

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Τεχνικές Αξιόπιστης Μετάδοσης
Πολυεκπομπής σε Κινητά Δίκτυα
Επικοινωνιών Τέταρτης Γενιάς

Νικόλαος Ε. Κανάκης

A.M.: 702

Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής

Επιβλέπων:

Χρήστος Ι. Μπούρας, Καθηγητής



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής
Πολυτεχνική Σχολή

Πάτρα

Δεκέμβριος 2014

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Τεχνικές Αξιόπιστης Μετάδοσης
Πολυεκπομπής σε Κινητά Δίκτυα
Επικοινωνιών Τέταρτης Γενιάς

Τριμελής Επιτροπή:

Ιωάννης Γαροφαλάκης,

Καθηγητής

Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης,

Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Επταμελής Επιτροπή:

Γεώργιος Αλεξίου, Καθηγητής

Εμμανουήλ Βαρβαρίγος,

Καθηγητής

Κυριάκος Βλάχος, Αναπληρωτής

Καθηγητής

Ιωάννης Γαροφαλάκης,

Καθηγητής

Σταύρος Κωτσόπουλος,

Καθηγητής

Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης,

Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής
Πολυτεχνική Σχολή

Περίληψη

Η επιτυχία των κινητών συστημάτων επικοινωνιών επόμενης γενιάς εξαρτάται από την ικανότητα παροχής νέων, ιδιαίτερα απαιτητικών πολυμεσικών υπηρεσιών, οι οποίες επιβάλλουν ισχυρούς περιορισμούς στη βασική αρχιτεκτονική μεταφοράς της πολυμεσικής πληροφορίας των κινητών δικτύων. Η παροχή αξιοπιστίας σε τέτοιου είδους υπηρεσίες αποτελεί ένα κρίσιμο τμήμα της αποδοτικής λειτουργίας τους. Η αντιμετώπιση των διαφορετικών απωλειών που παρουσιάζουν διαφορετικοί χρήστες, βασικό χαρακτηριστικό των ασύρματων καναλιών, μπορεί να αντιμετωπιστεί χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές, όπως τον ευρέως χρησιμοποιούμενο μηχανισμό του Forward Error Correction (FEC) στο επίπεδο εφαρμογών. Οι πολυμεσικές εφαρμογές αποτελούν πλέον μία τυπική απαίτηση για τις επόμενες γενιές κινητών δικτύων επικοινωνιών. Διάφορα πρότυπα πολυμεσικής μετάδοσης πολυεκπομπής (βλ. MBMS, DVB-T, κ.ά.) παρέχουν διάφορα μέσα αποδοτικής χρήσης των πόρων ενός δικτύου για την broadcast/multicast μετάδοση πολυμεσικού περιεχομένου σε πολλαπλούς χρήστες. Για την υποστήριξη της αποδοτικής διανομής multicast περιεχομένου, οι διάφορες συμπράξεις προτυποποίησης ανά τον κόσμο (π.χ. 3rd Generation Partnership Project (3GPP)) προτείνουν τη χρήση ενός μηχανισμού FEC στο επίπεδο εφαρμογών (AL-FEC) και πιο συγκεκριμένα την εφαρμογή της προτυποποιημένης οικογένειας συστηματικών, fountain κωδίκων FEC με την ονομασία Raptor (*Rapid Tornado*).

Το Forward Error Correction (FEC) είναι μία μέθοδος ελέγχου λαθών, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει ή και να αντικαταστήσει άλλες μεθόδους που προσφέρουν αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Το κύριο χαρακτηριστικό των σχημάτων FEC είναι πως ο αποστολέας προσθέτει πλεονάζουσα πληροφορία στη μεταδιδόμενη πληροφορία προς τον παραλήπτη. Η πληροφορία αυτή, επιτρέπει στον παραλήπτη να ανακατασκευάσει τα πηγαία δεδομένα. Τέτοια σχήματα αναπόφευκτα προσθέτουν ένα σταθερό επιπλέον φόρτο (overhead) στα μεταδιδόμενα δεδομένα και είναι υπολογιστικά κοστοβόρα. Παρόλα αυτά, σε περιβάλλοντα multicast μετάδοσης, η χρήση FEC τεχνικών προσφέρει πολύ ισχυρά κίνητρα. Η διαδικασία της κωδικοποίησης περιορίζει σημαντικά την επίδραση των διαφορετικών απωλειών δεδομένων που παρουσιάζουν διαφορετικοί παραλήπτες. Το γεγονός αυτό καθιστά τέτοια σχήματα προστασίας ικανά να λειτουργήσουν κλιμακωτά και ανεξάρτητα από το ρυθμό απώλειας δεδομένων που εμφανίζει ο κάθε χρήστης. Επιπρόσθετα, η μεγάλη μείωση, που επιφέρουν οι τεχνικές FEC, στο ρυθμό απώλειας δεδομένων περιορίζει δραματικά την ανάγκη αποστολής ανάδρασης στον αποστολέα για την επαναποστολή δεδομένων. Συνεπώς, τα

σχήματα FEC μπορούν πολύ απλά να προσφέρουν μία βασική απαίτηση των multicast κινητών υπηρεσιών, η οποία είναι η δυνατότητα κλιμάκωσης σε εφαρμογές με πολλούς χρήστες. Οι κώδικες Raptor, οι οποίοι αποτελούν μία επέκταση των κωδίκων LT, προτυποποιήθηκαν για να καλύψουν τις ανάγκες συμβατικών υλοποιήσεων σε διαφορετικά περιβάλλοντα για την αποδοτική μετάδοση δεδομένων πάνω σε ένα multicast δίκτυο. Οι κώδικες Raptor προσφέρουν βελτίωση στην αξιοπιστία της μετάδοσης, ενώ παράλληλα προσφέρουν ένα μεγάλο βαθμό ελευθερίας στην επιλογή των παραμέτρων της κωδικοποίησης. Οι κώδικες Raptor είναι κώδικες ροής (fountain codes), που σημαίνει πως μπορούν να παράγουν άμεσα όσα κωδικοποιημένα σύμβολα κι αν απαιτούνται από τα πηγαία σύμβολα ενός πηγαίου block δεδομένων. Ο αποκωδικοποιητής είναι ικανός να ανακτήσει το πηγαίο block από οποιοδήποτε σύνολο κωδικοποιημένων συμβόλων, ελαφρώς μεγαλύτερο ή ακόμα και ίσο σε πλήθος από το πλήθος των πηγαίων συμβόλων. Σαν αποτέλεσμα, οι κώδικες Raptor μπορούν να λειτουργούν πολύ κοντά σε έναν ιδανικό fountain κώδικα, ο οποίος θα απαιτούσε μόνο τον ακριβή αριθμό των πηγαίων συμβόλων για να ανακτήσει το μεταδιδόμενο αντικείμενο.

Παρά την εξαιρετική απόδοση του FEC κώδικα Raptor, έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στο πεδίο των κωδίκων εξάλειψης λαθών από την περίοδο που υιοθετήθηκε και πρόσφατα εμφανίστηκε στον οργανισμό Internet Engineering Task Force (IETF), η εξέλιξη των κωδίκων Raptor, με την ονομασία RaptorQ. Η νέα αυτή έκδοση παρουσιάζει ιδιαίτερα βελτιωμένες επιδόσεις σε σχέση με τους κώδικες Raptor και αναμένεται η άμεση υιοθέτησή τους από τις συμπράξεις προτυποποίησης.

Ένα βασικό σημείο τριβής στην εφαρμογή των μηχανισμών FEC είναι το ποσό του πλεονασμού που θα πρέπει να εισάγει μία multicast πηγή κατά τη FEC κωδικοποίηση ώστε να πετύχει την αποδοτική λειτουργία ενός τέτοιου μηχανισμού και να αντιμετωπίσει τις διαφορετικές απώλειες πακέτων που παρουσιάζουν διαφορετικοί χρήστες του δικτύου. Ιδιαίτερα σε multicast streaming περιβάλλοντα, όπου ο αποστολέας πρέπει να αποφασίσει εξ' αρχής το ποσό του πλεονασμού που θα μεταδώσει, έτσι ώστε κάθε FEC κωδικοποιημένο σύμβολο να μεταδίδεται μόνο μία φορά, η επιλογή της πλεονάζουσας πληροφορίας που θα εισαχθεί στη μετάδοση είναι μείζονος σημασίας.

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη και η διερεύνηση της απόδοσης του AL-FEC σε multicast υπηρεσίες κινητών δικτύων επικοινωνιών καθώς και η μελέτη ενός πλαισίου πάνω στο οποίο θα μπορούσε να βασιστεί η αποδοτική εφαρμογή του AL-FEC με την ανάπτυξη και αξιολόγηση τεχνικών για την επίτευξη αυτού. Σύμφωνα με τα

παραπάνω, αρχικά στην παρούσα εργασία μελετάμε την εφαρμογή των κωδίκων Raptor FEC στο επίπεδο εφαρμογών πάνω σε multicast υπηρεσίες κινητών δικτύων επικοινωνιών, διερευνώντας πως το ποσό της πλεονάζουσας πληροφορίας ποικίλλει σε πολλαπλούς χρήστες χρησιμοποιώντας ρεαλιστικά περιβάλλοντα προσομοίωσης. Επίσης, εξετάζουμε την απόδοση του Raptor AL-FEC για διάφορες διατάξεις του δικτύου ασύρματης πρόσβασης, διάφορα μοντέλα κινητικότητας των χρηστών καθώς και διάφορες παραμέτρους της FEC κωδικοποίησης. Πρόκειται ουσιαστικά για μία προσπάθεια να μελετηθεί αρχικά και να αξιολογηθεί η επίδραση της εφαρμογής του FEC πάνω σε multicast περιβάλλοντα ασύρματης μετάδοσης, όσον αφορά την επιτυχημένη μετάδοση ενός πολυμεσικού αντικειμένου καθώς και το πιο σημαντικό κομμάτι της αποδοτικής επιλογής των παραμέτρων εφαρμογής του μηχανισμού προστασίας FEC. Στη συνέχεια της εργασίας, προχωρούμε στη μελέτη και αξιολόγηση του νεότερου μέλους της οικογένειας των κωδίκων FEC Raptor με την ονομασία RaptorQ. Ερευνούμε και αξιολογούμε την επίδραση των εξαιρετικών ιδιοτήτων ανάκτησης που παρουσιάζει ο κώδικας RaptorQ και συγκρίνουμε τα οφέλη που εισάγει στην προστασία λαθών σε multicast περιβάλλοντα κινητών δικτύων επικοινωνιών σε σχέση με τον προκατόχο του κώδικα Raptor.

Στο επόμενο κομμάτι της παρούσας διδακτορικής διατριβής, το οποίο είναι αφιερωμένο στη διερεύνηση της αποδοτικής εφαρμογής του FEC, εισάγουμε ένα πλαίσιο υπό το οποίο μελετάται η απόδοση τεχνικών εφαρμογής του FEC και ερευνούμε διάφορους αλγορίθμους για την επίτευξη αυτού. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η σημαντικότερη παράμετρος που καθορίζει την αποδοτική εφαρμογή του FEC είναι η επιλογή της τιμής του πλεονασμού που θα εισαχθεί στα μεταδιδόμενα δεδομένα. Όμως η συγκεκριμένη επιλογή δεν μπορεί να θεωρηθεί τετριμμένη καθώς, ο αποστολέας θα πρέπει να αποφασίσει άμεσα για τον πλεονασμό που θα εισάγει κατά την κατασκευή των FEC blocks χωρίς να γνωρίζει την επιτυχή ή μη λήψη της μεταδιδόμενης πληροφορίας σε πολλαπλούς παραλήπτες υπό διαφορετικές συνθήκες λήψης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θεωρούμε πως το πρόβλημα της αποδοτικής επιλογής του FEC πλεονασμού μπορεί να αναχθεί σε ένα πρόβλημα άμεσης απόκρισης και να αντιμετωπιστεί με το σχεδιασμό αλγορίθμων άμεσης απόκρισης. Γενικά, οι αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπιστούν προβλήματα όπου η είσοδος δεν είναι εκ των προτέρων διαθέσιμη αλλά εμφανίζεται σταδιακά καθώς επίσης πολλές φορές ο αλγόριθμος πρέπει να λάβει μία απόφαση χωρίς να γνωρίζει την έκβαση ενός γεγονότος. Πολλές φορές, όταν η εφαρμογή ντετερμινιστικών λύσεων δεν μπορεί να βρει εφαρμογή η καλύτερη επιλογή είναι ένας πιθανοτικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εισάγουμε και ορίζουμε το πρόβλημα άμεσης απόκρισης που αναφέρεται στην αποδοτική εφαρμογή της AL-FEC προστασίας, το οποίο ονομάσαμε online AL-FEC policy problem και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και αξιολόγηση διαφόρων αλγορίθμων άμεσης απόκρισης. Επίσης, στα πλαίσια αυτού του προβλήματος άμεσης απόκρισης, έχουμε σχεδιάσει και προτείνει κάποιους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης από έναν απλοϊκό πιθανοτικό αλγόριθμο έως και πιο εξελιγμένους ντετερμινιστικούς αλγορίθμους.

Συνοψίζοντας, στην παρούσα διδακτορική διατριβή έχουμε μελετήσει την απόδοση των πιο διαδεδομένων AL-FEC κωδίκων, έχοντας εξάγει πολύτιμα συμπεράσματα για την αποδοτική εφαρμογή τους βάσει των ιδιοτήτων τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, έχουμε ορίσει και εισάγει ένα πλαίσιο αναγωγής της αποδοτικής εφαρμογής της προστασίας AL-FEC σε πρόβλημα άμεσης απόκρισης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση αλγορίθμων εφαρμογής του AL-FEC. Τέλος έχουμε σχεδιάσει και προτείνει πιθανοτικούς και ντετερμινιστικούς αλγορίθμους άμεσης απόκρισης, βασιζόμενοι στις ιδιότητες των FEC κωδίκων Raptor, από την αξιολόγηση των οποίων έχουμε εξάγει συμπεράσματα για τις δυνατότητες καθώς και τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει η εφαρμογή του FEC σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών.

Executive Summary

The success of next generation mobile communications systems strongly depends on the ability to provide new, particularly demanding multimedia services, which impose strong restrictions on the transmission architecture of multimedia information for mobile networks. Providing reliability in such services is crucial for the efficient operation. Different packet losses of different users, a key problem of multicast systems, can be tackled using appropriate techniques, such as the widely used mechanism of Forward Error Correction (FEC) at the application layer. The multimedia applications are now a typical requirement for the next generation of mobile communications networks. Various mobile multimedia multicast standards (eg. MBMS, DVB-T, etc) provide various means for the efficient utilization of resources for the multicast delivery of multimedia content to multiple users. To support the efficient delivery of multicast content, the various standardization projects (eg. 3rd Generation Partnership Project (3GPP)) propose the use of a FEC scheme at the application layer (AL-FEC) and more precisely the application of the standardized systematic fountain codes family, named Raptor (*Rapid Tornado*) codes.

Forward Error Correction (FEC) is an error control method, which can be used to support or replace other common methods providing reliability control in data transmission. The main characteristic of FEC is that the sender introduces redundant information to the transmitted data. This information allows the receiver to reconstruct the source data. Such schemes inevitably add a constant additional overhead in the transmitted data and is computationally costly. However, in multicast environments the use of FEC techniques has a lot of advantages. The encoding process significantly reduces the effect of different data losses of different recipients. This makes such protection schemes scalable and able to function independently of the packet losses of each individual recipient. Additionally, the large reductions on the data losses on the application layer dramatically reduces the need to send feedback to the sender for data retransmission. Therefore, FEC is able to provide a basic requirement of mobile multicast services, i.e. scalability of service delivery with respect to the amount of multicast users. Raptor codes, an extension of the LT codes, were standardized to meet the needs of the efficient data transmission on multicast environments for conventional services over different transmission environments. Raptor codes provide improvements in reliability transmission, while at the same time they provide scalable selection on the encoding parameters. Raptor codes are fountain codes, meaning that they can produce on the fly as many encoding symbols as required from the source symbols of a FEC source block. The FEC decoder is able to recover the source block from any set of encoding symbols slightly more from the number of source symbols. As a consequence, Raptor codes can operate very close to an ideal fountain code, which would require only the exact number of source symbols to recover the transmitted object.

Despite the excellent performance of Raptor code, there has been significant progress in the field of erasures codes since the Raptor code was adopted and recently Internet Engineering Task Force (IETF) introduced an evolved Raptor code, named RaptorQ. This new variation provides improved performance compared to existing Raptor code and the immediate adoption from mobile multicast standards is expected.

A key point on the application of FEC schemes is the amount of the required redundancy a multicast source should introduce in the FEC encoding in order to achieve the efficient application of such a mechanism and, at the same time to address the different packet loss conditions of each individual network user. Particularly in multicast streaming environments where the sender has to decide the amount of redundancy will introduce, so as each FEC encoding symbol is transmitted only once, the redundancy that has to be introduced in the transmission is of major importance.

Persuasion of this dissertation is to study and investigate the performance of AL-FEC in mobile multicast services and the development of a framework under which the efficient application of AL-FEC protection can be realized. Based on this, at first we study the application of Raptor FEC codes at the application layer of multicast services over mobile cellular networks, investigating how the amount of redundancy varies on multiple mobile users utilizing a realistic simulation environment. Furthermore, we examine the performance of Raptor AL-FEC codes for various transmission parameters, user mobility models and FEC encoding parameters. Thereafter, we proceed to a study and evaluation of the newest member of the Raptor codes family named RaptorQ. We investigate the impacts of the enhanced recovery properties of the new code and we compare the advantages on error protection the RaptorQ FEC provides with respect its predecessor Raptor FEC code.

In the next part of this dissertation, which is dedicated to the efficient application of AL-FEC protection, we introduce a framework under which we study the performance of AL-FEC mechanisms investigating various algorithms. As we have already mentioned the most important parameter that determines the efficient application of FEC protection is the amount of redundancy that will be introduced in the transmitted data. However, this is not a trivial issue since, the sender has to decide on the fly for the redundancy that will introduce during the construction of the AL-FEC blocks without having any prior knowledge on the reception outcome of the transmitted information to multiple recipients.

Based on this, we consider that the problem of the efficient selection of the AL-FEC redundancy can be reduced to an online problem which can be addressed by online algorithms. In general, online algorithms are used to confront problems where the input of the algorithm is not available in advance. subsequently, online algorithms have to generate output without knowledge of the entire input since input, information arrives in the future and is not accessible at present. In some problems, where the application

of deterministic solutions lacks of applicability, a randomized online algorithm is the simplest available algorithm and some times the most efficient solution.

In the present work we introduce and define an online problem on the efficient application of AL-FEC protection, named online AL-FEC policy problem and can be used to design and evaluate various randomized and deterministic online algorithms. Also for this online problem, we have designed and evaluate a variety of randomized and deterministic online algorithms.

Concluding, in this dissertation we studied the performance of the most popular AL-FEC codes, providing valuable results for their efficient application based on their properties. According to these results, we have introduced an online framework for the efficient application of AL-FEC codes which can be used for the design and evaluation of online algorithms. Finally we have proposed randomized and deterministic online algorithms, based on the properties of the Raptor FEC codes, and we have drawn several conclusions on the advantages that the efficient application of AL-FEC protection can introduce to mobile multicast networks.

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί το επιστέγασμα των σπουδών μου στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υπολογιστών» του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής (ΤΜΗΥΠ) του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο τίτλος της διδακτορικής διατριβής είναι «Τεχνικές Αξιόπιστης Μετάδοσης Πολυεκπομπής σε Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών Τέταρτης Γενιάς».

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όσους με βοήθησαν, με συμβούλευσαν και μου συμπαραστάθηκαν όλο αυτό το διάστημα. Ο Καθηγητής μου κ. Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής του ΤΜΗΥΠ του Πανεπιστημίου Πατρών, υπήρξε ο σύμβουλος και δάσκαλός μου σε όλη τη διάρκεια ολοκλήρωσης των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών μου σπουδών. Θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για την καθοδήγηση και την επιμονή του για συστηματική δουλειά.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής: τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ, κ. Ιωάννη Γαροφαλάκη και τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Κωνσταντίνο Μπερμερίδη, εξαιρετικούς καθηγητές με βαρύνουσα άποψη και κύρος, για την καθοδήγησή τους και την υποστήριξή τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τα μέλη της επταμελούς επιτροπής για την ουσιαστική συνδρομή τους στην ολοκλήρωση αυτής της διδακτορικής διατριβής: τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Γεώργιο Αλεξίου, τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Εμμανουήλ Βαρβαρίγο, τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Κυριάκο Βλάχο και τον Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών κ. Σταύρο Κωτσόπουλο.

Επιπλέον, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τους Δρ. Βασίλειο Κόκκινο και Δρ. Ανδρέα Παπαζώη, άριστους επιστήμονες με πλούσια πνευματικά προσόντα και σπουδαίο ήθος, οι οποίοι με τις πολύτιμες και ουσιαστικές τους γνώσεις και συμβουλές με καθοδήγησαν και με βοήθησαν σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Κλείνοντας, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Ευθύμιο και Ελένη, στην αδερφή μου, Μαρία καθώς και στη σύντροφο της ζωής μου, Στέλλα, για τη συμβολή και τη στήριξή τους σε αυτή την προσπάθεια αλλά και για όλα όσα έχουν κάνει για εμένα.

Πάτρα, Δεκέμβριος 2014

Νικόλαος Ε. Κανάκης

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Executive Summary	ix
Πρόλογος	xiii
Περιεχόμενα	xiv
Λίστα Εικόνων	xix
Λίστα Πινάκων	xxiii
Ακρωνύμια	xxv
1 Εισαγωγή	1
2 Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών	5
2.1 Ιστορικά Στοιχεία	5
2.2 Πρώτης Γενιάς (1G) Κυψελωτά Συστήματα	6
2.3 Δεύτερης Γενιάς (2G) Κυψελωτά Συστήματα	7
2.4 Τρίτης Γενιάς (3G) Κυψελωτά Συστήματα	9
2.5 Τέταρτης Γενιάς (4G) Κυψελωτά Συστήματα	12
2.5.1 Απαιτήσεις Απόδοσης	15
2.5.2 Βασικές Τεχνολογίες	19
2.5.3 Η Αρχιτεκτονική του Δικτύου	24
2.5.3.1 Επισκόπηση της Αρχιτεκτονικής	25
2.5.3.2 Το Δίκτυο Κορμού	26
2.5.3.3 Το Δίκτυο Πρόσβασης	27
2.5.4 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων	28
2.5.4.1 User Plane	29
2.5.4.2 Control Plane	29
2.6 Πέμπτης Γενιάς (5G) Κυψελωτά Συστήματα	29
2.7 Υπηρεσία MBMS	31
2.7.1 Τα Λειτουργικά Επίπεδα της Υπηρεσίας MBMS	33
2.7.2 Οι Λειτουργικές Οντότητες της Αρχιτεκτονικής MBMS	34
2.7.2.1 Content Provider/Multicast Broadcast Source	34

2.7.2.2	Broadcast-Multicast Service Centre (BM-SC)	35
2.7.2.3	MBMS Gateway (GW)	35
2.7.2.4	Mobility Management Entity (MME)	36
2.7.2.5	eUTRAN	37
2.7.2.6	User Equipment (UE)	37
2.7.3	Παροχή της MBMS Υπηρεσίας	37
2.7.3.1	Multicast Λειτουργία	37
2.7.3.2	Broadcast Λειτουργία	40
2.7.4	Η Στοιβά Πρωτοκόλλων της Υπηρεσίας MBMS	42
2.7.5	Μέθοδοι Παράδοσης Δεδομένων	42
2.7.5.1	Η Μέθοδος Download	44
2.7.5.2	Η Μέθοδος Streaming	46
2.7.6	Συμπληρωματικές Λειτουργίες των Μεθόδων Παράδοσης	48
2.7.6.1	Λειτουργία Επισκευής Αρχείου	48
2.7.6.2	Λειτουργία Αναφοράς Λήψης	49
3	Forward Error Correction	51
3.1	Εισαγωγικά Στοιχεία	52
3.2	Εφαρμογή των FEC κωδίκων	55
3.3	Κώδικες FEC	56
3.3.1	Απλοί Κώδικες	56
3.3.2	Μικροί Block FEC Κώδικες	58
3.3.3	Μεγάλοι Block FEC Κώδικες	61
3.3.4	Επεκτάσιμοι FEC Κώδικες	61
3.3.5	Θέματα Ασφάλειας	63
3.4	Οι Κώδικες Raptor	64
3.4.1	Fountain Κώδικες	65
3.4.2	LT Κώδικες	66
3.4.3	Μη Συστηματικοί Κώδικες Raptor	68
3.4.4	Ο Συστηματικός Προτυποποιημένος Κώδικας Raptor	71
3.4.4.1	Η Απόδοση του Προτυποποιημένου Κώδικα Raptor	72
3.4.5	Ο Κώδικας RaptorQ	76
3.4.5.1	Μεγαλύτερου Μήκους Αλφάβητο	77
3.4.5.2	Permanent Inactivation	78
3.4.5.3	Η Απόδοση του Κώδικα RaptorQ	79
4	Αλγόριθμοι Άμεσης Απόκρισης	85
4.1	Εισαγωγικά Στοιχεία	85
4.2	Ανταγωνιστική Ανάλυση	86
4.2.1	Διευκρινίσεις της Ανταγωνιστικής Ανάλυσης	88
4.3	Βασικά Προβλήματα Άμεσης Απόκρισης	88
4.3.1	Το πρόβλημα της Σελιδοποίησης	89
4.3.2	Το πρόβλημα k-server	90
4.3.3	Το πρόβλημα της Χρονοδρομολόγησης και Καταμερισμού Φόρτου	90
4.3.4	Το πρόβλημα του Generalized caching	91
4.3.5	Το πρόβλημα Διατήρησης TCP Συνδέσεων	92
4.3.6	Το πρόβλημα Διαχείρισης Buffers σε Δίκτυο	93

5	Ανασκόπηση Ερευνητικής Περιοχής	95
5.1	Περιβάλλοντα Προσομοίωσης Κυψελωτών Δικτύων Επικοινωνιών	96
5.1.1	Προσομοιωτής SA4	96
5.1.2	Προσομοιωτής E.U.R.A.N.E	99
5.1.3	Προσομοιωτής LTE Link Level	100
5.1.4	Προσομοιωτής LTE System Level	101
5.1.5	Προσομοιωτής SimuLTE	101
5.1.6	Προσομοιωτής LTE-Sim	102
5.2	AL-FEC σε Multicast Υπηρεσίες	103
5.3	Αλγόριθμοι Άμεσης Απόκρισης σε Προβλήματα των Κινητών Δικτύων Επικοινωνιών	108
6	Περιβάλλον Προσομοίωσης	111
6.1	Μηχανισμός Προσομοίωσης	111
6.2	Διαδικασία Προσομοίωσης	115
6.3	Αξιολόγηση της Υπηρεσίας MBMS	119
6.3.1	Ρυθμίσεις Προσομοίωσης	119
6.3.2	Συχνοτικό Εύρος Λειτουργίας	120
6.3.3	Πληθυσμός Χρηστών	122
6.3.4	Διάταξη Ασύρματου Δικτύου Πρόσβασης	123
7	AL-FEC Κώδικες Raptor	125
7.1	Αξιολόγηση του AL-FEC	125
7.1.1	Πλήθος Χρηστών	126
7.1.2	Εύρος Κυψέλης	127
7.1.3	Ικανοποίηση Χρηστών	128
7.2	Αξιολόγηση των Κωδίκων Raptor	135
7.2.1	Θεωρητική Συγκριτική Αξιολόγηση	137
7.2.2	Service Coverage	140
7.2.3	Επαναποστολή Πακέτων	143
7.2.4	Tune-in Delay	144
7.2.5	Time Utilization	145
8	Online AL-FEC Policy Πρόβλημα	149
8.1	Το Πρόβλημα Άμεσης Απόκρισης	149
8.2	Το AL-FEC Policy Πρόβλημα	151
8.2.1	Ο Offline Βέλτιστος Αλγόριθμος	153
8.3	Αλγόριθμοι Άμεσης Απόκρισης	154
8.3.1	Πιθανοτικός Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης	155
8.3.1.1	Ο Λόγος Απόδοσης του Πιθανοτικού Αλγορίθμου	156
8.3.1.2	Αξιολόγηση της Απόδοσης του Πιθανοτικού Αλγορίθμου	157
8.3.1.2.1	Ανακτηθέντα AL-FEC Πηγαία Blocks	157
8.3.1.2.2	Συνολικό Πλήθος Μεταδοθέντων Πακέτων	160
8.3.1.2.3	Πιθανότητα Αποτυχίας της AL-FEC Αποκωδικοποίησης	161
8.3.2	Weighted Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης	162
8.3.2.1	Ο Λόγος Απόδοσης του Weighted Αλγορίθμου	163
8.3.2.2	Αξιολόγηση της Απόδοσης του Weighted Αλγορίθμου	164

8.3.2.2.1	AL-FEC Transmission Overhead	164
8.3.2.2.2	Ανακτηθέντα AL-FEC Blocks	165
8.3.2.2.3	Μείωση στο Tune-in Delay	167
8.3.3	Προσαρμοστικός Weighted Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης	168
8.3.3.1	Ο Λόγος Απόδοσης του Προσαρμοστικού Weighted Αλ- γορίθμου	171
8.3.3.2	Αξιολόγηση της Απόδοσης του Προσαρμοστικού Weighted Αλγορίθμου	171
8.3.3.2.1	Σύγκλιση του Αλγορίθμου	171
8.3.3.2.2	AL-FEC Transmission Overhead	173
8.3.3.2.3	Κάλυψη Multicast Χρηστών	175
9	Συμπεράσματα	177
10	Μελλοντικές Επεκτάσεις	183
	Βιβλιογραφία	187
	Ευρετήριο	199

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Η Αρχιτεκτονική του Δικτύου GSM	8
2.2	Οι Προτάσεις κάθε SDO για τη Τεχνολογία Ασύρματης Πρόσβασης προς τον ITU-R	12
2.3	Το Χρονοδιάγραμμα Ανάπτυξης του IMT-Advanced και του LTE-Advanced	14
2.4	Η Διαχείριση στο Πεδίο της Συχνότητας των Σχημάτων Πολλαπλής Πρόσβασης	19
2.5	Τα 3 Βασικά Οφέλη των Πολλαπλών Κεραίων: (α) Κέρδος Ποικιλομορφίας, (β) Κέρδος Διάταξης, (γ) Κέρδος Χωρικής πολυπλεξίας	21
2.6	Σύγκριση MIMO χωρικής πολυπλεξίας με την τεχνική CoMP	22
2.7	Ένα τυπικό παράδειγμα relaying	23
2.8	Η Αρχιτεκτονική του Δικτύου EPS	25
2.9	Λειτουργικός Διαχωρισμός μεταξύ του eUTRAN και του EPC	26
2.10	Η Αρχιτεκτονική του eUTRAN	27
2.11	Η User Plane Στοιβά Πρωτοκόλλων	28
2.12	Η Control Plane Στοιβά Πρωτοκόλλων	30
2.13	Προκλήσεις των πέμπτης γενιάς συστημάτων	30
2.14	Οι βασικοί άξονες απόδοσης των πέμπτης γενιάς συστημάτων	31
2.15	Τα 3 Λειτουργικά Επίπεδα της Υπηρεσίας MBMS	33
2.16	Η Αρχιτεκτονική του EPS για την υπηρεσία MBMS	34
2.17	Οι Λειτουργίες του BM-SC	36
2.18	Οι φάσεις Παροχής μίας MBMS Multicast Υπηρεσίας	38
2.19	Παράδειγμα Χρονικής Εξέλιξης μίας Multicast Συνόδου	40
2.20	Οι Φάσεις Παροχής μίας MBMS Broadcast Υπηρεσίας	41
2.21	Παράδειγμα Χρονικής Εξέλιξης μίας Broadcast Συνόδου	43
2.22	Η Στοιβά Πρωτοκόλλων των MBMS Υπηρεσιών	43
2.23	Η Δομή ενός FLUTE Block	44
3.1	Ένας FEC Block Κωδικοποιητής	59
3.2	Παράδειγμα ενός Κώδικα LT	68
3.3	Παράδειγμα ενός Κώδικα Raptor	69
3.4	Παράδειγμα ενός Συστηματικού Κώδικα Raptor	71
3.5	Πιθανότητα Αποτυχίας vs. Overhead Μετάδοσης Κώδικα Raptor	74
3.6	Πιθανότητα Αποτυχίας vs. Overhead Λήψης Κώδικα Raptor	75
3.7	Βελτίωση Πιθανότητας Αποτυχίας με τη χρήση Μεγαλύτερων Αλφάβητων	78
3.8	Παράδειγμα Κωδικοποίησης της Τεχνικής permanent inactivation	79
3.9	Βελτίωση του Κώδικα RaptorQ στο Overhead Λήψης	81
3.10	Βελτίωση του Κώδικα RaptorQ ως προς το Μέγεθος του Μεταδιδόμενου Αντικειμένου	81

3.11	Απαιτούμενη Μνήμη Λειτουργίας του Κώδικα RaptorQ	83
5.1	Η Αρχιτεκτονική του Προσομοιωτή SA4	97
5.2	Παράδειγμα Εξόδου του Προσομοιωτή SA4	99
5.3	Η Αρχιτεκτονική του Προσομοιωτή LTE Link Level	100
5.4	Η Αρχιτεκτονική του Προσομοιωτή SimuLTE	102
6.1	Τοπολογίες του Περιβάλλοντος Προσομοίωσης	112
6.2	Στοιβά Πρωτοκόλλων του Περιβάλλοντος Προσομοίωσης	114
6.3	Αρχιτεκτονική του Μηχανισμού Προσομοίωσης	116
6.4	Στοιβά Πρωτοκόλλων του Μηχανισμού Προσομοίωσης	117
6.5	Παράδειγμα Εξόδου του Προσομοιωτή	118
6.6	Ρυθμός Απώλειας Πακέτων @ 5 MHz	121
6.7	Ρυθμός Απώλειας Πακέτων @ 10 MHz	122
6.8	Ρυθμός Απώλειας Πακέτων vs. Πληθυσμού Χρηστών	123
6.9	Ρυθμός Απώλειας Πακέτων vs. Μέγεθος Κυψέλης	124
7.1	Transmission Overhead vs. Πλήθους Χρηστών	127
7.2	Transmission Overhead vs. Εύρους Κυψέλης	128
7.3	Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών - Μοντέλο Κίνησης Πεζών	129
7.4	Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών - Μοντέλο Κίνησης Οχημάτων	129
7.5	Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 5 MHz	131
7.6	Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 10 MHz	131
7.7	Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 20 MHz	132
7.8	Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 128 kbps	133
7.9	Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 440 kbps	133
7.10	Πιθανότητα Αποτυχίας FEC Αποκωδικοποίησης vs. Reception Overhead	138
7.11	Transmission Overhead vs. Ρυθμού Απώλειας Πακέτων για Διαφορετικές Τιμές Μεγέθους Δεδομένων	139
7.12	Service Coverage vs. Transmission Overhead για Μοντέλο Κίνησης Πεζών	141
7.13	Service Coverage vs. Transmission Overhead για Μοντέλο Κίνησης Οχη- μάτων	141
7.14	Επαναποσταλθέντα Πακέτα vs. Transmission Overhead	143
7.15	Tune-in Delay vs. Transmission Overhead	145
7.16	Παράγοντας Time Utilization vs. Μήκους FEC Block	146
8.1	Συνολικός Αριθμός Ανακτηθέντων FEC Blocks vs. Ρυθμού Απώλειας Πα- κέτων	158
8.2	Μέσος Αριθμός Ανακτηθέντων FEC Blocks ανά Χρήστη vs. Ρυθμού Α- πώλειας Πακέτων	159
8.3	Μεταδιδόμενα Σύμβολα vs. Ρυθμού Απώλειας Πακέτων	160
8.4	Πιθανότητα Αποτυχίας AL-FEC Αποκωδικοποίησης vs. Μήκους Πηγαίου Block	162
8.5	AL-FEC Transmission Overhead vs. Μήκους Πηγαίου Block	165
8.6	Ανακτηθέντα AL-FEC Blocks vs. Μήκους Πηγαίου Block	166
8.7	Tune-in Delay vs. Μήκους Πηγαίου Block	168

8.8	Πλεονάζοντα Σύμβολα vs. Γύρων Μετάδοσης @ PLR: 5%	172
8.9	Πλεονάζοντα Σύμβολα vs. Γύρων Μετάδοσης @ PLR: 15%	172
8.10	AL-FEC Transmission Overhead vs. Γύρων Μετάδοσης	174
8.11	Κάλυψη Χρηστών vs. Γύρων Μετάδοσης	175

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Απαιτήσεις Απόδοσης Downlink των 4G Συστημάτων	16
2.2	Απαιτήσεις Απόδοσης Uplink των 4G Συστημάτων	17
2.3	Απαιτήσεις Απόδοσης Συστήματος των 4G Συστημάτων	18
2.4	Βασικές Απαιτήσεις Απόδοσης των 5G Συστημάτων	32
3.1	Σύγκριση Παραμέτρων Εφαρμογής Raptor και RaptorQ	80
3.2	Σύγκριση Ρυθμού Αποκωδικοποίησης Raptor και RaptorQ	82
6.1	Μοντέλα Καναλιών του Περιβάλλοντος Προσομοίωσης	115
6.2	Ρυθμίσεις Προσομοίωσης για την Αξιολόγηση της Υπηρεσίας MBMS	120
7.1	Η Επίδραση του Μήκους FEC Block στο Απαιτούμενο Transmission Overhead	134
7.2	Ρυθμίσεις Προσομοίωσης για την Αξιολόγηση των κωδίκων Raptor	136
8.1	Παράδειγμα Απώλειας Πακέτων σε Multicast Χρήστες	153

Ακρωνύμια

1G	F irst G eneration
2G	S econd G eneration
3G	T hird G eneration
4G	F ourth G eneration
5G	F ifth G eneration
3GPP	T hird G eneration P artnership P roject
ALC	A synchronous L ayered C oding
AL-FEC	A pplication L ayer F EC
AMC	A daptive M odulation and C oding
AMR	A daptive M ulti- R ate
AMPS	A dvanced M obile P hone S ervice
ARIB	A ssociation of R adio I ndustry B oard
ARQ	A utomatic R epeat request
AS	A ccess S tratum
AVC	A dvanced V ideo C oding
AWGN	A Additive W hite G aussian N oise
BLER	B lock E rror R ate
BM-SC	B roadcast/ M ulticast S ervice C enter

CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Check
DF	Digital Fountain
DFT-S-OFDM	Discrete Fourier Transform-spread-OFDM
DIMS	Dynamic and Interactive Multimedia Scenes
D-AMPS	Digital AMPS
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
eMBMS	Evolved MBMS
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ESI	Encoding Symbol ID
EURANE	Enhanced UMTS Radio Access Network Extensions
eUTRAN	Evolved UTRAN
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EURANE	Enhanced UMTS Radio Access Network Extensions
FDD	Frequency Division Duplex
FDT	File Description Table
FEC	Forward Error Correction
FIFO	First In First Out
FLUTE	File Delivery over Unidirectional Transport
FTP	File Transfer Protocol
FDMA	Frequency Division Multiple Access

GERAN	GSM/EDGE Radio Access Network
GF	Galois Field
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Services
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunnelling Protocol
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSCSD	High-Speed Circuit-Switched Data
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
HTTP	Hyper Text Transform Protocol
IMT	International Mobile Telecommunications
IMTS	International Mobile Telephony System
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU-Radiocommunication
Kbps	Kilo bits per second
LCT	Layered Coding Transport
LRU	Least Recently Used
LT	Luby Transform
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE Advanced

MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
MBMS-GW	MBMS Gateway
Mbps	Mega bits per second
MBSFN	Multicast/Broadcast Single Frequency Network
MCE	Multi-cell/multicast Coordination Entity
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input-Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
MTBF	Mean Time Between Failures
MTS	Mobile Telephone System
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NIC	Network Interface Card
NMT	Nordic Mobile Telephone
ns-2	Network Simulator 2
ns-3	Network Simulator 3
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OHG	Operators Harmonization Group
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PDU	Packet Data Unit
PHY-FEC	Physical Layer Forward Error Correction

PLR	P acket L oss R ate
PSS	P acket-switched S treaming S ervice
PTM	P oint-to- M ultipoint
PTP	P oint-to- P oint
P-GW	P DN Gateway
QoE	Q uality of E xperience
QoS	Q uality of S ervice
RAN	R adio A ccess N etwork
Raptor	R apid T ornado
RATs	R adio A ccess T echnologies
RIT	R adio I nterface T echnology
RLC	R adio L ink C ontrol
RNC	R adio N etwork C ontroller
ROHC	R obust H eaders C ompression
RRC	R adio R esource C ontrol
RS	R eed S olomon
RTCP	R TCP C ontrol P rotocol
RTP	R eal-time T ransport P rotocol
SAE	S ystem A rchitecture E volution
SBL	S ource B lock L ength
SBN	S ource B lock N umber
SC-FDMA	S ingle C arrier F requency D ivision M ultiple A ccess
SDO	S tandards D eveloping O rganization
SDP	S ession D escription P rotocol
SDU	S ervice D ata U nit

SFN	S ingle F requency N etwork
S-GW	S erving G ateway
SGSN	S erving GPRS S upport N ode
SINR	S ignal-to- I nterference-plus- N oise R atio
SRTP	S ecure RTP
SVC	S calable V ideo C oding
TCP	T ransport C ontrol P rotocol
TDD	T ime D ivision D uplex
TDMA	T ime D ivision M ultiple A ccess
TD-CDMA	T ime D ivision C ode D ivision M ultiple A ccess
TD-SCDMA	T ime D ivision S ynchronous C ode D ivision M ultiple A ccess
TIA	T elecommunications I ndustry A ssociation
TSG	T echnical S pecification G roup
TTA	T elecommunication T echnology A ssociation
TTI	T ransmission T ime I nterval
UDP	U ser D atagram P rotocol
UE	U ser E quipment
UEP	U nequal E rror P rotection
UM	U nacknowledged M ode
UMTS	U niversal M obile T elecommunications S ystem
UTRA	U niversal T errestrial R adio A ccess
UTRAN	UTRA N etwork
VoIP	V oice o ver I P
WCDMA	W ideband C DMA
WG	W orking G roup

WiMAX **W**orldwide **I**nteroperability for **M**icrowave **A**ccess

XOR Exclusive **OR**

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Το πεδίο των ασύρματων δικτύων έχει γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και έχει αναδειχθεί σε μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες βιομηχανίες παγκοσμίως. Τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, με ηγέτη τα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών, έχουν πλέον ευρέως διαδεδομένη χρήση και έχουν γίνει απαραίτητο εργαλείο στην καθημερινή ζωή δισεκατομμυρίων ανθρώπων παγκοσμίως. Η διεύθυνση των ασύρματων δικτύων είναι τόσο διαδεδομένη στις μέρες μας, ώστε σύντομα αναμένεται να φθάσουμε στο σημείο όπου ο αριθμός των κινητών συνδρομητών θα είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των χρηστών ενσύρματων δικτύων και πλέον το πλήθος των καταγεγραμμένων κινητών συσκευών έχει ξεπεράσει τον παγκόσμιο πληθυσμό. Η άνθιση αυτή οφείλεται στα πλεονεκτήματα των ασύρματων τηλεπικοινωνιών που συνοψίζονται στα 3Ο: επικοινωνία Οπουδήποτε, Οποτεδήποτε, με Οποιοδήποτε.

Η τεχνολογία της multicast μετάδοσης που προσφέρουν πλέον πολλά πρότυπα ασύρματων δικτύων αναπτύχθηκε με σκοπό την αποδοτική διανομή πολυμεσικού περιεχομένου σε ένα μεγάλο πλήθος κινητών χρηστών. Η βασική ιδέα της υπηρεσίας είναι η χρήση multicast πρωτοκόλλων, αντί point-to-point ροών για κάθε χρήστη, με σκοπό την εξοικονόμηση πόρων του δικτύου. Παρά την εξαιρετική απόδοση στη χρήση των δικτυακών πόρων, οι multicast υπηρεσίες παρουσιάζουν ένα βασικό μειονέκτημα, καθώς η εφαρμογή μηχανισμών ανάδρασης από τον κάθε μεμονωμένο χρήστη είναι αδύνατον να εφαρμοστεί αποδοτικά σε τέτοια περιβάλλοντα, δυσκολεύοντας τη λειτουργία μηχανισμών ελέγχου λαθών. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχεται με την εφαρμογή μηχανισμών Forward Error Correction (FEC) στο επίπεδο εφαρμογών, με πολλά πρότυπα να προτείνουν τη χρήση των κωδίκων Raptor.

Βασικό πλεονέκτημα των μηχανισμών FEC, είναι η παροχή αξιόπιστης μετάδοσης έναντι σε απώλειες δεδομένων χωρίς την ανάγκη παροχής πληροφοριών ανάδρασης από τους παραλήπτες στον αποστολέα, καθώς ο μηχανισμός FEC προσθέτει πλεονάζουσα πληροφορία στα μεταδιδόμενα δεδομένα προσφέροντας την ικανότητα αντιμετώπισης χαμένων ή κατεστραμμένων πακέτων δεδομένων. Παρόλα αυτά η εφαρμογή του FEC έρχεται με το δικό της κόστος καθώς ο έλεγχος του πλεονασμού που θα πρέπει να εισαχθεί στη μετάδοση από τον αποστολέα ώστε να πετύχει ταυτόχρονα την αποδοτική εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου και την παροχή ικανοποιητικής προστασίας σε ένα μεγάλο μέρος των χρηστών που συμμετέχουν στη multicast μετάδοση δεν είναι κάτι το τετριμμένο. Η επιλογή του πλεονασμού αποτελεί το μεγαλύτερο σημείο τριβής κατά την εφαρμογή της προστασίας FEC.

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη και η διερεύνηση της απόδοσης του AL-FEC σε multicast υπηρεσίες κινητών δικτύων επικοινωνιών καθώς και η μελέτη ενός πλαισίου πάνω στο οποίο θα μπορούσε να βασιστεί η αποδοτική εφαρμογή του AL-FEC με την ανάπτυξη και αξιολόγηση τεχνικών για την επίτευξη αυτού. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αρχικά στην παρούσα εργασία μελετάμε την εφαρμογή των κωδίκων Raptor FEC στο επίπεδο εφαρμογών πάνω σε multicast υπηρεσίες κινητών δικτύων επικοινωνιών, διερευνώντας πως το ποσό της πλεονάζουσας πληροφορίας ποικίλλει σε πολλαπλούς χρήστες χρησιμοποιώντας ρεαλιστικά περιβάλλοντα προσομοίωσης. Επίσης, εξετάζουμε την απόδοση του Raptor AL-FEC για διάφορες διατάξεις του δικτύου ασύρματης πρόσβασης, διάφορα μοντέλα κινητικότητας των χρηστών καθώς και διάφορες παραμέτρους της FEC κωδικοποίησης. Πρόκειται ουσιαστικά για μία προσπάθεια να μελετηθεί αρχικά και να αξιολογηθεί η επίδραση της εφαρμογής του FEC πάνω σε multicast περιβάλλοντα ασύρματης μετάδοσης, όσον αφορά την επιτυχημένη μετάδοση ενός πολυμεσικού αντικειμένου καθώς και το πιο σημαντικό κομμάτι της αποδοτικής επιλογής των παραμέτρων εφαρμογής του μηχανισμού προστασίας FEC. Στη συνέχεια της εργασίας, προχωρούμε στη μελέτη και αξιολόγηση του νεότερου μέλους της οικογένειας των κωδίκων FEC Raptor με την ονομασία RaptorQ. Ερευνούμε και αξιολογούμε την επίδραση των εξαιρετικών ιδιοτήτων ανάκτησης που παρουσιάζει ο κώδικας RaptorQ και συγκρίνουμε τα οφέλη που εισάγει στην προστασία λαθών σε multicast περιβάλλοντα κινητών δικτύων επικοινωνιών σε σχέση με τον προκάτοχό του κώδικα Raptor.

Στο επόμενο κομμάτι της παρούσας διδακτορικής διατριβής, το οποίο είναι αφιερωμένο στη διερεύνηση της αποδοτικής εφαρμογής του FEC, εισάγουμε ένα πλαίσιο υπό το οποίο μελετάται η απόδοση τεχνικών εφαρμογής του FEC και ερευνούμε διάφορους αλγόριθμους για

την επίτευξη αυτού. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η σημαντικότερη παράμετρος που καθορίζει την αποδοτική εφαρμογή του FEC είναι η επιλογή της τιμής του πλεονασμού που θα εισαχθεί στα μεταδιδόμενα δεδομένα. Όμως η συγκεκριμένη επιλογή δεν μπορεί να θεωρηθεί τετριμμένη καθώς, ο αποστολέας θα πρέπει να αποφασίσει άμεσα για τον πλεονασμό που θα εισάγει κατά την κατασκευή των FEC blocks χωρίς να γνωρίζει την επιτυχή ή μη λήψη της μεταδιδόμενης πληροφορίας σε πολλαπλούς παραλήπτες υπό διαφορετικές συνθήκες λήψης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, θεωρούμε πως το πρόβλημα της αποδοτικής επιλογής του FEC πλεονασμού μπορεί να αναχθεί σε ένα πρόβλημα άμεσης απόκρισης και να αντιμετωπιστεί με το σχεδιασμό αλγορίθμων άμεσης απόκρισης. Γενικά, οι αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπιστούν προβλήματα όπου η είσοδος δεν είναι εκ των προτέρων διαθέσιμη αλλά εμφανίζεται σταδιακά καθώς επίσης πολλές φορές ο αλγόριθμος πρέπει να λάβει μία απόφαση χωρίς να γνωρίζει την έκβαση ενός γεγονότος. Πολλές φορές, όταν η εφαρμογή ντετερμινιστικών λύσεων δεν μπορεί να βρει εφαρμογή η καλύτερη επιλογή είναι ένας πιθανοτικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εισάγουμε και ορίζουμε το πρόβλημα άμεσης απόκρισης που αναφέρεται στην αποδοτική εφαρμογή της AL-FEC προστασίας, το οποίο ονομάσαμε online AL-FEC policy problem και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και αξιολόγηση διαφόρων αλγορίθμων άμεσης απόκρισης. Επίσης, στα πλαίσια αυτού του προβλήματος άμεσης απόκρισης, έχουμε σχεδιάσει και προτείνει κάποιους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης από έναν απλοϊκό πιθανοτικό αλγόριθμο έως και πιο εξελιγμένους ντετερμινιστικούς αλγορίθμους.

Η παρούσα εργασία δομείται σε κεφάλαια ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία εισαγωγική αναφορά στα συστήματα κινητών επικοινωνιών και στην εξέλιξή τους έως την πέμπτη γενιά των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών. Περιλαμβάνει μία αναλυτική περιγραφή των κυψελωτών δικτύων τέταρτης γενιάς, περιγράφοντας τα βασικά συστατικά και τεχνολογίες του. Επίσης, παρουσιάζεται η multicast υπηρεσία MBMS των κινητών δικτύων τέταρτης γενιάς.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μία εισαγωγή στις μεθόδους παροχής προστασίας ενάντια στις απώλειες δεδομένων κατά τη διαδικασία της μετάδοσης σε multicast περιβάλλοντα. Ακολούθως, περιγράφεται η μέθοδος προστασίας FEC, αναφέροντας την εξέλιξη των κωδίκων FEC, αναλύοντας τα διαθέσιμα είδη κωδίκων FEC και περιγράφοντας αναλυτικά τις αρχές λειτουργίας τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κώδικες Raptor FEC, περιγράφοντας τη λειτουργία τους και δίνοντας μία ανάλυση της απόδοσής τους.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζουμε την περιοχή των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης, περιγράφουμε τις βασικές αρχές των αλγορίθμων αυτών καθώς και της ανάλυσης της απόδοσής τους χρησιμοποιώντας την έννοια της ανταγωνιστικής ανάλυσης και τέλος παρουσιάζουμε συνοπτικά τα βασικότερα προβλήματα στα οποία έχουν βρει εφαρμογή οι αλγόριθμοι αυτοί.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται μία ανασκόπηση της ερευνητικής περιοχής που μελετά η παρούσα διδακτορική διατριβή. Περιγράφονται με λεπτομέρειες τα βασικότερα σημεία των ερευνητικών εργασιών που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας.

Το Κεφάλαιο 6 προσφέρει μία αναλυτική περιγραφή του περιβάλλοντος προσομοίωσης που αναπτύξαμε στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζουμε πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία αφορούν την αξιολόγηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς του μηχανισμού προστασίας AL-FEC πάνω σε multicast υπηρεσίες μετάδοσης των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών. Επιπλέον, παρουσιάζουμε ερευνητικά αποτελέσματα συγκρίνοντας το νεότερο μέλος της οικογένειας κωδίκων Raptor FEC, με την ονομασία RaptorQ, με τον προκάτοχό του κώδικα Raptor αναδεικνύοντας τις μεγάλες βελτιώσεις που έχει εισάγει το σχήμα FEC.

Στο Κεφάλαιο 8 εισάγουμε ένα νέο πλαίσιο ανάπτυξης και αξιολόγησης αλγορίθμων για την εφαρμογή της προστασίας AL-FEC σε multicast περιβάλλοντα μετάδοσης βασισμένο στους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης. Στοχεύουμε στην αποτελεσματική εφαρμογή του AL-FEC χρησιμοποιώντας τον νέο κώδικα RaptorQ πάνω σε multicast περιβάλλοντα παράδοσης υπό το πλαίσιο της ανταγωνιστικής ανάλυσης. Παρέχουμε ένα μοντέλο ανάλυσης της ανταγωνιστικότητας των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης για την εφαρμογή της AL-FEC προστασίας για κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Επίσης, προτείνουμε και αναλύουμε τρεις αλγορίθμους άμεσης απόκρισης, για το πρόβλημα άμεσης απόκρισης που ορίζουμε, χρησιμοποιώντας διάφορες παραμέτρους της FEC κωδικοποίησης καθώς και βάσει των περιορισμών των κινητών δικτύων multicast μετάδοσης.

Το Κεφάλαιο 9 παρουσιάζει τα συμπεράσματα τα οποία έχουν εξαχθεί κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Τέλος στο Κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται διάφορα ανοιχτά και νέα θέματα πάνω στον τομέα που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Κεφάλαιο 2

Κινητά Δίκτυα Επικοινωνιών

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εισαγωγική αναφορά στα συστήματα κινητών επικοινωνιών και στην εξέλιξή τους έως την πέμπτη γενιά των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών. Ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή του κυψελωτού κινητού συστήματος τέταρτης γενιάς, περιγράφοντας τα βασικά συστατικά και τεχνολογίες του. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται συνοπτικά η εξέλιξη των τέταρτης γενιάς δικτύων, τα κινητά συστήματα επικοινωνιών πέμπτης γενιάς. Τέλος, παρουσιάζουμε αναλυτικά την υπηρεσία broadcast/multicast μετάδοσης του 3GPP με την ονομασία MBMS.

2.1 Ιστορικά Στοιχεία

Η αρχή της ασύρματης μετάδοσης χρονολογείται βαθιά μέσα στην ιστορία της ανθρωπότητας. Ακόμα και στα αρχαία χρόνια ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε αρχέγονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, τα οποία διέπονταν από τις αρχές της ασύρματης μετάδοσης. Παρόλα αυτά είναι πιο εύλογο να θεωρήσουμε πως η αρχή των ασύρματων δικτύων όπως τα αντιλαμβανόμαστε σήμερα, έγινε με την πρώτη ασύρματη μετάδοση. Το γεγονός αυτό συνέβη το 1895, λίγα χρόνια μετά από ένα άλλο πολύ σημαντικό γεγονός: την ανακάλυψη του τηλεφώνου. Τη χρονιά αυτή ο Guglielmo Marconi έκανε την επίδειξη της πρώτης ασύρματης μετάδοσης σε απόσταση 18 μιλίων. Έξι χρόνια αργότερα, ο Marconi εξέπεμψε επιτυχώς ένα ασύρματο σήμα το οποίο διέσχισε τον Ατλαντικό Ωκεανό και το 1902 η πρώτη αμφίδρομη μετάδοση κατά μήκος του Ατλαντικού πραγματοποιήθηκε. Τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών πέμπτης γενιάς είναι ένα από τα τελευταία βήματα μίας συνεχώς εξελισσόμενης σειράς από κινητά

τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Για τα επίγεια τηλεπικοινωνιακά συστήματα η εξέλιξη αυτή ξεκίνησε το 1947 με την εμφάνιση και εξέλιξη της έννοιας της κυψέλης (cell) από τα φημισμένα εργαστήρια της Bell (Bell Labs) στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Η χρήση των κυψελών επέτρεψε τη σημαντική αύξηση της χωρητικότητας ενός κινητού τηλεπικοινωνιακού δικτύου, χωρίζοντας την περιοχή κάλυψης σε μικρές κυψέλες, διαθέτοντας η κάθε μία το δικό της σταθμό βάσης (base station), ο οποίος λειτουργεί στη δική του ξεχωριστή συχνότητα.

2.2 Πρώτης Γενιάς (1G) Κυψελωτά Συστήματα

Το πρώτο δημόσιο κινητό τηλεφωνικό σύστημα, γνωστό σαν Mobile Telephone System (MTS), παρουσιάστηκε το 1946. Παρότι θεωρήθηκε ένα μεγάλο τεχνολογικό άλμα της εποχής, το συγκεκριμένο σύστημα υπέφερε από αρκετούς σημαντικούς περιορισμούς. Χαρακτηριστικά του, οι πομποδέκτες ήταν υπερβολικά μεγάλοι και μπορούσαν να εγκατασταθούν πρακτικά μόνο σε οχήματα, η μη αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος και η χειροκίνητη μεταγωγή των κλήσεων. Τα συστήματα IMTS αποτελούν βελτίωση των MTS προσφέροντας περισσότερα διαθέσιμα κανάλια και αυτόματη μεταγωγή κλήσης.

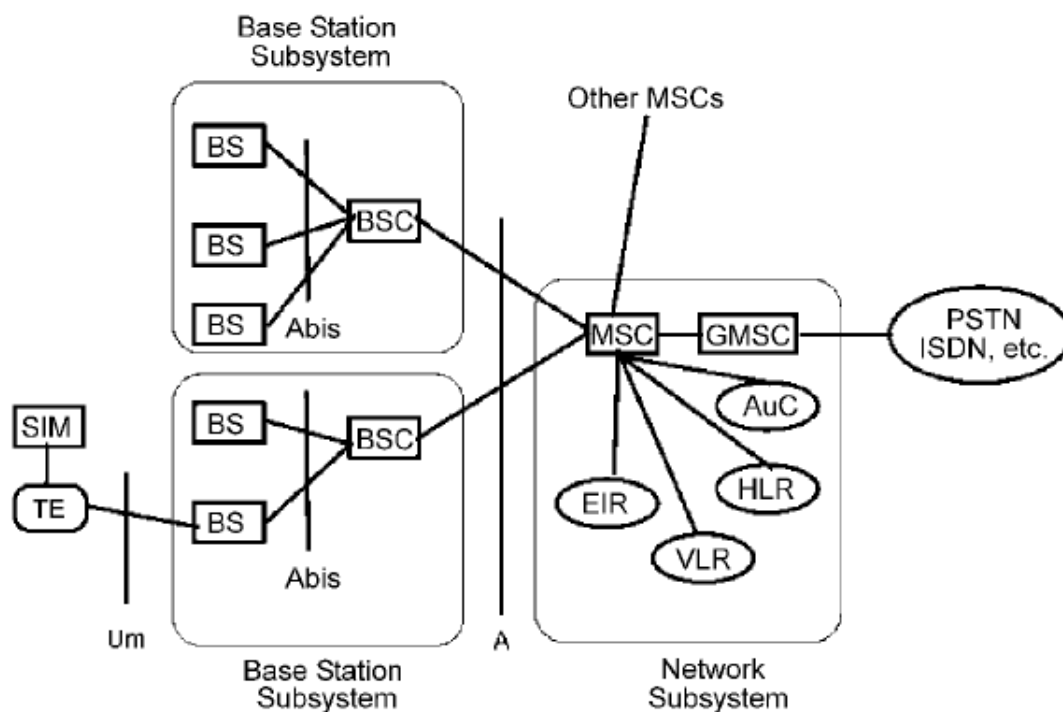
Παρόλα αυτά η εποχή της κυψελωτής τηλεφωνίας, όπως την κατανοούμε σήμερα, ξεκίνησε με την παρουσίαση της πρώτης γενιάς των κυψελωτών συστημάτων (1G συστήματα). Η βασική διαφορά μεταξύ των 1G συστημάτων και των MTS/IMTS ήταν η χρήση της έννοιας των κυψελών στα 1G, η οποία έφερε επανάσταση στην περιοχή της κινητής τηλεφωνίας. Η επανάσταση αυτή αιφνιδίασε πολλούς, ακόμα και την AT&T που υπολόγιζε πως μόλις ένα εκατομμύριο χρήστες κυψελωτής τηλεφωνίας θα υπάρχουν μέχρι τα τέλη του προηγούμενου αιώνα, σε σχέση με τους εκατοντάδες χιλιάδες εκατομμύρια που υπάρχουν σήμερα.

Η χρήση της κυψελωτής δομής βελτίωνε σημαντικά τη φασματική χρήση, παρόλα αυτά τα συστήματα 1G θεωρούνται πλέον τεχνολογικά πρωτόγονα. Εντούτοις, αυτό δεν αλλάζει το γεγονός πως ακόμα και σήμερα σε κάποιες περιοχές ακόμα χρησιμοποιούνται αναλογικά κυψελωτά τηλέφωνα. Ο λόγος για τον οποίο τα 1G συστήματα θεωρούνται ξεπερασμένα άπτεται στο γεγονός πως χρησιμοποιούν αναλογική σηματοδότηση για τη μετάδοση της κίνησης των χρηστών. Αυτό οδηγεί σε ένα πλήθος προβλημάτων. Η χρήση κρυπτογράφησης δεν είναι δυνατή, καθώς τα αναλογικά σήματα δεν επιτρέπουν τη χρήση αποδοτικών σχημάτων κρυπτογράφησης. Επίσης, η ποιότητα της κλήσης είναι υποδεέστερη σε σχέση με

των ψηφιακών συστημάτων, καθώς η αναλογική κίνηση υποβαθμίζεται ευκολότερα από το φαινόμενο της παρεμβολής και δεν επιτρέπει τη χρήση τεχνικών διόρθωσης λαθών. Τέλος, τα αναλογικά συστήματα προσφέρουν χαμηλή φασματική απόδοση, καθώς κάθε φέρουσα αφιερώνεται σε ένα χρήστη ανεξάρτητα από το εάν είναι ενεργός ή όχι (δλδ. ανενεργός κατά τη διάρκεια όμως μίας κλήσης). Συνολικά ένα μεγάλο πλήθος αναλογικών συστημάτων έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως [1], με πιο αντιπροσωπευτικά τα Advanced Mobile Phone System (AMPS) από τα εργαστήρια της Bell και το ευρωπαϊκό Nordic Mobile Telephony (NMT) [2].

2.3 Δεύτερης Γενιάς (2G) Κυψελωτά Συστήματα

Παρά τη μεγάλη εξάπλωση που γνώρισαν τα 1G κυψελωτά συστήματα, η τεχνολογική εξέλιξη με την ευρεία διάδοση των ψηφιακών κυκλωμάτων οδήγησε τη βιομηχανία να κινηθεί προς τη δεύτερη γενιά (2G), το διάδοχο των 1G συστημάτων. Τα 2G συστήματα αντιμετώπισαν πολλές από τις αδυναμίες των προκατόχων τους. Οι βελτιωμένες τους δυνατότητες προκύπτουν από το γεγονός πως, σε αντίθεση με τα 1G είναι πλήρως ψηφιακά συστήματα, προσφέροντας πλήθος πλεονεκτημάτων. Η ψηφιοποιημένη κίνηση μπορεί εύκολα να κρυπτογραφηθεί ώστε να προσφέρει ιδιωτικότητα και ασφάλεια. Στα ψηφιακά συστήματα είναι δυνατή η εφαρμογή ανίχνευσης λαθών και τεχνικών διόρθωσής τους. Κάνοντας χρήση τέτοιων τεχνικών ο παραλήπτης μπορεί να ανιχνεύσει και να διορθώσει λάθη στα μεταδιδόμενα bits, κάτι που ενισχύει την αξιόπιστη μετάδοση. Αυτό προφανώς οδηγεί στη λήψη σημάτων με ελάχιστη ή καθόλου παραμόρφωση, κάτι που μεταφράζεται σε καλύτερη ποιότητα κλήσης, υποστήριξη μετάδοσης δεδομένων σε υψηλότερες ταχύτητες και αποδοτικότερη φασματική χρήση, καθώς είναι απαραίτητες λιγότερες επαναποστολές κατεστραμμένων δεδομένων. Επιπλέον, τα ψηφιακά δεδομένα μπορούν να συμπιεστούν, γεγονός που αυξάνει την αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος και επιτρέπει στα 2G συστήματα να υποστηρίξουν περισσότερους χρήστες ανά σταθμό βάσης ανά MHz φάσματος σε σχέση με τα 1G. Τέλος στα ψηφιακά συστήματα κάθε φέρουσα συχνότητα διαμοιράζεται σε περισσότερους από ένα χρήστη, είτε χρησιμοποιώντας διαφορετικές χρονικές σχισμές είτε διαφορετικούς κώδικες ανά χρήστη. Δηλαδή οι σχισμές ή οι κώδικες ανατίθενται στους χρήστες μόνο όταν έχουν κίνηση να στείλουν. Η μετακίνηση από τα αναλογικά στα ψηφιακά συστήματα έγινε δυνατή χάρη στην ανάπτυξη τεχνικών για χαμηλού ρυθμού κωδικοποίηση φωνής και τη συνεχή εξέλιξη των ενσωματωμένων κυκλωμάτων στις κινητές συσκευές.



ΣΧΗΜΑ 2.1: Η Αρχιτεκτονική του Δικτύου GSM

Αντίθετα με τα 1G συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης στο πεδίο της συχνότητας (Frequency Division Multiple Access-FDMA) για το διαχωρισμό των χρηστών, τα 2G επιτρέπουν τη χρήση πολλαπλής πρόσβασης στο πεδίο του χρόνου (Time Division Multiple Access-TDMA) ή τη χρήση διαφορετικού κώδικα ανά χρήστη (Code Division Multiple Access-CDMA). Πολλά πρότυπα 2G συστημάτων έχουν αναπτυχθεί όπως τα D-AMPS, cdmaOne, GSM, IS-41, GPRS, HSCSD, cdmaTwo κ.ά., με πιο διαδεδομένο το GSM.

Η προέλευση του Global System for Mobile Communications (GSM) [3] μπορεί να βρεθεί στην Ευρώπη στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύχθηκε με βάση ορισμένα κριτήρια, όπως καλή ποιότητα κλήσης, χαμηλό κόστος τερματικών συσκευών και υποστήριξη επιπαλάμιον συσκευών, υποστήριξη διεθνούς περιαγωγής, φασματική αποδοτικότητα και συμβατότητα με την τεχνολογία ISDN. Παρότι το GSM αναπτύχθηκε στην Ευρώπη, γρήγορα υιοθετήθηκε από ένα μεγάλο πλήθος χωρών παγκοσμίως και συνολικά υπάρχουν 4 εκδόσεις του συστήματος, ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας. Η αρχιτεκτονική του δικτύου GSM αποτελείται από ένα σύνολο δικτυακών οντοτήτων και

μπορεί να χωριστεί σε 3 μέρη όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1, το υποσύστημα του κινητού σταθμού, το υποσύστημα του σταθμού βάσης και το υποσύστημα δικτύου.

Σημαντική εξέλιξη του συστήματος GSM αποτελεί το σύστημα General Packet Radio Service (GPRS) [4] το οποίο βασίζεται στις αρχές του GSM με κύρια διαφορά πως το GPRS, σε αντίθεση με το GSM που είναι ένα δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος (circuit-switched), είναι ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτου (packet-switched), εισάγοντας 2 νέες δικτυακές οντότητες στην αρχιτεκτονική του δικτύου GSM, το Serving GPRS Support Node (SGSN) και το Gateway GPRS Support Node (GGSN).

2.4 Τρίτης Γενιάς (3G) Κυψελωτά Συστήματα

Η μεγάλη επιτυχία της πρώτης και δεύτερης γενιάς των ασύρματων κυψελωτών συστημάτων αποδίδεται στην ανάγκη των χρηστών για υπηρεσίες φωνής. Για πάνω από μία δεκαετία τα 2G συστήματα ικανοποίησαν τις ανάγκες των χρηστών με κύρια απαίτηση τη μετάδοση φωνής. Αυτό οδήγησε σε 400 εκατομμύρια 2G κινητούς χρήστες, με τις τότε προβλέψεις να θέλουν 1.8 δισεκατομμύρια χρήστες το έτος 2010. Παρά τη μεγάλη επιτυχία και την αποδοχή της αγοράς, τα 2G συστήματα ήταν περιορισμένα όσον αφορά το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Ενώ κάτι τέτοιο δεν είναι περιοριστικός παράγοντας για την προσφερόμενη ποιότητα φωνής, καθιστούσε τα 2G πρακτικώς άχρηστα για την ικανοποίηση των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων για άλλες κινητές εφαρμογές. Ήδη αναμενόταν πως η συνεχώς αυξανόμενη δημοτικότητα των εφαρμογών πολυμέσων και των υπηρεσιών Διαδικτύου θα είχε σημαντικό αντίκτυπο στην παγκόσμια αγορά των κινητών δικτύων. Σύμφωνα με μελέτη της εποχής [30], το 2010 αναμενόταν πως το 60% της κίνησης των κινητών δικτύων θα αφορούσε πολυμεσικές εφαρμογές.

Τα 3G συστήματα είχαν στόχο να εκπληρώσουν τις ανάγκες μελλοντικών υπηρεσιών, προσφέροντας δυνατότητες παγκόσμιας κινητής πολυμεσικής επικοινωνίας σε μία αποδοτική βάση. Οι χρήστες, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική τους θέση θα μπορούσαν μέσω μόνο μίας συσκευής να απολαμβάνουν μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Η χρήση του όρου 3G συνήθως εμπεριέχει μία ασάφεια, καθώς τις περισσότερες φορές διαφορετικοί άνθρωποι εννοούν διαφορετικά πράγματα όταν τον χρησιμοποιούν. Αρχικά είχε οριστεί να χαρακτηρίζει οποιοδήποτε κινητό πρότυπο που προσέφερε απόδοση τουλάχιστον ίση με αυτή της τεχνολογίας ISDN (144 kbps). Τα 3G συστήματα προσέφεραν ρυθμό μετάδοσης τουλάχιστον 144 kbps

για πλήρη κινητικότητα σε όλες τις περιπτώσεις, 384 kbps για εφαρμογές περιορισμένης κινητικότητας σε μακρο- και μικρο-κυβελωτά περιβάλλοντα και 2 Mbps για εφαρμογές χαμηλής κινητικότητας. Οι ρυθμοί αυτοί ήταν αρκετοί για την υποστήριξη των τότε μελλοντικών πολυμεσικών εφαρμογών. Πρέπει να σημειωθεί πως ρυθμοί μετάδοσης ISDN είχαν επιτευχθεί και από κάποια 2.5G πρότυπα, όπως το GPRS και το IS-95B, μόνο όμως κάτω από ιδανικές συνθήκες του ασύρματου καναλιού και οι ρυθμοί αυτοί αναλογούσαν στις χαμηλότερες ταχύτητες των 3G. Τα βασικά χαρακτηριστικά των 3G συστημάτων είναι [31]:

1. Υποστήριξη συμμετρικής και ασύμμετρης κίνησης.
2. Υποστήριξη υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου και μεταγωγής κυκλώματος, όπως IP κίνηση και υψηλής απόδοσης υπηρεσίες φωνής.
3. Υποστήριξη ταυτόχρονης εκτέλεσης αρκετών υπηρεσιών πάνω στην ίδια τερματική συσκευή.
4. Προς τα πίσω συμβατότητα και διαλειτουργικότητα.
5. Υποστήριξη περιαγωγής.

Η προτυποποίηση των 3G συστημάτων ξεκίνησε από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union-ITU) το 1992. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής ονομάστηκε International Mobile Telecommunications 2000 (IMT-2000), το οποίο συμπεριλαμβάνει ένα πλήθος από διαφορετικά 3G πρότυπα. Κάθε ένα από αυτά τα πρότυπα δημιουργήθηκε από έναν ή περισσότερους εθνικούς οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων (Standards Developing Organizations-SDO). Το μεγάλο πλήθος προτύπων είχε σαν σκοπό να πετύχει την ομαλή εισαγωγή των 3G συστημάτων, ώστε να διατηρηθεί η προς τα πίσω συμβατότητα με τα υπάρχοντα 2G συστήματα. Για να διευκολυνθεί η ανάπτυξη ενός μικρότερου συνόλου από συμβατά 3G πρότυπα δημιουργήθηκαν διάφορα διεθνή προγράμματα όπως το Third Generation Partnership Project (3GPP) και το 3GPP2. Σύμφωνα με τη χώρα ανάπτυξης, ένα κατάλληλο πρότυπο ασύρματης πρόσβασης (γνωστό και σαν ασύρματη διεπαφή) έπρεπε να επιλεγεί, σε μία προσπάθεια να παρέχεται συμβατότητα με τα ήδη ανεπτυγμένα 2G συστήματα και να συμμορφώνεται με τους κανονισμούς διαχείρισης φάσματος της κάθε χώρας. Ο στόχος των 3G συστημάτων ήταν η σύγκλιση διαφορετικών υπηρεσιών, συνδυάζοντας τηλεφωνία, Διαδίκτυο και πολυμεσικές υπηρεσίες. Είναι ενδιαφέρον να αναφέρουμε πως μόλις ξεκίνησαν οι πρώτες εισηγήσεις για τα 3G δίκτυα το 1992

το Διαδίκτυο ήταν ακόμα ένα εργαλείο για την ακαδημαϊκή κοινότητα και οι εφαρμογές πολυμέσων ήταν κατά πολύ απλούστερες από τις σημερινές. Για αυτό το λόγο η υποστήριξη του Διαδικτύου και των πολυμέσων δεν ήταν αυτονόητη, παρόλα αυτά με το πέρασμα των χρόνων αυτό άλλαξε και τα σύγχρονα 3G πρότυπα παρέχουν αποδοτική υποστήριξη για προηγμένες υπηρεσίες Διαδικτύου, όπως περιήγηση στον παγκόσμιο ιστό και εφαρμογές πολυμέσων υψηλών απαιτήσεων.

Όσον αφορά τα διάφορα 3G πρότυπα ασύρματης πρόσβασης ο τομέας προτυποποίησης ασύρματων επικοινωνιών της ITU (ITU-Radiocommunication-ITU-R) κάλεσε την κατάθεση προτάσεων για πρότυπα το 1998, με αποτέλεσμα 10 επίγεια και 6 δορυφορικά πρότυπα να κατατίθενται από διάφορους SDOs χωρών από όλο τον κόσμο. Παρότι προέρχονταν από διαφορετικούς οργανισμούς, αρκετές από τις προτάσεις χαρακτηρίζονταν από μεγάλη ομοιότητα. Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute-ETSI) εισήγαγε το πρότυπο Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) το οποίο χρησιμοποιεί το Wideband CDMA (WCDMA) σαν μέθοδο ασύρματης πρόσβασης, συμπεριλαμβάνοντας 2 τρόπους λειτουργίας, το Frequency Division Duplex (FDD) WCDMA και το Time Division Duplex (TDD) WCDMA. Ο αντίστοιχος οργανισμός της Ιαπωνίας, Association of Radio Industry Board (ARIB) επίσης πρότεινε την τεχνολογία WCDMA, προσφέροντας συμβατότητα με την πρόταση του ETSI. Ο οργανισμός των Ηνωμένων Πολιτειών Telecommunications Industry Association (TIA) πρότεινε 3 διαφορετικά πρότυπα: το UWC-136, ένα πρότυπο βασισμένο σε TDMA το οποίο αποτελούσε την εξέλιξη του συστήματος IS-136, το cdma2000 σαν εξέλιξη του συστήματος IS-95 και ένα WCDMA σύστημα με την ονομασία WIMS. Ο οργανισμός της Κορέας Telecommunication Technology Association (TTA) πρότεινε 2 συστήματα, ένα πολύ κοντά στην πρόταση του ARIB και το επόμενο σύμφωνα με τα πρότυπα του cdma2000 του TIA. Τέλος, η Κίνα εισήγαγε τη δική της πρόταση με την ονομασία TD-SCDMA το οποίο βασίζεται σε ένα σχήμα συγχρονισμένου TD-CDMA συστήματος. Συνολικά οι προτάσεις κάθε εθνικού SDO παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2.

Αποτέλεσμα των παραπάνω προτάσεων ήταν η δημιουργία 2 προγραμμάτων που εργάζονταν στην ανάπτυξη 3G CDMA προτύπων, το πρόγραμμα 3GPP που ασχολήθηκε με το WCDMA και το 3GPP2 που εργάστηκε πάνω στην ανάπτυξη του cdma2000 προτύπου. Το 3GPP και το 3GPP2 βρίσκονταν υπό το συντονισμό μίας ομάδας από διαχειριστές δικτύων από όλο τον κόσμο που ονομάζεται Operators Harmonization Group (OHG) και είχε σαν στόχο

SDO	Air-interface proposal
ETSI (Europe)	<ul style="list-style-type: none"> • FDD WCDMA • TDD WCDMA • DECT
ARIB (Japan)	FDD WCDMA
TIA (USA)	<ul style="list-style-type: none"> • UWC-136 • Cdma2000 • WIMS (WCDMA)
TTP1 (USA)	WCDMA-NA
TTA (Korea)	<ul style="list-style-type: none"> • WCDMA • Cdma2000
China	TD-SCDMA

ΣΧΗΜΑ 2.2: Οι Προτάσεις κάθε SDO για τη Τεχνολογία Ασύρματης Πρόσβασης προς τον ITU-R

τον εναρμονισμό των διάφορων 3G προτύπων ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία τους πάνω σε διαφορετικά δίκτυα κορμού [32].

2.5 Τέταρτης Γενιάς (4G) Κυψελωτά Συστήματα

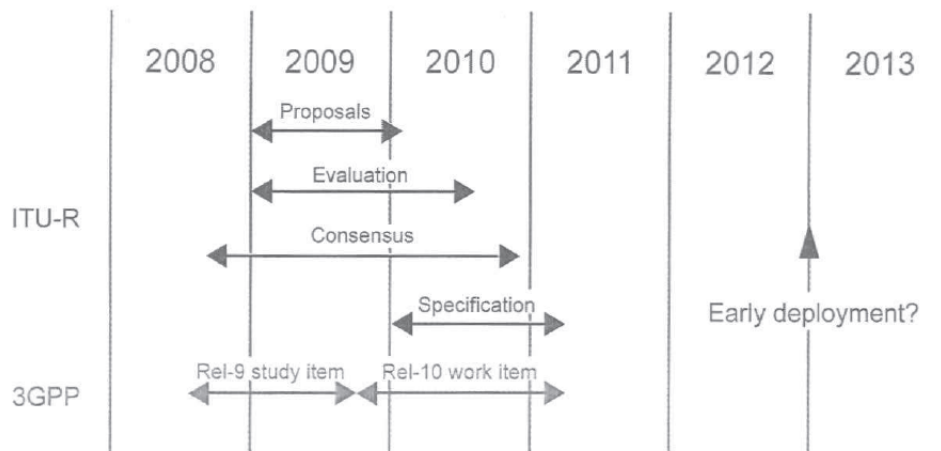
Η διαδικασία προτυποποίησης των συστημάτων τέταρτης γενιάς ξεκίνησε με το σύστημα Long Term Evolution (LTE), γνωστό και σαν 3,9G κυψελωτό σύστημα τηλεπικοινωνιών. Οι πρώτες εργασίες έγιναν στο Τορόντο το Νοέμβριο του 2004, όπου ένα σύνολο εταιρειών του χώρου των κινητών τηλεπικοινωνιών παρουσίασαν τους στόχους τους για τη μελλοντική εξέλιξη των προδιαγραφών που θα όριζε το 3GPP. Η συζήτηση για τις βασικές προδιαγραφές του νέου LTE συστήματος οδήγησε στη δημιουργία ενός επίσημου “Study Item” του 3GPP με βασικό στόχο την εξέλιξη της τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης που είχε μέχρι τότε ορίσει το 3GPP, ώστε να εξασφαλίσει την ανταγωνιστικότητά του για τα επόμενα 10 χρόνια τουλάχιστον. Κατά την εξέλιξη της διαδικασίας αυτής οι απαιτήσεις του LTE επαναδιατυπώθηκαν και αποσαφηνίστηκαν τελικώς τον Ιούνιο του 2005. Οι πιο βασικές από τις απαιτήσεις ήταν:

1. Μειωμένες καθυστερήσεις, όσον αφορά το χρόνο εγκατάστασης σύνδεσης και την καθυστέρηση μετάδοσης.
2. Αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.
3. Αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης ακόμα και στα όρια της κυψέλης, ώστε να εξασφαλίζεται ομοιομορφία στην παροχή υπηρεσιών σε όλους τους χρήστες.
4. Μειωμένο κόστος ανά bit, αποτέλεσμα της βελτιωμένης φασματικής απόδοσης.
5. Μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση του φάσματος, στις νέες και στις υπάρχουσες συχνότητες λειτουργίας.
6. Απλοποιημένη αρχιτεκτονική δικτύου.
7. Λογική κατανάλωση ενέργειας στις κινητές τεμαχικές συσκευές.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί πως οι απαιτήσεις των παρόχων κινητών δικτύων για τα κινητά συστήματα επόμενης γενιάς διατυπώθηκαν από τη σύμπραξη Next Generation Mobile Networks (NGMN) [33], γεγονός το οποίο συνέβαλε στην ανάπτυξη και στον καθορισμό του συστήματος LTE. Για τους σκοπούς αυτούς, ο σχεδιασμός του συστήματος LTE καλύπτει θέματα που αφορούν την ασύρματη διεπαφή καθώς και την αρχιτεκτονική του ασύρματου δικτύου.

Ο τυπικός ορισμός των 4G ασύρματων δικτύων γίνεται από το Working party 5D του ITU-R. Το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης του προγράμματος IMT-Advanced καθώς και του παράλληλου προγράμματος του 3GPP με την ονομασία LTE-Advanced παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.

Όσον αφορά την ονομασία του IMT-Advanced, η ITU εσκεμμένα χρησιμοποίησε το πρώτο μέρος 'IMT' από το πρόγραμμα 3G IMT-2000. Η ονομασία αυτή είναι σημαντική επειδή έχει συμφωνηθεί πως το δεσμευμένο φάσμα για τις τεχνολογίες IMT-2000 θα είναι γνωστό απλώς σαν φάσμα 'IMT' και θα είναι διαθέσιμο σε κάθε τεχνολογία εγκεκριμένη από το IMT-Advanced. Το 2007 στο World Radio Conference (WRC-07), ορίστηκε το νέο IMT φάσμα στις ακόλουθες φασματικές περιοχές: 450 MHz, 698–960 MHz, 2.3 GHz και 3.4–4.2 GHz. Ο στόχος της ITU ήταν να εγκρίνει τις υποψήφιες 4G τεχνολογίες έως τα τέλη του 2009 και στη συνέχεια να ακολουθήσει η ανάπτυξη και η υλοποίησή τους. Το γεγονός αυτό τοποθετεί τα 4G δύο χρόνια μετά την έκδοση 8 του LTE/SAE, με την εμπορική εμφάνιση



ΣΧΗΜΑ 2.3: Το Χρονοδιάγραμμα Ανάπτυξης του IMT-Advanced και του LTE-Advanced

των 4G υπηρεσιών να μην αναμένεται πριν το 2012. Όμως σε αντίθεση με τα 3G, τα 4G έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα πως δεν απαιτείται εκ νέου επανεξέταση των υπάρχοντων ασύρματων τεχνολογιών, λόγω της ύπαρξης του προτύπου LTE. Το πρόγραμμα IMT-2000 οδήγησε στην ανάπτυξη των προτύπων 3G, παρόλα αυτά στα επόμενα χρόνια τα πρότυπα 3G εξελίχθηκαν και ενισχύθηκαν οδηγώντας στο ονομαζόμενο 3.9G πρότυπο, έτσι ώστε το βήμα προς το IMT-Advanced να πραγματοποιηθεί όσο γίνεται πιο ομαλά. Η αποδοχή της τεχνολογίας ασύρματης διεπαφής (Radio Interface Technology-RIT) του 3GPP από το ITU αποτελεί ουσιαστικά μία ενίσχυση της έκδοσης 8 του LTE, γνωστή με την ονομασία LTE-Advanced, πρότυπο το οποίο ορίζεται πλήρως στην έκδοση 10.

Οι απαιτήσεις υψηλού επιπέδου για το IMT-Advanced ορισμένες από την ITU-R στο [34] είναι:

1. Υποστήριξη σε μεγάλο βαθμό παγκόσμιας κοινής λειτουργίας, διατηρώντας παράλληλα την ευελιξία στην υποστήριξη ενός μεγάλου εύρους τοπικών υπηρεσιών και εφαρμογών.
2. Συμβατότητα των υπηρεσιών της IMT και με άλλα δίκτυα.
3. Ικανότητα συνεργασίας και με άλλα συστήματα ασύρματης πρόσβασης.
4. Κινητές υπηρεσίες υψηλής ποιότητας.
5. Κινητές τερματικές συσκευές κατάλληλες για παγκόσμια χρήση.
6. Φιλικές στο χρήστη εφαρμογές, υπηρεσίες και εξοπλισμός.

7. Ενισχυμένοι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων ώστε να υποστηρίζονται προηγμένες υπηρεσίες και εφαρμογές (με στόχο τα 100 Mbps για υψηλή κινητικότητα και το 1 Gbps για χαμηλή κινητικότητα).

Η προσπάθεια του 3GPP να ορίσει ένα υποψήφιο πρότυπο RIT άρχισε με την έκδοση 9, η οποία είναι μία προπαρασκευαστική φάση του LTE-Advanced, με τις απαιτήσεις του να έχουν διατυπωθεί στο [35]. Οι απαιτήσεις αυτές έχουν οριστεί βάσει των απαιτήσεων της ITU-R για το IMT-Advanced καθώς επίσης και από τους διαχειριστές του 3GPP για την εξέλιξη του LTE. Βασικές απαιτήσεις είναι οι ακόλουθες:

1. Συνεχής βελτίωση στην ασύρματη τεχνολογία και αρχιτεκτονική του LTE.
2. Απαιτήση για συνεργασία με παλαιότερες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Technologies-RATs).
3. Πλήρης συμβατότητα του LTE-Advanced με το LTE, δηλαδή ένα LTE UE θα μπορεί να λειτουργήσει σε ένα δίκτυο LTE-Advanced και ένα LTE-Advanced UE θα μπορεί να λειτουργήσει σε ένα δίκτυο LTE.
4. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι αποφάσεις του WRC-07 για το νέο IMT φάσμα ώστε να διασφαλιστεί πως το LTE-Advanced θα μπορεί να χρησιμοποιεί κανάλια πέρα των 20 MHz.

Για να μπορέσει το LTE-Advanced να εκπληρώσει τις νέες απαιτήσεις εξετάζονται διάφορες νέες τεχνολογίες με χαρακτηριστικότερες την υιοθέτηση του σχήματος DFT-S-OFDM για την πολλαπλή πρόσβαση στο uplink, την τεχνική της συγκέντρωσης εύρους, τη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνικών MIMO, τη χρήση relaying, την υιοθέτηση οικιακών κυψελών (femtocells), κ.ά.

2.5.1 Απαιτήσεις Απόδοσης

Μία από τις βασικές απαιτήσεις των διαχειριστών δικτύου είναι η βελτιωμένη απόδοση των συστημάτων 4G σε σχέση με τα υπάρχοντα συστήματα, ώστε να εξασφαλιστεί η ανταγωνιστικότητά του και να εγείρει το ενδιαφέρον της αγοράς. Στη συγκεκριμένη παράγραφο περιγράφουμε τις βασικές μετρικές απόδοσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον ορισμό των

απαιτήσεων από το LTE καθώς και τον καθορισμό της απόδοσης σε κάθε μία από αυτές. Οι Πίνακες 2.1, 2.2 και 2.3 περιγράφουν αναλυτικά τους στόχους απόδοσης βάσει των οποίων προτυποποιήθηκε το σύστημα LTE.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Απαιτήσεις Απόδοσης Downlink των 4G Συστημάτων

	Απαίτηση	Συγκριτικά με έκδοση 6	Σχόλιο
Peak transmission rate	> 100 Mbps	7×14.4 Mbps	LTE in 20 MHz FDD, 2×2 spatial multiplexing. Reference: HSDPA in 5 MHz FDD, single antenna transmission
Peak spectral efficiency	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz	
Average cell spectral efficiency	> 1.6-2.1 bps/Hz/cell	$3-4 \times 0.53$ bps/Hz/cell	LTE: 2×2 spatial multiplexing, Interference Rejection Combining (IRC) receiver [36]. Reference: HSDPA, Rake receiver [37], 2 receive antennas
Cell edge spectral efficiency	> 0.04-0.06 bps/Hz/user	$2-3 \times 0.02$ bps/Hz	As above, 10 users assumed per cell
Broadcast spectral efficiency	> 1 bps/Hz	N/A	Dedicated carrier for broadcast mode

Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει στις απαιτήσεις απόδοσης της υπηρεσίας Broadcast/-Multicast μετάδοσης του συστήματος LTE. Παρότι δεν συμπεριλαμβανόταν στην πρώτη έκδοση του LTE λόγω της μεγαλύτερης προτεραιότητας που δόθηκε σε άλλες υπηρεσίες, υπήρχε η απαίτηση της ενσωμάτωσης μίας αποδοτικής broadcast/multicast λειτουργίας για υψηλού ρυθμού μετάδοση υπηρεσιών πολυμέσων (Multimedia Broadcast/Multicast

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: Απαιτήσεις Απόδοσης Uplink των 4G Συστημάτων

	Απαίτηση	Συγκριτικά με έκδοση 6	Σχόλιο
Peak transmission rate	> 50 Mbps	5×11 Mbps	LTE in 20 MHz FDD, single antenna transmission. Reference: HSUPA in 5 MHz FDD, single antenna transmission
Peak spectral efficiency	> 2.5 bps/Hz	2 bps/Hz	
Average cell spectral efficiency	> 0.66-1.0 bps/Hz/cell	$2-3 \times 0.33$ bps/Hz/cell	LTE: single antenna transmission, IRC receiver [36]. Reference: HSUPA, Rake receiver [37], 2 receive antennas
Cell edge spectral efficiency	> 0.02-0.03 bps/Hz/user	$2-3 \times 0.01$ bps/Hz	As above, 10 users assumed per cell

Services-MBMS) όπως υπηρεσίες τηλεόρασης (mobile TV) εισάγοντας τη λειτουργία Single Frequency Network (SFN). Αναλυτικότερα η υπηρεσία MBMS περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο.

Σε συστήματα broadcast μετάδοσης, ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι περιορισμένος σύμφωνα με την απόδοση των χρηστών που βρίσκονται στις χειρότερες συνθήκες μετάδοσης. Συνεπώς, οι απαιτήσεις απόδοσης της broadcast μετάδοσης ορίστηκαν σύμφωνα με ένα εφικτό όριο για το ρυθμό μεταφοράς δεδομένων (bps) και για τη φασματική απόδοση (bps/Hz), υποθέτοντας κάλυψη της τάξης του 98% της περιοχής λειτουργίας του συστήματος. Αυτό σημαίνει πως μόνο το 2% της περιοχής λειτουργίας θεωρείται περιοχή εκτός λειτουργίας, η οποία ορίζεται σαν μία περιοχή όπου οι χρήστες αντιμετωπίζουν ρυθμό εμφάνισης λάθους πακέτου (packet error rate) μεγαλύτερο από 1%. Η απαίτηση απόδοσης για τη φασματική απόδοση ορίστηκε στο 1 bps/Hz [38].

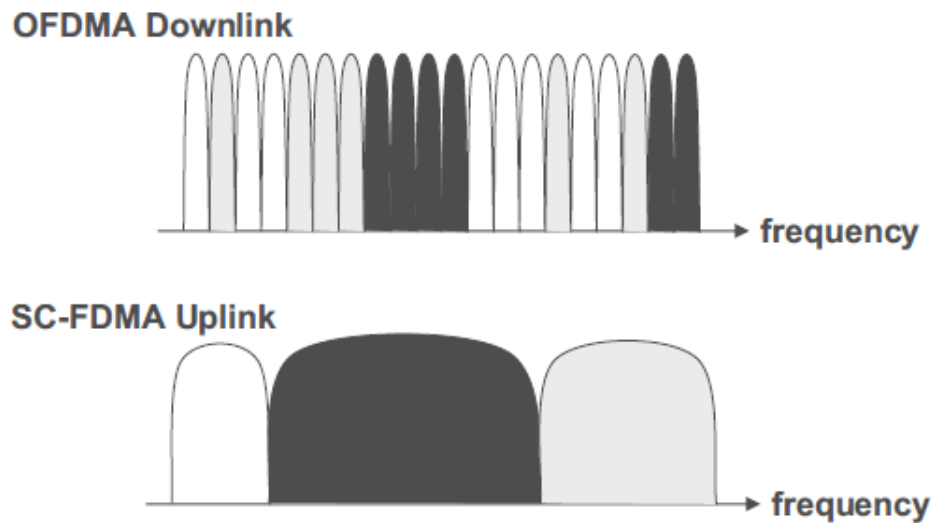
Πέρα από τα θέματα συνολικής απόδοσης του LTE, υπάρχουν και άλλα σημαντικά θέματα που εξετάστηκαν κατά την ανάπτυξη του συστήματος. Αυτά περιλαμβάνουν το μειωμένο κόστος ανάπτυξης του συστήματος, η φασματική ευελιξία και η συμβατότητα με παλαιότερα συστήματα. Το LTE είναι ικανό να λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών συχνοτικών διαστημάτων τόσο στο uplink όσο και στο downlink. Μπορεί να χρησιμοποιεί φάσματα

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3: Απαιτήσεις Απόδοσης Συστήματος των 4G Συστημάτων

	Απαίτηση	Συγκριτικά με έκδοση 6	Σχόλιο
User plane latency (two way radio delay)	< 10 ms	One fifth	
Connection set-up latency	< 100 ms		Idle state to active state
Operating bandwidth	1.4-20 MHz	5 MHz	(initial requirement started at 1.25 MHz)
VoIP capacity	NGMN preferred target expressed in [33] is > 60 sessions/MHz/cell		

που κυμαίνονται από το 1.4 έως και τα 20 MHz και να χειρίζεται όλα τα υπάρχοντα συχνοτικά διαστήματα που έχουν οριστεί μέχρι τώρα από την ITU-R συμπεριλαμβάνοντας και αυτά κάτω από το 1 GHz. Επίσης το LTE βασίζεται σε ένα εξελεγμένο δίκτυο κορμού μεταγωγής πακέτων, το οποίο επιτρέπει τη συνεργασία με διάφορες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, όπως τις GSM/EDGE και UTRAN του 3GPP καθώς και άλλες τεχνολογίες που δεν προέρχονται από το 3GPP όπως για παράδειγμα τις Wi-Fi, CDMA2000 και WiMAX. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό είναι η διαθεσιμότητα τερματικών κινητών συσκευών χαμηλού κόστους με μεγάλης διάρκειας μπαταρία, καθώς ο σχεδιασμός του συστήματος πετυχαίνει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, το LTE προσφέρει μία χαμηλού κόστους διάταξη μέσω του σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής του ασύρματου δικτύου πρόσβασης, το οποίο περιλαμβάνει:

1. Επίπεδη αρχιτεκτονική αποτελούμενη από μόνο έναν τύπο κόμβων, το σταθμό βάσης, με την ονομασία eNodeB (eNB).
2. Αποτελεσματικά πρωτόκολλα για την υποστήριξη υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου.
3. Αποτελεσματικούς μηχανισμούς λειτουργίας και συντήρησης, συμπεριλαμβάνοντας λειτουργίες αυτόματης βελτιστοποίησης.



ΣΧΗΜΑ 2.4: Η Διαχείριση στο Πεδίο της Συχνότητας των Σχημάτων Πολλαπλής Πρόσβασης

4. Εύκολη ανάπτυξη και ρύθμιση του δικτύου, προσφέροντας νέου τύπου σταθμούς βάσης, όπως τους λεγόμενους οικιακούς σταθμούς βάσης (ή αλλιώς femtocells).

2.5.2 Βασικές Τεχνολογίες

Το μεγάλο εύρος των απαιτήσεων που περιγράφηκαν παραπάνω μπορούν να εκπληρωθούν μόνο χάρη στις εξελίξεις πάνω στις κινητές ασύρματες τεχνολογίες. Από τις πιο βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιεί η ασύρματη διεπαφή του LTE είναι η τεχνολογία πολλαπλών φερουσών, η τεχνολογία πολλαπλών κεραιών και η εφαρμογή της μεταγωγής πακέτου στην ασύρματη διεπαφή.

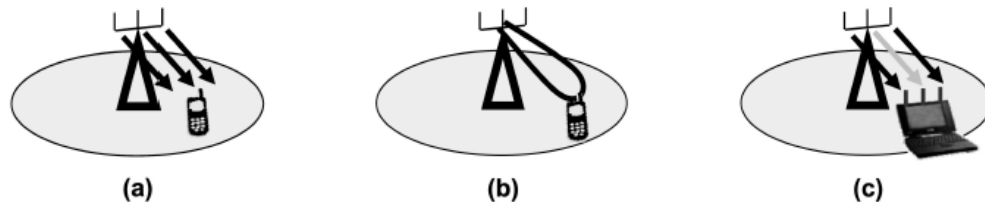
Η υιοθέτηση μίας προσέγγισης πολλαπλών φερουσών για την πολλαπλή πρόσβαση στο LTE ήταν η πρώτη βασική επιλογή σχεδιασμού. Τα υποψήφια σχήματα για το downlink ήταν το Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) και το Multiple WCDMA, ενώ για το uplink ήταν τα Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access (SC-FDMA), OFDMA και Multiple WCDMA. Η τελική επιλογή του σχήματος πολλαπλής πρόσβασης έγινε το Δεκέμβριο του 2005, επιλέγοντας το OFDMA για το downlink και το SC-FDMA για το uplink. Και τα δύο αυτά σχήματα άνοιξαν νέες διαστάσεις ευελιξίας στο πεδίο των συχνοτήτων, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.4.

Η OFDMA επεκτείνει την τεχνολογία πολλαπλών φερουσών Ορθογώνιας Πολυπλεξίας στο Πεδίο της Συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing-OFDM) ώστε να παρέχει ένα πολύ ευέλικτο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης. Η OFDM υποδιαιρεί το διαθέσιμο εύρος για τη μετάδοση του σήματος σε ένα πλήθος από στενού εύρους ζώνης υποφέρουσες, έτσι ώστε να είναι αμοιβαία ορθογώνιες, οι οποίες είτε η κάθε μία ξεχωριστά είτε σε μικρότερα σύνολα μπορούν να μεταφέρουν ανεξάρτητες ροές πληροφορίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μοιράζεται το διαθέσιμο εύρος μέσω των υποφερουσών σε πολλαπλούς χρήστες. Αυτή η ευελιξία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους:

1. Διαφορετικά φάσματα λειτουργίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να απαιτούνται αλλαγές στις παραμέτρους του συστήματος ή στο σχεδιασμό των κινητών συσκευών.
2. Οι πόροι μετάδοσης μπορούν να ανατεθούν σε διαφορετικούς χρήστες με τη χρονοδρομολόγηση να γίνεται στο πεδίο της συχνότητας.
3. Διευκολύνεται η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και οι τεχνικές διαχείρισης της παρεμβολής μεταξύ των κυψελών.

Στο uplink, η τεχνολογία SC-FDMA, που έχει πολλά κοινά ως προς τη λειτουργία της με την OFDMA, παρέχει ελαφρώς υποδεέστερες επιδόσεις σε σχέση με αυτές του downlink επιλύοντας το δίλημμα του πως μπορεί το uplink να ωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας πολλαπλών φερουσών. Ταυτόχρονα αποφεύγεται το υπερβολικό κόστος για τους κινητούς τερματικούς πομπούς, πετυχαίνοντας σημαντικά χαμηλότερο Μέγιστο-προς-Μέσο λόγο ισχύος (Peak-to-Average Power Ratio-PAPR) σε σχέση με την OFDMA και διατηρώντας ένα βαθμό ομοιότητας μεταξύ των τεχνολογιών του uplink και του downlink.

Η χρήση τεχνολογιών πολλαπλών κεραιών (MIMO) επιτρέπει την εκμετάλλευση του χωρικού πεδίου σαν μία άλλη νέα διάσταση. Αυτό αποκτά μεγάλη σημασία στην επιδίωξη για υψηλότερες φασματικές αποδόσεις. Με τη χρήση πολλαπλών κεραιών η θεωρητικά επιτεύξιμη φασματική απόδοση κλιμακώνεται γραμμικά με το πλήθος των κεραιών εκπομπής και λήψης που χρησιμοποιούνται. Οι πολλαπλές κεραιές εισάγουν μία μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους, βάσει τριών θεμελιωδών αρχών, οι οποίες παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.5.

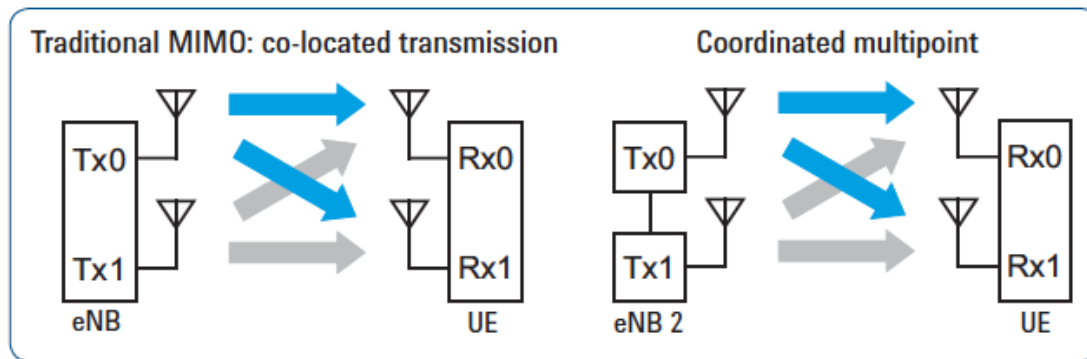


ΣΧΗΜΑ 2.5: Τα 3 Βασικά Οφέλη των Πολλαπλών Κεραίων: (α) Κέρδος Ποικιλομορφίας, (β) Κέρδος Διάταξης, (γ) Κέρδος Χωρικής πολυπλεξίας

1. *Κέρδος ποικιλομορφίας.* Χρήση της χωρικής ποικιλομορφίας που παρέχεται από τις πολλαπλές κεραίες για να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα της εκπομπής ως προς την εξασθένιση λόγω πολυδιόδευσης.
2. *Κέρδος διάταξης.* Η συγκέντρωση της ενέργειας σε μία ή περισσότερες δεδομένες κατευθύνσεις μέσω προκωδικοποίησης ή κατευθυντικής μετάδοσης. Αυτό επιτρέπει επίσης να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα πολλαπλοί χρήστες που βρίσκονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις (το λεγόμενο multi-user MIMO).
3. *Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας.* Η μετάδοση πολλαπλών ροών σήματος σε ένα χρήστη σε πολλαπλά χωρικά επίπεδα μέσω συνδυασμού των διαθέσιμων κεραίων.

Κατά το σχεδιασμό του συστήματος LTE έχουν συμπεριληφθεί πολλά χαρακτηριστικά των τεχνικών πολλαπλών κεραίων, προσφέροντας πολλές επιλογές ανάλογα με τη διάταξη του δικτύου και τις διαφορετικές καταστάσεις μετάδοσης των χρηστών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το LTE έχει σχεδιαστεί σαν ένα πλήρως βασισμένο στη μετάδοση πακέτων σύστημα πολλαπλών υπηρεσιών, χωρίς να βασίζεται σε μεταγωγής κυκλώματος, με προσανατολισμό στη σύνδεση, πρωτόκολλα όπως τα προκάτοχα συστήματα. Στο LTE, η μεταγωγή πακέτου έχει εφαρμοστεί σε όλα τα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Πιο συγκεκριμένα, βελτιώνοντας τη λειτουργία του πρότερου HSDPA συστήματος, το LTE για να βελτιώσει τη συνολική καθυστέρηση του συστήματος μείωσε τη διάρκεια του πακέτου από τα 2 ms του HSDPA σε μόλις 1 ms. Αυτό το μικρό διάστημα μετάδοσης σε συνδυασμό με τις νέες διαστάσεις της συχνότητας και του χώρου όπως περιγράφηκαν παραπάνω, έχουν επεκτείνει το πεδίο των διαστρωματικών (cross-layer) τεχνικών μεταξύ του υποεπιπέδου MAC και του φυσικού επιπέδου συμπεριλαμβάνοντας τις ακόλουθες τεχνικές στο LTE:



ΣΧΗΜΑ 2.6: Σύγκριση MIMO χωρικής πολυπλεξίας με την τεχνική CoMP

1. Προσαρμοζόμενος χρονοπρογραμματισμός στη διάσταση της συχνότητας και του χώρου.
2. Προσαρμογή των διάφορων επιλογών MIMO, συμπεριλαμβάνοντας την επιλογή του πλήθους των χωρικών επιπέδων που χρησιμοποιούνται.
3. Προσαρμογή της διαμόρφωσης και του ρυθμού κωδικοποίησης, συμπεριλαμβάνοντας το πλήθος των μεταδιδόμενων κωδικολέξεων.
4. Διαφορετικές ρυθμίσεις στο μηχανισμό αναφοράς της κατάστασης του ασύρματου καναλιού.

Τα διαφορετικά αυτά επίπεδα βελτιστοποίησης συνδυάζονται με μία πολύ εξελιγμένη σηματοδοσία ελέγχου ώστε να επιτύχει το LTE τους υψηλούς στόχους απόδοσής του.

Η τεχνική Coordinated Multipoint (CoMP) είναι μία εξελιγμένη παραλλαγή της τεχνικής MIMO, η οποία μπορεί να προσφέρει βελτιωμένους ρυθμούς μετάδοσης καθώς και να βελτιώσει τη ρυθμαπόδοση στα όρια της κυψέλης.

Στην Εικόνα 2.6 συγκρίνεται η παραδοσιακή MIMO χωρική πολυπλεξία με την τεχνική CoMP. Η βασικότερη διαφορά των δύο συστημάτων είναι πως στην περίπτωση του CoMP οι δύο πομποί δεν πρέπει να βρίσκονται γεωγραφικά στο ίδιο σημείο παρότι συνδέονται μέσω κάποιου είδους σύνδεσης υψηλής χωρητικότητας. Η τεχνική CoMP επιτρέπει τη συγχρονισμένη χρονοδρομολόγηση και την κατευθυντική μετάδοση από δύο ή περισσότερους πομπούς που δεν βρίσκονται γεωγραφικά στο ίδιο σημείο, τεχνική η οποία έχει τις βάσεις της στην τεχνική soft combining η οποία πρωτοεμφανίστηκε στα συστήματα CDMA.

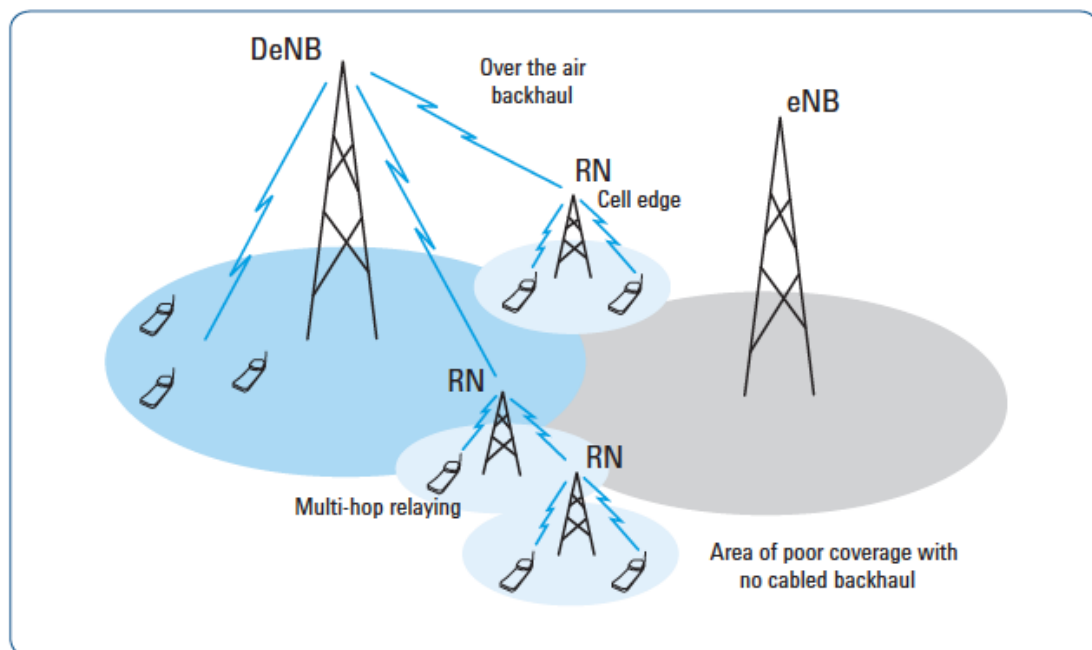
Μία άλλη μέθοδος η οποία προσφέρει βελτιωμένη κάλυψη τόσο σε αστικά όσο και σε περιβάλλοντα υπαίθρου. Η τεχνική του relaying δεν αποτελεί μία νέα τεχνική όμως συνεχώς το

επίπεδο ολοκλήρωσής της εξελίσσεται. Ένα τυπικό σενάριο της τεχνικής αυτής παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.7. Ένας κόμβος αναμετάδοσης (RN) συνδέεται ασύρματα στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης μέσω μίας κυψέλης δωρητή (donor cell-DeNB). Σύμφωνα με την έκδοση 10 του 3GPP ο RN μπορεί να συνδέεται με το DeNB με έναν από τους δύο παρακάτω τρόπους:

1. In-band (in-channel), όπου το DeNB-RN link μοιράζεται την ίδια φέρουσα με τα links του RN προς τα κινητά τεμαχικά.
2. Out-band, όπου το DeNB-RN link δε λειτουργεί στην ίδια φέρουσα με τα links του RN προς τα κινητά τεμαχικά.

Γενικά, η πιο διαδεδομένη χρήση του relaying είναι η χρήση σαν ασύρματος επαναλήπτης, ο οποίος λαμβάνει, εξομαλύνει και επανεκπέμπει ένα σήμα.

Μία βασική απαίτηση των τέταρτης γενιάς συστημάτων είναι η υποστήριξη ετερογενών δικτύων. Δηλαδή η συνδυαστική λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης κόμβων όπως τα picocells, femtocells, RNs, κ.ά. μέσα σε μία μακροκυψέλη. Τέτοιου είδους σενάρια ανάπτυξης δικτύων περιγράφονται αναλυτικά στο [54].



ΣΧΗΜΑ 2.7: Ένα τυπικό παράδειγμα relaying

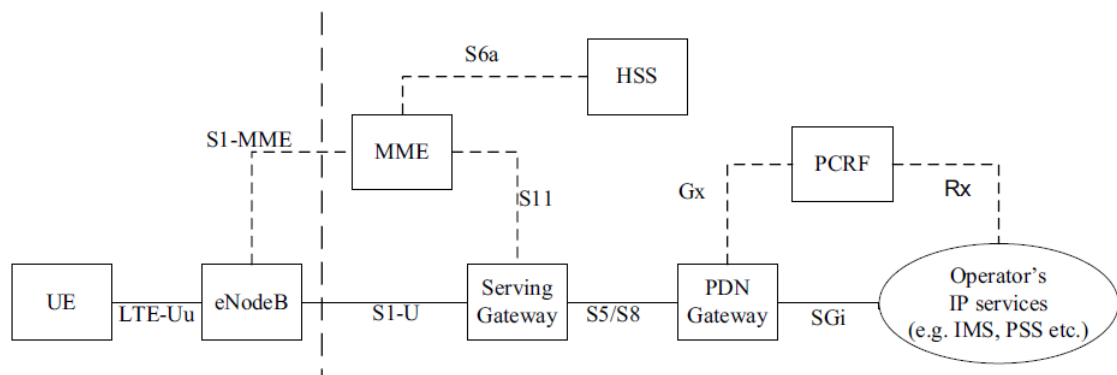
Μέχρι τώρα το κυψελωτά συστήματα είχαν μία κεντροποιημένη σχεδίαση που καθιστούσε εξαιρετικά δύσκολη την προσθήκη νέων δικτυακών κόμβων. Αυτό ακριβώς το πρόβλημα έρχονται να αντιμετωπίσουν τα αυτό-βελτιστοποιούμενα δίκτυα (self optimizing networks - SONs) προσφέροντας συγχρόνως ευκολότερη διαχείριση των δικτύων.

Τα βασικά σημεία των SONs αναφέρονται συνοπτικά σε:

1. Αυτο-ρύθμιση: αναφέρεται στην αυτοματοποιημένη διαδικασία της ρύθμισης και διαχείρισης ενός νεοεισαχθέντου κόμβου, π.χ. femtocell.
2. Αυτο-βελτιστοποίηση: αναφέρεται στη συνεχή διαδικασία της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων από το δίκτυο με στόχο την παραμετροποίηση των ρυθμίσεων του δικτύου ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο.
3. Αυτο-θεραπεία: αναφέρεται στη διαδικασία της ανάνηψης από ένα μη αναμενόμενο γεγονός στο δίκτυο.

2.5.3 Η Αρχιτεκτονική του Δικτύου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το LTE έχει σχεδιαστεί να υποστηρίζει μόνο υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου, σε αντίθεση με το μεταγωγής κυκλώματος μοντέλο των προηγούμενων κυψελωτών συστημάτων. Έχει σαν στόχο να παρέχει συνεχή Internet Protocol (IP) συνδεσιμότητα μεταξύ της κινητής συσκευής (που αναφέρεται σαν User Equipment-UE) και του δικτύου Πακέτων Δεδομένων (Packet Data Network-PDN) χωρίς καμία διακοπή στις εφαρμογές τελικών χρηστών κατά τη διάρκεια κινητικότητας. Καθώς ο όρος LTE αναφέρεται στην εξέλιξη της τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης μέσω του Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network (eUTRAN), συνοδεύεται από την εξέλιξη των θεμάτων που δεν αφορούν την ασύρματη πρόσβαση υπό τον όρο System Architecture Evolution (SAE) ο οποίος περιλαμβάνει το δίκτυο κορμού με την ονομασία Evolved Packet Core (EPC). Το LTE μαζί με το SAE σχηματίζουν το ονομαζόμενο Evolved Packet System (EPS). Το EPS χρησιμοποιεί την έννοια του ασύρματου 'φορέα' (radio bearer) για να δρομολογεί την IP κίνηση από μία πύλη στο PDN προς το UE. Ένας bearer είναι μία ροή IP πακέτων με ένα καθορισμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service-QoS) μεταξύ της πύλης και του UE. Το eUTRAN και το EPC σε συνεργασία εγκαθιστούν και διαχειρίζονται τους bearers ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών.



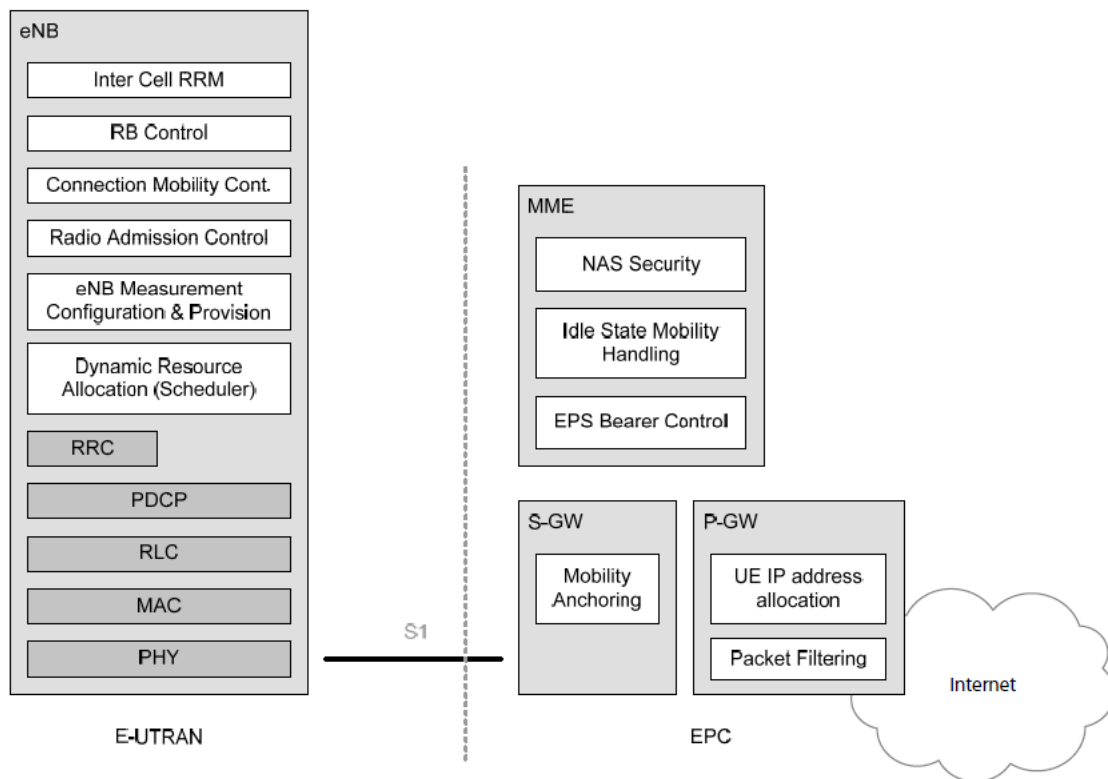
ΣΧΗΜΑ 2.8: Η Αρχιτεκτονική του Δικτύου EPS

2.5.3.1 Επισκόπηση της Αρχιτεκτονικής

Το EPS παρέχει στο χρήστη IP συνδεσιμότητα σε ένα PDN για πρόσβαση στο Διαδίκτυο, καθώς και για άλλες υπηρεσίες όπως για παράδειγμα Voice over IP (VoIP). Ένας EPS bearer είναι συσχετισμένος με ένα επίπεδο QoS. Πολλαπλοί bearers μπορούν να εγκατασταθούν για ένα χρήστη ώστε να του παρέχουν διαφορετικές QoS ροές ή σύνδεση με διαφορετικά PDNs. Για παράδειγμα, ένας χρήστης μπορεί να βρίσκεται σε μία κλήση φωνής (VoIP) ενώ παράλληλα μπορεί να εκτελεί πλοήγηση στο Διαδίκτυο ή ανάκτηση αρχείων μέσω του File Transfer Protocol (FTP). Το δίκτυο πρέπει επίσης να παρέχει επαρκή ασφάλεια και ιδιωτικότητα για το χρήστη και προστασία για το δίκτυο σε μη εγκεκριμένη χρήση.

Η συνολική λειτουργία του δικτύου επιτυγχάνεται μέσω διάφορων δικτυακών στοιχείων που έχουν διαφορετικούς ρόλους το καθένα. Η Εικόνα 2.8 απεικονίζει τη συνολική αρχιτεκτονική του δικτύου, συμπεριλαμβάνοντας τα δικτυακά στοιχεία και τις διεπαφές μεταξύ τους.

Σε υψηλότερο επίπεδο, το δίκτυο αποτελείται από το δίκτυο κορμού (Core Network-CN) EPC και το δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (eUTRAN). Ενώ το δίκτυο κορμού αποτελείται από πολλούς λογικούς κόμβους, το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται ουσιαστικά από μόνο ένα κόμβο, τον evolved NodeB (eNB), ο οποίος συνδέεται με τα UEs. Κάθε ένα από αυτά τα δικτυακά στοιχεία συνδέονται εσωτερικά του δικτύου μέσω των ορισμένων διεπαφών ώστε να προσφέρεται συνολική διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών στοιχείων. Στην πραγματικότητα, οι διαχειριστές δικτύων έχουν τη δυνατότητα να χωρίσουν ή να ενώσουν κάποια από αυτά τα δικτυακά στοιχεία στη φυσική τους υλοποίηση ανάλογα με τις εμπορικές τους



ΣΧΗΜΑ 2.9: Λειτουργικός Διαχωρισμός μεταξύ του eUTRAN και του EPC

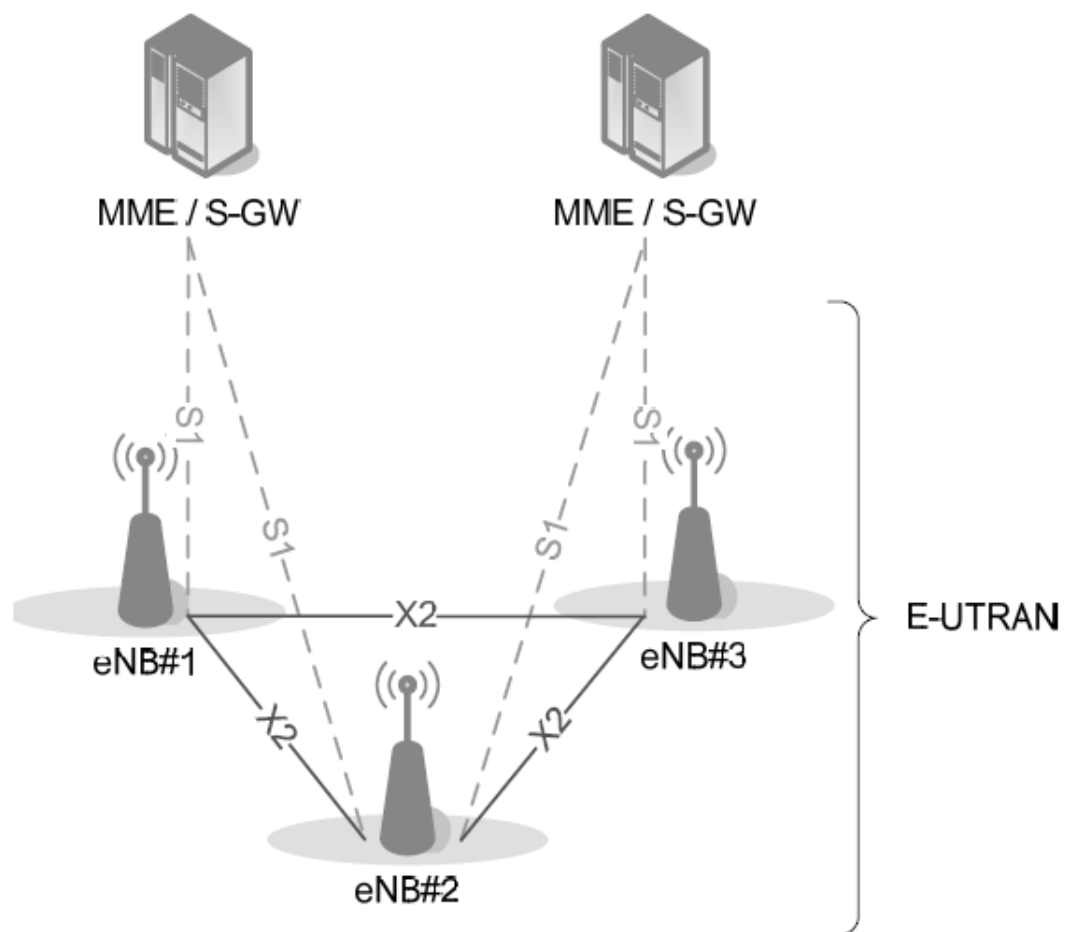
ανάγκες. Ο λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ του EPC και του eUTRAN παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9.

2.5.3.2 Το Δίκτυο Κορμού

Το δίκτυο κορμού (με την ονομασία EPC στο SAE) είναι υπεύθυνο για το συνολικό έλεγχο του UE και για την εγκατάσταση των bearers. Οι βασικοί λογικοί κόμβοι του EPC είναι:

1. PDN Gateway (P-GW).
2. Serving Gateway (S-GW).
3. Mobility Management Entity (MME).

Εκτός από αυτούς τους κόμβους, το EPC περιλαμβάνει και άλλους λογικούς κόμβους όπως τους Home Subscriber Server (HSS) και Policy Control and Charging Rules Function (PCRF). Αναλυτικά όλοι οι λογικοί κόμβοι και οι λειτουργίες τους παρουσιάζονται στο [39].

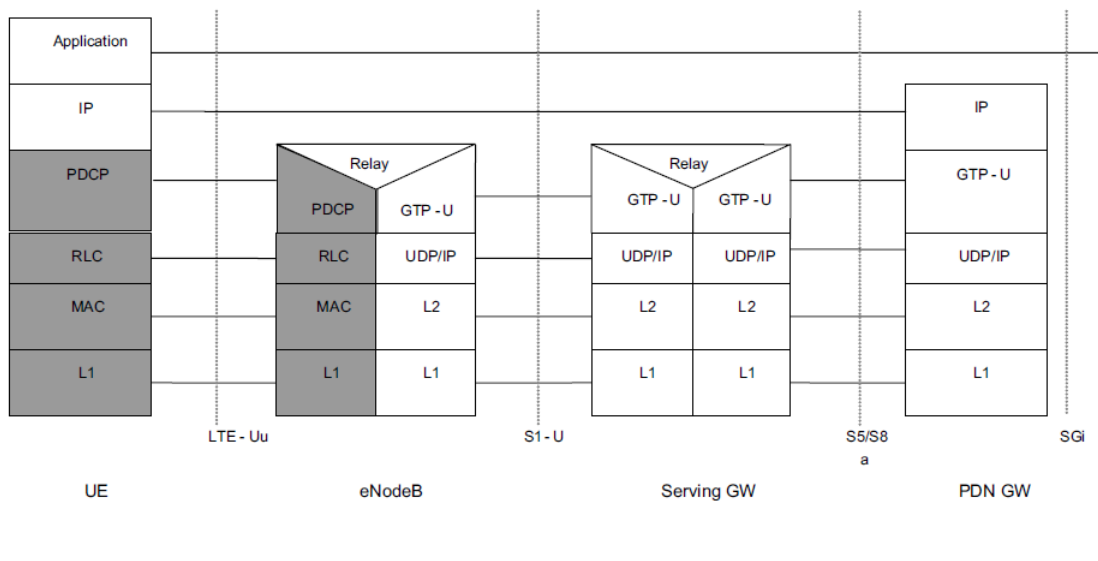


ΣΧΗΜΑ 2.10: Η Αρχιτεκτονική του eUTRAN

2.5.3.3 Το Δίκτυο Πρόσβασης

Το δίκτυο πρόσβασης του LTE, το eUTRAN, αποτελείται απλώς από ένα δίκτυο από eNBs όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.10. Για συνηθισμένη κίνηση δεδομένων (δλδ. αντίθετα με τη λειτουργία broadcast), δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής στο eUTRAN, συνεπώς η αρχιτεκτονική του χαρακτηρίζεται ως επίπεδη. Οι eNBs συνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2 και με το EPC μέσω της διεπαφής S1. Τα πρωτόκολλα που εκτελούνται μεταξύ των eNBs και των UEs είναι γνωστά σαν Access Stratum (AS) πρωτόκολλα. Το eUTRAN είναι υπεύθυνο για όλες τις λειτουργίες σχετικές με το ασύρματο κομμάτι του δικτύου, οι οποίες είναι:

1. Διαχείριση των ασύρματων πόρων.



ΣΧΗΜΑ 2.11: Η User Plane Στοιβά Πρωτοκόλλων

2. Συμπίεση επικεφαλίδων, ώστε να εξασφαλιστεί η αποδοτική χρήση της ασύρματης διεπαφής.
3. Ασφάλεια.
4. Συνδεσιμότητα με το EPC.

Στην πλευρά του δικτύου, όλες αυτές οι λειτουργίες ανήκουν στα eNBs, με τη δυνατότητα το καθένα να είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο πολλαπλών κυψελών. Σε αντίθεση με προηγούμενες δεύτερης και τρίτης γενιάς τεχνολογίες, το LTE ενσωματώνει τη λειτουργία του ασύρματου ελέγχου στο eNB. Αυτό επιτρέπει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων επιπέδων πρωτοκόλλων του δικτύου ασύρματης πρόσβασης, μειώνοντας την καθυστέρηση και αυξάνοντας συνολικά την αποδοτικότητα. Το eUTRAN παρουσιάζεται αναλυτικά στο [40].

2.5.4 Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η αρχιτεκτονική των πρωτοκόλλων του eUTRAN.

2.5.4.1 User Plane

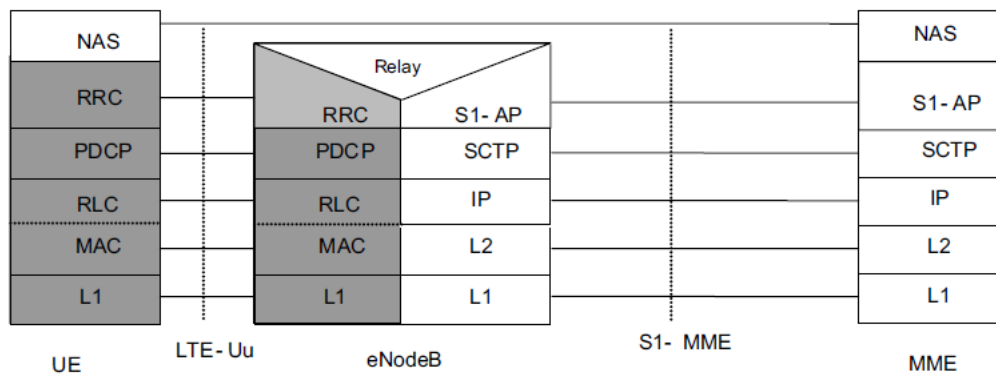
Ένα IP πακέτο προς ένα UE ενθυλακώνεται σε ένα πρωτόκολλο καθορισμένο από το EPC ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και μεταφέρεται από το P-GW προς το eNB για μετάδοση προς το UE. Διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς χρησιμοποιούνται ανάλογα με τη διεπαφή που χρησιμοποιείται. Ένα πρωτόκολλο μεταφοράς καθορισμένο από το 3GPP με την ονομασία GPRS Tunneling Protocol (GTP)[41] χρησιμοποιείται πάνω στις διεπαφές του δικτύου κορμού S1 και S5/S8. Η eUTRAN στοίβα πρωτοκόλλων του user plane παρουσιάζεται σχιασμένη στην Εικόνα 2.11, αποτελούμενη από τα Packet Data Convergence Protocol (PDCP) [42], Radio Link Control (RLC)[43] και Medium Access Control (MAC)[44] υποεπίπεδα τα οποία χρησιμοποιούνται μέχρι και το eNB στην πλευρά του δικτύου. Κατά τη διάρκεια αλλαγής κυψέλης (handover) λόγω κινητικότητας του χρήστη, η διαχείριση των δεδομένων προς το χρήστη που εκτελεί το handover γίνεται από το eNB και πιο συγκεκριμένα από το υποεπίπεδο PDCP, ενώ τα υποεπίπεδα RLC και MAC συνεχίζουν να προωθούν δεδομένα κανονικά.

2.5.4.2 Control Plane

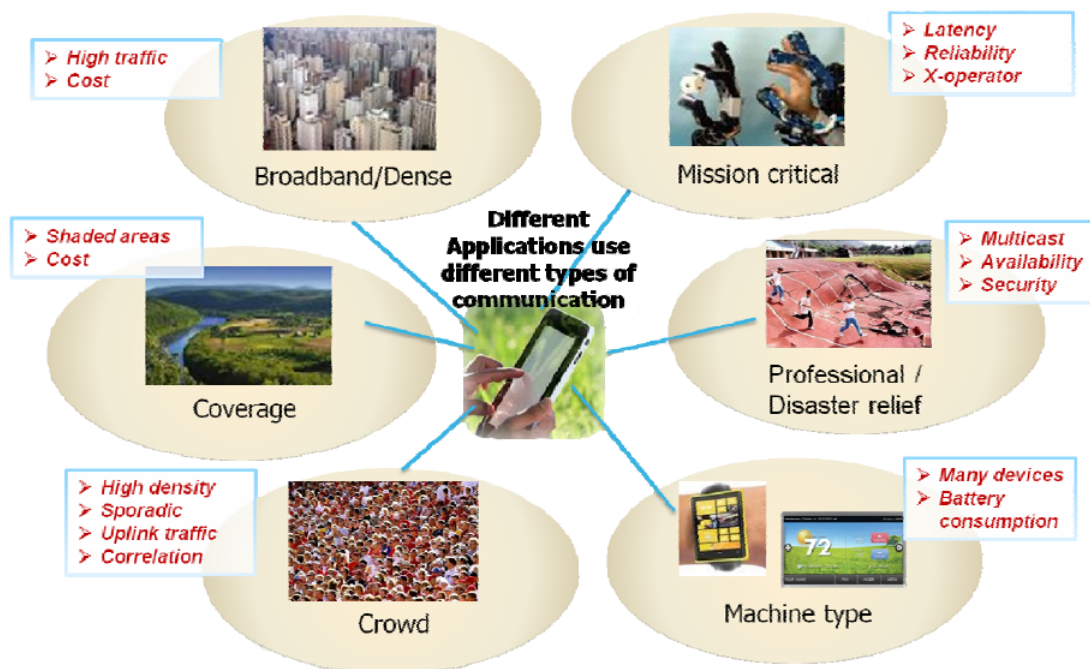
Η στοίβα πρωτοκόλλων του control plane μεταξύ του UE και του MME παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12. Η σχιασμένη περιοχή της στοίβας ορίζει τα πρωτόκολλα του access stratum. Τα χαμηλότερα επίπεδα εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες με του user plane, με τη διαφορά πως δεν εφαρμόζεται συμπίεση επικεφαλίδων για το control plane. Το πρωτόκολλο RRC είναι γνωστό σαν 'Επίπεδο 3' της στοίβας πρωτοκόλλων του AS. Αποτελεί τη βασική λειτουργία ελέγχου στο AS και είναι υπεύθυνο για την εγκατάσταση των ασύρματων bearers και για τη διαμόρφωση όλων των χαμηλότερων επιπέδων χρησιμοποιώντας την RRC σηματοδότηση μεταξύ του eNB και του UE. Οι λειτουργίες αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στο [45].

2.6 Πέμπτης Γενιάς (5G) Κυψελωτά Συστήματα

Κατά την περίοδο συγγραφής της παρούσας διδακτορικής διατριβής τα πέμπτης γενιάς κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών βρίσκονταν στο πρώιμο στάδιο του καθορισμού των απαιτήσεων απόδοσής τους, των υπηρεσιών που θα προσφέρουν καθώς και των τεχνολογιών



ΣΧΗΜΑ 2.12: Η Control Plane Στοιβά Πρωτοκόλλων



ΣΧΗΜΑ 2.13: Προκλήσεις των πέμπτης γενιάς συστημάτων

που θα χρησιμοποιηθούν. Ο όρος πέμπτη γενιά 5G αναφέρεται σε συστήματα που σχεδιάζεται να αναπτυχθούν πέραν του έτους 2020. Όπως έγινε λοιπόν με τα τέταρτης γενιάς συστήματα ο όρος 5G χρησιμοποιείται αρχικά πολύ γενικά για να περιγράψει συγκεκριμένες τεχνολογίες και αρχιτεκτονικές οι οποίες θα απαιτούν σημαντικές αλλαγές στις υπάρχουσες δικτυακές υποδομές, οι οποίες θα δικαιολογούν την αλλαγή γενιάς. Αρκετοί οργανισμοί προτυποποίησης ήδη εργάζονται για τον ορισμό των 5G . Η ομάδα εργασίας 5 της ITU-R ήδη εργάζεται πάνω στον καθορισμό του απαιτούμενου φάσματος καθώς και των κατάλληλων τεχνολογιών για την υλοποίηση της πέμπτης γενιάς κινητών δικτύων.

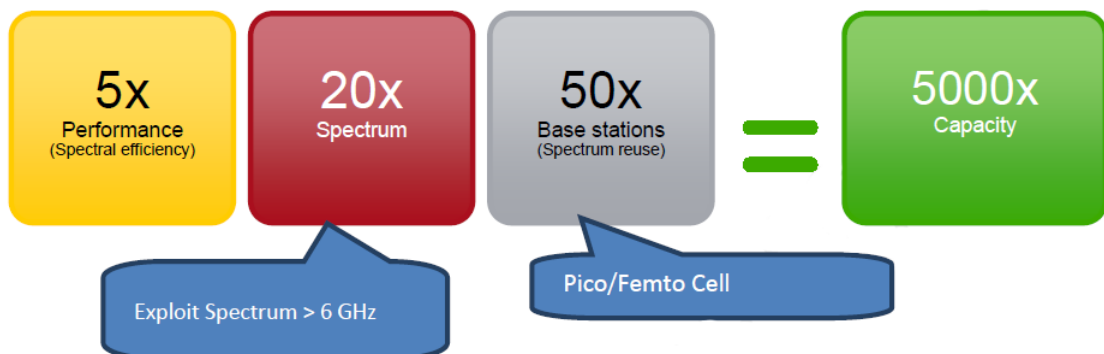
Τα μελλοντικά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών θα πρέπει να αντιμετωπίσουν διάφορες προκλήσεις οι οποίες συγκεντρώνονται σχηματικά στην Εικόνα 2.13. Αυτές περιλαμβάνουν το μειωμένο κόστος, την αξιοπιστία κατά τη μετάδοση, τα ετερογενή δίκτυα, τις υπηρεσίες πολυεκπομπής, την ασφάλεια, την υποστήριξη μίας ποικιλίας διαφορετικών συσκευών, τη λειτουργία υπό υπερυψηλή πυκνότητα χρηστών και την αποδοτική υποστήριξη πολλαπλών μοντέλων κινητικότητας.

Μέχρι το έτος 2030 αναμένεται να υπάρχει απαίτηση για 5000 φορές περισσότερη ασύρματη κίνηση δεδομένων σε σχέση με τις ημέρες μας [56]. Καθώς τα σχήματα που έχουν χρησιμοποιηθεί στα τέταρτης γενιάς συστήματα προσφέρουν φασματική απόδοση κοντά στο όριο του Shannon, ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί με το συνδυασμό της εκμετάλλευσης του φάσματος πέρα των 6 GHz [55] και με την πυκνότερη διάταξη ετερογενών δικτύων όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.14. Αυτές οι δύο επιλογές αποτελούν και τους βασικούς άξονες εξέλιξης των πέμπτης γενιάς συστημάτων.

Γενικά οι βασικότερες των απαιτήσεων απόδοσης των πέμπτης γενιάς συστημάτων συγκεντρώνονται στον Πίνακα 2.4.

2.7 Υπηρεσία MBMS

Η υπηρεσία Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS) είναι μία point-to-multipoint υπηρεσία στην οποία δεδομένα μεταδίδονται από μία πηγή σε πολλαπλούς παραλήπτες. Η



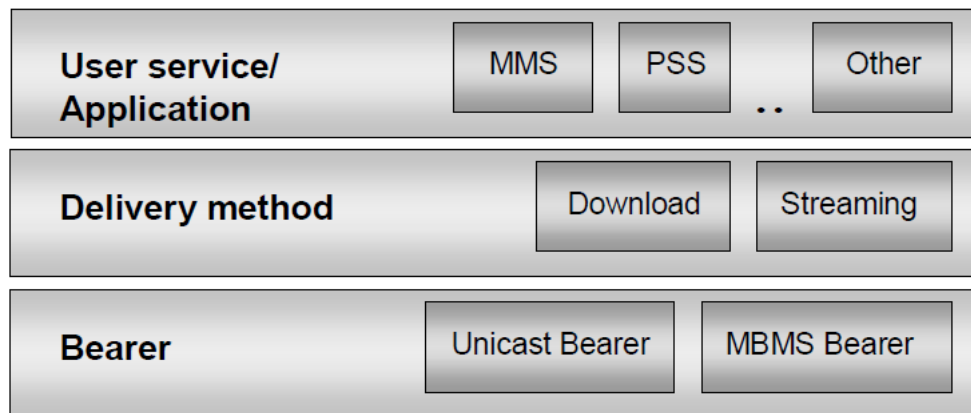
ΣΧΗΜΑ 2.14: Οι βασικοί άξονες απόδοσης των πέμπτης γενιάς συστημάτων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4: Βασικές Απαιτήσεις Απόδοσης των 5G Συστημάτων

Απαίτηση	Τιμή	Σχόλιο
Peak Data Rate	> 100 Gbps	100x that of currently deployed 4G
Bandwidth	0.5-2 GHz	Utilize large bandwidths for spectrum > 10 GHz
Minimum data rate	> 100 Mbps	When needed
Duplexing	TDD	
Latency	1 ms	Tactile Internet Latency
Backhaul	> 10 Gbps	Including wireless self backhauling
Battery Life	15 years	Low utilization Sensors
Coverage	20dB + LB	Coverage for e.g. basements
Cost	Low	Much lower than current GPRS device

μετάδοση των ίδιων δεδομένων σε πολλαπλούς παραλήπτες επιτρέπει τον επιμερισμό των δικτυακών πόρων. Η MBMS επεκτείνει την υπάρχουσα αρχιτεκτονική του 3GPP εισάγοντας την MBMS bearer υπηρεσία (service) και τις MBMS υπηρεσίες χρηστών (user services). Η MBMS bearer υπηρεσία προσφέρει δύο τρόπους λειτουργίας: τη λειτουργία broadcast και τη λειτουργία multicast. Η broadcast λειτουργία υποστηρίζεται από το EPS και το GPRS και η multicast λειτουργία υποστηρίζεται μόνο από το GPRS. Η υπηρεσία MBMS για το EPS υποστηρίζει το eUTRAN και το UTRAN, ενώ για το GPRS υποστηρίζει το UTRAN και το GERAN. Η αρχιτεκτονική της MBMS επιτρέπει την αποδοτική χρήση των πόρων του ασύρματου δικτύου και του δικτύου κορμού, εστιάζοντας στην αποδοτικότητα της ασύρματης διεπαφής. Η MBMS υπηρεσία πραγματοποιείται με την προσθήκη ενός πλήθους νέων δυνατοτήτων στις υπάρχουσες λειτουργικές οντότητες της αρχιτεκτονικής του 3GPP καθώς και με την προσθήκη νέων λειτουργικών οντοτήτων.

Οι MBMS υπηρεσίες χρηστών τοποθετούνται πάνω από την MBMS bearer υπηρεσία. Επίσης, οι MBMS υπηρεσίες χρηστών μπορούν να χρησιμοποιούν και άλλες UMTS bearer



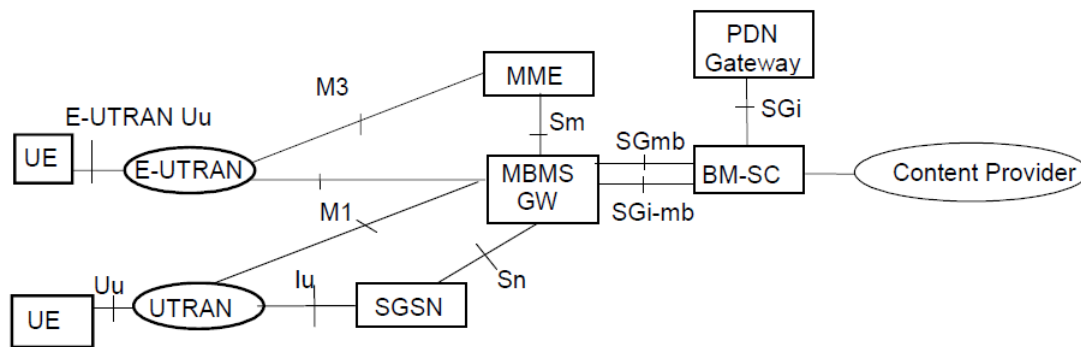
ΣΧΗΜΑ 2.15: Τα 3 Λειτουργικά Επίπεδα της Υπηρεσίας MBMS

υπηρεσίες για να διανείμουν δεδομένα. Στο [27] ορίζονται δύο μέθοδοι διανομής για τις MBMS υπηρεσίες χρηστών: η μέθοδος download και η μέθοδος streaming. Παράδειγμα εφαρμογών που χρησιμοποιούν τη download μέθοδο είναι η λήψη ειδήσεων και η αναβάθμιση λογισμικού. Η διανομή μουσικής σε πραγματικό χρόνο είναι ένα παράδειγμα εφαρμογής που χρησιμοποιεί τη μέθοδο streaming. Γενικά, μπορεί να υπάρχουν αρκετές MBMS υπηρεσίες χρηστών, με το 3GPP να έχει καθορίσει ένα σύνολο από κωδικοποιητές, σχήματα και πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς/εφαρμογών για την ανάπτυξη των MBMS υπηρεσιών.

2.7.1 Τα Λειτουργικά Επίπεδα της Υπηρεσίας MBMS

Τρία διακριτά λειτουργικά επίπεδα ορίζονται για την παράδοση MBMS υπηρεσιών. Αυτά είναι οι bearers, η μέθοδος παράδοσης δεδομένων και οι υπηρεσίες χρηστών. Στην Εικόνα 2.15 παρουσιάζονται αυτά τα επίπεδα με παραδείγματα για το είδος των bearers, των μεθόδων παράδοσης και των εφαρμογών.

Οι bearers παρέχουν το μηχανισμό με τον οποίο μεταφέρονται τα IP δεδομένα. Οι MBMS bearers όπως ορίζονται στα [46] και [47] χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν multicast και broadcast κίνηση με έναν αποδοτικό point-to-multipoint τρόπο μετάδοσης και αποτελούν τη βάση των MBMS υπηρεσιών. Οι MBMS bearers μπορεί να χρησιμοποιηθούν μαζί με unicast μεταδόσεις για να προσφέρουν ολοκληρωμένες δυνατότητες υπηρεσιών. Όταν μεταδίδεται MBMS περιεχόμενο χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες μέθοδοι παράδοσης. Το επίπεδο παράδοσης παρέχει λειτουργίες όπως ασφάλεια, έλεγχο αξιόπιστης μετάδοσης



ΣΧΗΜΑ 2.16: Η Αρχιτεκτονική του EPS για την υπηρεσία MBMS

μέσω τεχνικών forward error correction και άλλες διαδικασίες σχετικές με την παράδοση, όπως τη διαδικασία επισκευής του ληφθέντος αρχείου και την επιβεβαίωση της λήψης. Έχουν οριστεί δύο μέθοδοι παράδοσης, η download και η streaming, όμως μπορούν να προστεθούν και άλλες μέθοδοι κατά την εξέλιξη της υπηρεσίας MBMS. Οι μέθοδοι παράδοσης μπορούν να χρησιμοποιούν τους MBMS bearers, αλλά μπορούν να κάνουν χρήση και των point-to-point bearers χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από κατάλληλες διαδικασίες. Η MBMS υπηρεσία χρήστη υποστηρίζει τις εφαρμογές. Διαφορετικές εφαρμογές εισάγουν διαφορετικές απαιτήσεις όταν διανέμουν περιεχόμενο σε MBMS συνδρομητές και μπορεί να χρησιμοποιούν διαφορετικές MBMS μεθόδους παράδοσης. Για παράδειγμα μία εφαρμογή μετάδοσης μηνυμάτων όπως η MMS θα χρησιμοποιούσε τη download μέθοδο, ενώ μία streaming εφαρμογή όπως η κινητή τηλεόραση θα χρησιμοποιούσε τη streaming μέθοδο.

2.7.2 Οι Λειτουργικές Οντότητες της Αρχιτεκτονικής MBMS

Οι υπάρχουσες λειτουργικές οντότητες της κλασικής αρχιτεκτονικής μεταγωγής πακέτου (SGSN, MME, eUTRAN και UE), έχουν εμπλουτιστεί ούτως ώστε να παρέχουν την MBMS bearer υπηρεσία. Η αρχιτεκτονική του EPS για την υπηρεσία MBMS παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.16.

2.7.2.1 Content Provider/Multicast Broadcast Source

Ο πάροχος περιεχομένου (Content Provider), δηλαδή η πηγή της Multicast/Broadcast μετάδοσης, παρέχει διακριτά και συνεχή πολυμεσικά δεδομένα, καθώς επίσης την περιγραφή της υπηρεσίας και δεδομένα ελέγχου, προς το BM-SC. Μία υπηρεσία χρήστη MBMS

μπορεί να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα μία ή περισσότερες μεθόδους παράδοσης και ο Content Provider/Multicast Broadcast Source μπορεί να είναι ένας τρίτος, ανεξάρτητος του δικτύου πάροχος πολυμέσων. Δηλαδή η λειτουργία του Content Provider μπορεί να εκτελείται μέσα στο δίκτυο του διαχειριστή ή να παρέχεται εξωτερικά. Τέλος, ο Content Provider μπορεί επίσης να ρυθμίσει λειτουργίες της συνόδου και της μετάδοσης (π.χ. τη μέθοδο μετάδοσης).

2.7.2.2 Broadcast-Multicast Service Centre (BM-SC)

Το BM-SC παρέχει λειτουργίες για την παροχή και παράδοση των MBMS υπηρεσιών χρήστη. Λειτουργεί σαν ένα σημείο εισόδου για τον πάροχο του MBMS περιεχομένου, αναλαμβάνει να εγκρίνει και να αρχικοποιήσει τις MBMS bearer υπηρεσίες καθώς και να χρονοπρογραμματίσει και να διανείμει τις MBMS μεταδόσεις. Το BM-SC είναι μία λειτουργική οντότητα που πρέπει να υπάρχει για την παροχή οποιασδήποτε MBMS υπηρεσίας. Το BM-SC διαχειρίζεται και τις παρακάτω υπολειτουργίες:

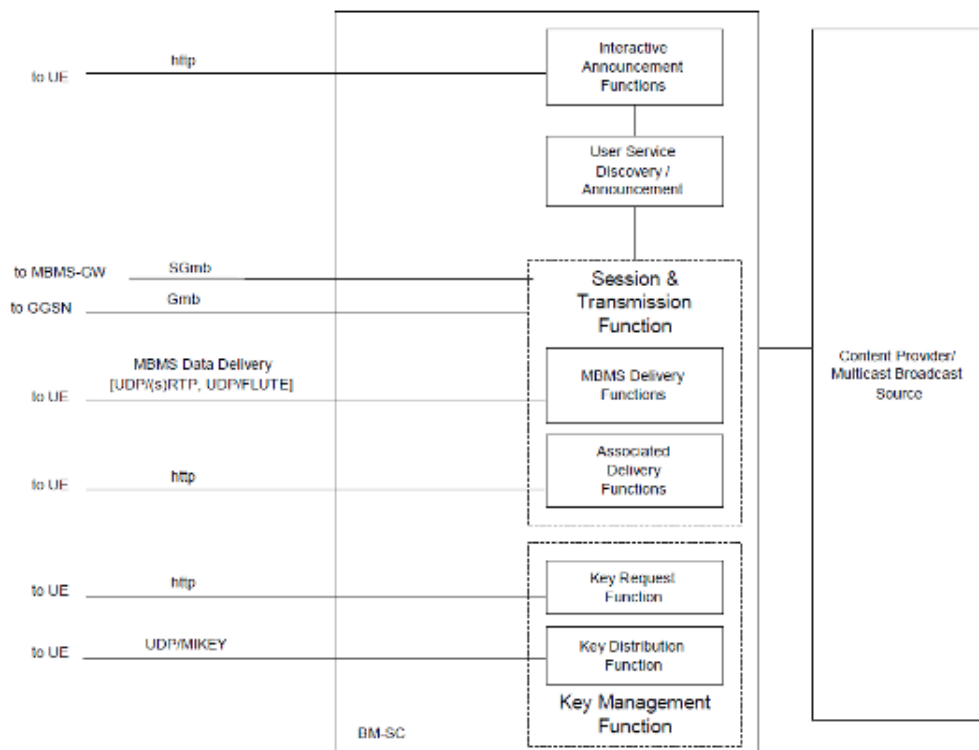
1. Λειτουργία διαχείρισης των μελών της MBMS υπηρεσίας.
2. Λειτουργία διαχείρισης συνόδου και μετάδοσης.
3. Λειτουργία διαχείρισης μεταφοράς.
4. Λειτουργία αναγγελίας της υπηρεσίας.
5. Συντονισμός του MBMS περιεχομένου στο eUTRAN.

Αναλυτικά οι λειτουργίες του BM-SC παρουσιάζονται στην Εικόνα [2.17](#).

2.7.2.3 MBMS Gateway (GW)

Οι βασικές λειτουργίες της πύλης MBMS (MBMS Gateway) είναι:

1. Η παροχή μίας διεπαφής για τις οντότητες που χρησιμοποιούν τους MBMS bearers μέσω της διεπαφής SGi-mb για το user plane και της διεπαφής SGmb για το control plane.
2. Η IP multicast διανομή των MBMS δεδομένων του user plane στα eNBs μέσω της διεπαφής M1.



ΣΧΗΜΑ 2.17: Οι Λειτουργίες του BM-SC

3. Επίσης ορίζει μία IP multicast διεύθυνση την οποία το eNB πρέπει να χρησιμοποιήσει για να λάβει τα MBMS δεδομένα. Αυτή η IP multicast διεύθυνση μαζί με την IP διεύθυνση της multicast πηγής παρέχεται στο eNB μέσω του MME.
4. Επιπλέον η MBMS GW μπορεί να υποστηρίζει την αλλαγή λειτουργίας σε point-to-point μετάδοση σε ορισμένες περιπτώσεις και μπορεί να επικοινωνεί με πολλές οντότητες του control plane, όπως το MME και τα BM-SCs.

Τέλος, να αναφέρουμε πως σε ένα δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθούν μία ή περισσότερες MBMS GWs και πως το MBMS GW μπορεί να είναι ανεξάρτητο στοιχείο ή να βρίσκεται ενσωματωμένο πάνω σε άλλο στοιχείο του δικτύου όπως το BM-SC.

2.7.2.4 Mobility Management Entity (MME)

Η λειτουργία του MBMS control plane υποστηρίζεται από το MME για πρόσβαση στο eUTRAN. Το MME παρέχει τις ακόλουθες λειτουργίες, ώστε να υποστηρίζει τις eUTRAN MBMS υπηρεσίες:

1. Έλεγχος συνόδου των MBMS bearers (έλεγχος των λειτουργιών έναρξη συνόδου/λήξη συνόδου).
2. Μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου της συνόδου σε πολλαπλούς eUTRAN κόμβους.
3. Παρέχει τη διεπαφή Sm στην MBMS GW, μέσω της οποίας λαμβάνει μηνύματα ελέγχου και την IP multicast διεύθυνση για λήψη MBMS δεδομένων από την MBMS GW.

2.7.2.5 eUTRAN

Το eUTRAN είναι υπεύθυνο για την αποδοτική παράδοση των MBMS δεδομένων στην επιθυμητή MBMS περιοχή. Το eUTRAN για την υπηρεσία MBMS πρέπει να έχει την ικανότητα να λαμβάνει IP multicast κίνηση.

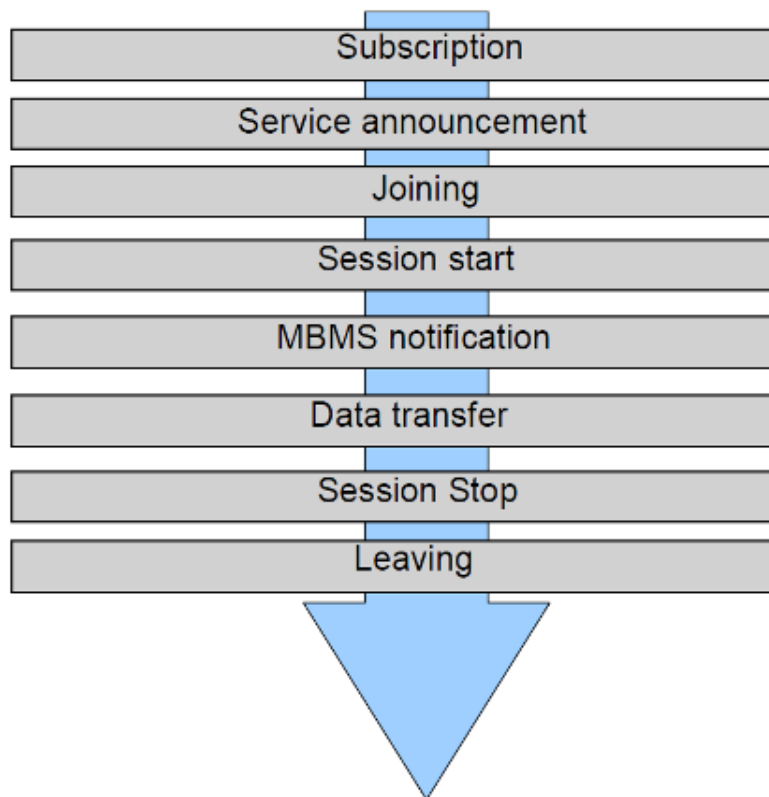
2.7.2.6 User Equipment (UE)

Ο κινητός εξοπλισμός των χρηστών (UE) πρέπει να υποστηρίζει τις λειτουργίες της ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της MBMS bearer υπηρεσίας. Αφότου μία MBMS bearer υπηρεσία ενεργοποιηθεί, δεν απαιτείται κανένα περαιτέρω αίτημα από το χρήστη για να λάβει MBMS δεδομένα, παρότι ο χρήστης μπορεί να ειδοποιηθεί πως η μεταφορά δεδομένων είναι έτοιμη να ξεκινήσει. Το UE πρέπει να υποστηρίζει λειτουργίες ασφάλειας κατάλληλες για την MBMS υπηρεσία. Το UE πρέπει, ανάλογα με τις δυνατότητες της τερματικής συσκευής, να έχει την ικανότητα να λαμβάνει γνωστοποιήσεις για τις διαθέσιμες MBMS υπηρεσίες, πληροφορίες paging και να υποστηρίζει ταυτόχρονες υπηρεσίες (για παράδειγμα ο χρήστης θα μπορεί να πραγματοποιήσει ή να λάβει μία κλήση και να λάβει μηνύματα κειμένου, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει MBMS περιεχόμενο). Επίσης, ανάλογα με τις δυνατότητες της τερματικής συσκευής, το UE μπορεί να αποθηκεύει MBMS δεδομένα.

2.7.3 Παροχή της MBMS Υπηρεσίας

2.7.3.1 Multicast Λειτουργία

Η λήψη μίας υπηρεσίας MBMS multicast βασίζεται σε συγκεκριμένες διαδικασίες, οι οποίες παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.18. Οι φάσεις της συνδρομής, της σύνδεσης και



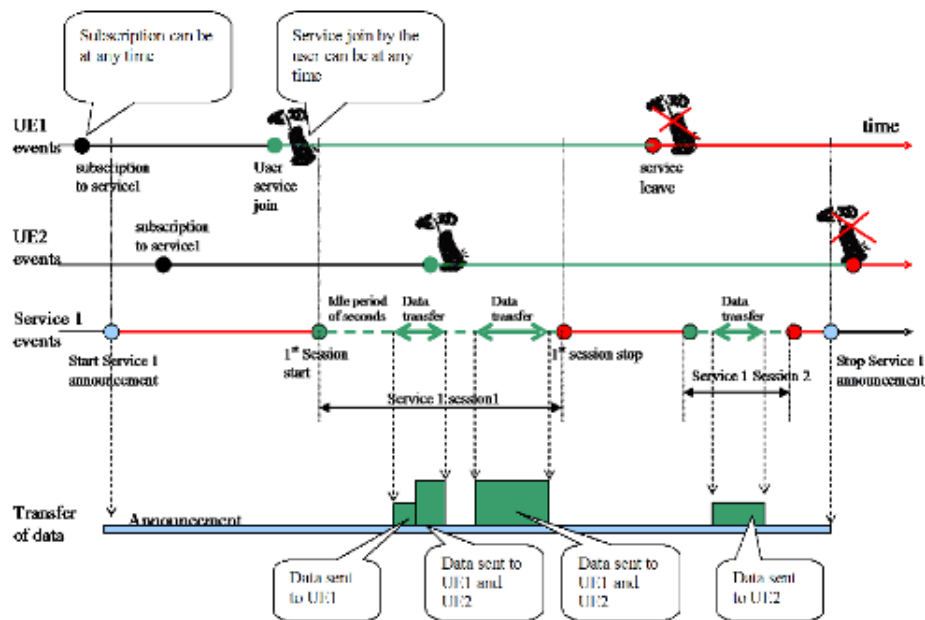
ΣΧΗΜΑ 2.18: Οι φάσεις Παροχής μίας MBMS Multicast Υπηρεσίας

της αποχώρησης από την υπηρεσία εκτελούνται ατομικά ανά χρήστη. Οι υπόλοιπες φάσεις εκτελούνται συνολικά για κάθε υπηρεσία, δηλαδή για όλους τους χρήστες που ενδιαφέρονται για τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Η ακολουθία των φάσεων μπορεί να επαναληφθεί, ανάλογα με τις ανάγκες για τη μεταφορά των δεδομένων. Επίσης οι φάσεις της συνδρομής, της σύνδεσης, της αποχώρησης, της αναγγελίας της υπηρεσίας καθώς και της MBMS ειδοποίησης μπορούν να εκτελούνται παράλληλα με τις άλλες φάσεις.

1. *Συνδρομή (Subscription)*: Εγκαθιδρύει τη σχέση μεταξύ του χρήστη και του παρόχου της υπηρεσίας, γεγονός που επιτρέπει στο χρήστη να λάβει τη σχετική MBMS multicast υπηρεσία. Η συνδρομή στην υπηρεσία είναι η συμφωνία ενός χρήστη να λάβει την υπηρεσία που διατίθεται από ένα πάροχο. Πληροφορίες σχετικές με τη διαδικασία της συνδρομής συνήθως παρέχονται από το BM-SC, όμως μπορεί να διατίθενται και από διαφορετικές δικτυακές οντότητες μαζί με άλλες λειτουργίες του BM-SC μέσω της διεπαφής Gmb.
2. *Αναγγελία της υπηρεσίας (Service announcement)*: Ο μηχανισμός αναγγελίας/ανακάλυψης των MBMS διαθέσιμων υπηρεσιών πρέπει να επιτρέπει στους χρήστες να

πληροφορούνται σχετικά με το εύρος της διαθεσιμότητας των MBMS υπηρεσιών. Αυτό περιλαμβάνει συγκεκριμένες MBMS υπηρεσίες, διαθέσιμες από το διαχειριστή του δικτύου, καθώς και υπηρεσίες παρεχόμενες από εξωτερικούς του δικτύου παρόχους περιεχομένου. Η διαδικασία της αναγγελίας χρησιμοποιείται για να διανεμηθεί στους χρήστες πληροφορία σχετική με την υπηρεσία, παράμετροι που απαιτούνται για την ενεργοποίηση της υπηρεσίας (π.χ. η IP multicast διεύθυνση) και άλλες πιθανές παράμετροι σχετικές με την υπηρεσία (π.χ. χρόνος έναρξης της υπηρεσίας).

3. *Σύνδεση (Joining)*: Η σύνδεση, δηλαδή η ενεργοποίηση της MBMS multicast υπηρεσίας από το χρήστη, είναι η διαδικασία με την οποία ένας συνδρομητής γίνεται μέλος μίας multicast ομάδας, δηλώνοντας στο δίκτυο πως επιθυμεί να λάβει τα multicast δεδομένα μέσω ενός MBMS bearer. Μία MBMS υπηρεσία μπορεί να μεταδίδεται από περισσότερους από έναν MBMS bearer. Σε αυτή την περίπτωση το τμήμα της MBMS υπηρεσίας που είναι ενεργοποιημένο στο UE ορίζει τους σχετικούς MBMS bearers για τη λήψη της υπηρεσίας.
4. *Έναρξη της συνόδου (Session Start)*: Η έναρξη της συνόδου είναι το σημείο στο οποίο το BM-SC είναι έτοιμο να στείλει δεδομένα. Η έναρξη της συνόδου πραγματοποιείται ανεξάρτητα από την ενεργοποίηση της υπηρεσίας από το χρήστη, δηλαδή ένας χρήστης μπορεί να ενεργοποιήσει την υπηρεσία πριν ή μετά την έναρξη της συνόδου. Η έναρξη της συνόδου προκαλεί τη δέσμευση των πόρων για τη λειτουργία του απαραίτητου bearer για τη μετάδοση των MBMS δεδομένων. Εάν μία υπηρεσία μεταφέρεται από περισσότερους του ενός bearer, ένα μήνυμα έναρξης συνόδου αποστέλλεται για κάθε MBMS bearer. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να απαιτείται να ενεργοποιηθεί το UE τη λήψη όλων των σχετικών bearers.
5. *MBMS ειδοποίηση (MBMS notification)*: Κατά τη διαδικασία αυτή, το UE πληροφορείται για επερχόμενη (και ενδεχομένως για τρέχουσα) MBMS multicast μεταφορά δεδομένων.
6. *Μεταφορά δεδομένων (Data transfer)*: Πρόκειται για τη φάση κατά την οποία τα MBMS δεδομένα μεταφέρονται στα UEs.
7. *Λήξη της συνόδου (Session Stop)*: Είναι το σημείο στο οποίο το BM-SC καθορίζει πως δεν θα υπάρχουν άλλα δεδομένα προς αποστολή για κάποια χρονική περίοδο, με την περίοδο αυτή να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δικαιολογείται η αποδέσμευση των πόρων των bearer(s) που είχαν δεσμευθεί για τη σύνοδο.



ΣΧΗΜΑ 2.19: Παράδειγμα Χρονικής Εξέλιξης μίας Multicast Συνόδου

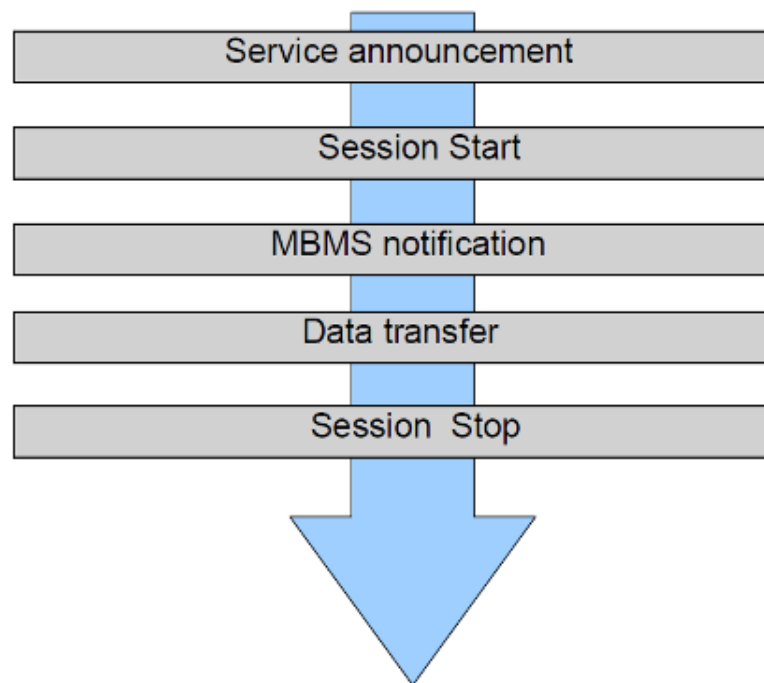
8. *Αποχώρηση (Leaving)*: Η αποχώρηση, δηλαδή η απενεργοποίηση του MBMS multicast από το χρήστη, είναι η διαδικασία με την οποία ένας συνδρομητής αφήνει (παύει να είναι μέλος) μίας multicast ομάδας.

Η χρονική εξέλιξη μίας multicast συνόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.19.

2.7.3.2 Broadcast Λειτουργία

Όπως έχει αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου η multicast μετάδοση είναι μία ειδική περίπτωση της broadcast μετάδοσης, όπου ο χρήστης πρέπει να εγγραφεί στην ομάδα της multicast μετάδοσης. Συνεπώς, στη broadcast λειτουργία δεν συμπεριλαμβάνονται οι φάσεις της συνδρομής, της σύνδεσης και της αποχώρησης. Συνολικά οι φάσεις για την παροχή μίας MBMS broadcast υπηρεσίας περιγράφονται στην Εικόνα 2.20.

Η ακολουθία των φάσεων μπορεί να επαναληφθεί, ανάλογα με τις ανάγκες για τη μετάδοση δεδομένων. Επίσης, είναι δυνατόν οι φάσεις αναγγελίας της υπηρεσίας και της MBMS ειδοποίησης να εκτελούνται παράλληλα με άλλες φάσεις, με σκοπό την πληροφόρηση των UEs που δεν έχουν λάβει ακόμα τη σχετική υπηρεσία.



ΣΧΗΜΑ 2.20: Οι Φάσεις Παροχής μίας MBMS Broadcast Υπηρεσίας

1. *Αναγγελία της υπηρεσίας (Service announcement)*: Πληροφορεί τα UEs για προσεχείς MBMS υπηρεσίες.
2. *Ενεργοποίηση υπηρεσίας τοπικά στο UE (UE local service activation)*: Το τμήμα της MBMS υπηρεσίας στο UE ξεκινά τη λήψη της MBMS bearer υπηρεσίας ώστε να λάβει την MBMS υπηρεσία χρήστη. Στην περίπτωση που μία MBMS υπηρεσία χρήστη μεταφέρεται από περισσότερες από μία MBMS bearer υπηρεσίες, μπορεί να απαιτείται το UE να εκκινήσει τη λήψη όλων των πολλαπλών σχετικών MBMS bearer υπηρεσιών για να λάβει συνολικά την υπηρεσία.
3. *Έναρξη της συνόδου (Session Start)*: Η έναρξη της συνόδου είναι το σημείο στο οποίο το BM-SC είναι έτοιμο να στείλει δεδομένα. Το σημείο αυτό μπορεί να προσδιοριστεί με την έναρξη μίας broadcast συνόδου, όπως ορίζεται στο [47]. Η έναρξη της συνόδου προκαλεί τη δέσμευση των πόρων για τη λειτουργία του απαραίτητου bearer για τη μετάδοση των MBMS δεδομένων. Εάν μία υπηρεσία μεταφέρεται από περισσότερους του ενός bearer, ένα μήνυμα έναρξης συνόδου αποστέλλεται για κάθε MBMS bearer. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να απαιτείται να ενεργοποιήσει το UE τη λήψη όλων των σχετικών bearers.

4. *MBMS ειδοποίηση (MBMS notification)*: Κατά τη διαδικασία αυτή το UE πληροφορείται για επερχόμενη (και ενδεχομένως για τρέχουσα) MBMS broadcast μεταφορά δεδομένων.
5. *Μεταφορά δεδομένων (Data transfer)*: Πρόκειται για τη φάση κατά την οποία τα MBMS δεδομένα μεταφέρονται στα UEs.
6. *Λήξη της συνόδου (Session Stop)*: Είναι το σημείο στο οποίο η MBMS υπηρεσία χρήστη καθορίζει πως δεν θα υπάρχουν άλλα δεδομένα προς αποστολή για κάποια χρονική περίοδο, με την περίοδο αυτή να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δικαιολογείται η αποδέσμευση των πόρων των bearer(s) που είχαν δεσμευθεί για τη σύνοδο.
7. *Ενημέρωση της συνόδου (Session Update)*: Η ενημέρωση της συνόδου χρησιμοποιείται για την ενημέρωση συγκεκριμένων παραμέτρων μίας τρέχουσας MBMS broadcast συνόδου. Οι παράμετροι που μπορούν να ενημερωθούν είναι η περιοχή της MBMS υπηρεσίας και/ή η λίστα των MMEs (μόνο από το BM-SC προς το MBMS GW). Εάν ένας κόμβος λάβει μία ενημέρωση της συνόδου, έχει σαν αποτέλεσμα η ενημέρωση αυτή να σταλεί σε όλους τους επόμενους κόμβους για να τους πληροφορήσει για τις αλλαγές στην υπηρεσία. Όταν μία ενημέρωση της συνόδου, συμπεριλαμβάνοντας τη λίστα παραμέτρων του MME, ληφθεί από το MBMS GW, έχει σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της διαδικασίας έναρξης συνόδου, η οποία αποστέλλεται σε όλους τους νέους κόμβους, και την ενεργοποίηση της διαδικασίας λήξης συνόδου σε όλους τους κόμβους που έχουν αφαιρεθεί από τη λίστα.

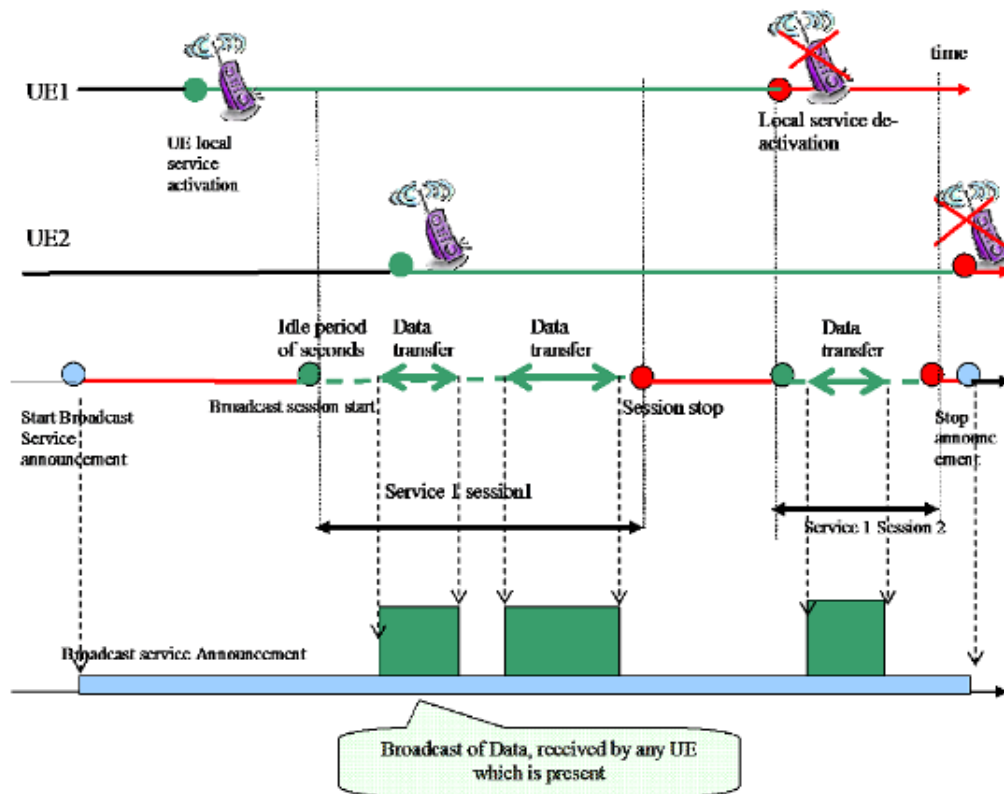
Η εξέλιξη μίας broadcast συνόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.21.

2.7.4 Η Στοιβά Πρωτοκόλλων της Υπηρεσίας MBMS

Η Εικόνα 2.22 παρουσιάζει τη στοιβά πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούν οι MBMS υπηρεσίες χρήστη. Τα σκιασμένα πρωτόκολλα και λειτουργίες βρίσκονται έξω από τους σκοπούς του παρόντος κεφαλαίου και δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά σε αυτά.

2.7.5 Μέθοδοι Παράδοσης Δεδομένων

Το 3GPP στο [27] έχει προσδιορίσει δύο μεθόδους παράδοσης δεδομένων, τη μέθοδο download και τη μέθοδο streaming. Οι δύο αυτές μέθοδοι κάνουν χρήση των MBMS bearers

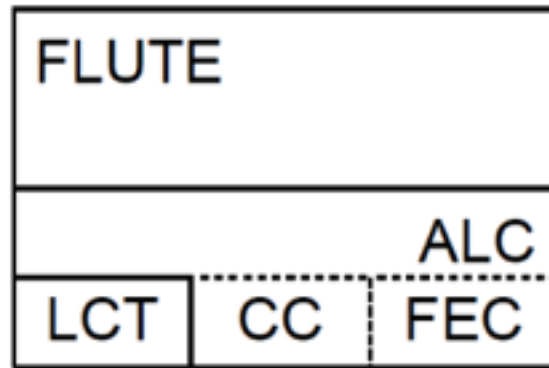


ΣΧΗΜΑ 2.21: Παράδειγμα Χρονικής Εξέλιξης μίας Broadcast Συνόδου

για την παράδοση περιεχομένου στους χρήστες. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι μέθοδοι download και streaming καθώς και άλλες διαδικασίες σχετικές με τις δύο αυτές μεθόδους.

Application(s)									
Service Announcement & Metadata (USD, etc.)	Associated-Delivery Procedures		MBMS Security		MBMS Security	Streaming Codecs (Audio, Video, Speech, etc.)	Download 3GPP file format, Binary data, Still images, Text, etc.	Associated-Delivery Procedures	Service Announcement & Metadata (USD, etc.)
	ptp File Repair	Reception Reporting	Registration	Key Distribution (MSK)					
HTTP		HTTP-digest	MKEY		MKEY	RTP Payload Format	FEC FLUTE		
						SRTP	RTP/RTCP		
					FEC		UDP		
							IP (Multicast) or IP (Unicast)		
							MBMS or ptp Bearer(s)		
							TCP		
							IP (unicast)		
							ptp Bearer		

ΣΧΗΜΑ 2.22: Η Στοιβά Πρωτοκόλλων των MBMS Υπηρεσιών



ΣΧΗΜΑ 2.23: Η Δομή ενός FLUTE Block

2.7.5.1 Η Μέθοδος Download

Η MBMS download μέθοδος χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο File Delivery over Unidirectional Transport (FLUTE) [50] για να παραδώσει περιεχόμενο πάνω από τους MBMS bearers. Το FLUTE εκτελείται πάνω από το πρωτόκολλο Asynchronous Layered Coding (ALC) [51]. Το ALC συνδυάζει το μηχανισμό κατασκευής block Layered Coding Transport (LCT) [52], ένα μηχανισμό κατασκευής block ελέγχου συμφόρησης και το μηχανισμό κατασκευής block του FEC [53], έτσι ώστε να επιτύχει αξιόπιστη μετάδοση, χωρίς συμφόρηση, του περιεχομένου σε έναν απεριόριστο αριθμό παραληπτών από έναν αποστολέα. Όπως αναφέρεται στο [51], ο έλεγχος συμφόρησης δεν είναι κατάλληλος για τον τύπο του περιβάλλοντος μετάδοσης στο οποίο εκτελείται η MBMS download μετάδοση και έτσι δεν χρησιμοποιείται έλεγχος συμφόρησης σε αυτή τη μέθοδο μετάδοσης. Στην Εικόνα 2.23 παρουσιάζεται η δομή της κατασκευής του FLUTE block. Το FLUTE μεταφέρεται πάνω σε UDP/IP ροές και είναι ανεξάρτητο από την έκδοση του IP πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται καθώς και των χαμηλότερων πρωτοκόλλων του επιπέδου ζεύξης.

Το ALC χρησιμοποιεί τη διαδικασία κατασκευής block του LCT για να παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης συνόδου. Το LCT έχει αρκετά καθορισμένα και μη καθορισμένα πεδία τα οποία κληρονομούνται και καθορίζονται από το ALC. Το ALC χρησιμοποιεί το μηχανισμό FEC για να παρέχει αξιοπιστία. Ο μηχανισμός FEC επιτρέπει την επιλογή ενός κατάλληλου κώδικα FEC για να χρησιμοποιηθεί με το ALC, παρέχοντας όμως και την επιλογή να μην χρησιμοποιηθεί κανένας κώδικας FEC, όπου απλά τα αρχικά δεδομένα αποστέλλονται χωρίς FEC κωδικοποίηση. Το ALC δεν είναι πλήρως καθορισμένο και γενικά μεταφέρει δυαδικά αντικείμενα πεπερασμένου ή μη μεγέθους. Το FLUTE είναι ένα πλήρως καθορισμένο

πρωτόκολλο για τη μεταφορά αρχείων (κάθε είδους διακριτών δυαδικών αντικειμένων) και χρησιμοποιεί για αυτό το σκοπό τα File Description Table (FDT) Instances, ώστε να προσφέρει έναν κατάλογο των τρέχοντων αρχείων και των απαραίτητων παραμέτρων τους, για μία FLUTE σύνοδο.

Ο σκοπός της μεθόδου download είναι να μεταδώσει περιεχόμενο σε αρχεία. Στα πλαίσια του MBMS download, ένα αρχείο περιέχει κάθε τύπο MBMS δεδομένων (π.χ. δυαδικά δεδομένα, εικόνες, κείμενο, μεταδεδομένα αναγγελίας υπηρεσίας). Ο όρος αρχείο χρησιμοποιείται για όλα τα αντικείμενα που μεταδίδονται με το FLUTE (με εξαίρεση τα FDT Instances).

Οι εφαρμογές του UE που βασίζονται στην download μέθοδο έχουν τρεις γενικές προσεγγίσεις για να λαμβάνουν αρχεία με χρήση του FLUTE από μία σύνοδο στην οποία έχουν εγγραφεί:

1. Γενική λήψη: Ζητά από το FLUTE να λάβει ελεύθερα όλα τα διαθέσιμα αρχεία. Η γενική λήψη μπορεί να είναι κατάλληλη για συνόδους με περιορισμένο αριθμό και/ή μέγεθος αρχείων, παρότι η αβεβαιότητα για την ποιότητα και το περιεχόμενο των αρχείων καθιστά αυτή την προσέγγιση ανεπιθύμητη.
2. Λήψη ενός αντιγράφου: Ζητά από το FLUTE να λάβει ένα αντίγραφο από ένα ή περισσότερα συγκεκριμένα αρχεία (τα οποία καθορίζονται από το αναγνωριστικό fileURI) και πιθανώς να εγκαταλείψουν τη σύνοδο μετά την ολοκλήρωση της λήψης των καθορισμένων αρχείων. Καθορίζοντας το αρχείο προς λήψη εξασφαλίζεται πως το UE έχει ένα άνω όριο στην ποσότητα των αρχείων που μπορεί να λάβει. Η προσέγγιση της λήψης ενός αντιγράφου απαιτεί τη γνώση του αναγνωριστικού των αρχείων (fileURIs).
3. Ενημερωμένη λήψη: Ζητά από το FLUTE να λάβει ένα ή περισσότερα συγκεκριμένα αρχεία και να συνεχίσει να λαμβάνει κάθε ενημέρωση αυτών των αρχείων. Όπως και με τη λήψη ενός αντιγράφου, η προσέγγιση της ενημερωμένης λήψης φράσσει την ποσότητα των αρχείων που μπορεί να ληφθούν και απαιτεί τη γνώση του αναγνωριστικού των αρχείων.

Συνήθως για κάθε MBMS σύνοδο χρησιμοποιείται ένα FDT Instance, συνεπώς συνίσταται πως κάθε MBMS σύνοδος πρέπει να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες επαναλήψεις του ίδιου FDT Instance.

Γενικά, οι MBMS πελάτες και εξυπηρετητές που υποστηρίζουν τη μέθοδο MBMS download πρέπει να υλοποιούν τις προδιαγραφές του FLUTE, όπως ορίζονται στο [50], καθώς επίσης του ALC [51] και τα χαρακτηριστικά του LCT [52] που κληρονομεί το FLUTE. Επιπλέον, αρκετά προαιρετικά και εκτεταμένα θέματα του FLUTE πρέπει να υποστηρίζονται, όπως περιγράφονται αναλυτικά στο [27].

2.7.5.2 Η Μέθοδος Streaming

Ο σκοπός της MBMS streaming μεθόδου παράδοσης είναι η παράδοση συνεχών πολυμεσικών δεδομένων (δηλαδή φωνή, ήχο, video) πάνω από έναν MBMS bearer. Επίσης, είναι δυνατή η χρήση του MBMS streaming πάνω σε unicast bearer. Η μέθοδος streaming συμπληρώνει την download μέθοδο παράδοσης, η οποία αποτελείται από την παράδοση των αρχείων. Η μέθοδος streaming είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη multicast και broadcast μετάδοση προγραμματισμένου streaming περιεχομένου.

Το Real-Time Transport Protocol (RTP) είναι το πρωτόκολλο μεταφοράς για τη μέθοδο MBMS streaming. Το RTP παρέχει τα μέσα για την αποστολή πραγματικού χρόνου ή streaming δεδομένων πάνω από το πρωτόκολλο UDP και χρησιμοποιείται ήδη για τη μεταφορά στην υπηρεσία μεταγωγής πακέτου streaming (Packet-switched Streaming Service-PSS) του 3GPP. Επίσης, το RTP παρέχει το RTP Control Protocol (RTCP) για παροχή ανάδρασης σχετικά με την ποιότητα της μετάδοσης.

Οι διαφορετικοί τύποι του RTP payload που χρησιμοποιούνται από τη μέθοδο MBMS streaming έχουν πάρα πολλά κοινά στοιχεία με τους τύπους που ορίζονται για την υπηρεσία PSS στο [57]. Για τη μεταφορά RTP/UDP/IP ροών συνεχών πολυμέσων πρέπει να χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι RTP payload:

1. Ο τύπος RTP payload του κωδικοποιητή φωνής στενού εύρους ζώνης AMR σύμφωνα με το [58]. Ένας χρήστης MBMS δεν απαιτείται να υποστηρίζει συνόδους πολλαπλών καναλιών
2. Ο τύπος RTP payload του κωδικοποιητή φωνής ευρείας ζώνης AMR σύμφωνα με το [58]. Ένας χρήστης MBMS δεν απαιτείται να υποστηρίζει συνόδους πολλαπλών καναλιών

3. Ο τύπος RTP payload του επεκτεταμένου κωδικοποιητή ευρείας ζώνης AMR σύμφωνα με το [59]
4. Ο τύπος RTP payload του βελτιωμένου aacPlus κωδικοποιητή σύμφωνα με το [60] και συγκεκριμένα του χαμηλού Bit-Rate AAC ή του υψηλού Bit-Rate AAC
5. Ο τύπος RTP payload του κωδικοποιητή video H.264 (AVC) σύμφωνα με το [61]
6. Ο τύπος RTP payload του μηχανισμού Dynamic and Interactive Multimedia Scenes (DIMS) σύμφωνα με το [62]
7. Ο τύπος RTP payload του μηχανισμού χρονοσυγχρονισμένου κειμένου σύμφωνα με το [63]

Το Session Description Protocol (SDP) παρέχεται για την περιγραφή μίας streaming συνόδου, μέσω μίας διαδικασίας ανακάλυψης στον MBMS χρήστη. Το SDP περιγράφει μία ή περισσότερες RTP συνόδους, οι οποίες αποτελούν μέρος μίας MBMS streaming συνόδου. Το SDP πρέπει να χρησιμοποιείται σύμφωνα με το [64].

Οι παράμετροι περιγραφής συνόδου μίας MBMS streaming συνόδου πρέπει να περιλαμβάνουν:

- Την IP διεύθυνση του αποστολέα
- Το πλήθος των πολυμέσων της συνόδου
- Την IP διεύθυνση προορισμού και τον αριθμό της θύρας για κάθε μία και για όλες τις RTP συνόδους της MBMS streaming συνόδου
- Τη χρονική στιγμή έναρξης και λήξης της συνόδου
- Το αναγνωριστικό (ID) του πρωτοκόλλου (π.χ. RTP/AVP)
- Τους τύπους των πολυμέσων
- Το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους SDP τροποποιητές εύρους ζώνης
- Τη λειτουργία του MBMS bearer ανά πολυμεσική ροή
- Τη διαμόρφωση του μηχανισμού FEC και τις σχετικές παραμέτρους του

- Τη γλώσσα(ες) της κάθε υπηρεσίας πολυμέσων
- Μετρικές Quality of Experience (QoE)

2.7.6 Συμπληρωματικές Λειτουργίες των Μεθόδων Παράδοσης

Οι συμπληρωματικές λειτουργίες που σχετίζονται με τις μεθόδους παράδοσης δεδομένων, γενικά αναφέρονται σε διαδικασίες που εκτελούνται πριν, κατά τη διάρκεια ή μετά τη φάση μετάδοσης των MBMS δεδομένων. Παρέχουν βοηθητικά χαρακτηριστικά στις MBMS υπηρεσίες, δρώντας ανεξάρτητα ή σε συνεργασία με τις MBMS μεθόδους μετάδοσης και τις συνόδους. Οι λειτουργίες αυτές, οι οποίες επιτρέπεται να εκτελεστούν μόνο μετά τη φάση MBMS μετάδοσης δεδομένων χαρακτηρίζονται ως λειτουργίες μετά-την-παράδοση (post-delivery). Παρότι η υπηρεσία MBMS παρέχει γενικές και επεκτάσιμες τεχνικές για ένα μεγάλο εύρος συμπληρωματικών λειτουργιών που μπορούν να εκτελούνται πριν ή κατά τη διάρκεια της φάσης μετάδοσης, οι δύο βασικότερες συμπληρωματικές λειτουργίες αφορούν post-delivery διαδικασίες και είναι οι διαδικασίες της επισκευής αρχείου και της αναφοράς λήψης περιεχομένου. Αυτές οι λειτουργίες ενεργοποιούνται, εγκαθιστώντας μία point-to-point σύνδεση και χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της MBMS συνόδου. Για να αποφευχθεί η συμφόρηση του δικτύου, τόσο στο uplink όσο και στο downlink, και επίσης για να προστατευθούν οι εξυπηρετητές από καταστάσεις υπερφόρτωσης, οι σχετικές λειτουργίες από διαφορετικά MBMS UEs πρέπει να επιμερίζονται στο χρόνο και στα διάφορα στοιχεία του δικτύου. Γενικά, οι MBMS download παραλήπτες πρέπει να υποστηρίζουν τη λειτουργία της επισκευής αρχείου καθώς και τη λειτουργία της αναφοράς λήψης, ενώ οι MBMS streaming παραλήπτες πρέπει να υποστηρίζουν μόνο τη διαδικασία αναφοράς λήψης.

2.7.6.1 Λειτουργία Επισκευής Αρχείου

Ο σκοπός της λειτουργίας επισκευής αρχείου είναι να επισκευάσει χαμένα ή κατεστραμμένα τμήματα ενός αρχείου της MBMS download μετάδοσης. Σε multicast/broadcast περιβάλλοντα η δυνατότητα κλιμάκωσης γίνεται ένα πολύ σημαντικό ζήτημα όσο το πλήθος των MBMS χρηστών αυξάνεται.

Γενικά, πρέπει να αποφευχθούν τρία προβλήματα:

1. Η πημύρα λόγω ανάδρασης όταν ένα μεγάλο πλήθος MBMS χρηστών ζητά ταυτόχρονα την ενεργοποίηση της επισκευής αρχείου. Αυτό θα προκαλέσει συμφόρηση στην κατεύθυνση του uplink.
2. Εμφάνιση συμφόρησης στο downlink κανάλι όταν μεταφέρονται τα δεδομένα επισκευής αρχείου, σαν αποτέλεσμα της προηγούμενης κατάστασης.
3. Υπερφόρτωση του εξυπηρετητή της επισκευής αρχείου, η οποία προκαλείται πάλι από την εισερχόμενη και εξερχόμενη κίνηση λόγω των αιτημάτων που φθάνουν στον εξυπηρετητή από τους χρήστες και της απόκρισης του εξυπηρετητή σε αυτά.

Τα τρία αυτά προβλήματα σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους και πρέπει να αντιμετωπιστούν ταυτόχρονα, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μία κλιμακωτή και αποδοτική λύση. Η βασική αρχή της λύσης είναι ο επιμερισμός των αιτημάτων επισκευής αρχείου στο χρόνο και σε πολλαπλούς εξυπηρετητές.

Ο MBMS χρήστης:

1. Καθορίζει τη λήξη της μετάδοσης των αρχείων ή των συνόδων.
2. Καθορίζει τα χαμένα δεδομένα μίας MBMS λήψης.
3. Υπολογίζει μία τυχαία χρονική τιμή και επιλέγει έναν εξυπηρετητή επισκευής αρχείου τυχαία από μία λίστα.
4. Στέλνει ένα μήνυμα αιτήματος επισκευής στον επιλεγμένο εξυπηρετητή την υπολογισμένη χρονική στιγμή.

Στη συνέχεια ο εξυπηρετητής επισκευής αρχείου αποκρίνεται με ένα μήνυμα απόκρισης επισκευής, το οποίο είτε περιέχει τα δεδομένα που ζητήθηκαν, παραπέμποντας το χρήστη σε μία MBMS download σύνοδο ή προς έναν άλλο εξυπηρετητή, είτε εναλλακτικά περιγράφει στο χρήστη μία κατάσταση σφάλματος.

2.7.6.2 Λειτουργία Αναφοράς Λήψης

Μετά από μία επιτυχημένη λήψη περιεχομένου, είτε μέσω MBMS bearers, είτε μέσω unicast bearers, είτε μέσω συνδυασμού point-to-multipoint και point-to-point bearers, μπορεί να ξεκινήσει από ένα MBMS UE μία διαδικασία αναφοράς λήψης με προορισμό το BM-SC. Για

τη μέθοδο download, η αναφορά λήψης χρησιμοποιείται για την αναφορά της ολοκλήρωσης λήψης ενός ή περισσότερων αρχείων. Για τη μέθοδο streaming, η αναφορά λήψης χρησιμοποιείται για την αναφορά στατιστικών στοιχείων σχετικών με τη μετάδοση. Εάν οι παράμετροι λειτουργίας του BM-SC απαιτούν την επιβεβαίωση μίας λήψης, τότε ο MBMS παραλήπτης πρέπει να επιβεβαιώσει τη λήψη. Εάν η αναφορά λήψης απαιτείται για στατιστικούς σκοπούς, το BM-SC μπορεί να καθορίσει το ποσοστό των χρηστών που θα συμμετέχουν στη διαδικασία αναφοράς.

Κεφάλαιο 3

Forward Error Correction

Το Forward Error Correction (FEC) είναι μία μέθοδος ελέγχου λαθών, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει ή και να αντικαταστήσει άλλες μεθόδους που προσφέρουν αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Το κύριο χαρακτηριστικό των σχημάτων FEC είναι πως ο αποστολέας προσθέτει πλεονάζουσα πληροφορία στη μεταδιδόμενη πληροφορία προς τον παραλήπτη. Η πληροφορία αυτή, επιτρέπει στον παραλήπτη να ανακατασκευάσει τα πηγαία δεδομένα.

Τέτοια σχήματα αναπόφευκτα προσθέτουν ένα σταθερό επιπλέον φόρτο (overhead) στα μεταδιδόμενα δεδομένα και είναι υπολογιστικά κοστοβόρα. Παρόλα αυτά, σε περιβάλλοντα multicast μετάδοσης, η χρήση FEC τεχνικών προσφέρει πολύ ισχυρά κίνητρα. Η διαδικασία της κωδικοποίησης περιορίζει σημαντικά την επίδραση των διαφορετικών απωλειών δεδομένων που παρουσιάζουν διαφορετικοί παραλήπτες. Το γεγονός αυτό καθιστά τέτοια σχήματα προστασίας ικανά να λειτουργήσουν κλιμακωτά και ανεξάρτητα από το ρυθμό απώλειας πακέτων που εμφανίζει ο κάθε χρήστης. Επιπρόσθετα, η μεγάλη μείωση, που επιφέρουν οι τεχνικές FEC, στο ρυθμό απώλειας πακέτων (Packet Loss Rate-PLR) περιορίζει δραματικά την ανάγκη αποστολής ανάδρασης στον παραλήπτη για την επαναποστολή δεδομένων. Συνεπώς, τα σχήματα FEC μπορούν πολύ απλά να προσφέρουν μία βασική απαίτηση των multicast κινητών υπηρεσιών, η οποία είναι η δυνατότητα κλιμάκωσης σε εφαρμογές με πολλούς χρήστες.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στις μεθόδους παροχής προστασίας ενάντια στις απώλειες δεδομένων κατά τη διαδικασία της μετάδοσης σε multicast περιβάλλοντα. Ακολούθως, περιγράφεται η μέθοδος προστασίας FEC, αναφέροντας την εξέλιξη των κωδίκων

FEC, αναλύοντας τα διαθέσιμα είδη κωδίκων FEC και περιγράφοντας αναλυτικά τις αρχές λειτουργίας τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κώδικες Raptor FEC, περιγράφοντας τη λειτουργία τους και δίνοντας μία ανάλυση της απόδοσής τους.

3.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για την παροχή αξιοπιστίας στα πρωτόκολλα μετάδοσης δεδομένων. Μία κοινή μέθοδος είναι η χρήση του Automatic Repeat request (ARQ). Με τη μέθοδο ARQ, οι παραλήπτες χρησιμοποιούν ένα uplink κανάλι προς τον αποστολέα για να στείλουν αιτήσεις για την επαναμετάδοση των χαμένων πακέτων. Το ARQ λειτουργεί ικανοποιητικά μόνο σε point-to-point πρωτόκολλα, όπως έχει αποδειχθεί από την επιτυχία του TCP/IP. Επίσης, το ARQ χρησιμοποιήθηκε σαν ένα αποτελεσματικό εργαλείο παροχής αξιοπιστίας για point-to-multipoint πρωτόκολλα και συγκεκριμένα για IP multicast πρωτόκολλα. Παρόλα αυτά, όταν ο αριθμός των παραληπτών γίνει αρκετά μεγάλος το ARQ έχει περιορισμούς, με βασικότερο το πρόβλημα της πλημμύρας λόγω ανάδρασης. Ένας άλλος περιορισμός είναι πως οι παραλήπτες μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικό ρυθμό απωλειών πακέτων και έτσι κάποιοι παραλήπτες μπορεί να επιβαρύνονται από άχρηστες επαναποστολές δεδομένων, γεγονός που προκαλεί και σπατάλη εύρους ζώνης για την επαναποστολή πακέτων τα οποία έχουν ληφθεί από την πλειοψηφία των χρηστών.

Σε περιβάλλοντα όπου το ARQ είναι, είτε κοστοβόρο, είτε αδύνατο στην εφαρμογή του επειδή υπάρχει περιορισμένη χωρητικότητα των προς τα πίσω καναλιών ή δεν διατίθενται καθόλου προς τα πίσω κανάλια, όπως στη δορυφορική μετάδοση, μερικές φορές μπορεί να χρησιμοποιείται η προσέγγιση του Carousel δεδομένων [5]. Με το Carousel δεδομένων, ο αποστολέας χωρίζει το μεταδιδόμενο αντικείμενο σε ίσου μήκους τμήματα δεδομένων, τα οποία θα μπορούσαν εδώ να ονομαστούν πηγαία σύμβολα, τα τοποθετεί σε πακέτα και στη συνέχεια ξεκινά την αποστολή των πακέτων αυτών με κυκλικό τρόπο. Οι παραλήπτες λαμβάνουν συνεχώς πακέτα μέχρις ότου να έχουν λάβει ένα αντίγραφο από κάθε πακέτο. Το Carousel δεδομένων έχει το πλεονέκτημα πως δεν απαιτεί την ύπαρξη uplink καναλιού, καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα προς αποστολή από τους παραλήπτες προς τον αποστολέα. Παρόλα αυτά, το Carousel δεδομένων έχει και αυτό περιορισμούς. Για παράδειγμα, εάν ένας παραλήπτης χάσει ένα πακέτο σε ένα γύρο αποστολής, πρέπει να περιμένει έναν ολόκληρο γύρο πριν να έχει πάλι την ευκαιρία να λάβει ξανά το πακέτο. Το γεγονός αυτό, μπορεί επίσης να προκαλέσει σπατάλη του εύρους ζώνης καθώς ο αποστολέας συνεχίζει την κυκλική

μετάδοση και μεταδίδει τα πακέτα μέχρις ότου να μην λείπει κανένα πακέτο από κάποιον παραλήπτη.

Οι κώδικες FEC παρέχουν μία μέθοδο αξιοπιστίας που μπορεί να συμπληρώσει ή να αντικαταστήσει άλλες μεθόδους, ειδικότερα σε point-to-multipoint πρωτόκολλα, όπως το IP multicast. Γενικά στη βιβλιογραφία, το FEC αναφέρεται στην ικανότητα να αντιμετωπίσει και τις απώλειες πακέτων και τις αλλοιώσεις σε επίπεδο bit. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση του IP multicast πρωτοκόλλου, το επίπεδο δικτύου θα ανιχνεύσει τα κατεστραμμένα πακέτα και θα τα απορρίψει ή το επίπεδο μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιήσει τη διαδικασία επικύρωσης πακέτου και να απορρίψει πάλι τα κατεστραμμένα πακέτα. Συνεπώς, η βασική εφαρμογή των κωδίκων FEC είναι σαν κώδικες εξάλειψης (erasure codes). Συγκεκριμένα, τα payloads των πακέτων επεξεργάζονται, χρησιμοποιώντας τον κωδικοποιητή FEC και τα προς μετάδοση αντικείμενα επανασυναρμολογούνται από τη λήψη των πακέτων που περιέχουν την κωδικοποιημένη πληροφορία, χρησιμοποιώντας τον αποκωδικοποιητή FEC.

Η είσοδος ενός FEC κωδικοποιητή είναι ένας αριθμός k ίσου μήκους πηγαίων συμβόλων. Ο FEC κωδικοποιητής παράγει ένα πλήθος κωδικοποιημένων συμβόλων τα οποία έχουν το ίδιο μήκος με τα πηγαία σύμβολα. Το επιλεγμένο μήκος των συμβόλων μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιεί την FEC κωδικοποίηση, ή να είναι σταθερό. Τα κωδικοποιημένα σύμβολα τοποθετούνται σε πακέτα για τη μετάδοση. Το πλήθος των κωδικοποιημένων συμβόλων που τοποθετούνται σε κάθε πακέτο μπορεί να μεταβάλλεται ανά πακέτο, ή μπορεί να είναι σταθερό (συνήθως ένα σύμβολο ανά πακέτο). Επίσης, σε κάθε πακέτο τοποθετείται επαρκής πληροφορία για να αναγνωρίζονται τα συγκεκριμένα κωδικοποιημένα σύμβολα σε κάθε πακέτο. Με τη λήψη κάθε πακέτου, ο παραλήπτης προωθεί τα κωδικοποιημένα σύμβολα στον FEC αποκωδικοποιητή για να ανακατασκευάσει ένα αντίγραφο των k πηγαίων συμβόλων από οποιοδήποτε σύνολο k κωδικοποιημένων συμβόλων. Οι block FEC κώδικες λειτουργούν όπως περιγράφεται παρακάτω. Η είσοδος ενός block FEC κωδικοποιητή είναι τα k πηγαία σύμβολα και ένας αριθμός n . Ο κωδικοποιητής παράγει ένα σύνολο από n κωδικοποιημένα σύμβολα. Ο κωδικοποιητής χαρακτηρίζεται ως συστηματικός εάν παράγει $n - k$ πλεονάζοντα σύμβολα δημιουργώντας ένα κωδικοποιημένο block n κωδικοποιημένων συμβόλων, αποτελούμενο συνολικά από τα k πηγαία σύμβολα και τα $n - k$ πλεονάζοντα σύμβολα. Ένας block FEC αποκωδικοποιητής έχει την ιδιότητα πως οποιαδήποτε k από τα n κωδικοποιημένα σύμβολα του block είναι επαρκή για την ανακατασκευή των k αρχικών πηγαίων συμβόλων.

Οι επεκτάσιμοι FEC κώδικες λειτουργούν ως εξής. Ένας επεκτάσιμος FEC κωδικοποιητής δέχεται σαν είσοδο k πηγαία σύμβολα και παράγει τόσα μοναδικά κωδικοποιημένα σύμβολα όσα ζητούνται, με το σύνολο του χρόνου που απαιτείται για την παραγωγή κάθε κωδικοποιημένου συμβόλου να είναι το ίδιο ανεξάρτητα από τα πόσα κωδικοποιημένα σύμβολα παράγονται. Ένας επεκτάσιμος FEC αποκωδικοποιητής έχει την ιδιότητα πως οποιαδήποτε k από τα μοναδικώς κωδικοποιημένα σύμβολα είναι επαρκή για την ανακατασκευή των k αρχικών πηγαίων συμβόλων.

Οι παραπάνω ορισμοί περιγράφουν την ιδανική περίπτωση, όπου η λήψη οποιονδήποτε από τα k κωδικοποιημένα σύμβολα είναι επαρκής για την ανάκτηση των k πηγαίων συμβόλων, όπου σε αυτή την περίπτωση το overhead της λήψης είναι 0%. Για κάποιους πρακτικούς FEC κώδικες, ελαφρώς περισσότερα από k κωδικοποιημένα σύμβολα απαιτούνται για την ανάκτηση των k πηγαίων συμβόλων. Εάν απαιτούνται $k * (1 + ep)$ κωδικοποιημένα σύμβολα, ορίζουμε το overhead της λήψης σαν $ep * 100\%$. Για παράδειγμα εάν απαιτούνται $k * 1.05$ κωδικοποιημένα σύμβολα τότε το overhead είναι 5%.

Πάνω σε μία άλλη, πιο αόριστη διάσταση, οι FEC κώδικες κατηγοριοποιούνται σαν μικροί ή μεγάλοι. Ένας μικρός FEC κώδικας είναι αποδοτικός υπό την έννοια των απαιτήσεων σε χρόνο επεξεργασίας για την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση για μικρές τιμές του k , ενώ ένας μεγάλος FEC κώδικας είναι αποδοτικός για πολύ μεγαλύτερες τιμές του k . Υπάρχουν υλοποιήσεις block FEC κωδίκων οι οποίοι έχουν χρόνο κωδικοποίησης ανάλογο των $n - k$ φορών του μήκους των k πηγαίων συμβόλων και χρόνο αποκωδικοποίησης ανάλογο των l φορών του μήκους των k πηγαίων συμβόλων, όπου το l είναι το πλήθος των χαμένων πηγαίων συμβόλων από τα k ληφθέντα κωδικοποιημένα σύμβολα με το l να μπορεί να είναι τόσο μεγάλο όσο και το k . Λόγω του ρυθμού αύξησης των χρόνων κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης σε σχέση με το k και το $n - k$, τέτοιου είδους κώδικες είναι συνήθως μικροί block FEC κώδικες. Υπάρχουν block FEC κώδικες με μικρό overhead που μπορούν να παράγουν n κωδικοποιημένα σύμβολα και να αποκωδικοποιήσουν τα k πηγαία σύμβολα σε χρόνο ανάλογο του μήκους των n κωδικοποιημένων συμβόλων. Αυτοί οι κώδικες συνήθως είναι μεγάλοι block FEC κώδικες. Επίσης υπάρχουν επεκτάσιμοι FEC κώδικες με μικρό overhead που μπορούν να παράγουν κάθε κωδικοποιημένο σύμβολο σε χρόνο σχεδόν ανάλογο με το μήκος του και μπορούν να αποκωδικοποιήσουν τα k πηγαία σύμβολα πάλι σε χρόνο σχεδόν ανάλογο του μήκους τους. Αυτοί θεωρούνται μεγάλοι επεκτάσιμοι FEC κώδικες.

Ίδανικά, οι FEC κώδικες στα πλαίσια της IP multicast μετάδοσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν κωδικοποιημένα σύμβολα που μεταδίδονται σε πακέτα, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ληφθέν πακέτο να είναι πλήρως ωφέλιμο στον παραλήπτη για την ανακατασκευή του μεταδιδόμενου αντικειμένου ανεξάρτητα από την κατάσταση προηγούμενων ληφθέντων πακέτων. Έτσι, εάν κάποια πακέτα χαθούν κατά τη μετάδοση, ο παραλήπτης μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε άλλη ακολουθία ίσου πλήθους πακέτων για να ανακατασκευάσει τα αρχικά δεδομένα. Αυτά τα πακέτα μπορεί να μεταδίδονται σαν προστασία ή να ζητούν την αποστολή τους οι παραλήπτες. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξαλείψει τα προβλήματα του ARQ και του Carousel δεδομένων και να αυξήσει δραματικά την ικανότητα κλιμάκωσης του πρωτοκόλλου, ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει αποδοτικά ένα μεγάλο πλήθος παραληπτών.

3.2 Εφαρμογή των FEC κωδίκων

Για κάποια αξιόπιστα IP multicast πρωτόκολλα, οι FEC κώδικες χρησιμοποιούνται σε συνεργασία με το ARQ για να προσφέρουν αξιοπιστία στη μετάδοση. Για παράδειγμα, ένα μεγάλο αντικείμενο μπορεί να χωριστεί σε ένα πλήθος πηγαίων blocks αποτελούμενα από ένα μικρό αριθμό πηγαίων συμβόλων και στον πρώτο γύρω της μετάδοσης μπορούν να μεταδοθούν όλα τα πηγαία σύμβολα από όλα τα πηγαία blocks. Στη συνέχεια, οι παραλήπτες μπορεί να αναφέρουν στον αποστολέα το πλήθος των πηγαίων συμβόλων που δεν έχουν λάβει από κάθε πηγαίο block. Ο αποστολέας μπορεί να υπολογίσει το μέγιστο αριθμό των χαμένων πηγαίων συμβόλων κάθε πηγαίου block από όλους τους παραλήπτες. Βάσει αυτού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μικρός block FEC κωδικοποιητής για να παράγει για κάθε πηγαίο block ένα πλήθος από πλεονάζοντα σύμβολα ίσο με το υπολογισμένο μέγιστο πλήθος των χαμένων συμβόλων κάθε block. Στο δεύτερο γύρο της μετάδοσης, ο εξυπηρετητής μπορεί να στείλει τα πλεονάζοντα σύμβολα από όλα τα blocks. Σε αυτό το παράδειγμα, εάν δεν υπάρχουν απώλειες κατά τη μετάδοση του δεύτερου γύρου, τότε όλοι οι παραλήπτες θα είναι ικανοί να ανακατασκευάσουν ένα ακριβές αντίγραφο κάθε αρχικού block. Σε αυτή την περίπτωση, ακόμα κι εάν από διαφορετικούς παραλήπτες λείπουν διαφορετικά σύμβολα από διαφορετικά blocks, η μετάδοση των πλεοναζόντων συμβόλων για ένα συγκεκριμένο block είναι χρήσιμη σε όλους τους παραλήπτες από τους οποίους λείπουν σύμβολα από το συγκεκριμένο block.

Σε άλλα αξιόπιστα IP multicast πρωτόκολλα, οι FEC κώδικες χρησιμοποιούνται κατά έναν τρόπο σύμφωνα με το Carousel δεδομένων και ονομάζονται FEC Carousel δεδομένων. Για

παράδειγμα, ένα FEC Carousel δεδομένων που χρησιμοποιεί ένα μεγάλο FEC block κώδικα λειτουργεί ως εξής. Ο μεγάλου block FEC κωδικοποιητής παράγει n κωδικοποιημένα σύμβολα θεωρώντας όλα τα k πηγαία σύμβολα ενός αντικειμένου σαν ένα block. Ο αποστολέας αποστέλλει κυκλικά τα n κωδικοποιημένα σύμβολα σε πακέτα με την ίδια σειρά σε κάθε γύρο. Κατά αυτό τον τρόπο ένα FEC Carousel δεδομένων μπορεί να προσφέρει πολύ καλύτερη προστασία από απώλειες πακέτων σε σχέση με ένα απλό Carousel δεδομένων. Για παράδειγμα, ένας παραλήπτης μπορεί να λάβει μέρος στη λήψη οποιαδήποτε χρονική στιγμή και όσο ο παραλήπτης λαμβάνει τουλάχιστον k κωδικοποιημένα σύμβολα από την αποστολή των n σε σύνολο, θα μπορεί να ανακτήσει πλήρως το μεταδιδόμενο αντικείμενο. Η μέθοδος αυτή, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί όταν το αντικείμενο χωρίζεται σε blocks και εφαρμόζεται ένας μικρός block FEC κώδικας σε κάθε block ξεχωριστά. Σε αυτή την περίπτωση είναι χρήσιμο να χρησιμοποιείται η τεχνική του interleaving στα σύμβολα διαφορετικών blocks.

Τέλος, σε κάποια άλλα αξιόπιστα IP multicast πρωτόκολλα, η μέθοδος για την παροχή αξιοπιστίας είναι η παραγωγή αρκετών κωδικοποιημένων συμβόλων έτσι ώστε κάθε κωδικοποιημένο σύμβολο να μεταδίδεται μόνο μία φορά. Για παράδειγμα, ο αποστολέας μπορεί να αποφασίσει εξ αρχής πόσα κωδικοποιημένα σύμβολα θα μεταδώσει, χρησιμοποιώντας έναν FEC κώδικα για να παράγει αυτό το πλήθος των κωδικοποιημένων συμβόλων και στη συνέχεια να μεταδώσει τα σύμβολα αυτά σε όλους τους παραλήπτες. Η μέθοδος αυτή βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή σε streaming πρωτόκολλα, όπου για παράδειγμα το stream χωρίζεται σε blocks. Από τα πηγαία σύμβολα κάθε block παράγονται τα κωδικοποιημένα σύμβολα με χρήση ενός FEC κώδικα και στα συνέχεια τα σύνολα των κωδικοποιημένων συμβόλων μεταδίδονται ακολουθιακά με χρήση του IP multicast.

3.3 Κώδικες FEC

3.3.1 Απλοί Κώδικες

Υπάρχουν κάποιοι πολύ απλοί κώδικες οι οποίοι είναι αποτελεσματικοί στην αντιμετώπιση απωλειών πακέτων κάτω από καταστάσεις πολύ μικρών απωλειών. Ένας πολύ απλός τρόπος παροχής προστασίας από μόνο μία απώλεια είναι, ο χωρισμός του αντικειμένου σε σταθερού μεγέθους πηγαία σύμβολα και στη συνέχεια η προσθήκη ενός πλεονάζοντος συμβόλου που θα είναι η ισοτιμία (XOR) όλων των πηγαίων συμβόλων. Το μέγεθος ενός

πηγαίου συμβόλου επιλέγεται κατάλληλα, έτσι ώστε να ταιριάζει απόλυτα στο payload ενός πακέτου, δηλαδή εάν το payload του πακέτου είναι 512 bytes τότε κάθε πηγαίο σύμβολο πρέπει να είναι 512 bytes. Η επικεφαλίδα κάθε πακέτου περιέχει επαρκής πληροφορίες για την αναγνώριση του payload. Ένα παράδειγμα αυτού είναι το αναγνωριστικό (ID) ενός κωδικοποιημένου συμβόλου. Τα IDs των κωδικοποιημένων συμβόλων μπορεί να αποτελούνται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι μία σημαία κωδικοποίησης που τίθεται στην τιμή 1 εάν το κωδικοποιημένο σύμβολο είναι ένα πηγαίο σύμβολο και στην τιμή 0 εάν το κωδικοποιημένο σύμβολο είναι ένα πλεονάζον σύμβολο. Το δεύτερο τμήμα του ID, είναι το ID του πηγαίου συμβόλου εάν η σημαία κωδικοποίησης είναι 1 ή το ID του πλεονάζοντος συμβόλου εάν η σημαία κωδικοποίησης είναι 0. Τα IDs των πηγαίων συμβόλων μπορεί να αριθμούνται από το 0 έως το $k - 1$ και το ID του πλεονάζοντος συμβόλου μπορεί να είναι 0. Για παράδειγμα, εάν το αντικείμενο αποτελείται από τέσσερα πηγαία σύμβολα που έχουν τις τιμές a , b , c και d , τότε η τιμή του πλεονάζοντος συμβόλου είναι $e = a \text{ XOR } b \text{ XOR } c \text{ XOR } d$. Έτσι, τα πακέτα που μεταφέρουν αυτά τα σύμβολα μπορεί να μοιάζουν σαν:

$$(1, 0 : a), (1, 1 : b), (1, 2 : c), (1, 3 : d), (0, 0 : e)$$

Σε αυτό το παράδειγμα, το ID του κωδικοποιημένου συμβόλου αποτελείται από τις δύο πρώτες τιμές, όπου η πρώτη τιμή είναι η σημαία κωδικοποίησης και η δεύτερη τιμή είναι είτε το ID του πηγαίου συμβόλου, είτε το ID του πλεονάζοντος συμβόλου. Η τελευταία τιμή του πακέτου είναι η τιμή του κάθε κωδικοποιημένου συμβόλου. Κάθε πηγαίο σύμβολο του αντικειμένου μπορεί να ανακτηθεί σαν την ισοτιμία όλων των άλλων συμβόλων. Για παράδειγμα, εάν έχουν ληφθεί τα πακέτα:

$$(1, 0 : a), (1, 1 : b), (1, 3 : d), (0, 0 : e)$$

τότε το χαμένο πηγαίο σύμβολο με ID πηγαίου συμβόλου 2 μπορεί να ανακτηθεί υπολογίζοντας την ποσότητα $a \text{ XOR } b \text{ XOR } d \text{ XOR } e = c$.

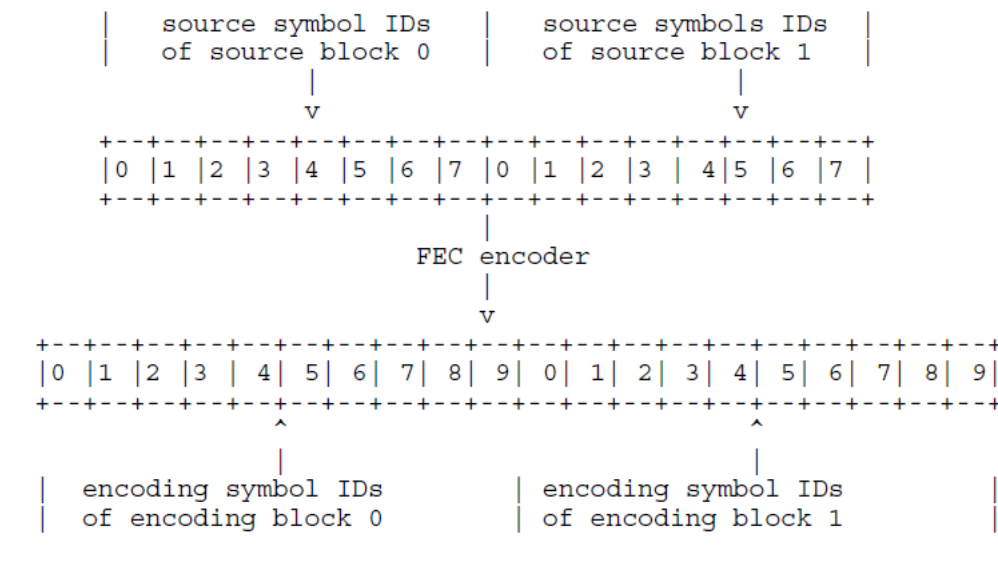
Ένας άλλος τρόπος σχηματισμού του ID του κωδικοποιημένου συμβόλου είναι οι τιμές $0, \dots, k - 1$ να ανατίθενται στα k πηγαία σύμβολα και η τιμή k να ανατίθεται στο πλεονάζον σύμβολο, το οποίο θα είναι η πράξη XOR των k πηγαίων συμβόλων.

Όταν το πλήθος των πηγαίων συμβόλων του αντικειμένου είναι μεγάλο, ένας απλός block κώδικας ανάλογης λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Σε αυτή την περίπτωση, τα πηγαία

σύμβολα ομαδοποιούνται σε πηγαία blocks πλήθους k διαδοχικών συμβόλων το καθένα, όπου το k μπορεί να είναι διαφορετικό για διαφορετικά blocks. Εάν ένα block αποτελείται από k πηγαία σύμβολα, τότε ένα πλεονάζον σύμβολο προστίθεται για να σχηματιστεί ένα κωδικοποιημένο block αποτελούμενο από $k + 1$ κωδικοποιημένα σύμβολα. Έτσι, ένα πηγαίο block αποτελούμενο από k πηγαία σύμβολα μπορεί να ανακτηθεί από οποιαδήποτε k από τα $k + 1$ κωδικοποιημένα σύμβολα του σχετικού block. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθούν λίγο πιο περίπλοκοι τρόποι για να χρησιμοποιηθούν πλεονάζοντα σύμβολα με χρήση της ισοτιμίας. Για παράδειγμα, μπορεί να δημιουργηθεί ένα block αποτελούμενο από k πηγαία σύμβολα σε ένα τετραγωνικό μητρώο $\rho \times \rho$, όπου το ρ θα είναι η τετραγωνική ρίζα του k . Στη συνέχεια, για κάθε γραμμή του μητρώου προστίθεται ένα πλεονάζον σύμβολο που είναι η ισοτιμία όλων των πηγαίων συμβόλων της γραμμής. Ομοίως, για κάθε στήλη προστίθεται ένα πλεονάζον σύμβολο που είναι η ισοτιμία όλων των πηγαίων συμβόλων της στήλης. Έτσι, κάθε γραμμή του μητρώου μπορεί να ανακτηθεί από οποιαδήποτε ρ από τα $\rho + 1$ σύμβολα της γραμμής και ομοίως για κάθε στήλη. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κώδικες που χρησιμοποιούν περισσότερες από δύο διαστάσεις με την ίδια λογική.

3.3.2 Μικροί Block FEC Κώδικες

Τα πρωτόκολλα αξιόπιστης IP multicast μετάδοσης μπορούν να χρησιμοποιούν έναν block (n, k) FEC κώδικα [6]. Σε τέτοιους κώδικες, τα k πηγαία σύμβολα κωδικοποιούνται σε $n > k$ κωδικοποιημένα σύμβολα, έτσι ώστε οποιαδήποτε k από τα κωδικοποιημένα σύμβολα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανακατασκευή των αρχικών k πηγαίων συμβόλων. Συνήθως, οι block κώδικες είναι συστηματικοί κώδικες, το οποίο σημαίνει πως τα n κωδικοποιημένα σύμβολα αποτελούνται από τα k πηγαία σύμβολα και τα $n - k$ πλεονάζοντα σύμβολα που παράγονται από τα k πηγαία σύμβολα, όπου το μέγεθος ενός πλεονάζοντος συμβόλου είναι το ίδιο με αυτό του πηγαίου συμβόλου. Για παράδειγμα, ο πρώτος απλός XOR κώδικας που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο είναι ένας $(k + 1, k)$ κώδικας. Γενικά, είναι επιθυμητή η επιλογή του n να είναι μεγαλύτερη του $k + 1$, καθώς κάτι τέτοιο μπορεί να παρέχει πολύ καλύτερη προστασία έναντι σε απώλειες. Ένα πολύ διαδεδομένο παράδειγμα τέτοιων τύπων κωδίκων είναι η κατηγορία των Reed-Solomon κωδίκων [8], οι οποίοι βασίζονται σε αλγεβρικές μεθόδους που χρησιμοποιούν πεπερασμένα σύνολα. Άλλες υλοποιήσεις (n, k) FEC κωδίκων χρησιμοποιούνται αποδοτικά και από προσωπικούς υπολογιστές [7].



ΣΧΗΜΑ 3.1: Ένας FEC Block Κωδικοποιητής

Πρακτικά, οι τιμές του k και του n πρέπει να είναι μικρές (π.χ. μικρότερες από 256) για τέτοιου είδους FEC κώδικες καθώς οι μεγάλες τιμές κάνουν την κωδικοποίηση και την αποκωδικοποίηση απαγορευτικά κοστοβόρες. Καθώς πολλά αντικείμενα θα είναι μεγαλύτερα από k σύμβολα για λογικές τιμές του k και του μήκους του συμβόλου (π.χ. μεγαλύτερα από 16 kB για $k = 16$ χρησιμοποιώντας σύμβολα του 1 kB), μπορούν να χωριστούν σε ένα πλήθος από πηγαία blocks. Κάθε πηγαίο block αποτελείται από k πηγαία σύμβολα, όπου το k μπορεί να διαφέρει μεταξύ διαφορετικών πηγαίων blocks. Ο κωδικοποιητής FEC χρησιμοποιείται για να παράγει από ένα πηγαίο block, n κωδικοποιημένα σύμβολα, όπου το πλήθος n του κωδικοποιημένου block μπορεί να διαφέρει για κάθε πηγαίο block. Για να ανακτήσει πλήρως ένας παραλήπτης το αντικείμενο, πρέπει να λάβει k διαφορετικά (δλδ. με διαφορετικά IDs κωδικοποιημένου συμβόλου) κωδικοποιημένα σύμβολα από το κάθε αντίστοιχο κωδικοποιημένο block. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου FEC κωδικοποιητή παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το αντικείμενο χωρίζεται σε δύο πηγαία blocks αποτελούμενα από οκτώ πηγαία σύμβολα το καθένα και ο FEC κωδικοποιητής παράγει δύο πλεονάζοντα σύμβολα (σύνολο δέκα κωδικοποιημένα σύμβολα) για το κάθε block.

Σε πολλές περιπτώσεις, ένα αντικείμενο χωρίζεται σε ίσου μήκους πηγαία blocks αποτελούμενα το καθένα από k συνεχή πηγαία σύμβολα του αντικειμένου, δηλαδή το block c αποτελείται από τα πηγαία σύμβολα που ανήκουν στο εύρος $[ck, (c + 1)k - 1]$. Αυτό εξασφαλίζει πως ο FEC κωδικοποιητής μπορεί να βελτιστοποιηθεί για το χειρισμό ενός συγκεκριμένου αριθμού k πηγαίων συμβόλων. Επίσης, εξασφαλίζει πως οι αναφορές στη μνήμη γίνονται

τοπικά όταν ο αποστολέας διαβάζει τα πηγαία σύμβολα που θα κωδικοποιήσει και όταν ο παραλήπτης διαβάζει τα κωδικοποιημένα σύμβολα που θα αποκωδικοποιήσει. Η τοπικότητα στις αναφορές είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν το αντικείμενο αποθηκεύεται σε δίσκους, καθώς μειώνει τις απαιτούμενες αναζητήσεις στο δίσκο. Ο αριθμός του block και το ID του πηγαίου συμβόλου μέσα στο block μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να καθοριστεί μοναδικά ένα πηγαίο σύμβολο του αντικειμένου. Εάν το μέγεθος του αντικειμένου δεν είναι πολλαπλάσιο των k πηγαίων συμβόλων, τότε το τελευταίο πηγαίο block θα περιλαμβάνει λιγότερα από k σύμβολα.

Η αρίθμηση των blocks μπορεί να είναι συνεχής, ξεκινώντας από το μηδέν. Τα κωδικοποιημένα σύμβολα ενός block μπορεί να καθοριστούν μοναδικά από ένα ID κωδικοποιημένου συμβόλου. Ένας τρόπος καθορισμού των κωδικοποιημένων συμβόλων ενός block είναι ο συνδυασμός μίας σημαίας κωδικοποίησης, η οποία καθορίζει το σύμβολο σαν πηγαίο ή πλεονάζον σύμβολο, μαζί με είτε ένα ID πηγαίου συμβόλου είτε ένα ID πλεονάζοντος συμβόλου. Για παράδειγμα, εάν το αντικείμενο αποτελείται από 10 πηγαία σύμβολα με τιμές $a, b, c, d, e, f, g, h, i$ και j , και το $k = 5$ και το $n = 8$, τότε δημιουργούνται δύο πηγαία blocks αποτελούμενα από 5 σύμβολα το καθένα και δύο κωδικοποιημένα blocks αποτελούμενα από 8 σύμβολα το καθένα. Έστω p, q και r οι τιμές των πλεοναζόντων συμβόλων για το πρώτο κωδικοποιημένο block και x, y και z οι τιμές για το δεύτερο κωδικοποιημένο block. Τότε τα κωδικοποιημένα σύμβολα μαζί με τα αναγνωριστικά τους είναι:

$$(0, 1, 0 : a), (0, 1, 1 : b), (0, 1, 2 : c), (0, 1, 3 : d), (0, 1, 4 : e), \\ (0, 0, 0 : p), (0, 0, 1 : q), (0, 0, 2 : r), (1, 1, 0 : f), (1, 1, 1 : g), \\ (1, 1, 2 : h), (1, 1, 3 : i), (1, 1, 4 : j), (1, 0, 0 : x), (1, 0, 1 : y), (1, 0, 2 : z).$$

Σε αυτό το παράδειγμα, η πρώτη τιμή καθορίζει τον αριθμό του block και οι επόμενες δύο τιμές καθορίζουν μαζί το κωδικοποιημένο σύμβολο του block, δηλαδή το ID του κωδικοποιημένου συμβόλου αποτελείται από τη σημαία κωδικοποίησης μαζί με το ID του πηγαίου συμβόλου ή το ID του πλεονάζοντος συμβόλου, ανάλογα με την τιμή της σημαίας κωδικοποίησης. Η τελευταία τιμή είναι το κωδικοποιημένο σύμβολο. Κάθε block μπορεί να ανακτηθεί από οποιαδήποτε 5 από τα 8 κωδικοποιημένα σύμβολα που ανήκουν σε αυτό το block. Ένας άλλος τρόπος για να καθοριστούν μοναδικά τα κωδικοποιημένα σύμβολα μέσα σε ένα block είναι να χρησιμοποιηθούν οι τιμές $0, \dots, k - 1$ για τα IDs των κωδικοποιημένων συμβόλων και οι τιμές $k, \dots, n - 1$ για τα IDs των πλεοναζόντων συμβόλων.

3.3.3 Μεγάλοι Block FEC Κώδικες

Οι κώδικες Tornado [9–11] είναι μεγάλοι block FEC κώδικες που προσφέρονται εναλλακτικά των μικρών block FEC κωδίκων. Ένας (n, k) Tornado κώδικας απαιτεί ελαφρώς περισσότερα από k από συνολικά n κωδικοποιημένα σύμβολα για να ανακτήσει τα k πηγαία σύμβολα. Λόγω κάποιων θεμάτων σχετικών με τη διαχείριση της μνήμης, πρακτικά η τιμή του n περιορίζεται να είναι ένα μικρό πολλαπλάσιο του k , π.χ. $n = 2k$. Στο [12] περιγράφεται ένα παράδειγμα υλοποίησης των κωδίκων Tornado. Οι κώδικες Tornado είναι σχεδιασμένοι να έχουν μικρό overhead κατά μέσο όρο, ανάλογα πάντα με το πλήθος των κωδικοποιημένων συμβόλων που θα ληφθούν. Για να εξασφαλιστεί πως ένας παραλήπτης θα μπορέσει να ανακατασκευάσει το αντικείμενο με τη χρήση χαμηλού overhead, τα πακέτα μετατίθενται με τυχαία διάταξη πριν από την αποστολή τους.

3.3.4 Επεκτάσιμοι FEC Κώδικες

Όλοι οι κώδικες FEC που περιγράφηκαν μέχρι αυτό το σημείο είναι block κώδικες. Υπάρχει ένας διαφορετικός τύπος FEC κωδίκων που ονομάζεται επεκτάσιμοι FEC κώδικες. Όπως και στους block κώδικες, ένας επεκτάσιμος FEC κωδικοποιητής λειτουργεί πάνω σε ένα αντικείμενο γνωστού μεγέθους που χωρίζεται σε ίσου μήκους πηγαία σύμβολα. Αντίθετα με τους block κώδικες, δεν υπάρχει προκαθορισμένος αριθμός κωδικοποιημένων συμβόλων που μπορούν να παραχθούν για τους επεκτάσιμους FEC κώδικες. Αντ' αυτού, ένας επεκτάσιμος FEC κωδικοποιητής μπορεί να παράγει τόσα μοναδικά σύμβολα όσα απαιτούνται κάθε φορά.

Οι κώδικες Luby Transform (LT) [13–15] είναι ένα παράδειγμα μεγάλων επεκτάσιμων FEC κωδίκων. Ένας LT κωδικοποιητής χρησιμοποιεί τυχαιότητα για να παράγει κάθε κωδικοποιημένο σύμβολο τυχαία και ανεξάρτητα από τα άλλα κωδικοποιημένα σύμβολα. Όπως και στους κώδικες Tornado, το πλήθος των πηγαίων συμβόλων k μπορεί να είναι πολύ μεγάλο και στους LT κώδικες, δηλαδή της τάξης των δεκάδων χιλιάδων. Η ταχύτητες κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης των LT κωδίκων βρίσκονται στο εύρος των 3 – 20 Mbps για υπολογιστές Pentium όταν το k είναι δεκάδες χιλιάδες. Ένας LT κωδικοποιητής μπορεί να παράγει όσα κωδικοποιημένα σύμβολα απαιτούνται. Όταν πρόκειται να παραχθεί ένα νέο κωδικοποιημένο σύμβολο, βασίζεται σε ένα τυχαία επιλεγμένο ID κωδικοποιημένου συμβόλου, το οποίο καθορίζει μοναδικά πως θα παραχθεί το κωδικοποιημένο σύμβολο από τα πηγαία

σύμβολα. Γενικά, κάθε τιμή του ID κωδικοποιημένου συμβόλου ανταποκρίνεται σε ένα μοναδικό κωδικοποιημένο σύμβολο, με το χώρο των πιθανών κωδικοποιημένων συμβόλων να είναι τέσσερα δισεκατομμύρια, εάν για παράδειγμα το ID κωδικοποιημένου συμβόλου είναι 4 bytes. Άρα, η πιθανότητα ένα συγκεκριμένο κωδικοποιημένο σύμβολο να είναι ίδιο με ένα άλλο κωδικοποιημένο σύμβολο είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πλήθος των πιθανών IDs κωδικοποιημένου συμβόλου. Ένας LT αποκωδικοποιητής έχει την ιδιότητα πως με πολύ μεγάλη πιθανότητα η λήψη οποιουδήποτε συνόλου από ελαφρώς περισσότερα από k κωδικοποιημένα σύμβολα είναι επαρκής για την ανακατασκευή των k πηγαιών συμβόλων. Για παράδειγμα, όταν το k είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιάδων, το overhead είναι μικρότερο από 5% χωρίς καμία αποτυχία σε εκατομμύρια επαναλήψεις της λήψης κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες απωλειών. Σε επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου οι κώδικες LT αναλύονται σε μεγαλύτερο βάθος.

Υπάρχει όμως ένα αδύναμο σημείο διαπραγματεύσης μεταξύ του πλήθους των πηγαιών συμβόλων και του overhead για τους LT κώδικες, με όσο μεγαλύτερο αριθμό πηγαιών συμβόλων τόσο να μειώνεται το overhead. Συνεπώς, για μικρά αντικείμενα, είναι μερικές φορές ευεργετικό να χωρίζεται το αντικείμενο σε πολλά μικρά πηγαιά σύμβολα και να περιλαμβάνονται πολλά κωδικοποιημένα σύμβολα σε ένα πακέτο. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιείται μόνο ένα ID κωδικοποιημένου πακέτου για να καθορίσει τα πολλαπλά κωδικοποιημένα σύμβολα που περιέχονται σε ένα πακέτο.

Υπάρχουν κάποιοι παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου μήκους του συμβόλου και του αριθμού των πηγαιών συμβόλων. Το βασικότερο σημείο είναι πως υπάρχει ένα σταθερό overhead επεξεργασίας ανά σύμβολο κατά τις διαδικασίες της κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης, ανεξάρτητα από τον αριθμό των πηγαιών συμβόλων. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας μικρότερα σύμβολα σημαίνει πως αυτό το σταθερό overhead επεξεργασίας ανά σύμβολο θα είναι μεγαλύτερο συνολικά με την αύξηση του αριθμού των συμβόλων. Ένα δεύτερο, λιγότερο σημαντικό σημείο, είναι πως υπάρχει μία επιβάρυνση της επεξεργασίας κάθε συμβόλου που εξαρτάται λογαριθμικά από τον αριθμό των πηγαιών συμβόλων και για αυτόν το λόγο υπάρχει μία μικρή προτίμηση στο μικρό αριθμό πηγαιών συμβόλων.

Όπως και στους μικρούς block κώδικες, έτσι και στους LT κώδικες υπάρχει ένα σημείο, κατά το οποίο το αντικείμενο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να χωριστεί σε blocks. Γενικά το αντικείμενο χωρίζεται σε blocks όταν ο αριθμός των πηγαιών συμβόλων επί το μήκος του payload του πακέτου είναι μικρότερο από το μέγεθος του αντικειμένου. Για παράδειγμα, εάν

το payload είναι 1024 bytes και το μέγιστο πλήθος των πηγαίων πακέτων είναι 128.000, τότε κάθε αντικείμενο μεγαλύτερο από 128 Mb θα χωριστεί σε περισσότερα από ένα blocks. Τα κωδικοποιημένα σύμβολα μπορούν να καθοριστούν μοναδικά από έναν αριθμό block (όταν το αντικείμενο χωρίζεται σε περισσότερα από ένα blocks) και ένα ID κωδικοποιημένου συμβόλου. Η αρίθμηση των blocks (εάν χρησιμοποιείται) γίνεται συνεχόμενα ξεκινώντας από το μηδέν. Ο αριθμός block και το ID κωδικοποιημένου συμβόλου επιλέγονται ομοιόμορφα και τυχαία από το διαθέσιμο εύρος τους. Για παράδειγμα, θεωρώντας 128.000 πηγαία σύμβολα και 2 blocks, κάθε πακέτο που παράγεται από τον LT κωδικοποιητή μπορεί να έχει τη μορφή $(b, x : y)$. Η πρώτη τιμή καθορίζει τον αριθμό του block και η δεύτερη τιμή καθορίζει το κωδικοποιημένο σύμβολο του κάθε block. Σε αυτό το παράδειγμα, ο αριθμός block b είναι είτε 0 είτε 1 και το ID κωδικοποιημένου συμβόλου x μπορεί να είναι μία τιμή των 32 bit. Η τιμή y είναι το κωδικοποιημένο σύμβολο.

3.3.5 Θέματα Ασφάλειας

Η χρήση του FEC δεν προσθέτει καμία πρόσθετη ασφάλεια σε σχέση με την αποστολή της ίδιας πληροφορίας χωρίς τη χρήση FEC. Παρόλα αυτά, όπως με κάθε σύστημα μετάδοσης, ένας κακόβουλος αποστολέας μπορεί να προσπαθήσει να προσβάλλει τα πακέτα μεταφέροντας αλλοιωμένα κωδικοποιημένα σύμβολα. Εάν ένας παραλήπτης δεχθεί ένα ή περισσότερα κατεστραμμένα σύμβολα, αντί των γνήσιων, τότε ένας τέτοιος αποστολέας υπάρχει περίπτωση να ανακατασκευάσει ένα αλλοιωμένο αντικείμενο.

Η διαδικασία πιστοποίησης αντικειμένου στο επίπεδο εφαρμογών μπορεί να ανιχνεύσει την αλλοιωμένη μετάδοση, αλλά ο παραλήπτης πρέπει να ακυρώσει το μεταδιδόμενο αντικείμενο. Προσβάλλοντας αλλοιωμένα κωδικοποιημένα σύμβολα, αυτά λαμβάνονται σαν έγκυρα κωδικοποιημένα σύμβολα από έναν παραλήπτη, το οποίο είναι μία προσπάθεια πιθανής επίθεσης. Λόγω αυτής της δυνατότητας, οι FEC παραλήπτες πρέπει να ελέγχουν τη διεύθυνση της πηγής ενός ληφθέντος συμβόλου από μία λίστα από γνήσιες διευθύνσεις αποστολέων. Καθώς η διεύθυνση της πηγής μπορεί να είναι πλαστή, τα πρωτόκολλα μεταφοράς που χρησιμοποιούν FEC θα πρέπει να παρέχουν μηχανισμούς για αξιόπιστη εξακρίβωση της πηγής κάθε κωδικοποιημένου συμβόλου. Οι multicast δρομολογητές κατά μήκος του μονοπατιού μετάδοσης μπορεί να παρέχουν τη δυνατότητα της ακύρωσης πακέτων που προέρχονται από ένα υποδίκτυο και η IP διεύθυνση αποστολής τους δεν ανήκει σε αυτό το υποδίκτυο. Γενικά, προτείνεται η χρήση ενός μηχανισμού πιστοποίησης πακέτων, όπως ο μηχανισμός του [17],

σε συνεργασία με τους κώδικες FEC. Έτσι, πακέτα που δεν μπορούν να πιστοποιηθούν θα μπορούν να ακυρώνονται και το μεταδιδόμενο αντικείμενο θα μπορεί να ανακτηθεί αξιόπιστα από τα ληφθέντα πακέτα.

3.4 Οι Κώδικες Raptor

Οι κώδικες Raptor παρουσιάστηκαν από τον Shokrollahi το 2001 [18] και μία αναλυτική επισκόπησή τους παρέχεται στο [19]. Πρόκειται για μία επέκταση των κωδίκων LT, οι οποίοι παρουσιάστηκαν από τον Luby [20]. Οι κώδικες Raptor προτυποποιήθηκαν για να καλύψουν τις ανάγκες συμβατικών υλοποιήσεων σε διαφορετικά περιβάλλοντα για την αποδοτική μετάδοση δεδομένων πάνω σε ένα broadcast δίκτυο. Η βασική διαδικασία της προτυποποίησης έγινε στο 3GPP και οι προδιαγραφές του προτυποποιημένου κώδικα Raptor παρουσιάστηκαν στην υπηρεσία MBMS του 3GPP και είναι ίδιες με τις προδιαγραφές των [21] και [22]. Οι κώδικες Raptor προσφέρουν βελτίωση στην αξιοπιστία της μετάδοσης, ενώ παράλληλα προσφέρουν ένα μεγάλο βαθμό ελευθερίας στην επιλογή των παραμέτρων της μετάδοσης. Οι κώδικες Raptor είναι κώδικες ροής (fountain codes), που σημαίνει πως μπορούν να παράγουν άμεσα όσα κωδικοποιημένα σύμβολα κι αν απαιτούνται από τα πηγαία σύμβολα ενός πηγαίου block δεδομένων. Ο αποκωδικοποιητής είναι ικανός να ανακτήσει το πηγαίο block από οποιοδήποτε σύνολο κωδικοποιημένων συμβόλων, ελαφρώς μεγαλύτερο σε πλήθος από το πλήθος των πηγαίων συμβόλων. Σαν αποτέλεσμα, οι κώδικες Raptor μπορούν να λειτουργούν πολύ κοντά σε έναν ιδανικό fountain κώδικα, ο οποίος θα απαιτούσε μόνο τον ακριβή αριθμό των πηγαίων συμβόλων για να ανακτήσει το μεταδιδόμενο αντικείμενο.

Για την αναλυτική περιγραφή των βασικών αρχών λειτουργίας των κωδίκων Raptor, υποθέτουμε πως αποστέλλεται ένα τμήμα περιεχομένου, αποτελούμενο από k σύμβολα, πάνω σε ένα μη αξιόπιστο κανάλι όπου μπορεί να χαθούν κάποια σύμβολα. Ένα σύμβολο αποτελείται από bits, μπορεί να είναι πολύ μικρό όπως ένα bit, ή μεγάλο όπως ένα πακέτο μετάδοσης στο Διαδίκτυο. Ορίζουμε το διάνυσμα των συμβόλων $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ και θεωρούμε πως όλα τα σύμβολα του διανύσματος έχουν το ίδιο μέγεθος (σε bits). Το διάνυσμα x , καλείται το πηγαίο block ή απλώς τα πηγαία σύμβολα. Η διαδικασία κωδικοποίησης χρησιμοποιεί την πράξη XOR πάνω στα σύμβολα, όπου η XOR δύο συμβόλων x_i και x_j είναι ένα σύμβολο, του οποίου το l -οστό bit είναι η XOR του l -οστού bit του x_i και του l -οστού bit του x_j , αντίστοιχα. Η πράξη XOR των x_i και x_j συμβολίζεται με $x_i \oplus x_j$. Εάν το a είναι σε

$GF(2)$ τότε το α_x υποδηλώνει το σύμβολο, του οποίου το l -οστό bit είναι η πράξη AND του α και του l -οστού bit του x . Βάσει αυτού, εάν τα $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ είναι στοιχεία σε $GF(2)$, τότε η έκφραση $\bigoplus_{i=1}^k \alpha_i x_i$ είναι ένα καλώς ορισμένο σύμβολο.

3.4.1 Fountain Κώδικες

Οι fountain κώδικες είναι μία νέα και καινοτόμα κλάση κωδίκων, σχεδιασμένων για τη μετάδοση δεδομένων πάνω από χρονικά μεταβαλλόμενα και άγνωστα κανάλια με απώλειες. Πρωτοεμφανίστηκαν στο [16] και η πρώτη αποδοτική τους υλοποίηση δόθηκε από τον Luby στο [14]. Ένας fountain κώδικας σχεδιασμένος για k πηγαία σύμβολα καθορίζεται από μία πιθανοτική κατανομή D πάνω στο σύνολο των δυαδικών αριθμών μήκους k . Ένας fountain κώδικας μπορεί να παράγει από το διάνυσμα x , μία απεριόριστη ροή από σύμβολα y_1, y_2, y_3, \dots , αποκαλούμενα σύμβολα εξόδου, ικανοποιώντας έτσι πολλές θεμελιώδεις ιδιότητες:

1. Κάθε σύμβολο εξόδου μπορεί να παραχθεί σύμφωνα με την ακόλουθη πιθανοτική διαδικασία: η κατανομή D δειγματοληπτείται για να σχηματιστεί ένα διάνυσμα $(\alpha_1, \dots, \alpha_k)$ και η τιμή των συμβόλων εξόδου ορίζεται να είναι ίση με $\bigoplus_{i=1}^k \alpha_i x_i$. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται σαν κωδικοποίηση και το διάνυσμα $(\alpha_1, \dots, \alpha_k)$ καλείται μάσκα.
2. Τα σύμβολα εξόδου μπορούν τώρα να παραχθούν ανεξάρτητα.
3. Τα πηγαία σύμβολα μπορούν να ανακτηθούν από οποιοδήποτε σύνολο από n σύμβολα εξόδου, με μεγάλη πιθανότητα. Η διαδικασία ανάκτησης συνήθως καλείται αποκωδικοποίηση και η ποσότητα $\frac{n}{k-1}$ καλείται το overhead του αποκωδικοποιητή. Η πιθανότητα να αποτύχει ο αποκωδικοποιητής καλείται πιθανότητα λάθους του κώδικα.

Η τρίτη ιδιότητα δείχνει πως οι fountain κώδικες είναι ανθεκτικοί απέναντι στις απώλειες, καθώς μόνο ο αριθμός των ληφθέντων συμβόλων εξόδου έχει σημασία για την αποκωδικοποίηση. Διαφορετικοί fountain κώδικες διαφέρουν στο σημείο του απαιτούμενου overhead για μία δεδομένη πιθανότητα λάθους. Επίσης διαφέρουν και στο σημείο της υπολογιστικής τους απόδοσης για τις διαδικασίες της κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης. Για τον καθορισμό αυτού του σημείου, ο αναμενόμενος αριθμός πράξεων XOR για την παραγωγή ενός συμβόλου εξόδου καλείται κόστος κωδικοποίησης ενός fountain κώδικα και ο αναμενόμενος αριθμός XORs που απαιτούνται για την αποκωδικοποίηση των πηγαίων συμβόλων

από τα ληφθέντα σύμβολα εξόδου καλείται κόστος αποκωδικοποίησης. Όσον αφορά την υπολογιστική πολυπλοκότητα, ο καλύτερος τύπος fountain κωδίκων, που μπορεί κάποιος να θεωρήσει, έχει σταθερό κόστος κωδικοποίησης (ανεξάρτητο του k) και κόστος αποκωδικοποίησης που αυξάνεται γραμμικά με το k . Θα πρέπει να σημειώσουμε πως το να εξετάζει κάποιος την υπολογιστική πολυπλοκότητα ξεχωριστά δεν έχει νόημα, αλλά γενικά θα πρέπει να εξετάζονται συνολικά όλες οι παράμετροι ενός τέτοιου κώδικα, δηλαδή το overhead, η υπολογιστική πολυπλοκότητα και η πιθανότητα λάθους του αποκωδικοποιητή.

Στη λειτουργία του κώδικα, τα σύμβολα εξόδου πρέπει να περιλαμβάνουν αναγνωριστικά που θα επιτρέπουν στον παραλήπτη να ανακτήσει τη μάσκα καθενός συμβόλου. Αυτό επιτυγχάνεται αναθέτοντας στα σύμβολα εξόδου αναγνωριστικά κωδικοποιημένου συμβόλου (Encoding Symbol IDs-ESI's). Στον προτυποποιημένο κώδικα Raptor, ένα ESI είναι ένας 16-bit ακέραιος που διευκολύνει τη δημιουργία της μάσκας ενός συμβόλου εξόδου. Η πιο απλοποιημένη μορφή αποκωδικοποίησης ενός fountain κώδικα είναι η παρακάτω: ο παραλήπτης ανακτά από κάθε ληφθέν σύμβολο y_i την αντίστοιχη μάσκα του $(\alpha_{i1}, \dots, \alpha_{ik})$ και καταστρώνει το ακόλουθο σύστημα γραμμικών εξισώσεων 3.1:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} & K & \alpha_{1k} \\ M & 0 & M \\ \alpha_{n1} & L & \alpha_{nk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ M \\ x_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ M \\ y_n \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Στην πραγματικότητα, όλες οι μέθοδοι αποκωδικοποίησης των fountain κωδίκων προσπαθούν να επιλύσουν το παραπάνω σύστημα εξισώσεων, είτε αυτό είναι άμεσα αντιληπτό, είτε όχι. Το βασικό σημείο κατά το σχεδιασμό του κώδικα είναι η δημιουργία ενός αλγορίθμου αποκωδικοποίησης χαμηλής πολυπλοκότητας με ικανοποιητικές επιδόσεις.

3.4.2 LT Κώδικες

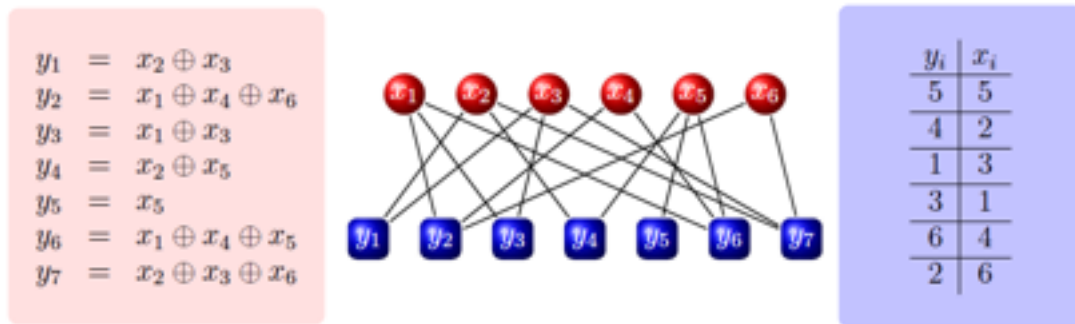
Οι LT κώδικες είναι οι πρώτοι fountain κώδικες. Παρουσιάζουν πάρα πολύ καλές αποδόσεις, όσον αφορά το απαιτούμενο overhead και την πιθανότητα λάθους. Για τους LT κώδικες η πιθανοτική κατανομή D έχει μία συγκεκριμένη μορφή η οποία περιγράφεται από τη διαδικασία δειγματοληψίας της. Η καρδιά των LT κωδίκων είναι μία πιθανοτική κατανομή Ω των ακεραίων $1, \dots, k$. Η κατανομή αυτή συχνά καλείται το βάρος ή η τάξη της κατανομής του LT κώδικα. Για τη δημιουργία ενός συμβόλου εξόδου, εφαρμόζεται η ακόλουθη διαδικασία:

1. Δειγματοληψία του Ω για να δημιουργηθεί ένας ακέραιος $w \in \{1, \dots, k\}$. Ο αριθμός w καλείται το βάρος ή η τάξη του συμβόλου εξόδου.
2. Τυχαία, ομοιόμορφη επιλογή ενός δυαδικού διανύσματος (a_1, \dots, a_k) από Hamming βάρη w .
3. Ορισμός της τιμής του συμβόλου εξόδου σε $\oplus_{i=1}^k a_i x_i$.

Ένας LT κώδικας όπως περιγράφηκε παραπάνω ορίζεται από τις παραμέτρους του (k, Ω) . Επίσης σε κάθε σύμβολο εξόδου ανατίθεται ένα ESI, το οποίο επιτρέπει την ανακατασκευή της μάσκας.

Όπως και με τους άλλους fountain κώδικες, οι LT κώδικες μπορούν να αποκωδικοποιηθούν επίλυοντας το σύστημα (3.1). Παρόλα αυτά, σε πολλές εφαρμογές, η απευθείας επίλυση του συστήματος, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα διάσπαση Gauss είναι απαγορευτικά κοστοβόρα. Είναι λοιπόν επιτακτική ανάγκη, η εφαρμογή πιο γρήγορων αλγορίθμων επίλυσης και ο σχεδιασμός της κατανομής Ω με τέτοιο τρόπο, ώστε οι αλγόριθμοι αποκωδικοποίησης να έχουν χαμηλό φόρτο και ταυτόχρονα να διατηρούν την πιθανότητα λάθους σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Ένας από τους απλούστερους αλγορίθμους επίλυσης είναι ο άπληστος αλγόριθμος, ο οποίος περιγράφεται παρακάτω χρησιμοποιώντας ορολογία της γραφοθεωρίας.

Μετά τη λήψη των συμβόλων εξόδου y_1, \dots, y_n , ταξινομούνται σε ένα διμερή γράφο με τα σύμβολα εξόδου να αποτελούν τη μία πλευρά και τα πηγαία σύμβολα x_1, \dots, x_k την άλλη. Κάθε σύμβολο εξόδου y συνδέεται με όλα τα σύμβολα εισόδου των οποίων το y είναι η πράξη XOR. Έτσι, εάν για παράδειγμα το $y = x_1 \oplus x_5 \oplus x_9$, το y συνδέεται με τα πηγαία σύμβολα x_1, x_5 και x_9 . Ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης είναι μία παραλλαγή του αλγορίθμου που παρουσιάζεται στο [23] και λειτουργεί σε γύρους. Σε κάθε γύρο, αναζητείται ένα σύμβολο εξόδου βαθμού ένα και αντιγράφεται η τιμή του στην τιμή του μοναδικού του γείτονα μεταξύ των πηγαίων συμβόλων. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η πράξη XOR του συμβόλου αυτού με όλα τα γειτονικά του σύμβολα από τα σύμβολα εξόδου, διαγράφοντας όλες τις εξερχόμενες ακμές του πηγαίου αυτού συμβόλου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται, μέχρις ότου να μην βρεθεί σύμβολο εξόδου βαθμού ένα. Εάν σε αυτό το σημείο δεν έχουν ανακτηθεί όλα τα πηγαία σύμβολα, τότε δηλώνεται ένα λάθος αποκωδικοποίησης. Σε εφαρμογές, είναι συχνά ευεργετικό να μην εκτελούνται οι πράξεις XOR του αλγορίθμου αμέσως. Αντίθετα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο προηγούμενος αλγόριθμος αποκωδικοποίησης



ΣΧΗΜΑ 3.2: Παράδειγμα ενός Κώδικα LT

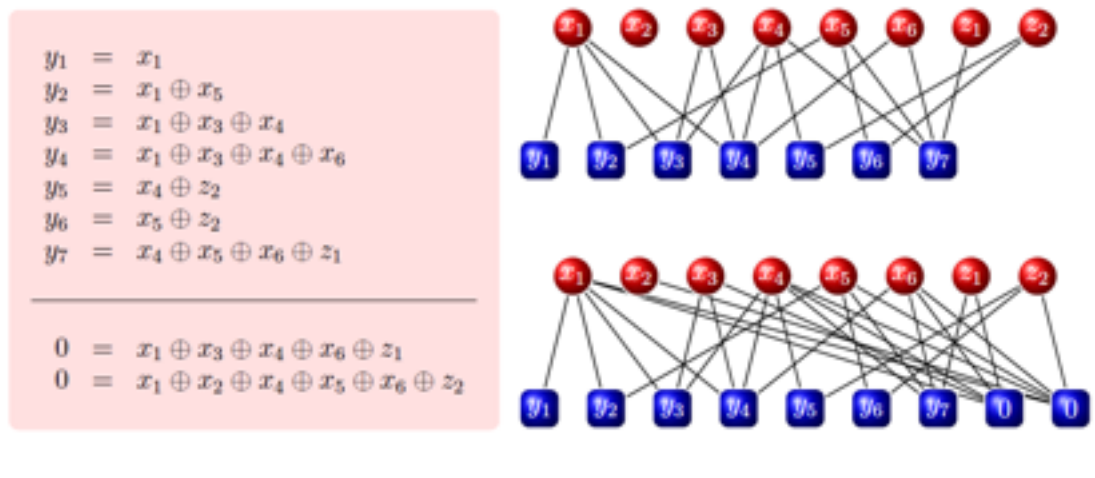
για τη δημιουργία ενός χρονοδιαγράμματος στο οποίο αποθηκεύεται η σειρά με την οποία εκτελούνται τα XORs.

Η Εικόνα 3.2 παρουσιάζει ένα παράδειγμα ενός κώδικα LT παρουσιάζοντας το σχετικό γράφο και το χρονοδιάγραμμα το οποίο περιγράφει τη σειρά του αλγορίθμου ανάκτησης των πηγαίων συμβόλων από τα ληφθέντα σύμβολα εξόδου.

Όμως, δεν είναι σε καμία περίπτωση βέβαιο πως ο άπληστος αλγόριθμος επιτυγχάνει. Στην πραγματικότητα, σχεδόν όλες οι επιλογές για την κατανομή Ω θα οδηγούσαν σε αλγορίθμους με πολύ μεγάλη πιθανότητα λάθους ακόμα και με τη χρήση μεγάλου overhead. Είναι πολύ εύκολο να διαπιστωθεί πως εάν ο αλγόριθμος αποκωδικοποίησης έχει πιθανότητα λάθους που μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το k , τότε το κόστος κωδικοποίησης πρέπει να είναι της τάξης του $\mathcal{O}(\log k)$ [19, 24] και το μέσο κόστος ενός αλγορίθμου της τάξης του $\mathcal{O}(k \log k)$. Είναι αξιοσημείωτο πως αυτό το φράγμα μπορεί να επιτευχθεί με ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό, που ονομάζεται robust soliton distribution και ασυμπτωτικά εγγυάται μικρή πιθανότητα λάθους με ένα overhead της τάξης του $\mathcal{O}(\frac{\log^2 k}{\sqrt{k}})$ [24].

3.4.3 Μη Συστηματικοί Κώδικες Raptor

Παρά την εξαιρετική απόδοση των LT κωδίκων, δεν είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένας μηχανισμός με σταθερό κόστος για την κωδικοποίηση και γραμμικό κόστος για την αποκωδικοποίηση χωρίς να αυξηθεί η πιθανότητα λάθους. Ειδικότερα, μία απλή ανάλυση δείχνει πως για να επιτευχθεί σταθερό κόστος κωδικοποίησης με λογικό overhead, η πιθανότητα λάθους θα είναι κι αυτή σταθερή. Μία επέκταση των κωδίκων LT, οι κώδικες Raptor είναι μία κλάση fountain κωδίκων με σταθερό κόστος κωδικοποίησης και γραμμικό κόστος



ΣΧΗΜΑ 3.3: Παράδειγμα ενός Κώδικα Raptor

αποκωδικοποίησης. Σε σύγκριση με τους LT κώδικες, πετυχαίνουν αυτή την υπεροχή στην πολυπλοκότητα σε βάρος ενός ασυμπτωτικά μεγαλύτερου overhead, παρότι στις περισσότερες πρακτικές υλοποιήσεις τους οι κώδικες Raptor υπερτερούν των LT σε πολλά θέματα. Στην πραγματικότητα, για σταθερό overhead ϵ μπορούν να κατασκευαστούν οικογένειες κωδίκων Raptor με κόστος κωδικοποίησης $\mathcal{O}(\log \frac{1}{\epsilon})$, κόστος αποκωδικοποίησης $\mathcal{O}(k \log \frac{1}{\epsilon})$ και πιθανότητα λάθους που ασυμπτωτικά μειώνεται αντιστρόφως πολυωνυμικά με το k [19].

Οι κώδικες Raptor πετυχαίνουν αυτή την απόδοση χρησιμοποιώντας μία απλή ιδέα: η πηγή x προκωδικοποιείται χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό κώδικα C διάστασης k και μήκους του block m . Η κωδικοποίηση του x με τον C παράγει ένα διάνυσμα $z = (z_1, \dots, z_m)$ συμβόλων που ονομάζονται σύμβολα εισόδου. Συχνά χρησιμοποιείται μία συστηματική κωδικοποίηση για τον C , κατά την οποία το $z = (x_1, \dots, x_k, z_1, \dots, z_{m-k})$, όπου τα z_1, \dots, z_{m-k} είναι πλεονάζοντα σύμβολα. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένας κατάλληλα επιλεγμένος LT κώδικας (m, Ω) στο z για να παραχθούν τα σύμβολα εξόδου y_1, y_2, \dots . Ο χαρακτηρισμός ενός κώδικα Raptor μπορεί να γίνει από τις παραμέτρους του (C, k, Ω) . Ένα παράδειγμα ενός κώδικα Raptor παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3. Σε αυτό το παράδειγμα το μητρώο ελέγχου της προκωδικοποίησης C είναι:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

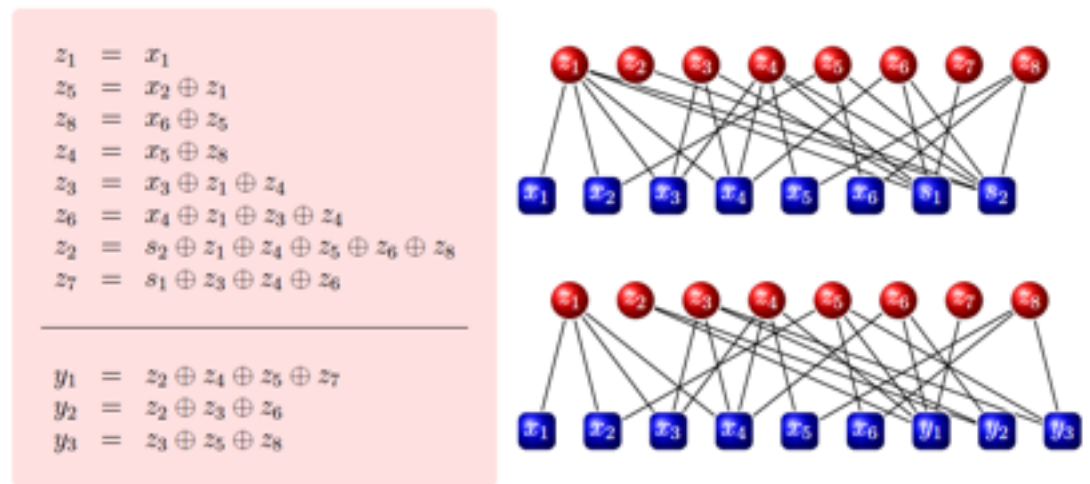
Οι κώδικες Raptor μπορούν να αποκωδικοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Ο πιο απλός

αποκωδικοποιητής καταστρώνει ένα σύστημα από γραμμικές εξισώσεις και επιλύει το σύστημα με διάσπαση Gauss. Η λειτουργία του συστήματος έχει την παρακάτω δομή: θεωρούμε πως ο κώδικας C έχει ένα μητρώο ελέγχου H με m στήλες και $m - k$ γραμμές. Επιπλέον, θεωρούμε πως κάθε σύμβολο εξόδου y_i έχει μία μάσκα $(\alpha_{i1}, \dots, \alpha_{mi})$, η οποία ανακτάται χρησιμοποιώντας το ESI του συμβόλου εξόδου. Επιπρόσθετα, έστω (z_1, \dots, z_m) τα σύμβολα εισόδου του LT κώδικα. Η ανάκτηση αυτών των συμβόλων εισόδου είναι ισοδύναμη με την ανάκτηση των πηγαίων συμβόλων, κάτι που είναι προφανές εάν ο C είναι συστηματικός. Τα σύμβολα εισόδου μπορούν να ανακτηθούν επιλύοντας το παρακάτω γραμμικό σύστημα 3.2:

$$\begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & L & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & L & \alpha_{2m} \\ M & M & 0 & M \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & L & \alpha_{nm} \\ LL & LL & LL & LL \\ & & H & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ M \\ z_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ M \\ y_n \\ LL \\ 0 \\ M \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Γενικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διάσπαση Gauss για την επίλυση του συστήματος, καθώς ο αποκωδικοποιητής θα είναι βέλτιστος υπό την έννοια της αποκωδικοποίησης, καθώς ένας τέτοιος αλγόριθμος θα αποτυγχάνει, εάν και μόνο εάν, αποτυγχάνει η διάσπαση Gauss. Παρόλα αυτά, ο χρόνος εκτέλεσης του αποκωδικοποιητή θα είναι απαγορευτικά μεγάλος.

Ένας διαφορετικός αποκωδικοποιητής με πολύ μικρότερη πολυπλοκότητα λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο με τον άπληστο αλγόριθμο των LT κωδίκων. Το μητρώο του (3.2) χρησιμοποιείται σαν μητρώο σύνδεσης των m συμβόλων εισόδου και των $n + m - k$ συμβόλων εξόδου. Δημιουργούνται n δυναμικά σύμβολα εξόδου, των οποίων η σχέση με τα σύμβολα εισόδου παρουσιάζεται στον πάνω γράφο της Εικόνα 3.3 και τα τελευταία $m - k$ στατικά σύμβολα εξόδου με τις τιμές τους να είναι μηδέν, των οποίων η σχέση με τα σύμβολα εισόδου παρουσιάζεται στον κάτω γράφο. Στη συνέχεια μπορεί να εφαρμοστεί ο άπληστος αλγόριθμος της προηγούμενης παραγράφου για την ανάκτηση των συμβόλων εισόδου. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη διαδικασία αποκωδικοποίησης παρέχονται στο [25].



ΣΧΗΜΑ 3.4: Παράδειγμα ενός Συστηματικού Κώδικα Raptor

3.4.4 Ο Συστηματικός Προτυποποιημένος Κώδικας Raptor

Σε αρκετές εφαρμογές είναι επιτακτική ανάγκη τα πηγαία σύμβολα να παίρνουν μέρος στη μετάδοση. Ένας συστηματικός fountain κώδικας είναι ένας fountain κώδικας ο οποίος, εκτός από τις τρεις ιδιότητες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, πρέπει να διαθέτει και τις επόμενες δύο ιδιότητες:

1. Τα αρχικά πηγαία σύμβολα περιέχονται στη ροή των μεταδιδόμενων συμβόλων εξόδου. Τα σύμβολα εξόδου που δεν ανήκουν στο σύνολο των πηγαίων συμβόλων ονομάζονται σύμβολα επισκευής (repair symbols).
2. Για κάθε $0 \leq l \leq m$, όλα τα πηγαία σύμβολα μπορούν να ανακτηθούν από οποιοδήποτε σύνολο l από τα πηγαία σύμβολα και οποιοδήποτε σύνολο $n-l$ συμβόλων επισκευής, με μεγάλη πιθανότητα.

Η απλή ιδέα της αποστολής των πηγαίων συμβόλων παράλληλα με τα απλά σύμβολα εξόδου ενός μη συστηματικού κώδικα Raptor αποτυγχάνει. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των στατιστικών απόδοσης των πηγαίων συμβόλων και των συμβόλων επισκευής. Αντιθέτως, αυτό που χρειάζεται είναι μία μέθοδος που κάνει τα πηγαία σύμβολα όμοια με τα άλλα σύμβολα εξόδου. Με μία τέτοια μέθοδο, οι διαφορές μεταξύ των δύο συνόλων εξαφανίζονται και δεν έχει καμία σημασία ποιο μέρος των ληφθέντων συμβόλων είναι πηγαία. Μία τέτοια μέθοδος έχει περιγραφεί στο [19] και στο [26]. Η βασική ιδέα

πίσω από αυτήν τη μέθοδο είναι η ακόλουθη: η διαδικασία ξεκινά με ένα μη συστηματικό κώδικα Raptor, όπου παράγονται k σύμβολα εξόδου. Στη συνέχεια εκτελείται ένας αλγόριθμος, ο οποίος εξετάζει εάν είναι δυνατόν να αποκωδικοποιηθούν τα σύμβολα εισόδου χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα σύμβολα εξόδου. Εάν ναι, τότε αναγνωρίζονται αυτά τα σύμβολα εξόδου μαζί με τα πηγαία σύμβολα και αποκωδικοποιούνται για να παραχθεί ένα σύνολο από m ενδιάμεσα σύμβολα (intermediate symbols). Στη συνέχεια, δημιουργούνται τα σύμβολα επισκευής από τα ενδιάμεσα σύμβολα χρησιμοποιώντας την κανονική διαδικασία κωδικοποίησης των κωδίκων Raptor. Ένα παράδειγμα ενός συστηματικού κώδικα Raptor παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τα πηγαία σύμβολα είναι τα x_1, \dots, x_6 . Οι κόμβοι s_1, s_2 έχουν παραχθεί από τις σχέσεις που υπαγορεύονται από την προκωδικοποίηση και οι τιμές τους είναι μηδέν. Στο πρώτο βήμα, τα ενδιάμεσα σύμβολα z_1, \dots, z_8 παράγονται από τα πηγαία σύμβολα εφαρμόζοντας αποκωδικοποίηση. Οι επόμενες διαδικασίες οδηγούν στα z_i όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4 αριστερά. Στη συνέχεια, τα σύμβολα εξόδου παράγονται από αυτά τα ενδιάμεσα σύμβολα. Σημειώνεται πως εκ κατασκευής τα x_i είναι επίσης οι XORs των z_i με τα οποία συνδέονται.

Το βασικότερο σημείο αυτής της μεθόδου είναι το πρώτο βήμα κατά το οποίο πρέπει να βρεθούν k σύμβολα εξόδου που να είναι αποκωδικοποιήσιμα. Υπάρχει μία ποικιλία μεθόδων που μπορούν να πραγματοποιήσουν κάτι τέτοιο. Τα σύμβολα εξόδου που παράγονται από αυτές τις μεθόδους διαφέρουν στην πιθανότητα λάθους και στην πολυπλοκότητα του αποκωδικοποιητή. Οι υπολογισμοί που αφορούν αυτά τα σύμβολα μπορούν να εκτελεστούν εκ των προτέρων και μπορεί να διατηρηθεί το καλύτερο σύνολο συμβόλων εξόδου για επαναλαμβανόμενη χρήση. Συνεπώς, αυτό που χρειάζεται είναι μία αποδοτική μέθοδο για την επαναπαραγωγή αυτών των συμβόλων εξόδου, για παράδειγμα ένας ακέραιος των 16 bit. Ο προτυποποιημένος κώδικας Raptor του [27] κάνει ακριβώς αυτό, προσφέροντας για κάθε μήκος k μεταξύ 1 και 8192 έναν 16-bit ακέραιο και μία διαδικασία για την παραγωγή των k συμβόλων εξόδου από αυτό τον ακέραιο.

3.4.4.1 Η Απόδοση του Προτυποποιημένου Κώδικα Raptor

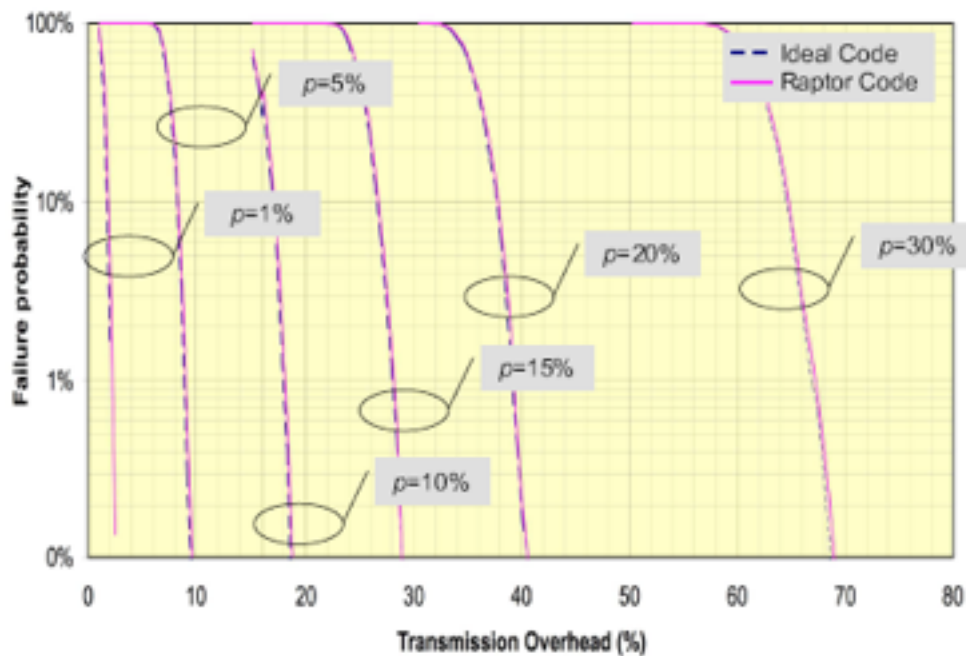
Υπάρχουν αρκετά θέματα που πρέπει να εξεταστούν κατά την αξιολόγηση της απόδοσης των κωδίκων Raptor. Αυτά περιλαμβάνουν την απόδοση κωδικοποίησης, την πολυπλοκότητα (ιδιαίτερα του αποκωδικοποιητή) και την προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές περιπτώσεις

χρήσης. Αποτελεσματικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τη σύγκριση του προτυποποιημένου κώδικα Raptor με έναν ιδανικό fountain κώδικα. Ένας τέτοιος κώδικας έχει την ιδιότητα πως για οποιοδήποτε αριθμό k πηγαίων συμβόλων, μπορεί να δημιουργήσει οποιοδήποτε αριθμό m συμβόλων επισκευής εξασφαλίζοντας πως, οποιοσδήποτε συνδυασμός k από τα $k + m$ πηγαία και επισκευής σύμβολα είναι επαρκής για την ανάκτηση των k πηγαίων συμβόλων. Συνεπώς, ένας ιδανικός fountain κώδικας έχει μηδενικό overhead λήψης, δηλαδή ο αριθμός των ληφθέντων συμβόλων που απαιτούνται για την αποκωδικοποίηση των πηγαίων συμβόλων, είναι ακριβώς ο αριθμός των πηγαίων συμβόλων ανεξάρτητα από το ποια σύμβολα έχουν ληφθεί. Αποτελέσματα προσομοίωσης των κωδίκων Raptor, όπως για παράδειγμα τα [28, 29], δείχνουν πως οι κώδικες Raptor έχουν overhead λήψης πολύ κοντά σε αυτό των ιδανικών fountain κωδίκων.

Για μία σύνοδο μετάδοσης ενός αρχείου με τη χρήση Application Layer FEC (AL-FEC), το overhead μετάδοσης ορίζεται σαν $100 * (N/K - 1)$, όπου το N είναι ο αριθμός των κωδικοποιημένων πακέτων που μεταδόθηκαν κατά τη σύνοδο λήψης του αρχείου και K είναι ο αριθμός των πηγαίων πακέτων του αρχικού αρχείου (όλα τα πακέτα είναι ίδιου μεγέθους). Άρα, το overhead μετάδοσης είναι το ποσό των δεδομένων επισκευής που στάλθηκαν για τη λήψη του αρχείου, μετρούμενο σαν ποσοστό του μεγέθους του αρχείου. Κατά τη φάση προτυποποίησης της υπηρεσίας MBMS, το 3GPP δοκίμασε εκτενώς διαφορετικές εναλλακτικές για να παρέχει αξιοπιστία στα συστήματά του. Ένα ενδεικτικό αποτέλεσμα παρέχεται στην Εικόνα 3.5, όπου παρουσιάζεται η πιθανότητα αποτυχημένης αποκωδικοποίησης σε αντίθεση με το overhead μετάδοσης όταν μεταδίδεται ένα αρχείο 3 Mb κωδικοποιημένο με Raptor πάνω από έναν UMTS bearer με διαφορετικούς ρυθμούς απωλειών στο επίπεδο ζεύξης p , συγκρινόμενος με έναν ιδανικό fountain κώδικα.

Είναι ξεκάθαρο από τα αποτελέσματα πως για αυτές τις συνθήκες οι Raptor κώδικες λειτουργούν τόσο καλά όσο και οι ιδανικοί fountain κώδικες για όλους τους ρυθμούς απωλειών. Είναι επίσης άξιο να σημειωθεί πως ο ρυθμός απώλειας κωδικοποιημένων συμβόλων είναι γενικά μεγαλύτερος από το ρυθμό απώλειας στο επίπεδο ζεύξης, καθώς η αντιστοίχιση των IP πακέτων στα πακέτα του επιπέδου ζεύξης δεν είναι τέλεια.

Η απόδοση των κωδίκων Raptor συγκρινόμενη με έναν ιδανικό fountain κώδικα έχει ερευνηθεί και περαιτέρω, καθώς η απόδοση του overhead ενός AL-FEC κώδικα μπορεί να εκφραστεί από την πιθανότητα αποτυχημένης αποκωδικοποίησης $p_f(n, k)$ σε συνάρτηση με



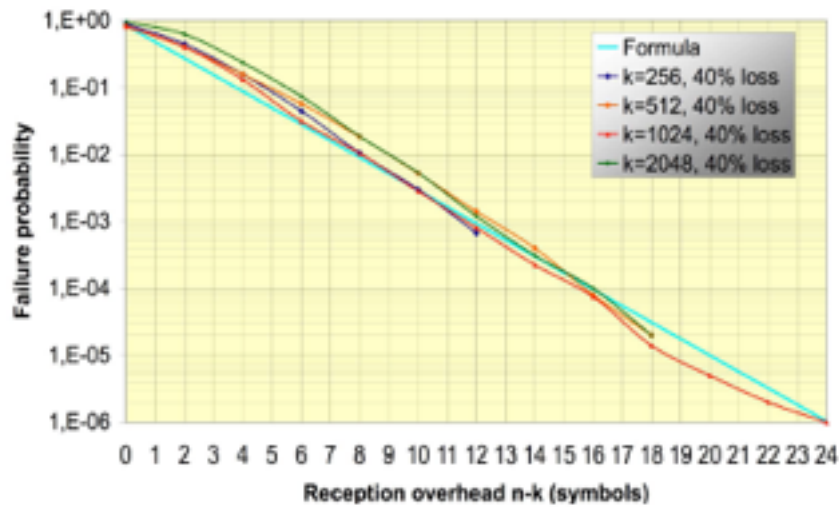
ΣΧΗΜΑ 3.5: Πιθανότητα Αποτυχίας vs. Overhead Μετάδοσης Κώδικα Raptor

το μέγεθος k του πηγαιού block και τον αριθμό των ληφθέντων συμβόλων n . Η σχέση έχει οριστεί σαν:

$$p_{fR}(n, k) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } n < k \\ 0.85 \times 0.567^{n-k}, & \text{εάν } n \geq k \end{cases} \quad (3.3)$$

Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται η πιθανότητα αποτυχίας $p_f(n, k)$ σε αντίθεση με την ποσότητα $n - k$, η οποία χαρακτηρίζει το overhead του κώδικα. Παρατηρείται πως για διαφορετικές τιμές του k , η παράσταση $p_f(n, k)$ εξομοιώνει σχεδόν τέλεια την απόδοση του overhead. Για τον κώδικα Raptor η πιθανότητα αποτυχίας για $n \geq k$ μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του αριθμού των ληφθέντων συμβόλων. Η αύξηση είναι τόσο γρήγορη, που για μόνο 12 επιπρόσθετα σύμβολα η πιθανότητα αποτυχίας είναι 0.1% και για 24 επιπρόσθετα σύμβολα γίνεται 0.0001%. Για ένα τυπικό πηγαιό block μεγέθους $k \geq 1000$ συμβόλων, το απαιτούμενο overhead για πιθανότητα αποτυχίας 0.1% είναι κάτω από 1.2% και για πιθανότητα αποτυχίας 0.0001% είναι κάτω από 2.4%.

Το μέσο overhead του κώδικα, ϵ , είναι το μέσο ποσό των επιπρόσθετων απαραίτητων δεδομένων για την ανάκτηση ενός πηγαιού block. Σε πρακτικά περιβάλλοντα, κάτι τέτοιο ανταποκρίνεται σε έναν παραλήπτη που ζητά την αποστολή κωδικοποιημένων συμβόλων



ΣΧΗΜΑ 3.6: Πιθανότητα Αποτυχίας vs. Overhead Λήψης Κώδικα Raptor

μέχρις ότου η αποκωδικοποίηση να γίνει δυνατή. Βάσει της συνάρτησης $p_f(n, k)$, το μέσο overhead, ϵ , σε σχέση με το k δίνεται ως:

$$\epsilon(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^{\infty} i(p_f(k+i-1, k) - p_f(k+i, k)) = \frac{0.85}{k} \sum_{i=0}^{\infty} i(0.567^{i-1} - 0.567^i) = \frac{0.85}{(1 - 0.567)k}$$

Δηλαδή η τελική σχέση είναι περίπου $\frac{2}{k}$. Συνεπώς, ο αριθμός των επιπρόσθετων συμβόλων είναι κατά μέσο όρο 2, ανεξάρτητα του k . Το μέσο overhead λήψης μειώνεται με την αύξηση του k και για τυπικές τιμές του $k \geq 1000$ είναι το πολύ 0.2%.

Όσον αφορά την πολυπλοκότητα, ο προτυποποιημένος κώδικας Raptor είναι αρκετά αποδοτικός. Για παράδειγμα σε μία κινητή πλατφόρμα ARM των 206 MHz μπορούν να επιτευχθούν ταχύτητες αποκωδικοποίησης μεγαλύτερες από 25 Mbps. Σε σύγκριση, για παράδειγμα με τους Reed-Solomon κώδικες, οι οποίοι λειτουργούν με μη δυαδικά σύμβολα, η υπολογιστική πολυπλοκότητα των κωδίκων Raptor είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη. Επιπλέον πλεονεκτήματα των κωδίκων Raptor είναι πως η πολυπλοκότητα είναι γραμμική με το μέγεθος των πηγαίων δεδομένων και παραμένει γραμμική για κάθε ρυθμό απώλειας πακέτων. Οι απαιτήσεις σε μνήμη είναι επίσης αρκετά ελκυστικές, καθώς και για την κωδικοποίηση και για την αποκωδικοποίηση απαιτείται μόνο ελαφρώς μεγαλύτερη μνήμη από το μέγεθος του πηγαίου block.

3.4.5 Ο Κώδικας RaptorQ

Το πιο εξελιγμένο, μέχρι τώρα διαθέσιμο, μέλος της οικογένειας των κωδίκων Raptor ονομάζεται κώδικας RaptorQ [71] ή αλλιώς, χάριν συντομίας RQ. Ο κώδικας RaptorQ παρουσιάζει πολλές και σημαντικές βελτιώσεις σε πολλούς τομείς σε σχέση με τον πρωτοπονημένο προκάτοχό του κώδικα Raptor. Ο κώδικας RaptorQ υποστηρίζει μέγεθος πηγαίου block έως και 56403 πηγαία σύμβολα και υποστηρίζει συνολικά έως και 16777216 κωδικοποιημένα σύμβολα. Αξίζει να σημειωθεί πως τα παραπάνω όρια στην εφαρμογή του κώδικα RaptorQ έχουν τεθεί λόγω πρακτικών ζητημάτων των εφαρμογών στους οποίους χρησιμοποιείται η FEC προστασία και δεν αποτελούν πραγματικό περιορισμό του ίδιου του κώδικα RaptorQ.

Ο κώδικας RaptorQ παρουσιάζει απόδοση όσον αφορά τη σχέση πλεονασμού-αποτυχίας, η οποία πρακτικά αγγίζει την απόδοση ενός θεωρητικού fountain κώδικα ο οποίος λειτουργεί στο πεδίο \mathbb{F}_{256} . Η απόδοση αυτή αναφέρεται σε ολόκληρο το εύρος των υποστηριζόμενων τιμών του πλήθους των πηγαίων συμβόλων ανά πηγαίο block και για κάθε τιμή της πιθανότητας απώλειας. Ο κώδικας RaptorQ είναι και αυτός ένας fountain κώδικας, δηλαδή ο κωδικοποιητής μπορεί να παράξει άμεσα όσα κωδικοποιημένα σύμβολα απαιτούνται από τα πηγαία σύμβολα ενός πηγαίου block. Επίσης, ο κώδικας RaptorQ είναι ένας συστηματικός κώδικας, δηλαδή όλα τα πηγαία σύμβολα ανήκουν στα κωδικοποιημένα σύμβολα. Έτσι τα κωδικοποιημένα σύμβολα μπορούν να θεωρηθούν ένας συνδυασμός των αρχικών πηγαίων συμβόλων και των συμβόλων επισκευής που παρήχθησαν από τον κωδικοποιητή. Η αναλυτική περιγραφή των προδιαγραφών του κώδικα RaptorQ βρίσκονται στο [69].

Παρότι ο κώδικας Raptor είναι ένας πολύ αποδοτικός κώδικας FEC, υπάρχουν κάποιες βελτιώσεις που θα μπορούσαν να ενισχύσουν την πρακτική εφαρμογή του. Οι δύο βασικότερες βελτιώσεις είναι μία αποδοτικότερη σχέση μεταξύ πλεονασμού και πιθανότητας αποτυχίας και ο μεγαλύτερος αριθμός πηγαίων συμβόλων ανά πηγαίο block. Ιδιαίτερα σε κάποιες εφαρμογές, όπως οι streaming εφαρμογές ο κώδικας Raptor μειονεκτεί σημαντικά. Για παράδειγμα σε μία streaming εφαρμογή, όπου το εύρος τιμών του πλήθους των πηγαίων συμβόλων ανά block μπορεί να διαφέρει σημαντικά, π.χ. $K = 40, 200, 1000, 10000$, και η απαίτηση για πιθανότητα αποτυχίας αποκωδικοποίησης είναι της τάξης του 10^{-5} ή 10^{-6} ο κώδικας Raptor υστερεί σημαντικά καθώς η σπατάλη εύρους ζώνης για την αποστολή έστω και ενός επιπλέον συμβόλου επισκευής είναι μεγάλης σημασίας. Πιο συγκεκριμένα, έστω πως απαιτείται πιθανότητα αποτυχίας 10^{-6} σε ένα δίκτυο με ρυθμό απώλειας πακέτων 10%

ενώ χρησιμοποιούμε μέγεθος πηγαίου block ίσο με 200. Ο κώδικας Raptor απαιτεί 24 πλεονάζοντα σύμβολα, δηλαδή 224 κωδικοποιημένα σύμβολα. Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να αποσταλούν συνολικά 249 κωδικοποιημένα σύμβολα κάτι που μεταφράζεται σε πλεονασμό ίσο με 24.5%. Από την άλλη πλευρά, ο κώδικας RaptorQ απαιτεί μόλις 2 πλεονάζοντα σύμβολα, κάτι που αντίστοιχα σημαίνει μόλις 12.5% πλεονασμό.

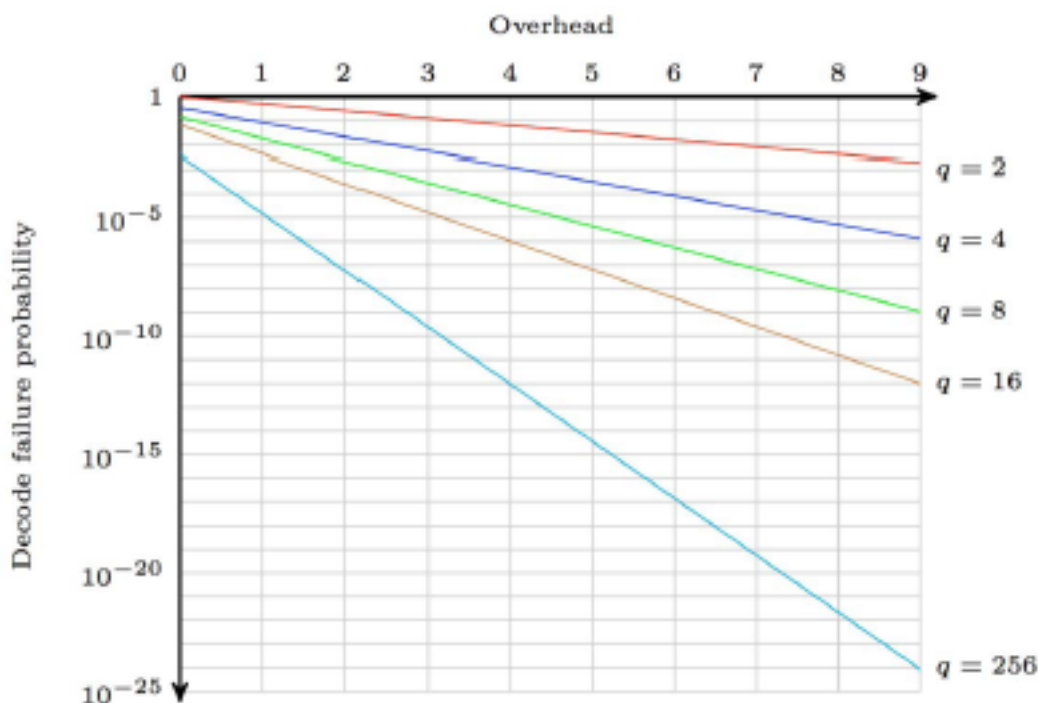
Για να πετύχει την εξαιρετική απόδοσή του ο κώδικας RaptorQ εισάγει πολλές βελτιώσεις με τις βασικότερες δύο να είναι [70]:

1. Η χρήση συμβόλων πάνω σε μεγαλύτερα, μη δυαδικά αλφάβητα
2. η χρήση μίας τεχνικής που ονομάζεται permanent inactivation

3.4.5.1 Μεγαλύτερου Μήκους Αλφάβητο

Σε όλες τις λειτουργίες που έχουν περιγραφεί προηγουμένως για την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση στον κώδικα Raptor, όλες οι πράξεις που γίνονται στα σύμβολα είναι XOR πράξεις, δηλαδή πράξεις πάνω σε πεδία Galois, $\mathbb{GF}(2)$. Υπάρχει ένας βασικός περιορισμός στην απόδοση ανακατασκευής κάθε τέτοιου κώδικα: η καλύτερη απόδοση που μπορεί να πετύχει ένας τέτοιος κώδικας από τη λήψη $K + h$ κωδικοποιημένων συμβόλων είναι πιθανότητας ίσης κατά προσέγγιση με $1 - \frac{1}{2^{k+1}}$. Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο περιορισμός η λύση είναι η χρήση πράξεων πάνω σε μεγαλύτερα πεπερασμένα πεδία. Για παράδειγμα ένας κώδικας που χρησιμοποιεί πράξεις πάνω σε $\mathbb{GF}(256)$ αντί για $\mathbb{GF}(2)$ μπορεί να πετύχει απόδοση αποκωδικοποίησης με πιθανότητα ίση με $1 - \frac{1}{256^{k+1}}$. Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η απόδοση ανάκτησης τέτοιων κωδίκων για διαφορετικές τιμές στα πεδία $\mathbb{GF}(q)$. Κάθε καμπύλη περιγράφει την πιθανότητα αποτυχίας της αποκωδικοποίησης χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές $\mathbb{GF}(q)$ σε σχέση με τον πλεονασμό (overhead) h .

Αυτό ακριβώς το πλεονέκτημα εισάγει και ο κώδικας RaptorQ, καθώς πλέον οι πράξεις για τον υπολογισμό των HDPC συμβόλων γίνονται με χρήση πεδίων $\mathbb{GF}(256)$, και οι εναπομείναντες πράξεις συμβόλων γίνονται χρησιμοποιώντας πεδία $\mathbb{GF}(2)$, δηλαδή εξακολουθούν να είναι απλές πράξεις XOR. Πλέον τα τμήματα των μητρώων που αφορούν πράξεις σε $\mathbb{GF}(256)$ απομονώνονται κατά την κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση, ώστε η συντριπτική πλειοψηφία των πράξεων των συμβόλων να παραμείνουν απλές XOR και μόνο μία μικρή μειοψηφία να γίνεται πάνω σε $\mathbb{GF}(256)$.



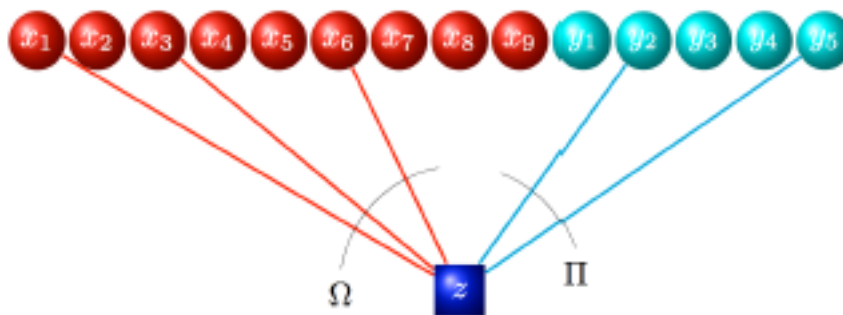
ΣΧΗΜΑ 3.7: Βελτίωση Πιθανότητας Αποτυχίας με τη χρήση Μεγαλύτερων Αλφάβητων

3.4.5.2 Permanent Inactivation

Η τεχνική permanent inactivation είναι μία πολύ ενδιαφέρουσα επέκταση των κωδίκων LT και της τεχνικής inactivation decoding η οποία βελτιώνει δραματικά τις ιδιότητες ανακατασκευής, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνει γραμμικό χρόνο κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης.

Η τεχνική permanent inactivation στον κώδικα RaptorQ λειτουργεί ως εξής. Περί των \sqrt{K} των ενδιάμεσων συμβόλων δηλώνονται σαν μονίμως μη ενεργά, και αυτά τα σύμβολα καλούνται *PI* σύμβολα, και η εναπομείνουσα πλειοψηφία των ενδιάμεσων συμβόλων καλούνται *LT* σύμβολα. Τα *PI* και τα *LT* σύμβολα χειρίζονται διαφορετικά από τους αλγόριθμους κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης.

Για τον αλγόριθμο κωδικοποίησης, ένα κωδικοποιημένο σύμβολο υπολογίζεται σαν την πράξη XOR δύο προσωρινών συμβόλων, όπου εφαρμόζεται *LT* κωδικοποίηση στα *LT* σύμβολα για να παραχθεί ένα προσωρινό σύμβολο και *PI* κωδικοποίηση στα *PI* σύμβολα για να παραχθεί το δεύτερο προσωρινό σύμβολο. Η διαδικασία της *PI* κωδικοποίησης είναι μία απλούστερη έκδοση της διαδικασίας της *LT* κωδικοποίησης, όπου δύο ή τρία από τα *PI* σύμβολα επιλέγονται τυχαία εφαρμόζοντας την πράξη XOR μεταξύ τους.



ΣΧΗΜΑ 3.8: Παράδειγμα Κωδικοποίησης της Τεχνικής permanent inactivation

Ένα παράδειγμα της κωδικοποίησης της τεχνικής permanent inactivation παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.8. Τα ενδιάμεσα σύμβολα χωρίζονται στα LT σύμβολα $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ και στα PI σύμβολα y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 . Για κάθε κωδικοποιημένο σύμβολο z , ένα σύνολο γειτόνων επιλέγεται από τα LT σύμβολα σύμφωνα με μία κατανομή Ω , ένα σύνολο γειτόνων επιλέγεται από τα PI σύμβολα σύμφωνα με μία κατανομή Π , και το z είναι η XOR όλων αυτών των γειτονικών συμβόλων.

Για τον αλγόριθμο αποκωδικοποίησης, τα σύμβολα PI είναι ανενεργά στην αρχή, και στη συνέχεια εφαρμόζεται η τεχνική inactivation decoding όπως περιγράφεται αναλυτικά στο [71], αλλά εφαρμόζεται μόνο στα σύμβολα LT κατά την πρώτη και τρίτη φάση, με τα σύμβολα PI καθώς και τα άλλα ενδιάμεσα που είναι ανενεργά κατά την πρώτη φάση να ανακατασκευάζονται κατά τη δεύτερη φάση. Όταν χρησιμοποιούνται K κωδικοποιημένα σύμβολα για την αποκωδικοποίηση των ενδιάμεσων συμβόλων, επειδή υπάρχουν περίπου \sqrt{K} περισσότερα κωδικοποιημένα σύμβολα από τα σύμβολα LT , ο επιπρόσθετος αριθμός των απενεργοποιήσεων ελαχιστοποιείται, και η πιθανότητα τα κωδικοποιημένα σύμβολα να μπορούν να ανακτηθούν επιτυχώς από τα σύμβολα LT είναι πολύ μεγάλη.

3.4.5.3 Η Απόδοση του Κώδικα RaptorQ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο κώδικας RaptorQ εμφανίστηκε σαν ένα πιο αποδοτικό μέλος της οικογένειας των κωδίκων Raptor. Οι βελτιώσεις του αφορούν την ευελιξία εφαρμογής του, την πολυπλοκότητα, την αποδοτική διαχείριση της μνήμης των συσκευών που εφαρμόζεται καθώς και στον πιο σημαντικό παράγοντα, στην απόδοση αποκωδικοποίησης. Οι κώδικες Raptor είναι κώδικες υποβέλτιστοι όσον αφορά το ποσό του πλεονασμού λήψης, συγκρινόμενοι με τους κώδικες Reed-Solomon οι οποίοι είναι βέλτιστοι erasure κώδικες, δηλαδή

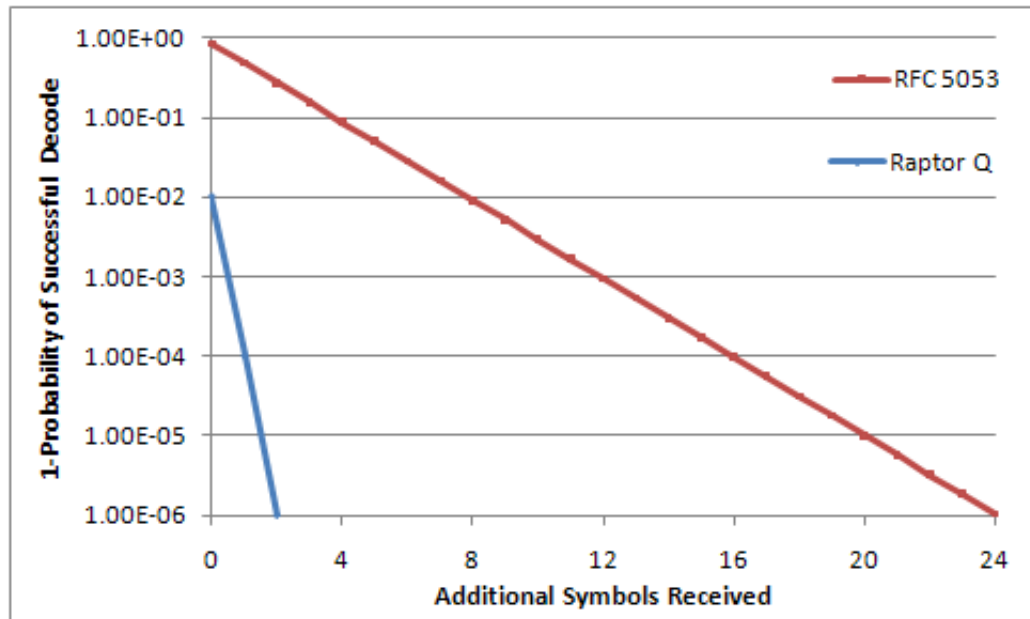
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: Σύγκριση Παραμέτρων Εφαρμογής Raptor και RaptorQ

Ιδιότητα	Raptor RFC 5053	RaptorQ RFC 6330
Maximum Number of Source Symbols	8192	56403
Maximum Number of Encoded Symbols	65536	16777216
Maximum Symbol Size	65536	65536

απαιτούν τη λήψη ακριβώς του ίδιου πλήθους κωδικοποιημένων σύμβολων με το πλήθος των πηγαίων συμβόλων για επιτυχή αποκωδικοποίηση, όμως δεν παρουσιάζουν γραμμικό χρόνο κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης. Μέχρι την εμφάνιση της νέας γενιάς των κωδίκων Raptor, τους κώδικες RaptorQ, ο προτυποποιημένος κώδικας Raptor παρουσιάζει γραμμικό χρόνο κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης, όπως και ο κώδικας RaptorQ, όμως απαιτεί τη λήψη επιπλέον συμβόλων επί των πηγαίων για να πετύχει επιτυχή αποκωδικοποίηση. Αυτό ακριβώς το μειονέκτημα έρχεται να εξαλείψει ο κώδικας RaptorQ, ο οποίος μπορούμε πλέον να πούμε πως λειτουργεί πρακτικά με την ίδια απόδοση ενός ιδανικού erasure κώδικα. Όσον αφορά την ευελιξία που εισάγει ο κώδικας RaptorQ ως προς την επιλογή των παραμέτρων εφαρμογής, οι βελτιώσεις που εισάγει συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1.

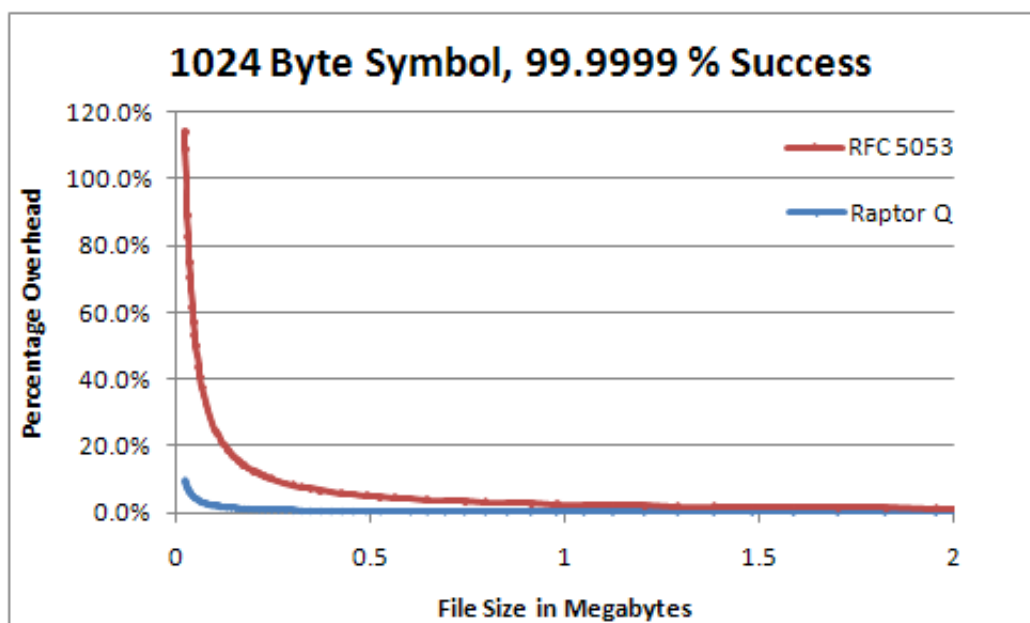
Οι βελτιώσεις που εισάγει ο κώδικας RaptorQ στο μήκος του πηγαίου block, καθώς και στο πλήθος των κωδικοποιημένων συμβόλων που μπορεί να παράξει είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερου μεγέθους αρχεία καθώς προσφέρει 6.8 φορές μεγαλύτερο μήκος πηγαίου block και 256 φορές περισσότερα κωδικοποιημένα σύμβολα.

Όσον αφορά τη βασικότερη ιδιότητα ανάλυσης της απόδοσης των κωδίκων Raptor, δηλαδή την πιθανότητα αποτυχίας της αποκωδικοποίησης σε συνάρτηση με το πλήθος των ληφθέντων κωδικοποιημένων συμβόλων, ενώ ο προτυποποιημένος κώδικας Raptor απαιτεί overhead λήψης 24 σύμβολα για να πετύχει πιθανότητα επιτυχούς αποκωδικοποίησης 99.9999%, ο κώδικας RaptorQ απαιτεί μόλις 2 σύμβολα overhead λήψης για να πετύχει την ίδια πιθανότητα αποκωδικοποίησης. Η συγκεκριμένη βελτίωση καθιστά τον κώδικα RaptorQ πολύ πιο αποδοτικό ιδιαίτερα για τη μετάδοση μικρών αρχείων. Συγκριτικά οι βελτιώσεις αυτές περιγράφονται γραφικά στις Εικόνες 3.9, 3.10.



ΣΧΗΜΑ 3.9: Βελτίωση του Κώδικα RaptorQ στο Overhead Λήψης

Η συνάρτηση που περιγράφει την πιθανότητα αποτυχημένης αποκωδικοποίησης $p_f(n, k)$ σε συνάρτηση με το μέγεθος k του πηγαίου block και τον αριθμό των ληφθέντων συμβόλων n για τον κώδικα RaptorQ έχει οριστεί σαν [72]:



ΣΧΗΜΑ 3.10: Βελτίωση του Κώδικα RaptorQ ως προς το Μέγεθος του Μεταδιδόμενου Αντικειμένου

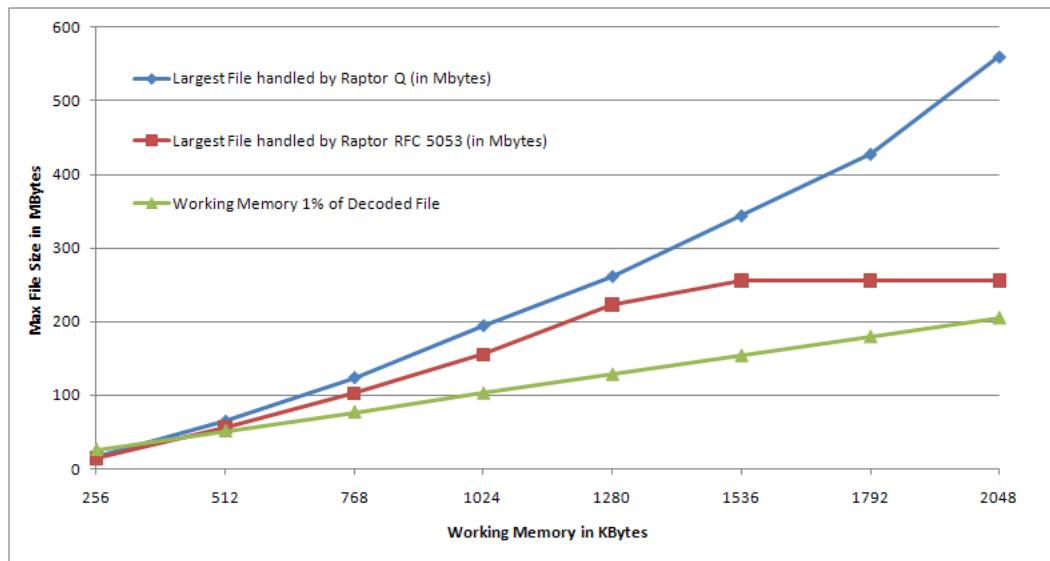
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: Σύγκριση Ρυθμού Αποκωδικοποίησης Raptor και RaptorQ

File Size (bytes)	Raptor RFC 5053 Decode Rate (Mbps)	RaptorQ RFC 6330 Decode Rate (Mbps)	Overhead Rate
32768	49.6	54.1	6.3%
65536	48.6	69.7	3.1%
131072	42.2	76.0	1.6%
262144	37.3	74.7	0.8%
524288	33.1	69.8	0.4%

$$p_{f_{RQ}}(n, k) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } n < k \\ 0.01 \times 0.01^{n-k}, & \text{εάν } n \geq k \end{cases} \quad (3.4)$$

Όσον αφορά την πολυπλοκότητα λειτουργίας του κώδικα RaptorQ, ο ρυθμός αποκωδικοποίησης είναι 10% έως 100% υψηλότερος από τον αντίστοιχο ρυθμό του προτυποποιημένου κώδικα Raptor, όπως παρουσιάζεται και στα αποτελέσματα του Πίνακα 3.2 όπου οι δύο κώδικες συγκρίνονται σε κινητή συσκευή Android OS, υπό τις ίδιες συνθήκες με ρυθμό απώλειας συμβόλου 50% και θεωρώντας μέγεθος συμβόλου 85 bytes για τον κώδικα Raptor και 1024 bytes για τον κώδικα RaptorQ.

Τέλος, ο κώδικας RaptorQ είναι επίσης πιο αποδοτικός στη διαχείριση της μνήμης που απαιτεί σε σχέση με τον προτυποποιημένο κώδικα Raptor, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 3.11.



ΣΧΗΜΑ 3.11: Απαιτούμενη Μνήμη Λειτουργίας του Κώδικα RaptorQ

Κεφάλαιο 4

Αλγόριθμοι Άμεσης Απόκρισης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε την περιοχή των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης, περιγράφουμε τις βασικές αρχές των αλγορίθμων αυτών καθώς και της ανάλυσης της απόδοσής τους χρησιμοποιώντας την έννοια της ανταγωνιστικής ανάλυσης και τέλος παρουσιάζουμε συνοπτικά τα βασικότερα προβλήματα στα οποία έχουν βρει εφαρμογή οι αλγόριθμοι αυτοί.

4.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Ο παραδοσιακός σχεδιασμός και ανάλυση αλγορίθμων υποθέτει πως ένας αλγόριθμος, ο οποίος παράγει μία έξοδο, έχει πλήρη γνώση ολόκληρης της εισόδου εκ των προτέρων. Παρόλα αυτά, η παραδοχή αυτή είναι πολύ συχνά μη ρεαλιστική σε πρακτικές εφαρμογές. Η πλειοψηφία των αλγοριθμικών προβλημάτων που υπάρχουν είναι πρακτικά online (άμεσης απόκρισης) [84].

Οι αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης [84, 85] έχουν εφαρμογή σε προβλήματα όπου η είσοδος δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων αλλά εμφανίζεται σταδιακά στον αλγόριθμο. Ένας αλγόριθμος άμεσης απόκρισης καλείται να πάρει αποφάσεις για τη λύση ενός προβλήματος με βάση μερική πληροφορία για τα δεδομένα του προβλήματος και χωρίς να μπορεί να προβλέψει το μέλλον. Τα σχετικά προβλήματα άμεσης απόκρισης είναι είτε προβλήματα μεγιστοποίησης κόστους, είτε προβλήματα ελαχιστοποίησης κόστους.

Γενικά, η είσοδος του προβλήματος γίνεται γνωστή με τη μορφή μίας ακολουθίας αιτήσεων. Όταν εμφανίζεται μία αίτηση, ένας αλγόριθμος άμεσης απόκρισης καλείται να πάρει μία

οριστική απόφαση για τη συγκεκριμένη αίτηση. Για την ανάλυση των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης χρησιμοποιείται ο όρος του competitive analysis (ανταγωνιστικής ανάλυσης) [85] με βάση την οποία, η απόδοση του αλγορίθμου συγκρίνεται με την απόδοση ενός βέλτιστου (υποθετικού) αλγορίθμου. Ο βέλτιστος αλγόριθμος θεωρείται ένας σοφός αλγόριθμος που γνωρίζει ολόκληρη την είσοδο εκ των προτέρων και μπορεί να υπολογίσει τη βέλτιστη έξοδο.

4.2 Ανταγωνιστική Ανάλυση

Ένας αλγόριθμος άμεσης απόκρισης εφαρμόζεται πάνω σε μία ακολουθία αιτήσεων $\sigma = \sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(m)$. Οι αιτήσεις πρέπει να εξυπηρετηθούν με τη σειρά την οποία εμφανίστηκαν. Κατά την εξυπηρέτηση του αιτήματος $\sigma(t)$, ο αλγόριθμος άμεσης απόκρισης δεν γνωρίζει κάποιο αίτημα $\sigma(t')$ με $t' > t$. Η μετρική που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης ενός αλγορίθμου άμεσης απόκρισης είναι το competitive ratio (λόγος απόδοσης) του αλγορίθμου [85]. Θεωρούμε πως ο αλγόριθμος ALG επεξεργάζεται ακολουθίες αιτήσεων για το πρόβλημα μεγιστοποίησης κέρδους Π . Τότε ο λόγος απόδοσης του αλγορίθμου ορίζεται ως η ελάχιστη τιμή της ποσότητας c για την οποία ισχύει η σχέση:

$$OPT(\sigma) - c \cdot ALG(\sigma) \leq \alpha \quad (4.1)$$

για κάθε δυνατή ακολουθία αιτήσεων σ για το πρόβλημα Π .

Οι ποσότητες $OPT(\sigma)$ και $ALG(\sigma)$ δηλώνουν το βέλτιστο (μέγιστο) κέρδος για την ακολουθία αιτήσεων σ και το κέρδος του αλγορίθμου ALG κατά την εκτέλεσή του στην ακολουθία σ , ενώ η παράμετρος α είναι μία οποιαδήποτε σταθερά που είναι ανεξάρτητη της ακολουθίας σ .

Ο παραπάνω ορισμός καλύπτει την περίπτωση που ο αλγόριθμος ALG είναι ντετερμινιστικός. Στην περίπτωση πιθανοτικών αλγορίθμων, το κέρδος $ALG(\sigma)$ του αλγορίθμου πάνω σε μία ακολουθία σ είναι μία τυχαία μεταβλητή. Συνεπώς, ο λόγος απόδοσης ενός πιθανοτικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης ALG για το πρόβλημα μεγιστοποίησης κέρδους Π ενάντια σε αμνήμονες αντιπάλους (oblivious adversaries) είναι η ελάχιστη τιμή της ποσότητας c για την οποία ισχύει ότι:

$$OPT(\sigma) - c \cdot \mathbb{E}[ALG(\sigma)] \leq \alpha \quad (4.2)$$

Εφόσον το πρόβλημα Π το επιτρέπει, ο λόγος απόδοσης του αλγορίθμου άμεσης απόκρισης ALG μπορεί να οριστεί χρησιμοποιώντας $\alpha = 0$. Σε αυτή την περίπτωση, ο λόγος απόδοσης c ορίζεται ως εξής:

$$c = \max \frac{OPT(\sigma)}{\mathbb{E}[ALG(\sigma)]} \quad (4.3)$$

όπου το μέγιστο επιλέγεται μεταξύ όλων των δυνατών ακολουθιών αιτήσεων σ .

Στην περίπτωση που το πρόβλημα Π είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους, ο λόγος απόδοσης ενός πιθανοτικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης ALG ορίζεται ως η ελάχιστη τιμή της ποσότητας c για την οποία ισχύει η σχέση:

$$\mathbb{E}[ALG(\sigma)] - c \cdot OPT(\sigma) \leq \alpha \quad (4.4)$$

για κάθε δυνατή ακολουθία αιτήσεων σ για το πρόβλημα Π . Οι ποσότητες $OPT(\sigma)$ και $ALG(\sigma)$ πλέον δηλώνουν το βέλτιστο (ελάχιστο) κόστος για την ακολουθία αιτήσεων σ και το κόστος του αλγορίθμου ALG κατά την εκτέλεσή του στην ακολουθία σ , ενώ η παράμετρος α ορίζεται όπως προηγουμένως. Ο ορισμός αυτός απλοποιείται σε:

$$c = \max \frac{\mathbb{E}[ALG(\sigma)]}{OPT(\sigma)} \quad (4.5)$$

εφόσον το πρόβλημα Π μας επιτρέπει να θέσουμε την παράμετρο α ίση με 0.

Οι ορισμοί για την περίπτωση των ντετερμινιστικών αλγορίθμων άμεσης απόκρισης όταν το Π είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους απλοποιούνται αφαιρώντας το σύμβολο της μέσης τιμής από το κόστος του αλγορίθμου ALG .

Πρέπει να σημειωθεί πως η απόδοση ενός πιθανοτικού αλγορίθμου προκύπτει συγκρίνοντας τον αλγόριθμο με αμνήμονες αντιπάλους για τους οποίους υποτίθεται πως δημιουργούν την ακολουθία αιτήσεων χωρίς να έχουν πρόσβαση στα αποτελέσματα των τυχαίων επιλογών του αλγορίθμου, παρόλο που μπορεί να γνωρίζουν την πιθανοτική κατανομή με βάση την οποία κάνει τις τυχαίες επιλογές του ο αλγόριθμος. Σύμφωνα με αυτό, όταν υπολογίζεται η μέση τιμή του κόστους ή του κέρδους του αλγορίθμου για μία ακολουθία αιτήσεων σ ,

υποτίθεται πως ο αντίπαλος έχει επιλέξει ολόκληρη την ακολουθία πριν την δώσει ως είσοδο στον πιθανοτικό αλγόριθμο.

4.2.1 Διευκρινίσεις της Ανταγωνιστικής Ανάλυσης

Η ανταγωνιστική ανάλυση είναι μία μέθοδος ανάλυσης της απόδοσης χειρότερης περίπτωσης. Για κάποια προβλήματα άμεσης απόκρισης, όπως αυτό της σελιδοποίησης, οι λόγοι απόδοσης των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης είναι πολύ χειρότεροι από τους λόγους απόδοσης που παρατηρούνται στην πραγματικότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στην ανταγωνιστική ανάλυση χρησιμοποιούνται αυθαίρετα τυχαίες ακολουθίες αιτήσεων ενώ στην πραγματικότητα οι είσοδοι των αλγορίθμων είναι κατά πολύ πιο περιορισμένοι και καθορισμένοι.

Συνεπώς, μία σειρά από επιστημονικές εργασίες αναλύουν τους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης χρησιμοποιώντας πιο περιοριστικές και πρακτικές ακολουθίες αιτήσεων και προτείνουν αντίστοιχες μετρικές για την αξιολόγηση της απόδοσης των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πρόβλημα της σελιδοποίησης, όπου σύμφωνα με την παραδοσιακή ανταγωνιστική ανάλυση έχει αποδειχθεί πως ο καλύτερος λόγος απόδοσης που μπορεί να πετύχει ένας ντετερμινιστικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης είναι k , όπου το k είναι το πλήθος των σελίδων που μπορεί να βρίσκονται στη γρήγορη μνήμη. Την απόδοση αυτή την πετυχαίνουν οι αλγόριθμοι *LRU* και *FIFO*.

Από πρακτικής απόψεως το θεωρητικό αυτό όριο δεν έχει πολύ σημασία καθώς πλέον οι γρήγορες μνήμες μπορούν να αποθηκεύουν εκατοντάδες χιλιάδες σελίδες και στην πραγματικότητα ο λόγος απόδοσης των αλγορίθμων αυτών είναι κατά πολύ μικρότερος σε πρακτικές εφαρμογές. Στην εργασία [73] όπου παρουσιάζεται μία πειραματική αξιολόγηση του αλγορίθμου άμεσης απόκρισης *LRU*, ο λόγος απόδοσης του αλγορίθμου είναι μεταξύ 1 και 2 καθώς επίσης η απόδοσή του είναι κατά πολύ ανώτερη από αυτή του αλγορίθμου άμεσης απόκρισης *FIFO*. Όλα αυτά τα στοιχεία αποκρύπτονται από την παραδοσιακή ανταγωνιστική ανάλυση.

4.3 Βασικά Προβλήματα Άμεσης Απόκρισης

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα βασικότερα προβλήματα της επιστήμης των υπολογιστών τα οποία έχουν προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας αλγορίθμους άμεσης απόκρισης. Επίσης

περιγράφουμε συνοπτικά τους βασικότερους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης που έχουν εμφανιστεί για το κάθε πρόβλημα.

4.3.1 Το πρόβλημα της Σελιδοποίησης

Το πρόβλημα της σελιδοποίησης θεωρεί ένα υπολογιστικό σύστημα με μνήμη δύο επιπέδων, το οποίο αποτελείται από γρήγορη μνήμη μικρού μεγέθους και μία αργή μεγάλου μεγέθους μνήμη. Θεωρείται πως η γρήγορη μνήμη μπορεί να αποθηκεύσει ταυτόχρονα k σελίδες μνήμης και πως στην αργή μνήμη μπορεί να βρίσκονται άπειρες στο πλήθος σελίδες. Κάθε αίτημα αναφέρεται σε μία σελίδα στο σύστημα της μνήμης. Για κάθε αίτημα εάν η σελίδα που ζητείται βρίσκεται στη γρήγορη μνήμη τότε το αίτημα εξυπηρετείται. Διαφορετικά εάν η σελίδα που ζητείται δεν βρίσκεται στη γρήγορη μνήμη συμβαίνει ένα σφάλμα σελίδας. Στη συνέχεια η σελίδα αυτή μεταφέρεται από την αργή μνήμη στη γρήγορη και ανακατάται. Ένας αλγόριθμος σελιδοποίησης καθορίζει ποια σελίδα πρέπει να αφαιρεθεί από τη γρήγορη μνήμη ώστε να αντικατασταθεί από αυτήν που ζητήθηκε. Στην περίπτωση που ο αλγόριθμος είναι άμεσης απόκρισης, η απόφαση αυτή πρέπει να ληφθεί χωρίς καμία γνώση σχετικά με τα αιτήματα σελίδων που θα ακολουθήσουν. Στο πρόβλημα της σελιδοποίησης, το κόστος που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι ο συνολικός αριθμός σφαλμάτων σελίδας που θα συμβούν για μία ακολουθία αιτημάτων.

Όσον αφορά τους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης για το πρόβλημα της σελιδοποίησης, οι δύο πιο γνωστοί αλγόριθμοι είναι:

- LRU (Least Recently Used): όταν συμβεί ένα σφάλμα σελίδας, ο αλγόριθμος αφαιρεί από τη γρήγορη μνήμη τη σελίδα που ζητείται λιγότερο συχνά
- FIFO (First-In First-Out): όταν συμβεί ένα σφάλμα σελίδας, ο αλγόριθμος αφαιρεί από τη γρήγορη μνήμη τη σελίδα που βρίσκεται στη γρήγορη μνήμη το μεγαλύτερο διάστημα

Στο [74] αναλύεται η απόδοση των αλγορίθμων LRU και FIFO όπου έχει αποδειχθεί πως για οποιαδήποτε ακολουθία αιτημάτων ο αριθμός των σφαλμάτων σελίδας είναι το πολύ k φορές του πλήθους των σφαλμάτων σελίδας που συμβαίνουν από το βέλτιστο OPT αλγόριθμο. Δηλαδή, οι αλγόριθμοι αυτοί είναι k -ανταγωνιστικοί. Επίσης, έχει αποδειχθεί πως οι δύο αυτοί αλγόριθμοι είναι βέλτιστοι. Ο βέλτιστος αλγόριθμος για το πρόβλημα της

σελιδοποίησης έχει περιγραφεί στο [75] και ονομάζεται MIN. Ο βέλτιστος αλγόριθμος MIN αφαιρεί τη σελίδα για την οποία έρχεται ένα αίτημα αργότερα από όλες τις άλλες στο μέλλον.

4.3.2 Το πρόβλημα k-server

Το πρόβλημα k-server είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα της θεωρίας των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης. Στο πρόβλημα αυτό δίνεται ένας χώρος S και k κινητοί εξυπηρετητές οι οποίοι τοποθετούνται σε σημεία του S . Κάθε αίτημα ορίζει ένα σημείο $x \in S$. Για να εξυπηρετηθεί ένα αίτημα, ένας από τους k εξυπηρετητές θα πρέπει να μετακινηθεί στο σημείο του αιτήματος εκτός εάν στο σημείο αυτό βρίσκεται ήδη ένας εξυπηρετητής. Η μετακίνηση ενός εξυπηρετητή από ένα σημείο x προς ένα σημείο y έχει κόστος ίσο με την απόσταση μεταξύ των σημείων x και y . Στόχος του προβλήματος είναι η εξυπηρέτηση μίας ακολουθίας αιτημάτων ούτως ώστε η συνολική απόσταση μετακίνησης όλων των εξυπηρετητών να είναι η ελάχιστη.

Το πρόβλημα αυτό εισήχθη με την εργασία [76] όπου επίσης αποδείχθηκε ένα κάτω φράγμα για ντετερμινιστικούς αλγόριθμους άμεσης απόκρισης. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο καλύτερος λόγος απόδοσης που μπορεί να πετύχει μέχρι τώρα ένας πιθανοτικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης είναι $2k - 1$.

4.3.3 Το πρόβλημα της Χρονοδρομολόγησης και Καταμερισμού Φόρτου

Η χρονοδρομολόγηση είναι ένα κλασικό και καλά μελετημένο πρόβλημα το οποίο ακόμα όμως ελκύει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Το πρόβλημα στη χρονοδρομολόγηση άμεσης απόκρισης ορίζεται όπως παρακάτω. Δίνεται ένα σύνολο από m συστήματα. Μία ακολουθία από εργασίες καταφθάνουν, με κάθε εργασία να έχει ένα χρόνο επεξεργασίας ο οποίος μπορεί να είναι γνωστός, μπορεί όμως και να μην είναι. Κάθε νέα εργασία πρέπει να δρομολογηθεί άμεσα σε μία από τις m μηχανές για επεξεργασία. Ο στόχος του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η βελτιστοποίηση μίας συγκεκριμένης παραμέτρου ανάλογα με τις διάφορες παραλλαγές του προβλήματος.

Η πιο βασική εκδοχή υποθέτει πως όλες οι μηχανές είναι ίδιες και οι αιτήσεις προς επεξεργασία καταφθάνουν μία-μία. Επίσης υποθέτει πως ο χρόνος επεξεργασίας του κάθε αιτήματος είναι γνωστός εκ των προτέρων. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του *makespan*

του συστήματος, δηλαδή το χρόνο ολοκλήρωσης και της τελευταίας εργασίας μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο.

Για αυτή την εκδοχή του προβλήματος ο βασικότερος αλγόριθμος προτάθηκε στο [77] με την ονομασία Greedy και είναι $(2 - \frac{1}{m})$ -ανταγωνιστικός. Ο αλγόριθμος Greedy αναθέτει κάθε νέα εργασία στο σύστημα με το λιγότερο φόρτο.

4.3.4 Το πρόβλημα του Generalized caching

Το πρόβλημα του generalized caching ασχολείται με το caching αντικειμένων στο διαδίκτυο. Οι μνήμες αυτές διατηρούνται τόσο από τους πελάτες όσο και από εξυπηρετητές. Η αποθήκευση πρόσφατα προσπελασμένων αντικειμένων σε τοπικές μνήμες μπορεί να μειώσει σημαντικά τους χρόνους απόκρισης καθώς και τη συμφόρηση στο δίκτυο επειδή τα αντικείμενα που ζητούνται δεν είναι απαραίτητο να μεταφέρονται συνεχώς πάνω από το διαδίκτυο. Γενικά, τα προβλήματα caching στο διαδίκτυο ποικίλουν από το απλό πρόβλημα της σελιδοποίησης που έχουμε ήδη περιγράψει μέχρι μορφές που αναφέρονται σε αντικείμενα πολλαπλού μεγέθους με διαφορετικό κόστος όταν ανακτώνται σε μία τοπική μνήμη. Το κόστος αυτό μπορεί για παράδειγμα να εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου και από την τρέχουσα συμφόρηση του δικτύου.

Στο πρόβλημα του generalized caching υπάρχει ένα σύστημα μνήμης δύο επιπέδων που αποτελείται από μία γρήγορη και μία αργή μνήμη. Στην αναπαράσταση του δικτύου, η γρήγορη μνήμη είναι η τοπική μνήμη και η αργή μνήμη είναι ολόκληρο το διαδίκτυο. Θεωρείται πως η γρήγορη μνήμη έχει χωρητικότητα K . Για κάθε αντικείμενο d θεωρούμε ένα μέγεθος $size(d)$ και ένα κόστος $cost(d)$. Το συνολικό μέγεθος των σελίδων στη γρήγορη μνήμη δεν μπορεί ποτέ να ξεπερνά το K . Εάν ένα αντικείμενο που ζητείται δεν βρίσκεται στην τοπική μνήμη, τότε επιφέρει ένα κόστος $cost(d)$. Στόχος του προβλήματος είναι η εξυπηρέτηση μίας ακολουθίας αιτήσεων με το μικρότερο δυνατό συνολικό κόστος φόρτωσης.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα κόστους:

1. The Bit Model [78]: για κάθε αντικείμενο d ισχύει $cost(d) = size(d)$
2. The Fault Model [78]: για κάθε αντικείμενο d ισχύει $cost(d) = 1$ ενώ το μέγεθος μπορεί να είναι αυθαίρετο

3. The Cost Model: για κάθε αντικείμενο d ισχύει $size(d) = 1$ ενώ το κόστος μπορεί να είναι αυθαίρετο
4. The General Model: για κάθε αντικείμενο d τόσο το κόστος όσο και το μέγεθος μπορεί να είναι αυθαίρετα

Για τα μοντέλα Bit και Fault, ο αλγόριθμος LRU είναι $(k + 1)$ -ανταγωνιστικός, όπου το k είναι ο λόγος του K προς το μέγεθος του μικρότερου αντικειμένου που έχει ζητηθεί. Ο λόγος απόδοσης $k + 1$ είναι βέλτιστος για όλους τους ντετερμινιστικούς αλγορίθμους άμεσης απόκρισης. Επίσης, για τα συγκεκριμένα μοντέλα υπάρχουν πιθανοτικοί αλγόριθμοι που είναι $\mathcal{O}(\log^2 k)$ -ανταγωνιστικοί. Όσον αφορά το μοντέλο Cost, το οποίο είναι γνωστό και σαν ζυγισμένο caching, είναι μία ειδική περίπτωση του προβλήματος $k - server$. Τέλος, για το μοντέλο General δίνεται ένας K -ανταγωνιστικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης στο [79].

4.3.5 Το πρόβλημα Διατήρησης TCP Συνδέσεων

Στο [80] εμφανίστηκε το πρόβλημα του connection caching για το διαδίκτυο. Η επικοινωνία μεταξύ πελάτη και εξυπηρετητή στο διαδίκτυο γίνεται παραδοσιακά με το πρωτόκολλο HTTP (Hyper Text Transform Protocol), το οποίο χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο το πρωτόκολλο TCP για τη μετάδοση των δεδομένων. Η τρέχουσα έκδοση του HTTP/1.1 λειτουργεί με μόνιμες συνδέσεις. Δηλαδή μόλις εγκαθιδρυθεί μία TCP σύνδεση μπορεί να διατηρηθεί ανοικτή και χρησιμοποιηθεί για μετάδοση μέχρι να την κλείσει ένα από τα δύο άκρα. Φυσικά, ένας κόμβος του δικτύου μπορεί να διατηρήσει έναν περιορισμένο αριθμό από ταυτόχρονα ανοικτές TCP συνδέσεις.

Βάσει αυτών, στο πρόβλημα του connection caching δίνεται ένα δίκτυο μοντελοποιημένο σαν ένας κατευθυνόμενος γράφος. Οι κορυφές του γράφου αναπαριστούν τους κόμβους του δικτύου και οι ακμές αναπαριστούν όλες τις πιθανές συνδέσεις. Κάθε κόμβος διατηρεί μία μνήμη στην οποία μπορεί να διατηρεί τις ανοικτές συνδέσεις. Μία σύνδεση $c = (u, v)$ θεωρείται ανοικτή εάν βρίσκεται αποθηκευμένη στις μνήμες και των δύο κόμβων u, v . Για έναν κόμβο u , το $k(u)$ ορίζει το πλήθος των συνδέσεων που μπορεί να διατηρεί ταυτόχρονα ανοικτές και έστω k το μέγεθος της μεγαλύτερης μνήμης στο δίκτυο. Για μία σύνδεση ορίζεται το $cost(u, v)$ ως το κόστος εγκατάστασης της σύνδεσης. Ένας αλγόριθμος άμεσης απόκρισης για αυτό το πρόβλημα πρέπει να εξυπηρετήσει μία ακολουθία αιτήσεων με την

κάθε αίτηση να ορίζει μία σύνδεση. Εάν η σύνδεση που αιτήθηκε είναι ήδη ανοικτή τότε το κόστος εξυπηρέτησής της είναι 0, διαφορετικά η εγκατάστασή της επιφέρει ένα κόστος. Στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους για μία ακολουθία αιτήσεων.

Στο [80] έχει αποδειχθεί πως οποιοσδήποτε c -ανταγωνιστικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης από το πρόβλημα της σελιδοποίησης μπορεί να μετασχηματιστεί σε έναν $2c$ -ανταγωνιστικό αλγόριθμο για το πρόβλημα αυτό. Επίσης, στο [81] έχουν προταθεί ντετερμινιστικοί και πιθανοτικοί αλγόριθμοι μακροχρόνου για το πρόβλημα του connection caching.

4.3.6 Το πρόβλημα Διαχείρισης Buffers σε Δίκτυο

Το τελευταίο πρόβλημα άμεσης απόκρισης που θα παρουσιάσουμε σχετίζεται με τη διαχείριση των buffers των δρομολογητών και των μεταγωγέων σε δίκτυα. Οι δρομολογητές και οι μεταγωγείς διαχειρίζονται την κίνηση δεδομένων στα δίκτυα και διασφαλίζουν πως τα πακέτα θα φθάσουν στο σωστό προορισμό τους. Τυπικά, η κίνηση μεταφέρεται σε ριπές, δηλαδή το πλήθος των πακέτων που φθάνουν σε ένα buffer σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ξεπερνά το πλήθος των πακέτων που μπορούν να επεξεργαστούν μέσα στο χρονικό αυτό διάστημα. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε απώλεια πακέτων με αποτέλεσμα τα πακέτα αυτά να πρέπει να επαναμεταδωθούν. Για να μειωθεί η απώλεια πακέτων, οι δρομολογητές και οι μεταγωγείς είναι εφοδιασμένοι με buffers όπου αποθηκεύουν προσωρινά πακέτα μέχρι να τα επεξεργαστούν και τα προωθήσουν κατάλληλα. Το πρόβλημα άμεσης απόκρισης αφορά τη διαχείριση αυτών των buffers.

Θεωρούνται n ροές δεδομένων που μοιράζονται ένα κοινό κανάλι εξόδου σε ένα δρομολογητή. Τα δεδομένα αποτελούνται από πακέτα ίσου μεγέθους. Τη χρονική στιγμή t , $N(t, i)$ πακέτα καταφθάνουν από τη ροή i . Με κάθε ροή δεδομένων είναι συσχετισμένη μία ουρά FIFO άπειρης χωρητικότητας, στην οποία αποθηκεύονται τα πακέτα κάθε ροής. Σε κάθε χρονικό βήμα ένας αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης επιλέγει μία από τις ουρές και στέλνει το πρώτο πακέτο της στο κανάλι εξόδου του δρομολογητή. Στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του μέγιστου μήκους της ουράς που εμφανίζεται ανάμεσα σε όλες τις ουρές.

Στις εργασίες [82] και [83] έχει αποδειχθεί πως ο λόγος απόδοσης ενός οποιοδήποτε ντετερμινιστικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης είναι $\Omega(\log n)$. Ο πιο γνωστός αλγόριθμος για το πρόβλημα ονομάζεται Longest Queue First.

- Longest Queue First: ο αλγόριθμος επιλέγει πάντα την ουρά με το μεγαλύτερο μέγεθος

Ο αλγόριθμος Longest Queue First είναι $\mathcal{O}(\log n)$ -ανταγωνιστικός.

Κεφάλαιο 5

Ανασκόπηση Ερευνητικής Περιοχής

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία ανασκόπηση της ερευνητικής περιοχής που μελετά η παρούσα διδακτορική διατριβή. Περιγράφονται με λεπτομέρειες τα βασικότερα σημεία των ερευνητικών εργασιών που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας. Για λόγους πληρότητας, θα συμπεριλάβουμε και εργασίες που αναφέρονται σε παλαιότερης γενιάς κινητά δίκτυα, από τα τέταρτης γενιάς (4G), κυρίως από την προκάτοχη τρίτη γενιά (3G) των κινητών συστημάτων, τα οποία όμως προσφέρουν πολύτιμα συμπεράσματα για την αξιολόγηση της εφαρμογής του AL-FEC πάνω σε multicast υπηρεσίες κινητών δικτύων. Επιπλέον, καθώς η διαδικασία της προσομοίωσης των κινητών δικτύων επικοινωνιών αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της παρούσας έρευνας, παρουσιάζουμε εκτενώς τους βασικούς μηχανισμούς προσομοίωσης ερευνητικής χρήσης των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών. Επίσης, η εφαρμογή των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης για μηχανισμούς παροχής αξιοπιστίας FEC είναι ένα κομμάτι για το οποίο δεν υπάρχουν σχετικές εργασίες, καθώς η παρούσα διδακτορική διατριβή εισάγει πρώτη το πρόβλημα αποδοτικής εφαρμογής του FEC στο επίπεδο εφαρμογών για κινητά δίκτυα υπολογιστών. Παρόλα αυτά, οι αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε άλλα προβλήματα των κινητών δικτύων εφαρμογών για τα οποία παρουσιάζουμε και περιγράφουμε σχετικές εργασίες.

Για λόγους ορθότερης παρουσίασης των σχετικών εργασιών θα χωρίσουμε την ερευνητική περιοχή σε τρία τμήματα, τα οποία παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους:

1. Μηχανισμοί προσομοίωσης των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών.
2. Αξιολόγηση της εφαρμογής του AL-FEC πάνω σε multicast υπηρεσίες των κινητών δικτύων επικοινωνιών.
3. Εφαρμογή των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης σε προβλήματα των κινητών δικτύων επικοινωνιών.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε και να τονίσουμε, πως τόσο η ερευνητική περιοχή των τέταρτης γενιάς κινητών δικτύων είναι μία νέα περιοχή, αλλά ειδικότερα η μελέτη και εφαρμογή των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης στην αποδοτική εφαρμογή του AL-FEC πάνω σε υπηρεσίες multicast μετάδοσης είναι μία περιοχή η οποία πρωτοεισάγεται με την παρούσα διδακτορική διατριβή και επομένως δεν υπάρχει σχετική έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία μέχρι τώρα.

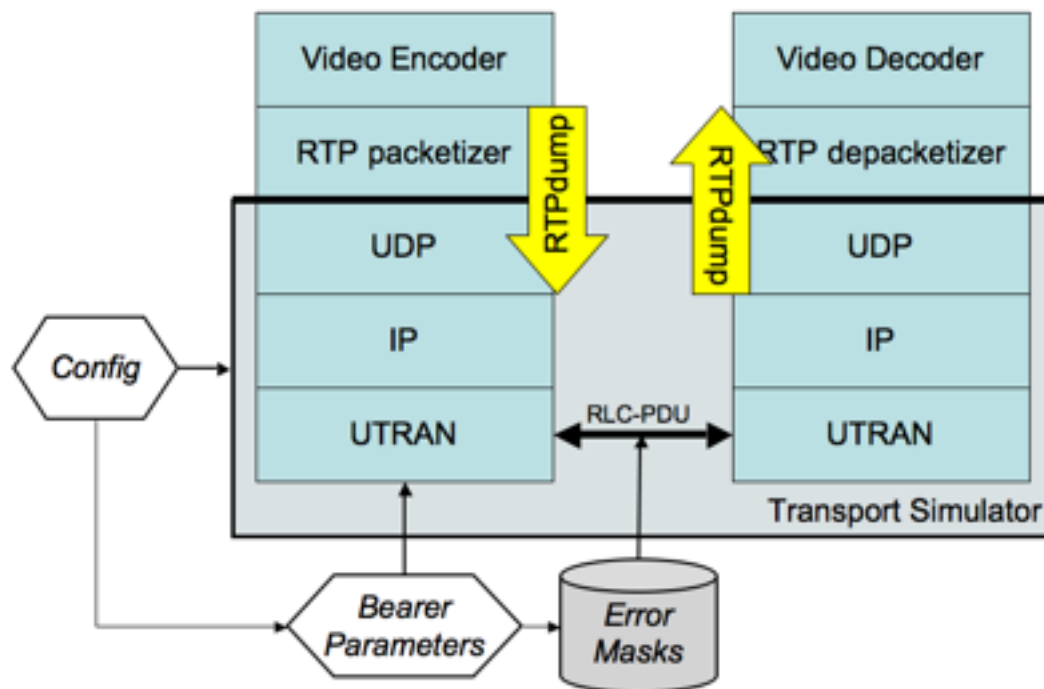
5.1 Περιβάλλοντα Προσομοίωσης Κυψελωτών Δικτύων Επικοινωνιών

Στην παρούσα πρώτη παράγραφο παρουσιάζουμε κάποιους προσομοιωτές κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών ερευνητικής χρήσης, συμπεριλαμβάνοντας και πλατφόρμες προσομοίωσης που αναφέρονται σε παλαιότερης γενιάς (3G) κινητά δίκτυα, που προσφέρουν όμως σημαντικές πληροφορίες για τη διαδικασία προσομοίωσης, καθώς και για συγκεκριμένες εξειδικευμένες λειτουργίες που μπορεί να προσφέρει καθένας από αυτούς τους μηχανισμούς.

5.1.1 Προσομοιωτής SA4

Πρόκειται για ένα περιβάλλον προσομοίωσης κινητών δικτύων τεχνολογίας UMTS αλλά και WCDMA, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον από τις ομάδες εργασίας του 3GPP [86, 87], για την αξιολόγηση υπηρεσιών streaming μετάδοσης video. Ο στόχος του προσομοιωτή αυτού είναι κυρίως η προσομοίωση της διαδικασίας μεταφοράς, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1, των πακέτων διαφόρων streaming υπηρεσιών χρησιμοποιώντας απλώς κάποια μοντέλα απωλειών για το φυσικό επίπεδο, εστιάζοντας τη λειτουργία του σε υψηλότερα επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων.

Η προσομοίωση περιλαμβάνει κωδικοποίηση πηγής και ενθυλάκωση των δεδομένων σε RTP πακέτα για το κομμάτι της υπηρεσίας πολυμέσων. Στη συνέχεια, ο προσομοιωτής εκτελεί



ΣΧΗΜΑ 5.1: Η Αρχιτεκτονική του Προσομοιωτή SA4

την αντιστοίχιση των RTP/IP πακέτων σε RLC μονάδες πακέτων δεδομένων (Packet Data Units-PDUs), τη διαδικασία της εξαγωγής δεδομένων από τα ληφθέντα πακέτα καθώς και την αποκωδικοποίηση αυτών. Η εισαγωγή του μοντέλου λαθών κατά τη μετάδοση γίνεται στο υποεπίπεδο RLC του επιπέδου ζεύξης, χρησιμοποιώντας μάσκες λαθών που προσομοιώνουν τη μετάδοση στο UTRAN. Επίσης, ο προσομοιωτής μοντελοποιεί την εφαρμογή της συμπίεσης επικεφαλίδων, μειώνοντας το μέγεθος των RTP/UDP/IP επικεφαλίδων σε μία σταθερή τιμή. Επιπλέον, η πλατφόρμα αυτή προσφέρει ανάλογα με το περιβάλλον προσομοίωσης τη χρήση τόσο PSS bearers, όσο και MBMS bearers, δίνοντας τη δυνατότητα επιλογής διαφόρων παραμέτρων τους. Στην περίπτωση χρήσης των μοντελοποιημένων MBMS bearers, προσφέρεται επίσης η δυνατότητα χρήσης ενός μοντελοποιημένου μηχανισμού AL-FEC με χρήση των Raptor κωδίκων (σε ορισμένες εκδόσεις του προσομοιωτή) για την προσομοίωση της απόδοσης της προστασίας που προσφέρει το AL-FEC στις MBMS υπηρεσίες.

Αναλυτικότερα, οι βασικότερες παράμετροι εισόδου που προσφέρει ο SA4 προσομοιωτής είναι οι παρακάτω:

- Αρχείο εισόδου RTP: Το όνομα του αρχείου που περιέχει τα δεδομένα RTP

- Αρχείο εξόδου RTP: Το όνομα του αρχείου εξόδου που θα περιέχει τα ληφθέντα δεδομένα RTP είναι ίδιας μορφής με το αρχείο εισόδου RTP, με τη μόνη προφανή διαφορά πως δεν θα περιέχει όλα τα δεδομένα εισόδου καθώς κάποια πακέτα δεν θα ληφθούν
- Bearer: Ένας ακέραιος αριθμός που χαρακτηρίζει τον επιθυμητό bearer. Δίνεται λίστα από διαθέσιμους PSS και MBMS bearers
- RandomSeed: Ένας ακέραιος αριθμός που ορίζει τον αριθμό έναρξης της τυχαίας γεννήτριας του μοντέλου λαθών
- ErrorfreeRTP: Ορίζει ένα συγκεκριμένο αριθμό RTP πακέτων στην αρχή του αρχείου, τα οποία θα προωθηθούν στον παραλήπτη χωρίς να χαθούν
- MaxSendingDelay: Με τον ορισμό του στην τιμή μηδέν, η προσωρινή μνήμη του αποστολέα θεωρείται άπειρου μήκους
- Max E2Edelay: Η μέγιστη καθυστέρηση ενός πακέτου σε ms μεταξύ του χρόνου που δημιουργείται και αυτού που αποστέλλεται από τον προσομοιωτή. Εάν ο χρόνος αυτός υπερβεί την ορισμένη τιμή το πακέτο ακυρώνεται, θεωρώντας το σαν απώλεια πακέτου
- Stat File: Πρόκειται για την έξοδο του προσομοιωτή, αρχείο το οποίο προσφέρει τις παρακάτω πληροφορίες για κάθε εκτέλεση προσομοίωσης:
 - Ημερομηνία και ώρα
 - Αριθμός του bearer
 - Ρυθμός λάθους bit (bit error rate) για τη συγκεκριμένη μετάδοση
 - Ρυθμός απώλειας στο επίπεδο RLC-PDU
 - Ρυθμός μετάδοσης bit, λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τα ληφθέντα και πλήρη RLC blocks
 - Συνολικός αριθμός πλαισίων RLC
 - Συνολικός αριθμός επανασταλθέντων πλαισίων RLC
 - Συνολικός αριθμός RTP πακέτων
 - Ρυθμός απώλειας RTP πακέτων
 - Ο ρυθμός κωδικοποίησης (bitrate) του video, σε kbit/s
 - Ο συνολικός χρόνος αποστολής του αρχείου σε ms

Date	Time	Bear	StartPos	Bit-ER	RLC-ER	BRateeff	TotFrame	TotRetra	TotDummy	TotPacks	PlossRat	BitrateA	TranTime
29-Nov	17:50	1	0	0.0102	0.1074	54.24	447	48	0	31	0	54.58	4470ms

ΣΧΗΜΑ 5.2: Παράδειγμα Εξόδου του Προσομοιωτή SA4

Ένα παράδειγμα της εξόδου του προσομοιωτή για μία μετάδοση εμφανίζεται στην Εικόνα 5.2.

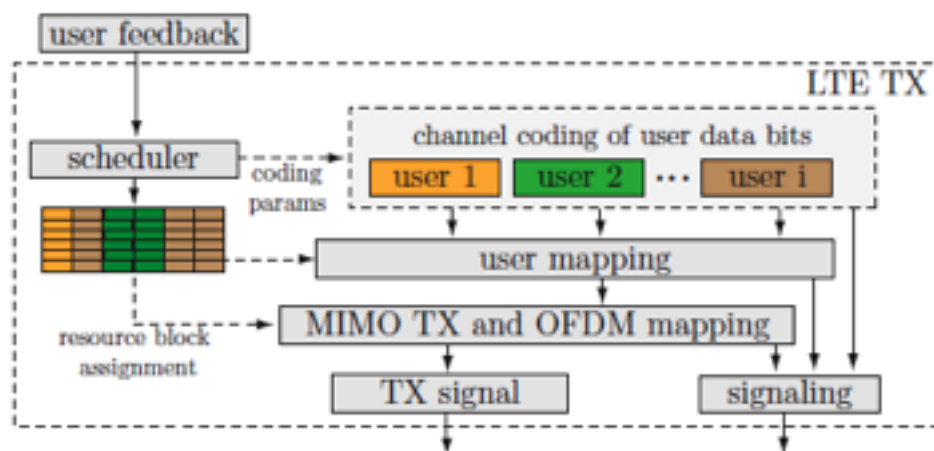
5.1.2 Προσομοιωτής E.U.R.A.N.E

Ο προσομοιωτής Enhanced UMTS Radio Access Network extensions (E.U.R.A.N.E), είναι ουσιαστικά ένα πακέτο λειτουργικών επεκτάσεων του διαδεδομένου προσομοιωτή δικτύων Network Simulator – ns-2 [88] για την υποστήριξη των κινητών δικτύων UMTS. Η ανάπτυξη του προσομοιωτή E.U.R.A.N.E έγινε στα πλαίσια του προγράμματος SEACORN [89].

Οι επεκτάσεις του πακέτου αυτού για τον ns-2 περιλαμβάνουν τρεις νέους κόμβους στα στοιχεία του ns-2, που ονομάζονται Radio Network Controller (RNC), Basestation (BS) και User Equipment (UE), η λειτουργικότητα των οποίων υποστηρίζει τα ακόλουθα κανάλια μεταφοράς της τεχνολογίας UMTS:

- FACH
- RACH
- DCH
- HS-DSCH

Οι δυνατότητες προσομοίωσης που προσφέρει ο μηχανισμός αυτός, είναι οι ίδιες με της πλατφόρμας ns-2, κάνοντας χρήση των νέων δικτυακών στοιχείων που προστέθηκαν. Περισσότερες πληροφορίες για τη λειτουργία του προσομοιωτή αυτού μπορούν να βρεθούν στο [90].



ΣΧΗΜΑ 5.3: Η Αρχιτεκτονική του Προσομοιωτή LTE Link Level

5.1.3 Προσομοιωτής LTE Link Level

Ο προσομοιωτής LTE Link Level [91] είναι μία πλατφόρμα προσομοίωσης, υλοποιημένη σε περιβάλλον MATLAB, του φυσικού επιπέδου των κινητών δικτύων LTE. Ο προσομοιωτής περιλαμβάνει μόνο την αξιολόγηση της απόδοσης downlink μεταδόσεων και προσφέρει διάφορα περιβάλλοντα μετάδοσης, όπως τη μετάδοση σε ένα χρήστη και τη μετάδοση σε πολλούς χρήστες που τοποθετούνται σε μία κυψέλη ή σε πολλαπλές κυψέλες. Οι βασικές προσφερόμενες λειτουργίες είναι η προσαρμοστική επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Adaptive Modulation and Coding-AMC), η υποστήριξη MIMO τεχνικών, ο μηχανισμός HARQ, καθώς και θέματα χρονοπρογραμματισμού στο υποεπίπεδο MAC του επιπέδου ζεύξης, με τη βασική δομή του αποστολέα να παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3.

Τα διαθέσιμα, μέχρι στιγμής, μοντέλα καναλιών του προσομοιωτή είναι ένα μοντέλο προσθετικού λευκού Γκαουσιανού θορύβου (AWGN), ένα κανάλι που ακολουθεί την Flat Rayleigh κατανομή, ένα block fading και ένα fast fading κανάλι, διάφορα μοντέλα καναλιών της ITU-R, καθώς και μοντέλα καναλιών του 3GPP. Τα αποτελέσματα του προσομοιωτή αφορούν το ρυθμό λάθους block (Block Error Rate-BLER) καθώς και το ρυθμό μετάδοσης του ασύρματου καναλιού. Τέλος, προσφέρει και τη δυνατότητα αξιολόγησης των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι MIMO μεταδόσεις στην απόδοση του συστήματος.

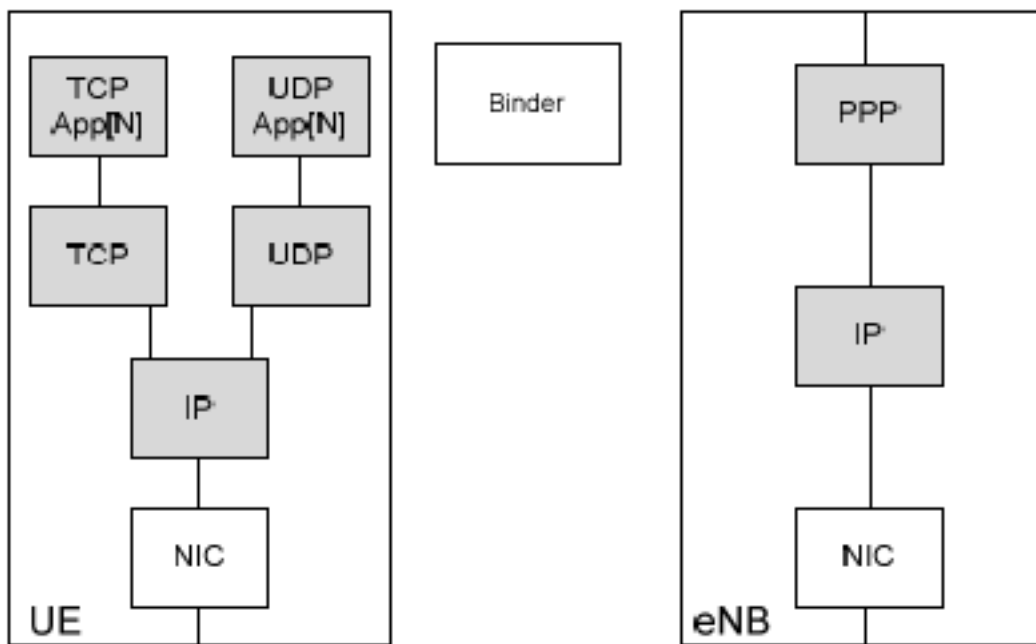
5.1.4 Προσομοιωτής LTE System Level

Ο προσομοιωτής LTE System Level [92] δημιουργήθηκε για να συμπληρώσει τον προηγούμενο προσομοιωτή LTE Link Level. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μηχανισμών επιτρέπει τη λεπτομερή προσομοίωση των διαδικασιών του φυσικού επιπέδου για την ανάλυση θεμάτων σχετικών με το επίπεδο ζεύξης και την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος όπου μπορεί να διερευνηθεί η συνολική απόδοση του δικτύου. Στόχος του System Level προσομοιωτή είναι να μελετήσει θέματα που αναφέρονται στη διάταξη των κυψελών, στο χρονοπρογραμματισμό ή σε θέματα ελέγχου της παρεμβολής. Παρόλα αυτά, οι επιλογές του συγκεκριμένου προσομοιωτή θεωρούμε πως είναι πολύ περιορισμένες και η χρήση του δεν θα μπορούσε να επεκταθεί σε άλλα θέματα, όπως η συνολική και ρεαλιστική αξιολόγηση ενός LTE MBMS συστήματος, που απαιτούν πλήρη λειτουργικότητα όλων των στοιχείων του δικτύου.

5.1.5 Προσομοιωτής SimuLTE

Οι συγγραφείς του [104] προσφέρουν έναν προσομοιωτή ανοικτού κώδικα με την ονομασία SimuLTE[105], ο οποίος είναι βασισμένος στη γνωστή πλατφόρμα προσομοίωσης OM-NeT++ [106]. Ο προσομοιωτής αυτός είναι ένας system-level προσομοιωτής και είναι συμβατός με τις προδιαγραφές του 3GPP για κυψελωτά δίκτυα τεχνολογίας LTE και LTE-Advanced. Ο SimuLTE προσομοιώνει το data plane τόσο του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (RAN) όσο και του δικτύου κορμού (EPC) των δικτύων LTE. Η πλατφόρμα μπορεί να προσφέρει προσομοιώσεις σε FDD λειτουργία, με ετερογενή eNBs (π.χ. macro, micro, pico) υποστηρίζοντας κατευθυντικές και ανισοτροπικές κεραιές καθώς και την επικοινωνία μέσω της X2 διεπαφής. Επίσης, προσφέρονται ρεαλιστικά μοντέλα καναλιών, πλήρως συμβατά με τις προδιαγραφές του 3GPP, η προσομοίωση του επιπέδου MAC καθώς και η χρονοδρομολόγηση πόρων τόσο στην κεραία εκπομπής όσο και στις τερματικές συσκευές. Στην τρέχουσα έκδοση της πλατφόρμας δεν έχουν μοντελοποιηθεί οι λειτουργίες του RRC. Η βασική δομή του προσομοιωτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4.

Το στοιχείο Binder είναι υπεύθυνο για την γενική διαχείριση και την επικοινωνία των κόμβων που συμμετέχουν σε μία προσομοίωση, δηλαδή των σταθμών βάσης και των τερματικών συσκευών. Η υλοποίηση των πρωτοκόλλων μεταφοράς TCP και UDP καθώς και του πρωτοκόλλου IP παρέχονται απευθείας από την πλατφόρμα OMNeT++. Το επίπεδο της



ΣΧΗΜΑ 5.4: Η Αρχιτεκτονική του Προσομοιωτή SimuLTE

Network Interface Card (NIC) προσομοιώνει πλήρως τις λειτουργίες του φυσικού επιπέδου της στοίβας των δικτύων LTE.

5.1.6 Προσομοιωτής LTE-Sim

Στην εργασία [107] παρουσιάζεται η πλατφόρμα προσομοίωσης των κινητών κυψελωτών δικτύων τεχνολογίας LTE, με την ονομασία LTE-Sim, αρχικά εμφανίστηκε σαν τμήμα της τελευταίας έκδοσης του προσομοιωτή δικτύων ns-3[108], όμως πλέον προσφέρεται σαν αυτόνομο πακέτο σε μία πιο ολοκληρωμένη έκδοσή του. Ο LTE-Sim προσπαθεί να γεφυρώσει το κενό που αφήνουν οι προηγούμενοι προσομοιωτές LTE, οι οποίοι υποστηρίζουν μόνο κάποια τμήματα ενός συστήματος LTE, παρέχοντας ένα πλήρες περιβάλλον για την συνολική αξιολόγηση της απόδοσης ενός LTE συστήματος.

Ο LTE-Sim προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου δικτύου LTE, καθώς περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση τόσο του eUTRAN όσο και του EPS. Συγκεκριμένα περιλαμβάνει περιβάλλοντα μίας και πολλαπλών κυψελών, διαχείριση θεμάτων QoS, περιβάλλοντα πολλαπλών χρηστών, κινητικότητα χρηστών, διαδικασίες handover καθώς και την υλοποίηση τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Έχουν μοντελοποιηθεί τρεις κόμβοι του δικτύου: το User Equipment (UE), ο evolved NodeB (eNB) και η Mobility Management

Entity/Gateway (MME/GW). Επίσης, υποστηρίζεται η διαχείριση των bearers για τη μετάδοση δεδομένων καθώς επίσης παρέχονται και διάφορες άλλες λειτουργίες των LTE, όπως διάφοροι αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης, ένα σχήμα AMC και η λειτουργία παροχής ανάδρασης σχετικά με την κατάσταση του καναλιού (Channel Quality Indicator-CQI). Τέλος, παρέχονται διάφορα μοντέλα για το φυσικό επίπεδο.

5.2 AL-FEC σε Multicast Υπηρεσίες

Στην εργασία του [93], οι συγγραφείς προσφέρουν μία αξιολόγηση της απόδοσης της εφαρμογής του συστηματικού κώδικα Raptor πάνω στην MBMS download μετάδοση σε κινητά συστήματα επικοινωνιών τεχνολογίας UMTS. Η αξιολόγηση αυτή, πραγματοποιείται από την πλευρά του τηλεπικοινωνιακού κόστους της μετάδοσης, περιγράφοντας ένα μοντέλο για την ανάλυση κόστους της MBMS υπηρεσίας τεχνολογίας HSDPA. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα πάνω στη λειτουργία της υπηρεσίας download περιλαμβάνοντας τη μετάδοση δεδομένων πάνω από MBMS multicast bearers όπου εφαρμόζεται AL-FEC, καθώς και τη χρήση unicast bearers για την προσομοίωση της διαδικασίας επισκευής αρχείου που περιλαμβάνει η υπηρεσία download, προτείνοντας την επιλεκτική επαναμετάδοση των χαμένων δεδομένων. Το σχήμα προσομοίωσης βασίζεται σε μία πιθανοτική μέθοδο που μοντελοποιεί την κατανομή των multicast χρηστών στο UMTS δίκτυο. Τα αποτελέσματα αναλύουν τη συμπεριφορά του σχήματος FEC του 3GPP, σε σχέση με παραμέτρους όπως η πυκνότητα των multicast χρηστών σε μία δεδομένη MBMS περιοχή καθώς και ο πληθυσμός των χρηστών. Επίσης έχει αξιολογηθεί η σχέση του overhead του κώδικα FEC με το κόστος επαναμετάδοσης των χαμένων πακέτων προτείνοντας ένα βέλτιστο σημείο επιλογής του.

Οι συγγραφείς της εργασίας [94] εστιάζουν στη διαδικασία επαναποστολής των χαμένων πακέτων της MBMS download υπηρεσίας πάνω σε δίκτυα ασύρματης πρόσβασης τεχνολογίας UTRAN και GERAN. Προτείνουν το συνδυασμό της χρήσης AL-FEC με τη χρήση συνδυασμένων point-to-point αλλά και point-to-multipoint μεταδόσεων για την αποστολή χαμένων πακέτων. Μέσα από ένα σύνολο προσομοιώσεων προσπαθούν να εξισορροπήσουν το FEC overhead σε σχέση με τα προτεινόμενα σχήματα επαναποστολής, έχοντας σαν στόχο τη βελτιστοποίηση της χρήσης των ασύρματων πόρων του δικτύου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η απλή φάση της point-to-multipoint μετάδοσης για την επισκευή του μεταδιδόμενου αρχείου δεν είναι αποδοτική, καθώς ο αποστολέας δεν μπορεί να γνωρίζει τις

διαφορετικές απώλειες που παρουσιάζουν οι χρήστες και πως η αύξηση της προστασίας που προσφέρει ο μηχανισμός FEC κατά τη μετάδοση σε συνδυασμό με το συνδυαστικό σχήμα point-to-point και point-to-multipoint μεταδόσεων είναι ευεργετικό ως προς τη συνολική λειτουργία του δικτύου, καθώς μειώνεται η διάρκεια της φάσης επισκευής και αποφεύγεται η κατάσταση υπερφόρτωσης του εξυπηρετητή που έχει αναλάβει τη διαδικασία της επισκευής.

Στην εργασία που παρουσιάζεται στο [95] παρέχονται ρεαλιστικές προσομοιώσεις για την απόδοση της εφαρμογής του AL-FEC πάνω σε UMTS MBMS υπηρεσίες, καθώς οι περισσότερες σχετικές εργασίες υποθέτουν πολύ απλά μοντέλα απωλειών που τις περισσότερες φορές δεν ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες που αντιμετωπίζουν διαφορετικοί χρήστες σε μία MBMS περιοχή. Επίσης ερευνά το συνδυασμό και τη σχέση μεταξύ διαφόρων παραμέτρων της ασύρματης διεπαφής καθώς και της εφαρμογής της τεχνικής FEC στο φυσικό επίπεδο. Παρουσιάζεται μία ανάλυση της συνολικής απόδοσης ενός συστήματος MBMS, αναλύοντας τη σχέση μεταξύ του AL-FEC και του FEC στο φυσικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψιν παραμέτρους, όπως την ισχύ μετάδοσης και διάφορα μοντέλα κινητικότητας των χρηστών. Η διαστρωματική (cross-layer) μελέτη και προσπάθεια βελτιστοποίησης της συγκεκριμένης εργασίας προσφέρει ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, αντίθετα με την αντίληψη πως όλα τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά στο φυσικό επίπεδο, τα αποτελέσματα δείχνουν πως η ενίσχυση του ρυθμού κωδικοποίησης του AL-FEC (δλδ. η αύξηση του πλεονασμού που εισάγει ο κώδικας Raptor) σε βάρος του ρυθμού κωδικοποίησης του FEC στο φυσικό επίπεδο προσφέρει συγκριτικά καλύτερα αποτελέσματα στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Στο [96] παρουσιάζεται ένα σχήμα cross-layer σχεδιασμού για τη λειτουργία της MBMS μίας κυψέλης υπηρεσίας σε κινητά δίκτυα τεχνολογίας LTE. Το σχήμα αυτό περιλαμβάνει το επίπεδο εφαρμογής και το επίπεδο ζεύξης, στο οποίο ενεργεί ο μηχανισμός HARQ σε συνδυασμό με τις παραμέτρους λειτουργίας του κώδικα Raptor στο επίπεδο εφαρμογής. Το προτεινόμενο σχήμα προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα, όπως της απλούστερης σηματοδότησης σε σχέση με παραδοσιακά σχήματα ελέγχου λαθών και του βελτιωμένου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων που πετυχαίνει. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης λειτουργίας του νέου αυτού σχήματος δείχνουν, πως ο συγχρονισμός μεταξύ των δύο μηχανισμών παροχής προστασίας οδηγεί σε σημαντική βελτίωση στη σπατάλη πόρων του δικτύου, καθώς στόχος του σχήματος είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των επαναποστολών από το μηχανισμό του HARQ σε συνδυασμό με κατάλληλες ρυθμίσεις των παραμέτρων του κωδικοποιητή του

Raptor FEC, εξετάζοντας συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS που λαμβάνουν οι χρήστες, συγκρίνοντας το προτεινόμενο σχήμα με έναν κλασικό HARQ μηχανισμό.

Οι συγγραφείς του [97] προτείνουν ένα καινοτόμο σχήμα ανάκτησης αρχείου για την LTE eMBMS download μετάδοση σε δίκτυα MBSFN λειτουργίας. Το σχήμα αυτό εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η MBSFN λειτουργία και προτείνει την προσαρμοστική παραγωγή πλεονάζοντων συμβόλων για αποδοτική ανάκτηση αρχείων από το συστηματικό κώδικα Raptor του 3GPP. Τα πλεονάζοντα κωδικοποιημένα σύμβολα παράγονται συνεχώς, μέχρις ότου όλοι οι multicast παραλήπτες να έχουν ανακτήσει πλήρως το μεταδιδόμενο αρχείο. Για να εξακριβωθεί η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος, παρουσιάζονται προσομοιώσεις που εξετάζουν την απόδοση της αποκλειστικής μετάδοσης πλεονάζοντων συμβόλων, σε σχέση με τη μέθοδο της επαναμετάδοσης των χαμένων πακέτων του αρχείου χωρίς την εφαρμογή AL-FEC και σε σχέση με τη μέθοδο της εφαρμογής προκαθορισμένου AL-FEC overhead στη μετάδοση σε συνδυασμό με την επαναμετάδοση των χαμένων πακέτων στο τέλος της αποστολής. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη εργασία δείχνουν τη βελτιωμένη απόδοση του προτεινόμενου σχήματος αποκλειστικής χρήσης του συστηματικού κώδικα Raptor κατά τη download μετάδοση ενός αρχείου χωρίς την ανάγκη χρήσης μίας φάσης επισκευής, όπως προτείνεται από τις προδιαγραφές του 3GPP για τις MBMS υπηρεσίες download, σε δίκτυα MBSFN λειτουργίας. Ο λόγος της βελτιωμένης απόδοσης του σχήματος, για οποιαδήποτε τιμή του Raptor overhead, είναι τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η MBSFN μετάδοση, εκμεταλλεζόμενη το γεγονός πως αντί να αποστέλλει επιλεκτικά τα χαμένα πακέτα σε διαφορετικούς χρήστες, τα οποία πολύ πιθανόν να είναι διαφορετικά μεταξύ τους (λόγω των διαφορετικών απωλειών που παρουσιάζει ο κάθε χρήστης σε ένα τέτοιο περιβάλλον μετάδοσης), μεταδίδει πλεονάζουσα πληροφορία, η οποία είναι χρήσιμη σε όλους τους χρήστες βάσει των ιδιοτήτων των κωδικών Raptor.

Στην εργασία [109] αξιολογείται η προστασία AL-FEC με τη χρήση του κώδικα Raptor για τη multicast μετάδοση video πραγματικού χρόνου σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα ερευνάται η σχέση μεταξύ των σφαλμάτων που συμβαίνουν στο φυσικό επίπεδο και στο υποεπίπεδο MAC σε σχέση με το επίπεδο εφαρμογών, τη χρήση δηλαδή του κώδικα Raptor. Οι χαμηλοί ρυθμοί κωδικοποίησης για τον κώδικα Raptor φαίνεται πως εισάγουν πολύ υψηλές απαιτήσεις στο περιορισμένο εύρος ζώνης ενός ασύρματου καναλιού. Στη συγκεκριμένη εργασία επεκτείνεται το σχήμα επιλογής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης MCS έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψιν του και την επιβάρυνση που εισάγει η εφαρμογή

της προστασίας FEC με τον κώδικα Raptor. Προτείνεται ένα διαστρωματικό σχήμα βελτιστοποίησης μεταξύ των παραμέτρων εφαρμογής του FEC στο επίπεδο εφαρμογών και των επιλογών του MCS. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων πάνω σε multicast WiMAX περιβάλλον μετάδοσης έδειξαν πως η χρήση του κώδικα Raptor σαν AL-FEC προστασία αυξάνει σημαντικά τη συνολική απόδοση του δικτύου.

Οι συγγραφείς του [98] μέσα σε μία γενική ανάλυση των υπηρεσιών video του 3GPP πάνω σε παλαιότερης γενιάς UMTS κινητά συστήματα, παρουσιάζουν και την προσέγγισή τους για τη streaming μετάδοση video στα πλαίσια της υπηρεσίας MBMS. Η εργασία αυτή ασχολείται περισσότερο με τις προσφερόμενες τεχνολογίες για την αποδοτική παροχή τέτοιου είδους υπηρεσιών, εξετάζοντάς τις υπό το πρίσμα της απόδοσής τους στην παροχή QoS χαρακτηριστικών στους τελικούς χρήστες. Οι συγγραφείς της εργασίας εξετάζουν τη χρήση του AL-FEC σε MBMS video streaming υπηρεσίες σαν ένα εργαλείο παροχής QoS, οι παράμετροι του οποίου, προσαρμόζονται ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου καθώς και διάφορους περιορισμούς που εισάγουν οι υπηρεσίες μετάδοσης video. Και σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται η απόδοση ενός cross-layer σχεδιασμού, που περιλαμβάνει τη μελέτη της σχέσης του ρυθμού κωδικοποίησης του AL-FEC (δλδ. το ποσό της πλεονάζουσας πληροφορίας) με το ρυθμό κωδικοποίησης του FEC στο φυσικό επίπεδο, λαμβάνοντας όμως υπόψη και τους περιορισμούς που θέτει μία streaming μετάδοση, κυρίως όσον αφορά στη συνολική καθυστέρηση του συστήματος για την παροχή της μεταδιδόμενης πολυμεσικής πληροφορίας στους τελικούς χρήστες. Μέσα από ρεαλιστικές προσομοιώσεις που απεικονίζουν το ποσοστό των μη ικανοποιημένων χρηστών σε σχέση με το συνολικό ποσό της προστασίας που εισάγεται από το AL-FEC εξάγονται ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Καταρχήν διαπιστώνεται πως η χρήση AL-FEC είναι ευεργετική για την απόδοση του συστήματος, καθώς το FEC μόνο στο φυσικό επίπεδο δεν είναι ικανό να αντιμετωπίσει την απώλεια των κατεστραμμένων πακέτων. Ο ιδανικός συνδυασμός για αυτές τις δύο παραμέτρους φαίνεται πως είναι η ίση κατανομή του ρυθμού κωδικοποίησης FEC μεταξύ του επιπέδου εφαρμογών και του φυσικού επιπέδου, καθώς περαιτέρω αύξηση του overhead του AL-FEC οδηγεί σε αύξηση του ποσοστού των μη ικανοποιημένων χρηστών κυρίως λόγω των χρονικών περιορισμών που θέτει η streaming μετάδοση video.

Στην εργασία του [99] παρουσιάζεται ένας εξελιγμένος σχεδιασμός του συστήματος αποκωδικοποίησης στην πλευρά του παραλήπτη, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στη μέθοδο streaming, όσο και στη μέθοδο download της MBMS υπηρεσίας. Ο εξελιγμένος αυτός μηχανισμός, συνδυάζεται με την εφαρμογή της κωδικοποίησης Raptor και η λειτουργία του

προτεινόμενου μηχανισμού προσφέρει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα στην απόδοση της διαδικασίας αποκωδικοποίησης των προστατευμένων με AL-FEC πακέτων. Η βασική ιδέα λειτουργίας του εξελιγμένου παραλήπτη αναφέρεται στην ικανότητά του να χρησιμοποιεί μερικώς κατεστραμμένη πληροφορία, η οποία κανονικά θα ακυρωνόταν από έναν συμβατικό παραλήπτη, και να την προωθεί κανονικά στα υψηλότερα επίπεδα πρωτοκόλλων ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται μία πρακτική και αποτελεσματική υλοποίηση του αποκωδικοποιητή Raptor σύμφωνα με τη λειτουργία που μόλις περιγράψαμε, ένας σχεδιασμός που προσφέρει μεγάλα κέρδη στην απόδοση του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα η πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Για να αναλυθούν τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η μέθοδος αυτή πάνω στην MBMS streaming μετάδοση video παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος σε δίκτυο ασύρματης πρόσβασης τεχνολογίας GERAN των EGPRS συστημάτων. Η βασική μετρική των πειραμάτων, για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μηχανισμού AL-FEC, είναι γνωστή σαν μέσος χρόνος μεταξύ αποτυχίας (mean time between failures-MTBF) και πρόκειται για μία συχνά υιοθετούμενη μετρική από το 3GPP [100] για την αξιολόγηση των QoS επιδόσεων σε εφαρμογές streaming μετάδοσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντικά οφέλη από την υιοθέτηση του προτεινόμενου αλγορίθμου για τον Raptor αποκωδικοποιητή, καθώς η συνολική απόδοση αυξάνεται δραστικά σε σχέση με έναν συμβατικό αποκωδικοποιητή, διατηρώντας ταυτόχρονα την πολυπλοκότητα αποκωδικοποίησης στα επίπεδα ενός συμβατικού αποκωδικοποιητή.

Η ίδια ερευνητική ομάδα, παρουσιάζει στο [101] μία μελέτη για τις επιλογές σχεδιασμού ενός συστήματος MBMS streaming μετάδοσης video πάνω σε ασύρματα δίκτυα EGPRS και UMTS. Η μελέτη αυτή προσφέρει αποτελέσματα μέσα από έναν πλήρη εξομοιωτή της MBMS υπηρεσίας, εξετάζοντας σχεδιαστικές επιλογές σε όλα τα επίπεδα. Πρώτα αναλύονται οι επιλογές των παραμέτρων του κωδικοποιητή video, όπως ο ρυθμός κωδικοποίησής του, εξετάζοντας επίσης και την προσαρμογή του μεγέθους των πακέτων στο επίπεδο εφαρμογής. Στη συνέχεια περιγράφονται σχεδιαστικές επιλογές, σχετικές με το overhead του AL-FEC σε σχέση με το διαθέσιμο κάθε φορά ρυθμό μετάδοσης της ροής του video. Στην πλευρά του παραλήπτη προτείνεται η χρήση του εξελιγμένου αποκωδικοποιητή που περιγράφηκε στην προηγούμενη εργασία. Από τα αποτελέσματα το πολυτιμότερο συμπέρασμα είναι πως η διαδικασία βελτιστοποίησης ενός τέτοιου πολύπλοκου συστήματος σίγουρα δεν είναι εύκολη, καθώς η επίδραση όλων αυτών των παραμέτρων στη συνολική απόδοση του συστήματος,

εξαρτάται στενά από τις διαφορετικές απώλειες που παρουσιάζουν οι διαφορετικοί MBMS παραλήπτες.

Οι συγγραφείς της εργασίας [102], παρουσιάζουν μία άλλη, πιο θεωρητική προσέγγιση πάνω στη μετάδοση video σε περιβάλλοντα μετάδοσης MBMS streaming για δίκτυα τεχνολογίας LTE. Θεωρούν ως πρόβλημα βελτιστοποίησης το συνδυασμό παραμέτρων από το επίπεδο του κωδικοποιητή video, εξετάζοντας τεχνικές κωδικοποίησης σε στρώματα, από το επίπεδο εφαρμογών, εξετάζοντας το overhead του AL-FEC και από το φυσικό επίπεδο, εξετάζοντας επιλογές του ρυθμού μετάδοσης και θέματα χρονοπρογραμματισμού στο υποεπίπεδο MAC του επιπέδου ζεύξης. Ο αλγόριθμος που προτείνουν έχει σαν στόχο την βέλτιστη επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (modulation and coding scheme-MCS) στο φυσικό επίπεδο καθώς και το σχήμα του AL-FEC που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε επίπεδο κωδικοποίησης του video επιλέγοντας ταυτόχρονα το βέλτιστο ρυθμό κωδικοποίησης κάθε επιπέδου της ροής του video, προτείνοντας εξελεγμένους κωδικοποιητές.

Τέλος, στην εργασία [103] παρουσιάζεται μεταξύ άλλων η απόδοση της MBMS streaming υπηρεσίας πάνω σε κινητά δίκτυα τεχνολογίας HSDPA από την πλευρά του τηλεπικοινωνιακού κόστους, αναλύοντας τον έλεγχο ισχύος για τη streaming μετάδοση και αξιολογώντας την επίδραση της εφαρμογής του κώδικα Raptor στην υπηρεσία αυτή, εξάγοντας πολύτιμα συμπεράσματα για την εφαρμογή του AL-FEC πάνω σε MBMS περιβάλλοντα.

5.3 Αλγόριθμοι Άμεσης Απόκρισης σε Προβλήματα των Κινητών Δικτύων Επικοινωνιών

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει οι αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης έχουν χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων των κινητών δικτύων επικοινωνιών.

Η εργασία του [110] ασχολείται με τη δημιουργία κλιμακώσιμων και αξιόπιστων multicast πρωτοκόλλων. Πιο συγκεκριμένα οι συγγραφείς της εργασίας αυτής ασχολούνται με το σχεδιασμό πολιτικών χρονοδρομολόγησης οι οποίες μπορούν να καθορίζουν τι είδους δεδομένα ο αποστολέας πρέπει να εισάγει σε κάθε μεταδιδόμενο πακέτο. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται data selection policy, και αναφέρεται στην επιλογή μεταξύ της μετάδοσης ενός νέου τμήματος πηγαιάς πληροφορίας, την επαναμετάδοση ενός πακέτου που έχει χαθεί ή τη μετάδοση ενός πλεονάζοντος FEC κωδικοποιημένου πακέτου. Η ανάλυση των πολιτικών που προτείνουν οι συγγραφείς γίνεται στο πνεύμα της ανταγωνιστικής ανάλυσης όπου

συγκρίνουν το λόγο απόδοσης χειρότερης περίπτωσης με αυτόν ενός βέλτιστου αλγορίθμου επιλογής πολιτικής. Οι συγγραφείς εισάγουν ένα μοντέλο δικτύου πάνω στο οποίο σχεδιάζουν διάφορους αλγορίθμους για την επιλογή της πολιτικής μετάδοσης, προτείνοντας έναν πιθανοτικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης ο οποίος χρησιμοποιεί προστασία FEC. Επίσης, προτείνουν έναν ντετερμινιστικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης ο οποίος κάτω από συγκεκριμένες QoS εγγυήσεις αποδεικνύεται πως έχει καλύτερη απόδοση από άλλες προσεγγίσεις που είναι βασισμένες στην παροχή ανάδρασης από τους χρήστες που συμμετέχουν στη multicast μετάδοση.

Οι συγγραφείς του [111] μελετούν το πρόβλημα της ανάθεσης συχνοτήτων σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών εισάγοντας κατανεμημένους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης. Το πρόβλημα της ανάθεσης συχνοτήτων ανάγεται σε ένα πρόβλημα πολυχρωματισμού σε ζυγισμένο γράφο. Το διάγραμμα των βαρών το οποίο είναι συσχετισμένο με τις κορυφές του γράφου μοντελοποιεί το πλήθος των κλήσεων προς εξυπηρέτηση στις κορυφές και θεωρείται πως μεταβάλλεται με το χρόνο. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται ένα πλαίσιο ανταγωνιστικής ανάλυσης υπό το οποίο σχεδιάζονται και μελετώνται κατανεμημένοι αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Επίσης, οι συγγραφείς παρουσίασαν τους πρώτους κατανεμημένους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης για το πρόβλημα και απέδειξαν κάτω φράγμα για το λόγο απόδοσης οποιουδήποτε αλγορίθμου άμεσης απόκρισης.

Στην εργασία [112] οι αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης εισάγονται στο πεδίο της δρομολόγησης σε αδόμητα δίκτυα πολλαπλής απόστασης με προσανατολισμό στην κατανάλωση ενέργειας. Οι συγγραφείς της εργασίας μοντελοποιούν και αξιολογούν την απόδοση τέτοιου είδους ασύρματων δικτύων ως προς την κατανάλωση ενέργειας και σχεδιάζουν πάνω σε αυτό το μοντέλο αλγορίθμους δρομολόγησης με στόχο τη βελτίωση στη διαχείριση της ενέργειας που καταναλώνουν οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου. Η μοντελοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας λαμβάνει επίσης υπόψιν τις διαφορετικές πηγές ενέργειας που μπορεί να υφίσταται σε τέτοιου είδους ετερογενή ασύρματα δίκτυα. Το ανταγωνιστικό μοντέλο που εισάγεται θεωρεί πως ο βέλτιστος offline αλγόριθμος έχει πλήρη γνώση των πακέτων που θα εξυπηρετηθούν στο μέλλον αλλά και αυτών που εξυπηρετήθηκαν στο παρελθόν. Το δίκτυο μοντελοποιείται σαν ένας κατευθυνόμενος γράφος με τις κορυφές να αναπαριστούν τους κόμβους του δικτύου και οι ακμές τις ασύρματες συνδέσεις μεταξύ τους. Στο μοντέλο αυτό ο λόγος απόδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων άμεσης απόκρισης υπολογίζεται με βάση το πλήθος των κόμβων του δικτύου. Επίσης, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι δεν απαιτούν γνώση της πιθανοτικής κατανομής που ακολουθεί η άφιξη των προς εξυπηρέτηση πακέτων

και θεωρείται συνεπώς πως οι αλγόριθμοι αυτοί είναι άμεσα εφαρμόσιμοι σε πραγματικά αδόμητα δίκτυα.

Επίσης, οι συγγραφείς της εργασίας [113] έχουν προτείνει αλγόριθμους άμεσης απόκρισης για την ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής για τη μετάδοση πακέτων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Η εργασία αυτή βασίζεται στο γεγονός πως σε πολλά σχήματα κωδικοποίησης καναλιού η ισχύς εκπομπής μπορεί να μειωθεί σημαντικά εάν αυξηθεί η χρονική διάρκεια εκπομπής ενός πακέτου. Οι συγγραφείς εισάγουν και ορίζουν το online πρόβλημα με την ονομασία *energy-efficient transmission scheduling* το οποίο ανάγουν σε ένα *convex* πρόβλημα βελτιστοποίησης εξετάζοντας την περίπτωση μετάδοσης σε ομάδα πολλαπλών χρηστών. Για την περίπτωση του *downlink* προτείνουν έναν αλγόριθμο άμεσης απόκρισης με την ονομασία *MoveRight* ο οποίος δείχνουν πως πετυχαίνει την απόδοση του βέλτιστου *offline* αλγορίθμου για το πρόβλημα αυτό. Για την περίπτωση του *uplink* προτείνουν τον αλγόριθμο *MoveRightExpress* ο οποίος εμφανίζει αρκετά ικανοποιητικό λόγο απόδοσης υπό το πλαίσιο της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και της καθυστέρησης.

Τέλος, στην εργασία [114] μελετάται το πρόβλημα άμεσης απόκρισης με την ονομασία *maximum independent set* για την περίπτωση των γράφων που αποτελούνται από δίσκους. Οι γράφοι δίσκων είναι γράφοι που προκύπτουν από την τομή δίσκων στο επίπεδο. Δοθέντος ενός τέτοιου γράφου, το πρόβλημα *maximum independent set* αναφέρεται στην εύρεση του μέγιστου αριθμού ανεξάρτητων συνόλων, δηλαδή κόμβων του γράφου χωρίς ακμές μεταξύ τους. Κάθε δίσκος αναπαριστά έναν κόμβο και κάθε ακμή μεταξύ δύο κόμβων προκύπτει μόνο εφόσον οι δύο δίσκοι τέμνονται. Το συγκεκριμένο πρόβλημα άμεσης απόκρισης μπορεί να μοντελοποιήσει προβλήματα δέσμευσης πόρων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται διάφοροι πιθανοτικοί αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης για το πρόβλημα αυτό.

Κεφάλαιο 6

Περιβάλλον Προσομοίωσης

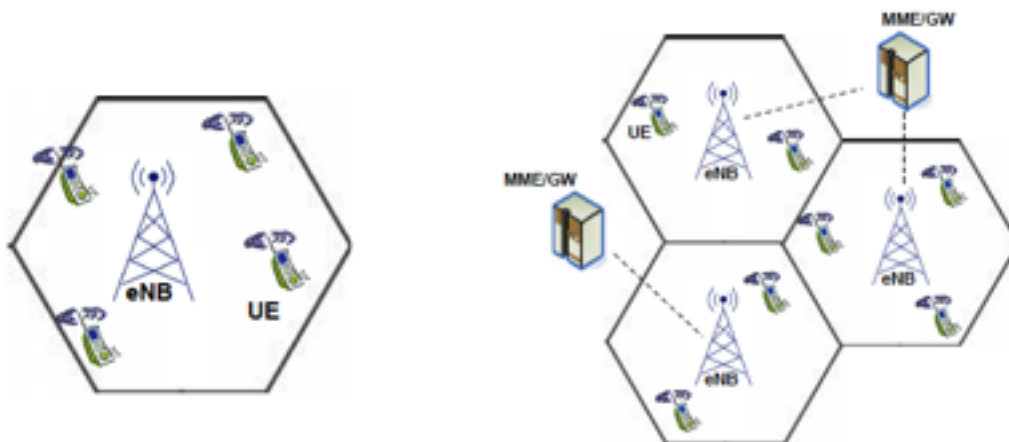
Στο κεφάλαιο αυτό της διδακτορικής διατριβής, παρουσιάζουμε και αναλύουμε το περιβάλλον προσομοίωσης που αναπτύξαμε για τους σκοπούς της εργασίας. Στόχος μας είναι η παροχή ενός πλήρως λειτουργικού περιβάλλοντος προσομοίωσης καθώς και ρεαλιστικού, το οποίο θα παρέχει τη δυνατότητα εξακρίβωσης της απόδοσης ενός ολοκληρωμένου συστήματος μετάδοσης, από το επίπεδο εφαρμογών μέχρι και το φυσικό επίπεδο του ασύρματου δικτύου πρόσβασης.

Πιο συγκεκριμένα, στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάζουμε αναλυτικά τη λειτουργικότητα του μηχανισμού προσομοίωσης που αναπτύξαμε για τους σκοπούς της εργασίας. Συνεχίζοντας στο βασικό κομμάτι του μηχανισμού προσομοίωσης, περιγράφουμε το τμήμα του περιβάλλοντος προσομοίωσης που σχετίζεται με την εφαρμογή των κωδίκων Raptor AL-FEC πάνω σε multicast υπηρεσίες των κινητών δικτύων επικοινωνιών τέταρτης γενιάς.

6.1 Μηχανισμός Προσομοίωσης

Η πλατφόρμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση των πειραμάτων του κεφαλαίου αυτού βασίζεται στην επέκταση των προσομοιωτών δικτύων τέταρτης γενιάς των εργασιών [107, 115] πάνω στον προσομοιωτή δικτύων ns-3. Για την υποστήριξη της προσομοίωσης της εφαρμογής κωδίκων FEC στο επίπεδο εφαρμογών το συγκεκριμένο περιβάλλον προσομοίωσης έχει επεκταθεί και προσαρμοστεί κατάλληλα.

Ο μηχανισμός έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της ολοκληρωμένης λειτουργίας ενός δικτύου τέταρτης γενιάς LTE, καθώς πιο συγκεκριμένα μοντελοποιεί τις λειτουργίες τόσο



ΣΧΗΜΑ 6.1: Τοπολογίες του Περιβάλλοντος Προσομοίωσης

του eUTRAN όσο και του EPS. Ο μηχανισμός μοντελοποιεί πλήρως τις λειτουργίες των παρακάτω τριών βασικών κόμβων ενός κινητού δικτύου επικοινωνιών τεχνολογίας LTE:

- του User Equipment (UE)
- του evolved NodeB (eNB)
- και του Mobility Management Entity/Gateway (MME/GW)

Επίσης, όσον αφορά το φυσικό επίπεδο παρέχονται διάφορα μοντέλα για την προσομοίωσή του. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.1, η οποία αφορά τα περιβάλλοντα μετάδοσης που ο μηχανισμός δύναται να προσομοιώσει υποστηρίζεται η εκτέλεση προσομοιώσεων τόσο σε περιβάλλοντα μίας κυψέλης όσο και σε περιβάλλοντα πολλαπλών κυψελών. Η τοπολογία του δικτύου αποτελείται από ένα σύνολο κυψελών και δικτυακών κόμβων. Οι κινητές τερματικές συσκευές (UEs) είναι κατανομημένες στις κυψέλες με ένα eNB ανά κυψέλη. Επίσης κάθε τοπολογία περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα MME/GW τα οποία είναι ικανά να διαχειρίζονται ένα ή περισσότερα eNB. Σε κάθε κυψέλη ανατίθεται ένα μοναδικό αναγνωριστικό. Τα χαρακτηριστικά της κάθε κυψέλης που προσφέρει το περιβάλλον προσομοίωσης είναι η ακτίνα της και η θέση της κυψέλης ορίζοντάς τα στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Γενικά, σε κάθε δικτυακό στοιχείο του περιβάλλοντος προσομοίωσης ανατίθεται ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID).

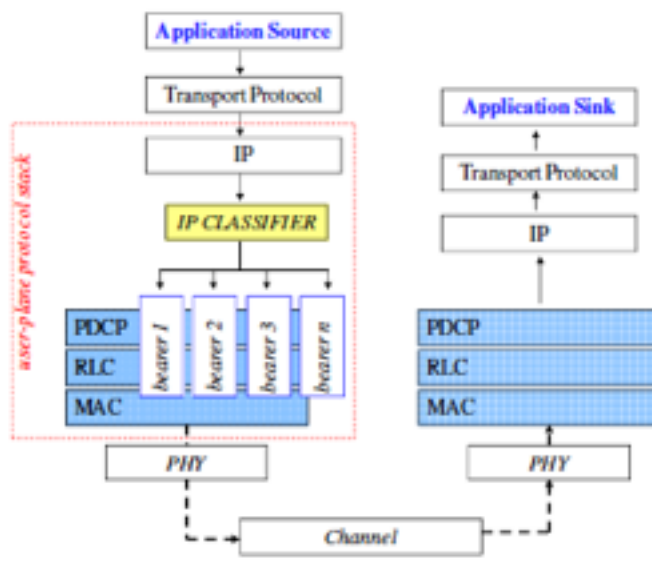
Όσον αφορά την κινητικότητα των UEs του δικτύου, προσφέρονται δύο τύποι κινητικότητας με το πρώτο να είναι το μοντέλο κίνησης τυχαίας κατεύθυνσης και το μοντέλο κίνησης τυχαίας διαδρομής όπως περιγράφονται στο [116]. Οι υποστηριζόμενες ταχύτητες κίνησης των UEs είναι 0, 3, 30 και 120 χ.α.ώ., προσομοιώνοντας το στατικό μοντέλο, το μοντέλο κίνησης πεζών και το μοντέλο κίνησης οχημάτων αντίστοιχα. Στο μοντέλο τυχαίας κατεύθυνσης, για κάθε χρήστη επιλέγεται τυχαία η κατεύθυνση κίνησης, και διατηρείται μέχρι να φθάσει τα όρια της κυψέλης, όπου και επιλέγεται μία νέα κατεύθυνση. Για το μοντέλο κίνησης τυχαίας διαδρομής, κάθε τυχαία επιλεγμένη κατεύθυνση κίνησης, διατηρείται για ένα χρονικό διάστημα ανάλογο της ταχύτητας κίνησης του UE, και στη συνέχεια επιλέγεται μία νέα κατεύθυνση. Επίσης για την περίπτωση του περιβάλλοντος προσομοίωσης πολλαπλών κυψελών, ο μηχανισμός προσομοίωσης μοντελοποιεί ημια τη διαδικασία του handover όταν ένα UE μετακινείται από την κυψέλη που ανήκει σε μία γειτονική του.

Προχωρώντας στην μοντελοποιημένη στοίβα πρωτοκόλλων, τα πακέτα δεδομένων που μεταφέρονται από τους μοντελοποιημένους bearers παράγονται από το επίπεδο εφαρμογών, το οποίο προσφέρει τέσσερις διαφορετικές γεννήτριες κίνησης:

1. RTP κίνηση πολυμεσικού περιεχομένου κωδικοποιημένο σύμφωνα με το πρότυπο H.264
2. ροές VoIP
3. ροή σταθερού ρυθμού μετάδοσης
4. ροή που προσομοιώνει κλασική IP κίνηση

Η πολυμεσική ροή χρησιμοποιεί πακέτα βάσει πραγματικών video αρχείων, τα οποία είναι διαθέσιμα στο [117].

Ο προσομοιωτής υλοποιεί διάφορες λειτουργίες τόσο του user plane όσο και του control plane της στοίβας πρωτοκόλλων των δικτύων τέταρτης γενιάς. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τα υποεπίπεδα RRC, PDCP, MAC καθώς και το RLC, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.2. Το υποεπίπεδο RRC είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των downlink και uplink bearers. Στο user plane, το υποεπίπεδο PDCP εκτελεί τη συμπίεση των επικεφαλίδων των πακέτων προερχόμενων από υψηλότερα επίπεδα και τα προωθεί στο επόμενο υποεπίπεδο RLC. Το RLC μοντελοποιεί τη μετάδοση δεδομένων χωρίς επιβεβαίωση (Unacknowledged Mode-UM) του



ΣΧΗΜΑ 6.2: Στοιβία Πρωτοκόλλων του Περιβάλλοντος Προσομοίωσης

υποεπιπέδου RLC. Επιπλέον, το RLC εκτελεί τις λειτουργίες του κατακερματισμού των πακέτων για μετάδοση στα χαμηλότερα υποεπίπεδα, καθώς και τη συνένωση των μονάδων δεδομένων (Service Data Units-SDUs) που λαμβάνει από χαμηλότερα υποεπίπεδα. Τέλος, το υποεπίπεδο MAC προσφέρει μία διεπαφή μεταξύ των δικτυακών οντοτήτων eNB και UE και του φυσικού επιπέδου για τη μετάδοση των πακέτων. Επίσης, το MAC είναι υπεύθυνο για το χρονοπρογραμματισμό της μετάδοσης των πακέτων.

Στην τρέχουσα έκδοση του περιβάλλοντος προσομοίωσης, στο επίπεδο μεταφοράς έχει υλοποιηθεί μόνο το πρωτόκολλο UDP. Με τη δημιουργία πακέτων στο επίπεδο εφαρμογών, αυτά προωθούνται στα πρωτόκολλα UDP και IP. Σε κάθε IP πακέτο προστίθεται μία PDCP επικεφαλίδα, παρέχοντας τη λειτουργία της συμπίεσης επικεφαλίδων με το πρωτόκολλο Robust Header Compression (ROHC)[118]. Τέλος, προστίθενται η προστασία CRC και οι επικεφαλίδες των υποεπιπέδων RLC και MAC.

Η λειτουργία του φυσικού επιπέδου προσομοιώνεται από ένα αναλυτικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την απόδοση της ασύρματης διεπαφής, υποστηρίζοντας μοντέλα περιγραφής των φαινομένων του propagation loss και του path loss. Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει συνοπτικά τα μοντέλα καναλιών που υποστηρίζονται. Αναλυτικές πληροφορίες για την προσομοίωση του φυσικού επιπέδου παρέχονται στο [107].

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: Μοντέλα Καναλιών του Περιβάλλοντος Προσομοίωσης

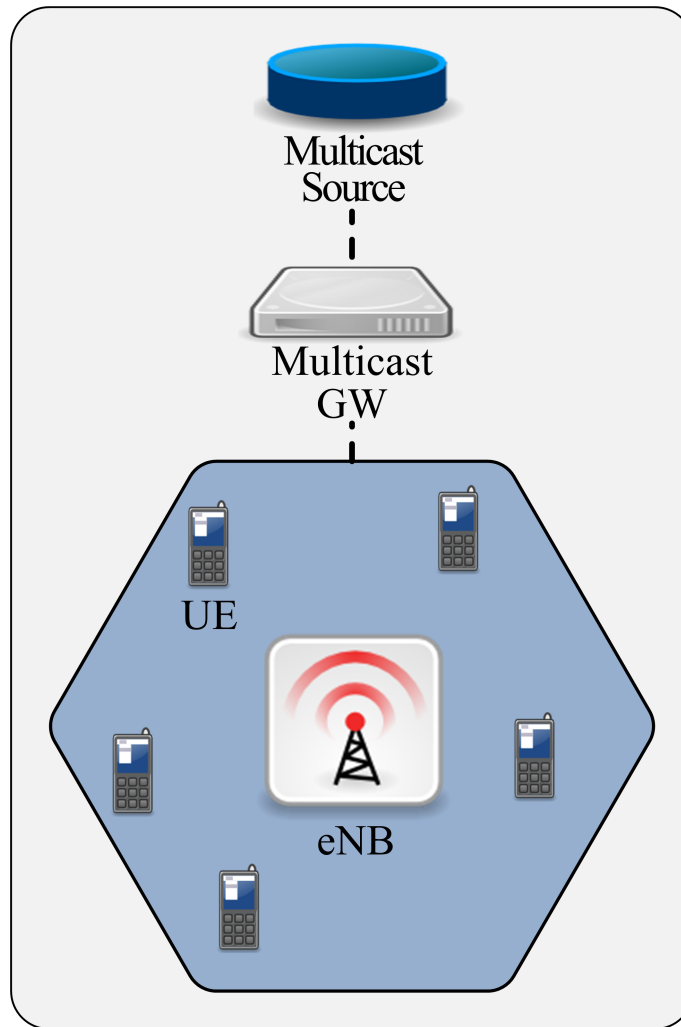
Cell Scenario	Path loss model
Macro Cell – Urban and Suburban Areas	$L = 128.1 + 37.6 \log_{10} d$
Macro Cell – Rural Areas	$L = 100.54 + 34.1 \log_{10}(10)d$
Micro Cell	$L = 24 + 45 \log_{10}(d + 20)$

6.2 Διαδικασία Προσομοίωσης

Στην πλατφόρμα προσομοίωσης, παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας σεναρίων προσομοίωσης, δημιουργώντας μία συνάρτηση αρχικοποίησης των στοιχείων του προσομοιωτή. Η διαδικασία δημιουργίας σεναρίων αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Δημιουργία ενός στιγμιότυπου προσομοίωσης
2. Δημιουργία κυψέλης, eNB και UE, ορίζοντας σε κάθε ένα πολλαπλές παραμέτρους τους όπως:
 - Πλήθος κυψελών
 - Διάσταση κυψέλης
 - Πλήθος UEs ανά κυψέλη
 - Μοντέλο κινητικότητας UEs και ταχύτητα κίνησής τους
3. Δημιουργία εφαρμογών, σύμφωνα με τα μοντέλα που έχουν περιγραφεί προηγουμένως, ορίζοντας τα QoS χαρακτηριστικά τους και τη χρονική διάρκεια μετάδοσής τους
4. Ορισμός της συνολικής χρονικής διάρκειας της προσομοίωσης
5. Τέλος, μπορούν να οριστούν διάφορες άλλες παράμετροι, με βασικότερες το εύρος λειτουργίας του συστήματος, το μοντέλο καναλιού και τη μέθοδο duplexing (FDD ή TDD)

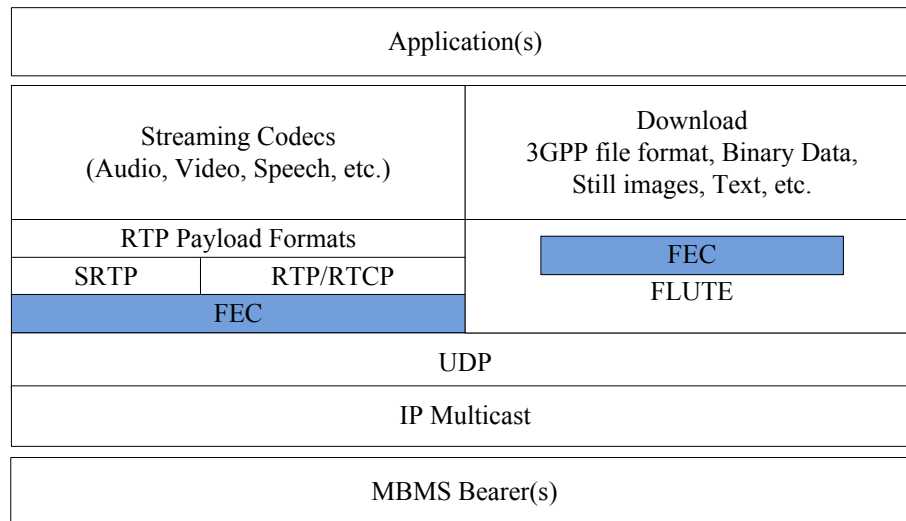
Η αρχιτεκτονική του δικτύου του προσαρμοσμένου περιβάλλοντος προσομοίωσης MBMS παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.3. Στο eUTRAN, ο eNB λαμβάνει τα προς μετάδοση δεδομένα από το EPC και τα προωθεί προς τα UEs μέσω της ασύρματης διεπαφής. Στο EPC, το



ΣΧΗΜΑ 6.3: Αρχιτεκτονική του Μηχανισμού Προσομοίωσης

Multicast-GW, ενεργεί σαν σημείο εισόδου για τις μεταδιδόμενες ροές που παρέχονται από το Multicast Source (η πηγή των πολυμεσικών δεδομένων). Το Multicast-GW είναι υπεύθυνο για την αρχικοποίηση των μοντελοποιημένων multicast bearers και για τη διανομή της IP multicast κίνησης. Επίσης, στο Multicast-GW υλοποιείται η παροχή προστασίας στις μεταδιδόμενες ροές, μέσω της εφαρμογής του AL-FEC.

Η στοίβα πρωτοκόλλων της μοντελοποιημένης multicast μετάδοσης, τόσο για υπηρεσίες download όσο και streaming παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.4. Το νέο στοιχείο, σε σχέση με την πλατφόρμα προσομοίωσης ns-3, είναι η εισαγωγή του επιπέδου Raptor FEC, για την παροχή AL-FEC προστασίας. Ο μηχανισμός του AL-FEC αποτελείται από τρία συστατικά στοιχεία: την κατασκευή ενός πηγαιίου block από τα πακέτα της πολυμεσικής πληροφορίας που ανήκουν σε μία ή περισσότερες UDP ροές, την τροποποίηση των πηγαιίων πακέτων σύμφωνα με τον AL-FEC μηχανισμό και τη δημιουργία των πακέτων επισκευής.



ΣΧΗΜΑ 6.4: Στοιβή Πρωτοκόλλων του Μηχανισμού Προσομοίωσης

Ο μοντελοποιημένος κωδικοποιητής Raptor παράγει τα επιπρόσθετα πακέτα σύμφωνα με την επιθυμητή προστασία που εισάγει το σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, παράγονται n κωδικοποιημένα σύμβολα από k πηγαία σύμβολα, συνεπώς το overhead αποστολής που προσθέτει το σχήμα AL-FEC, δηλαδή ο αριθμός των FEC συμβόλων επισκευής διαιρεμένος από τον αριθμό των FEC πηγαίων συμβόλων, είναι ίσο με την ποσότητα $(n - k)/k$. Μετά την εφαρμογή του μηχανισμού FEC, οι UDP ροές ανατίθενται σε IP multicast bearers. Οι ροές αυτές μεταδίδονται σε ρεαλιστικά multicast περιβάλλοντα, όπου μπορούμε να ορίσουμε το πλήθος των χρηστών που λαμβάνουν την μοντελοποιημένη υπηρεσία καθώς και να χρησιμοποιήσουμε διάφορα μοντέλα κινητικότητας και ταχύτητας κίνησης. Επίσης, στην περίπτωση προσομοίωσης της multicast μετάδοσης σε μία κυψέλη (single-cell MBMS) μπορούμε να ορίσουμε το πλήθος των γειτονικών κυψελών που θα δρουν σαν παρεμβολή καθώς και την ανάπτυξη των κυψελών ορίζοντας το μέγεθός τους. Στο επίπεδο του μοντελοποιημένου AL-FEC, οι παράμετροι που μπορούμε να ορίσουμε είναι το overhead και ο αριθμός των FEC συμβόλων που προστατεύονται μαζί σε ένα FEC πηγαίο block.

Στην πλευρά του παραλήπτη το βασικό σημείο της απόδοσης του AL-FEC είναι η ικανοποίηση του χρήστη, με την έννοια της επιτυχημένης αποκωδικοποίησης της προστατευμένης ροής δεδομένων, η οποία εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το ποσό του πλεονασμού που προσθέτει στη μετάδοση ο FEC κωδικοποιητής, καθώς και από άλλες παραμέτρους του. Η θεωρητική απόδοση του κώδικα Raptor εξαρτάται από το ποσό των δεδομένων που λήφθηκαν από κάθε χρήστη της μετάδοσης. Εάν έχουν ληφθεί λιγότερα σύμβολα από το μέγεθος του FEC block, τότε η ανάκτηση του αρχικού block δεδομένων είναι προφανώς αδύνατη.

```
RX UM_RLC SIZE 262 B 0 PDU_SN 2131
RX VIDEO ID 4961 SBN 3 MBMS 0 SIZE 1490 SRC -1 DST 7 D 0.002
RX UM_RLC SIZE 262 B 2 PDU_SN 1700
RX VIDEO ID 4962 SBN 3 MBMS 0 SIZE 1490 SRC -1 DST 8 D 0.002
RX UM_RLC SIZE 262 B 4 PDU_SN 1583
RX VIDEO ID 5262 SBN 3 MBMS 0 SIZE 1490 SRC -1 DST 9 D 0.002
RX UM_RLC SIZE 262 B 6 PDU_SN 1656
```

ΣΧΗΜΑ 6.5: Παράδειγμα Εξόδου του Προσομοιωτή

Εάν έχει ληφθεί ένας αριθμός κωδικοποιημένων συμβόλων που δεν είναι μικρότερος από τον αριθμό των πηγαίων συμβόλων, τότε η πιθανότητα επιτυχούς αποκωδικοποίησης της ροής πολυμέσων μπορεί πολύ εύκολα να εξαχθεί από τις σχέσεις 3.3, 3.4 ανάλογα της έκδοσης του κώδικα Raptor, με έναν απλό υπολογισμό.

Τέλος, η έξοδος της προσομοίωσης δίνεται απευθείας στο τερματικό του προσομοιωτή και αποθηκεύεται σε ένα αρχείο, ώστε να είναι διαθέσιμη προς επεξεργασία. Ένα παράδειγμα εξόδου δίνεται στην Εικόνα 6.5.

Σύμφωνα με το παράδειγμα, το πρώτο πεδίο περιγράφει το γεγονός που προκάλεσε την καταγραφή κάθε γραμμής. Δηλαδή, γραμμές που ξεκινούν με τα αναγνωριστικά TX, RX και DROP περιγράφουν πακέτα που έχουν αποσταλεί, ληφθεί και χαθεί, αντίστοιχα. Το επόμενο πεδίο περιγράφει το είδος του πακέτου που αναφέρεται η κάθε καταγραφή. Τα επόμενα πεδία αφορούν τις εξής πληροφορίες:

- ID: ένα αναγνωριστικό που χαρακτηρίζει κάθε πακέτο μοναδικά
- SRC: το αναγνωριστικό του κόμβου που έστειλε το πακέτο
- DST: το αναγνωριστικό του προορισμού του πακέτου
- T: αναφέρεται στη χρονική στιγμή δημιουργίας του πακέτου
- D: αναφέρεται στην καθυστέρηση του κάθε πακέτου
- Το αναγνωριστικό του IP multicast bearer
- Το μοναδικό αναγνωριστικό του πηγαίου FEC block (SBN) που ανήκει το κάθε προ-στατευμένο πακέτο

6.3 Αξιολόγηση της Υπηρεσίας MBMS

Στη συγκεκριμένη παράγραφο του κεφαλαίου παρουσιάζουμε κάποια αποτελέσματα προσομοιώσεων, τα οποία αφορούν την απόδοση της λειτουργίας ενός συστήματος MBMS γενικά, αξιολογώντας το πώς επηρεάζουν κάποιες παράμετροι λειτουργίας του δικτύου τη συνολική απόδοση του συστήματος, εστιάζοντας στο ρυθμό απώλειας πακέτων. Η απόδοση του AL-FEC εξαρτάται από την απόδοση του δικτύου και πιο συγκεκριμένα, από τις απώλειες πακέτων που παρουσιάζουν οι multicast χρήστες κατά τη λήψη των πολυμεσικών δεδομένων. Εφόσον, σκοπός του μηχανισμού παροχής προστασίας FEC είναι η αντιμετώπιση των ανεξάρτητων απωλειών πακέτων που παρατηρούνται σε κάθε χρήστη της υπηρεσίας, συνεπάγεται άμεσα πως η συμπεριφορά των κωδίκων Raptor, όσον αφορά το απαιτούμενο ποσό προστασίας (δλδ. το transmission overhead) που πρέπει να εισάγει στη μετάδοση, εξαρτάται άμεσα από το ρυθμό απώλειας πακέτων που παρουσιάζουν οι χρήστες που λαμβάνουν την υπηρεσία. Συνεπώς, ο ρυθμός απώλειας πακέτων που παρατηρείται στο δίκτυο έχει άμεση σχέση με την απόδοση που θα παρουσιάσει ο μηχανισμός προστασίας AL-FEC γι' αυτό και παραθέτουμε κάποια βασικά αποτελέσματα σχετικά με αυτό.

6.3.1 Ρυθμίσεις Προσομοίωσης

Το περιβάλλον προσομοίωσης που περιγράφηκε προηγουμένως μπορεί να μας παρέχει ρεαλιστικά αποτελέσματα για ένα σύνολο από διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος, οι οποίες θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια, πως επηρεάζουν συνολικά την απόδοση παροχής MBMS υπηρεσιών σε πολλαπλούς χρήστες. Ο Πίνακας 6.2 παρουσιάζει αναλυτικά τις παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης πειραματικής αξιολόγησης. Υιοθετήθηκε το μοντέλο διάδοσης μακροκυψέλης σε αστικό περιβάλλον μετάδοσης, το οποίο προτείνεται στο [119]. Η επιλεγμένη διάταξη της MBMS υπηρεσίας μετάδοσης σε μία κυψέλη προσομοιώνει τη μετάδοση σε μία κεντρική κυψέλη στην οποία περιέχονται οι παραλήπτες της multicast μετάδοσης και ένα δακτύλιο έξι γειτονικών κυψελών, οι οποίες δρουν σαν παρεμβολή στην κεντρική κυψέλη. Για τα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μία πολυμεσική ροή κωδικοποιημένη κατά H.264 σε διάφορους ρυθμούς κωδικοποίησης. Επιπλέον, στις περισσότερες προσομοιώσεις, παράλληλα με τη μετάδοση της multicast υπηρεσίας, κάθε χρήστης λαμβάνει και μία ροή καλύτερης προσπάθειας (best effort) μέσω unicast bearers. Συνεπώς, τα πειραματικά αποτελέσματα

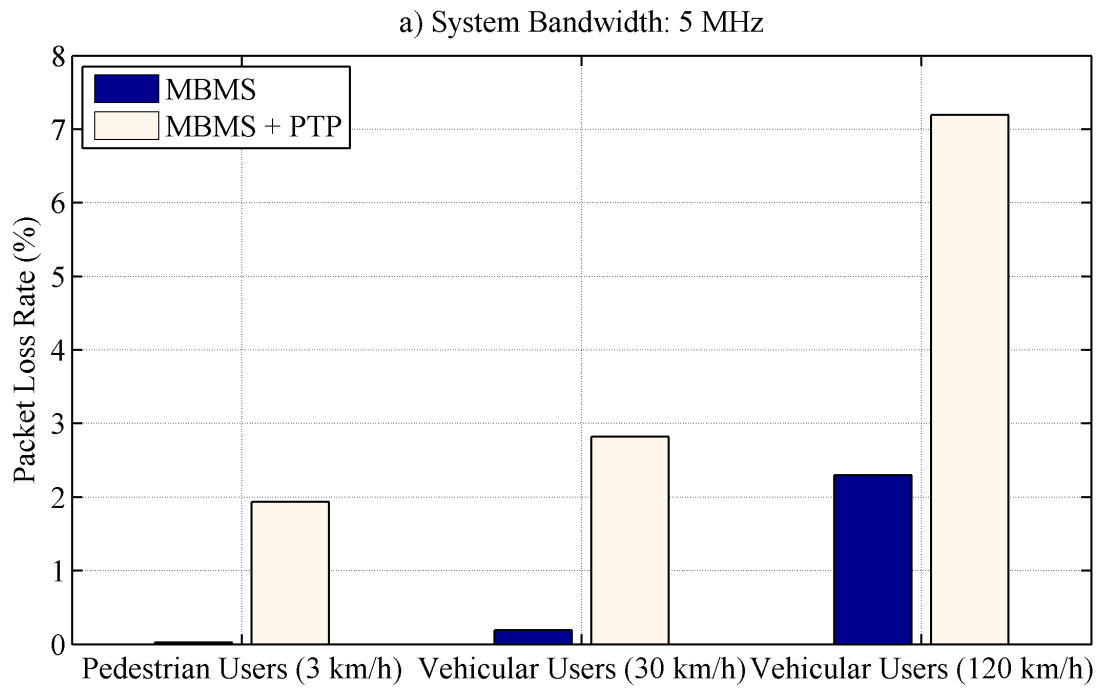
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: Ρυθμίσεις Προσομοίωσης για την Αξιολόγηση της Υπηρεσίας MBMS

Parameter	Units	Value
Cell layout		Hexagonal grid, 3 sectors per site
Simulation duration	sec	120
Carrier frequency	MHz	2000
System bandwidth	MHz	5
Channel model		3GPP Typical Urban (TU)
Propagation model		3GPP macrocell – urban area
Path loss	dB	$L = 128.1 + 37.6 \log_{10} d$
UE Rx antennas		2
BS # antennas		1
BS transmit power	dBm	43
BS antenna gain	dBi	14

που παρουσιάζονται στη συνέχεια αναφέρονται σε ρεαλιστικές, υψηλού φόρτου συνθήκες του δικτύου.

6.3.2 Συχνотικό Εύρος Λειτουργίας

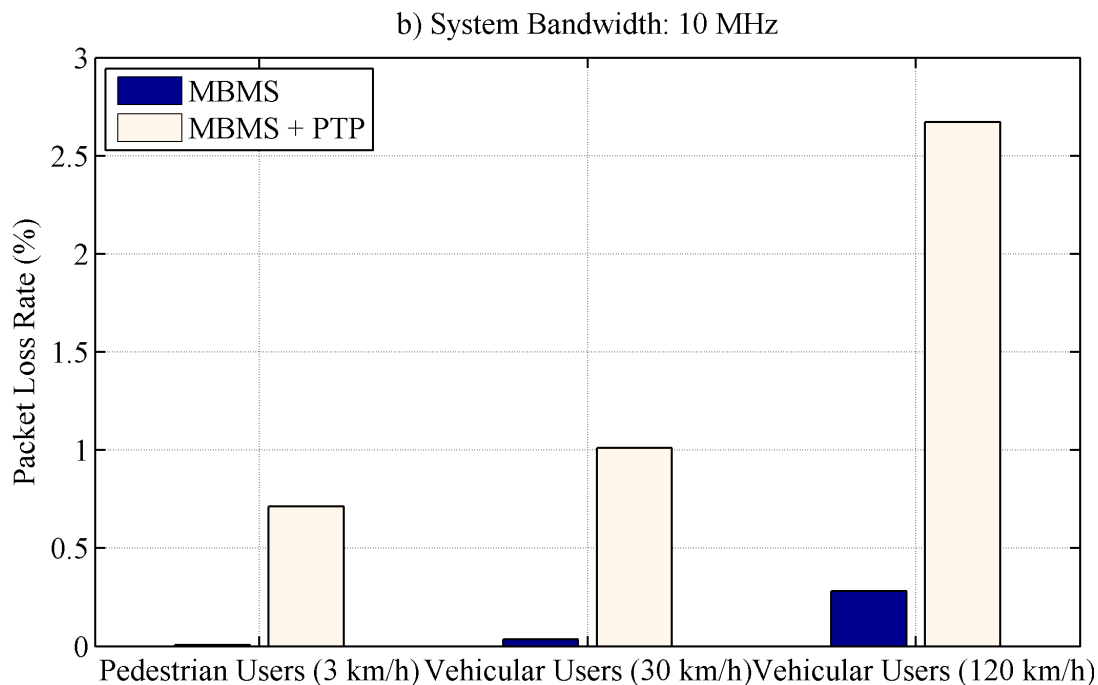
Στις Εικόνες 6.6, 6.7 παρουσιάζεται πως μεταβάλλεται ο μέσος ρυθμός απώλειας πακέτων του δικτύου προσομοιώνοντας 100 χρήστες, ομοιόμορφα κατανομημένους στην περιοχή μετάδοσης της multicast υπηρεσίας, οι οποίοι ακολουθούν το μοντέλο κίνησης πεζών και το μοντέλο κίνησης οχημάτων. Για το δεύτερο μοντέλο κίνησης παρουσιάζονται δύο ταχύτητες κίνησης, 30 και 120 χ.α.ώ. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να καταστήσουμε σαφές πως ο ρυθμός απώλειας πακέτων αφορά σε όλες τις προσομοιώσεις το επίπεδο εφαρμογών. Στην



ΣΧΗΜΑ 6.6: Ρυθμός Απώλειας Πακέτων @ 5 MHz

Εικόνα 6.6 παρέχονται αποτελέσματα προσομοιώνοντας τη λειτουργία της υπηρεσίας LTE MBMS με το συχνοτικό εύρος του συστήματος να έχει οριστεί στα 5 MHz, ενώ αντίστοιχα στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζεται η βελτίωση στην απόδοση του συστήματος με την αύξηση του εύρους λειτουργίας στα 10 MHz. Και οι δύο γραφικές προσφέρουν αποτελέσματα για το ρυθμό απώλειας πακέτων μίας πολυμεσικής ροής, κωδικοποιημένης στα 128 kbps, με τη δεύτερη μπάρα να παρέχει τα ίδια αποτελέσματα, θεωρώντας όμως, πως παράλληλα με τη multicast μετάδοση πραγματοποιούνται και unicast μεταδόσεις IP κίνησης. Θεωρούμε πως το δεύτερο σενάριο, πλέον είναι το πιο ρεαλιστικό, καθώς προσφέρει ένα περιβάλλον χρήσης πιο κοντά στις σημερινές απαιτήσεις, όπου οι χρήστες για παράδειγμα, παράλληλα με τη multicast υπηρεσία εκτελούν περιήγηση στο Διαδίκτυο ή εκτελούν τη λήψη ενός αρχείου.

Η πρώτη παρατήρηση από τις δύο γραφικές παραστάσεις είναι οι ευεργετικές συνέπειες στην απόδοση του συστήματος από την αύξηση του εύρους λειτουργίας του συστήματος. Ιδιαίτερα στο μοντέλο κίνησης των 120 χ.α.ώ. οι διαφορές είναι αξιοσημείωτες, καθώς στην περίπτωση των 10 MHz η διαφορά στο μέσο ρυθμό απώλειας πακέτων στην περίπτωση της ταυτόχρονης χρήσης MBMS και unicast bearers, είναι 5% σε σχέση με το εύρος των 5 MHz.

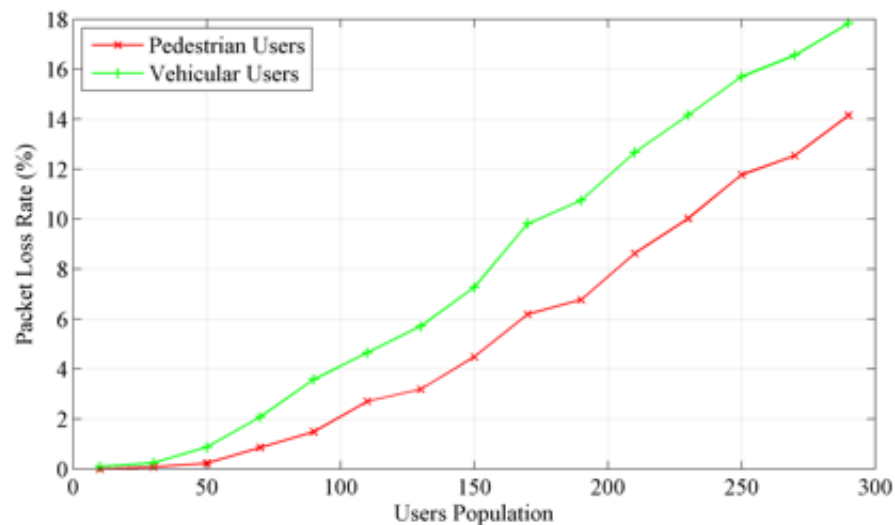


ΣΧΗΜΑ 6.7: Ρυθμός Απώλειας Πακέτων @ 10 MHz

Μία δεύτερη παρατήρηση είναι η διαφορά μεταξύ της μετάδοσης μόνο multicast περιεχομένου και του συνδυασμού multicast και unicast μεταδόσεων σε όλες τις περιπτώσεις προσομοίωσης. Κάτι τέτοιο είναι απόλυτα λογικό, εάν αναλογιστεί κανείς τη λειτουργία του συστήματος και ειδικότερα τη λειτουργία του EPC. Βασικό πλεονέκτημα της MBMS υπηρεσίας είναι η αποδοτική χρήση των πόρων του δικτύου ειδικότερα στο EPC και στο eUTRAN. Συνεπώς, ενώ στην περίπτωση της MBMS μετάδοσης απαιτείται η χρήση ενός MBMS bearer για τη μετάδοση σε 100 χρήστες, στην περίπτωση της IP κίνησης απαιτείται η εγκατάσταση επιπλέον 100 unicast bearers, γεγονός που μειώνει σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου.

6.3.3 Πληθυσμός Χρηστών

Στην Εικόνα 6.8 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου ρυθμού απώλειας πακέτων των multicast χρηστών του δικτύου σε σχέση με την αύξηση του πληθυσμού των χρηστών που συμμετέχουν στη multicast μετάδοση στην περιοχή της MBMS υπηρεσίας, θεωρώντας το σενάριο της ταυτόχρονης μετάδοσης της multicast υπηρεσίας και κλασικής IP κίνησης σε κάθε χρήστη. Σε κάθε περίπτωση, ο μετρούμενος ρυθμός απώλειας πακέτων αφορά την



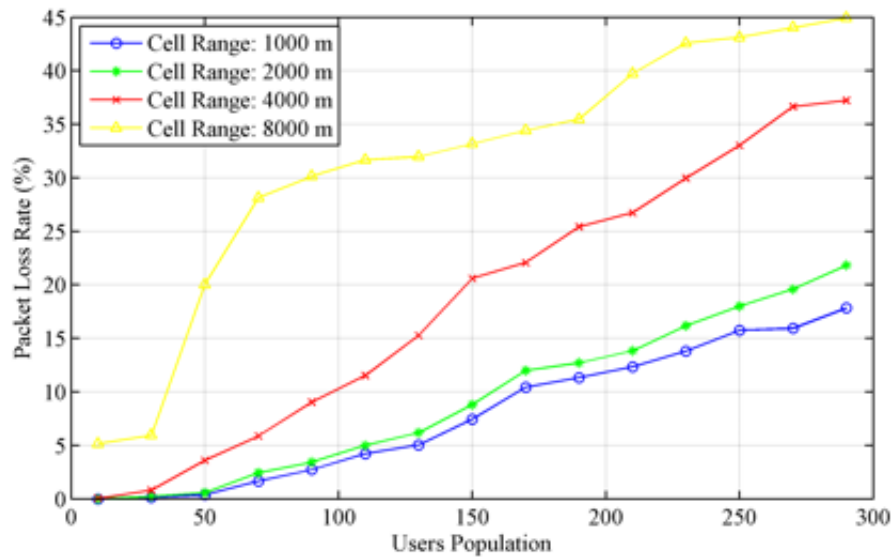
ΣΧΗΜΑ 6.8: Ρυθμός Απώλειας Πακέτων vs. Πληθυσμού Χρηστών

απώλειας των πακέτων των πολυμεσικών δεδομένων και όχι των συνολικών πακέτων λήψης σε κάθε χρήστη.

Όπως είναι αναμενόμενο ο ρυθμός απώλειας πακέτων αυξάνεται όσο αυξάνεται ο πληθυσμός των χρηστών, γεγονός που οφείλεται κυρίως στους λόγους που αναφέραμε προηγουμένως. Φυσικά, θα ήταν λάθος να θεωρήσουμε πως η αύξηση του multicast πληθυσμού δεν θα επηρέαζε καθόλου την απόδοση της MBMS υπηρεσίας, εάν δεν υπήρχε η παρουσία των unicast bearers. Παρότι, η MBMS λειτουργία επιτρέπει στους πόρους του EPC να διαμοιραστούν αποδοτικά μεταξύ μεγάλου αριθμού χρηστών, έτσι η αύξηση του multicast πληθυσμού δεν αυξάνει το ποσό των μεταδιδόμενων δεδομένων, όμως σίγουρα επιβαρύνει τη λειτουργία του eUTRAN και μειώνει την αποδοτικότητά του, όπως παρουσιάζεται και στην ανάλυση του [120]. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται από την επιβάρυνση που μπορεί να προσθέτουν στο δίκτυο οι συνεχώς αυξανόμενες λειτουργίες σηματοδότησης, διάφορες επικουρικές μεταδόσεις (up-link point-to-point μεταδόσεις) και τέλος η παρεμβολή μεταξύ των χρηστών που συνεχώς θα αυξάνεται με την αύξηση του πληθυσμού, άρα και της πυκνότητας των χρηστών σε μία δεδομένη multicast περιοχή μετάδοσης.

6.3.4 Διάταξη Ασύρματου Δικτύου Πρόσβασης

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει δραστικά το ρυθμό απώλειας πακέτων των χρηστών είναι το μέγεθος των κυψελών. Στην Εικόνα 6.9 παρουσιάζεται η μεταβολή του ρυθμού απώλειας πακέτων για 4 διαφορετικές τιμές του εύρους της κυψέλης σε σχέση με την αύξηση



ΣΧΗΜΑ 6.9: Ρυθμός Απώλειας Πακέτων vs. Μέγεθος Κυψέλης

του multicast πληθυσμού. Το εύρος λειτουργίας του συστήματος έχει οριστεί στα 5 MHz με τους χρήστες να προσομοιώνουν το μοντέλο κίνησης πεζών χρηστών. Εδώ πρέπει να διασαφηνίσουμε πως ο όρος εύρος της κυψέλης ορίζει το διπλάσιο της ακτίνας της.

Παρατηρούμε πως η αύξηση του εύρους της κυψέλης επηρεάζει σημαντικά το μέσο ρυθμό απώλειας πακέτων των χρηστών. Μεγαλύτερο αντίκτυπο στην κάμψη της απόδοσης του συστήματος παρουσιάζει η αύξηση του εύρους της κυψέλης στην τιμή των 4000 και των 8000 μέτρων, όπου για μεγάλες τιμές του πληθυσμού των χρηστών ο ρυθμός απώλειας πακέτων φθάνει σε απαγορευτικά μεγάλες τιμές. Γενικά, παρατηρείται πως η αύξηση του μεγέθους της κυψέλης δρα αρνητικά στην απόδοση του συστήματος όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, καθώς με την αύξηση του μεγέθους της κυψέλης, όλο και περισσότεροι χρήστες θα βρίσκονται σε κακές συνθήκες λήψεως, θεωρώντας πως η ισχύς μετάδοσης του σταθμού βάσης διατηρείται σταθερή.

Κεφάλαιο 7

AL-FEC Κώδικες Raptor

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία αφορούν την αξιολόγηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς του μηχανισμού προστασίας AL-FEC πάνω σε multicast υπηρεσίες μετάδοσης των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών τέταρτης γενιάς, χρησιμοποιώντας τους AL-FEC κώδικες Raptor και εξετάζοντας ποικίλα σενάρια multicast μετάδοσης. Επίσης, παρουσιάζουμε ερευνητικά αποτελέσματα συγκρίνοντας το νεότερο μέλος της οικογένειας κωδίκων Raptor FEC, με την ονομασία RaptorQ, με τον προκάτοχό του κώδικα Raptor αναδεικνύοντας τις μεγάλες βελτιώσεις που έχει εισάγει το νέο σχήμα FEC. Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στις εργασίες [123–126].

7.1 Αξιολόγηση του AL-FEC

Στην παρούσα παράγραφο προσομοιώνεται και αξιολογείται η απόδοση και η επίδραση της εφαρμογής του AL-FEC, με τη χρήση των κωδίκων Raptor, πάνω σε multicast υπηρεσίες, μελετώντας τις παραμέτρους της AL-FEC κωδικοποίησης σε συνδυασμό με διάφορες παραμέτρους του περιβάλλοντος μετάδοσης.

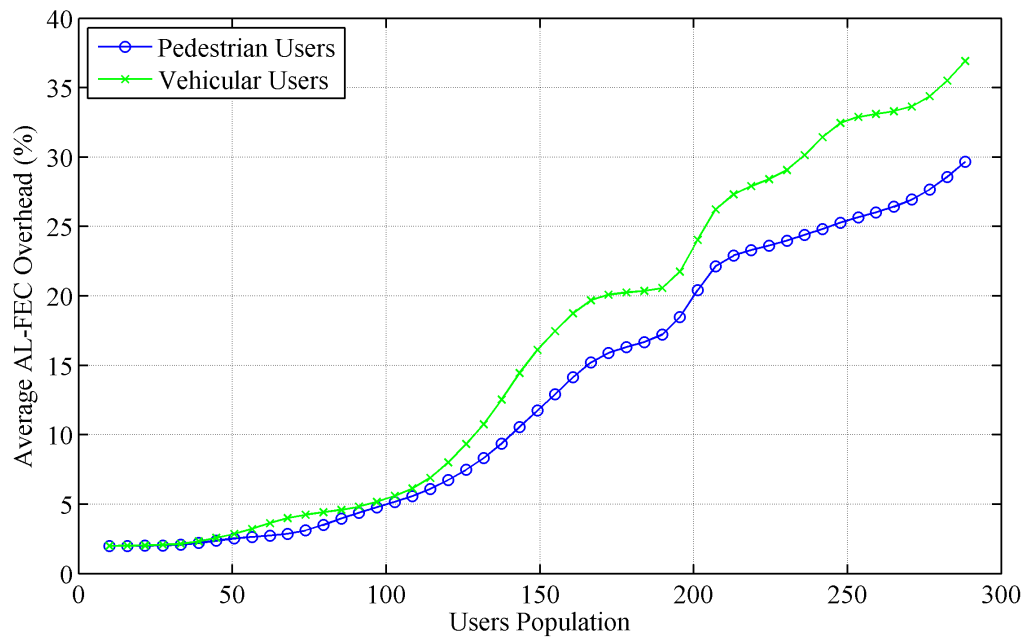
Όσον αφορά τη διαδικασία της FEC κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης, θεωρούμε πως το μέγεθος κάθε FEC συμβόλου είναι σταθερό και πως κάθε μεταδιδόμενο πακέτο περιέχει ένα μόνο FEC σύμβολο. Βασικό σημείο αξιολόγησης αποτελεί η ικανοποίηση του χρήστη, υποθέτοντας πως ένας χρήστης είναι ικανοποιημένος εάν ο αριθμός των ληφθέντων κωδικοποιημένων συμβόλων είναι επαρκής για την επιτυχή αποκωδικοποίηση όλων των πηγαίων FEC blocks από τα οποία αποτελείται η ροή των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούμε

η πιθανότητα αποτυχίας της αποκωδικοποίησης για κάθε πηγαίο block να είναι μικρότερη από 10^{-2} όπως προτείνεται στο [121]. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειώσουμε πως αυτή η υπόθεση δεν σημαίνει πως ένας χρήστης με πιθανότητα αποτυχίας αποκωδικοποίησης μεγαλύτερη από την προηγούμενη τιμή θα αποτύχει σίγουρα να ανακτήσει τα κωδικοποιημένα δεδομένα του πηγαίου block, αλλά αποτελεί ένα επαρκές και πρακτικό κατώφλι. Για την πειραματική αξιολόγηση της παραγράφου αυτής έχουμε χρησιμοποιήσει το περιβάλλον προσομοίωσης που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο και τις ρυθμίσεις προσομοίωσης που έχουν περιγραφεί στον Πίνακα 6.2.

7.1.1 Πλήθος Χρηστών

Στην Εικόνα 7.1 παρουσιάζεται το μέσο απαιτούμενο transmission overhead που πρέπει να εισάγει ο FEC κωδικοποιητής στην πολυμεσική μετάδοση, ώστε να εξασφαλιστεί πως όλοι οι χρήστες θα έχουν μία επιτυχή αποκωδικοποίηση της προστατευμένης ροής σύμφωνα με τις παραδοχές που έχουμε περιγράψει προηγουμένως, σε συνάρτηση με την αύξηση των χρηστών που λαμβάνουν τη multicast υπηρεσία. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις είναι οι τυπικές, με το εύρος του συστήματος να έχει οριστεί στα 5MHz, το εύρος της κυψέλης ίσο με 1000 μέτρα και η κωδικοποίηση των πολυμέσων να έχει γίνει στα 128 kbps. Όσον αφορά την FEC κωδικοποίηση η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται είναι το transmission overhead, αφού το πλήθος των πηγαίων συμβόλων που προστατεύονται μαζί σε κάθε block παραμένει σταθερό και ίσο με 256 σύμβολα ανά block. Παρέχονται μετρήσεις για το μοντέλο κίνησης πεζών χρηστών και το μοντέλο κίνησης οχημάτων (30 χ.α.ώ.).

Τα αποτελέσματα που καταγράφονται στη γραφική παράσταση είναι απολύτως αναμενόμενα. Με την αύξηση του πληθυσμού των χρηστών παρατηρείται και αύξηση του απαιτούμενου μέσου transmission overhead, καθώς τα χαμένα πακέτα σε κάθε χρήστη αυξάνονται με αποτέλεσμα να απαιτείται η εισαγωγή μεγαλύτερου ποσού πλεονασμού από τον FEC κωδικοποιητή. Ένα ενδιαφέρον σημείο είναι, πως μέχρι τους περίπου 120 χρήστες το απαιτούμενο transmission overhead για τους πεζούς χρήστες και για τους χρήστες κίνησης με οχήματα είναι σχεδόν το ίδιο. Από το σημείο αυτό και πέρα, παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει ο πληθυσμός των χρηστών η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων κινητικότητας αυξάνεται. Από ότι φαίνεται, όσο ο πληθυσμός των χρηστών είναι σχετικά χαμηλός, εκπληρώνεται ένας βασικός στόχος των LTE συστημάτων, η υποστήριξη υψηλής απόδοσης σε περιπτώσεις κινητικότητας. Με την αύξηση του πλήθους των χρηστών η επιβάρυνση στη λειτουργία του δικτύου



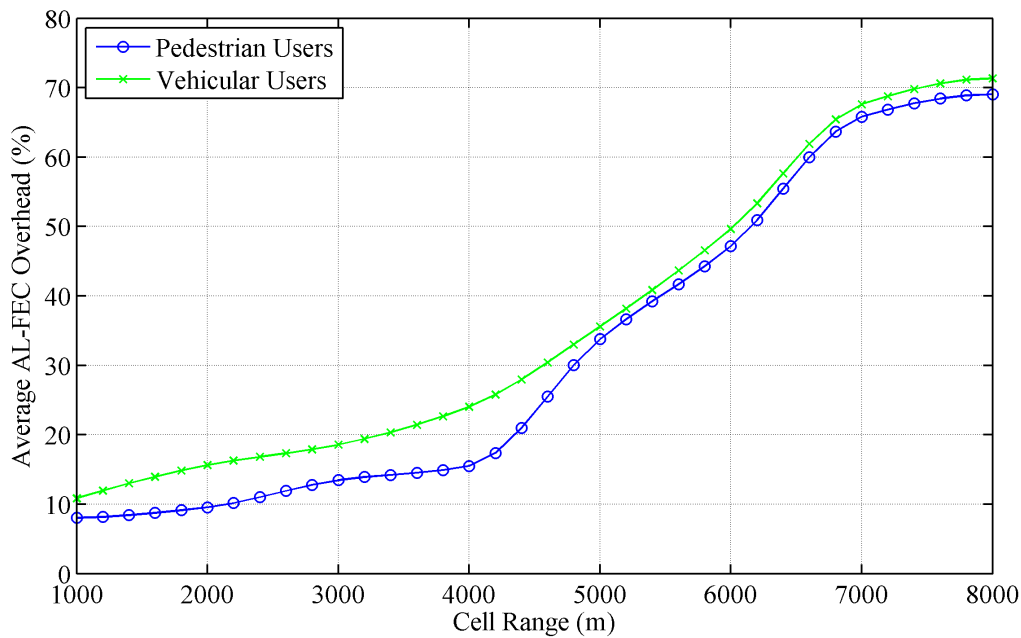
ΣΧΗΜΑ 7.1: Transmission Overhead vs. Πλήθους Χρηστών

αυξάνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα το απαιτούμενο μέσο transmission overhead να φθάνει σε σχετικά υψηλά επίπεδα (περίπου 40%).

7.1.2 Εύρος Κυψέλης

Στην παράγραφο αυτή, διερευνούμε πως επηρεάζει το μέγεθος της κυψέλης το μέσο απαιτούμενο transmission overhead. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 7.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου transmission overhead σε συνάρτηση με την αύξηση του εύρους της κυψέλης. Η διάταξη του δικτύου πρόσβασης παραμένει όπως έχει περιγραφεί ήδη για την single-cell MBMS μετάδοση. Προσομοιώνουμε τη μετάδοση της ροής πολυμέσων H.264 των 128 kbps σε 200 κινητούς χρήστες σύμφωνα με τα δύο μοντέλα κινητικότητας.

Για τυπικά χαμηλές τιμές του εύρους κυψέλης το απαραίτητο transmission overhead παραμένει χαμηλό και για τα δύο μοντέλα κινητικότητας. Μέχρι το μέγεθος της κυψέλης να ξεπεράσει τα 5000 μέτρα η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων κινητικότητας είναι περίπου 5%. Όταν το μέγεθος της κυψέλης ξεπεράσει την παραπάνω τιμή, παρατηρούμε πως το απαιτούμενο transmission overhead για τα δύο μοντέλα κινητικότητας είναι σχεδόν το ίδιο. Κάτι τέτοιο μπορεί να οφείλεται στο γεγονός πως, διατηρώντας σταθερό το πλήθος των χρηστών, οι χρήστες που κινούνται σε υψηλότερες ταχύτητες μπορούν να εκμεταλλεύονται καλύτερα τα κέρδη ποικιλομορφίας λόγω πολλαπλών χρηστών. Γενικά, παρατηρούμε

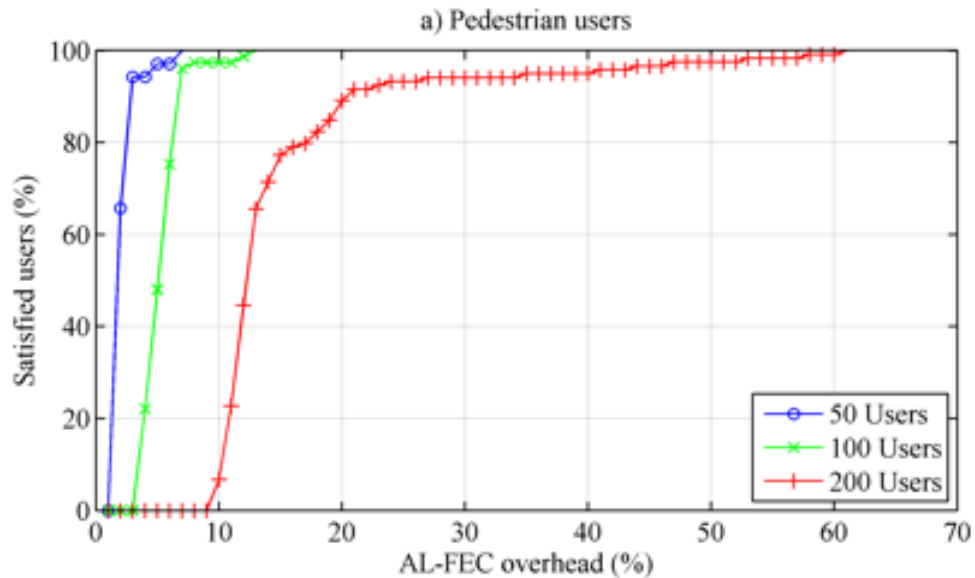


ΣΧΗΜΑ 7.2: Transmission Overhead vs. Εύρους Κυψέλης

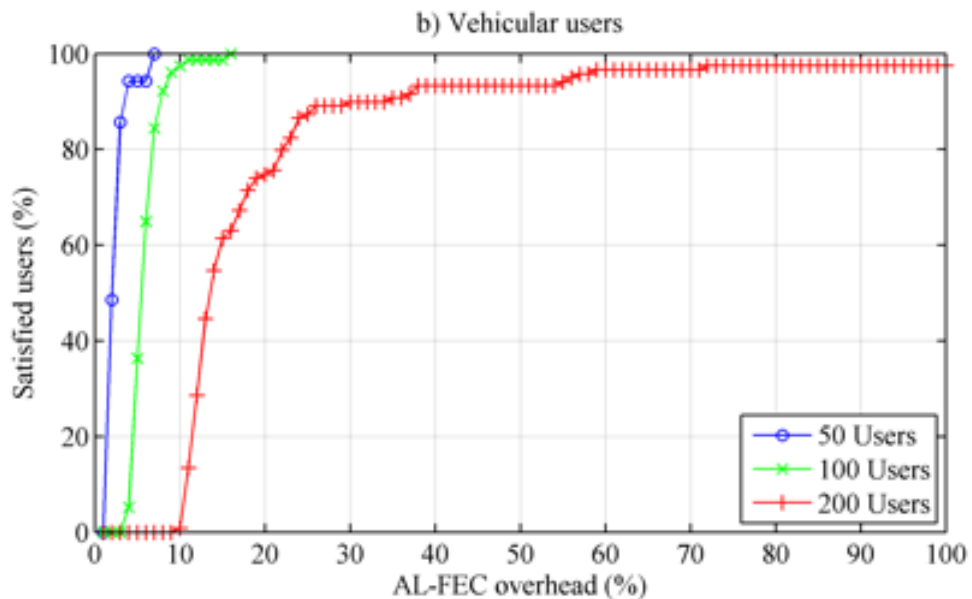
πως το απαιτούμενο μέσο transmission overhead αυξάνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της κυψέλης, οδηγώντας σε πολύ υψηλές τιμές για σχετικά μεγάλα μεγέθη κυψελών σε αστικά περιβάλλοντα. Κάτι τέτοιο είναι λογικό, καθώς σε ένα περιβάλλον πολλαπλών χρηστών, όπου διαφορετικοί χρήστες αντιμετωπίζουν διαφορετικές απώλειες δεδομένων λόγω των διαφορετικών συνθηκών λήψης που μπορεί να αντιμετωπίζουν και καθώς το εύρος της κυψέλης αυξάνεται, όλο και περισσότεροι χρήστες θα αντιμετωπίζουν κακές συνθήκες λήψης.

7.1.3 Ικανοποίηση Χρηστών

Στην παράγραφο αυτή διερευνούμε σε μεγαλύτερο βάθος την απόδοση του AL-FEC, εξετάζοντας ποια είναι η επίδραση της μεταβολής του transmission overhead πάνω σε κάθε χρήστη, και όχι συνολικά, εισάγοντας την παράμετρο της ικανοποίησης του χρήστη και πιο συγκεκριμένα εξετάζουμε ποιο είναι το ποσοστό των ικανοποιημένων χρηστών για διάφορα μεγέθη του transmission overhead. Η ικανοποίηση ενός χρήστη ορίζεται σύμφωνα με τις παραδοχές που περιγράφηκαν προηγουμένως για το κατώφλι της πιθανότητας αποτυχίας της FEC αποκωδικοποίησης. Για τα συγκεκριμένα πειράματα, το εύρος της κυψέλης έχει οριστεί στα 1000 μέτρα και η κωδικοποίηση εφαρμόζεται σε μία πολυμεσική ροή, κωδικοποιημένη στα 128 kbps με το μήκος του κάθε πηγαιού block να είναι 256 σύμβολα. Στην Εικόνα 7.3 παρουσιάζεται η μεταβολή του ποσοστού των ικανοποιημένων χρηστών, καθώς το AL-FEC



ΣΧΗΜΑ 7.3: Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών - Μοντέλο Κίνησης Πεζών



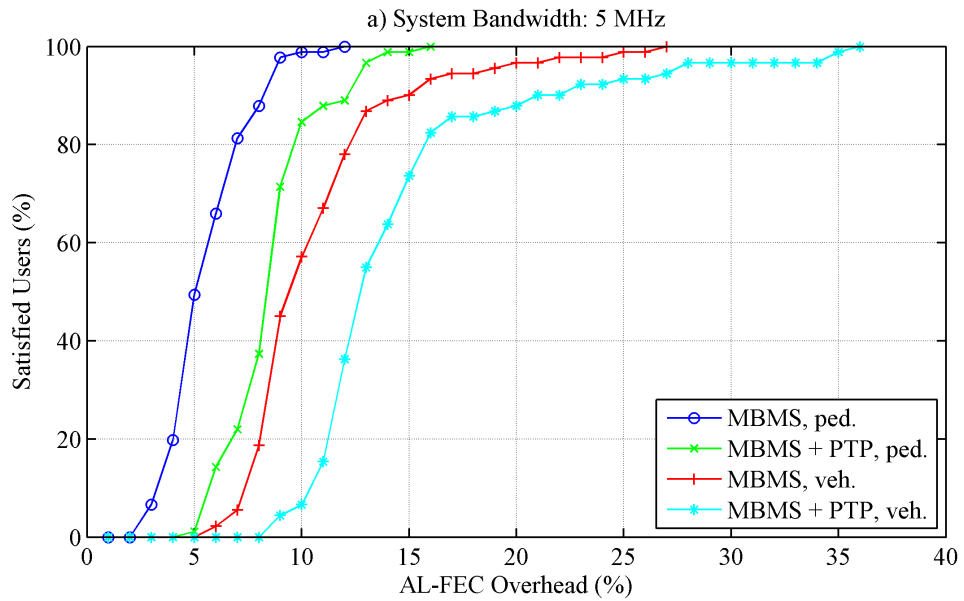
ΣΧΗΜΑ 7.4: Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών - Μοντέλο Κίνησης Οχημάτων

transmission overhead αυξάνεται, για τρεις διαφορετικές τιμές του πλήθους των χρηστών, με τους χρήστες να ακολουθούν το μοντέλο κινητικότητας πεζών χρηστών. Οι τρεις διαφορετικές τιμές του πληθυσμού προσομοιώνουν διαφορετικά φόρτη δικτύου, σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί. Στην Εικόνα 7.4 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το μοντέλο κινητικότητας οχημάτων.

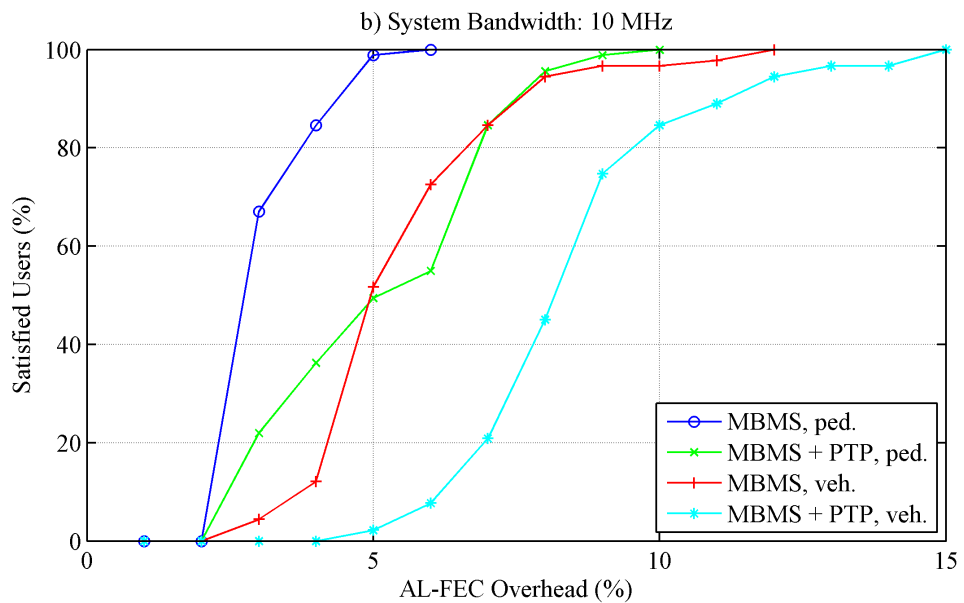
Όταν η πυκνότητα των χρηστών είναι σχετικά μικρή (δλδ. 50 και 100 χρήστες), η εισαγωγή 5% transmission overhead έχει σαν αποτέλεσμα την ικανοποίηση ποσοστού μεγαλύτερου του 95% των χρηστών και για τα δύο μοντέλα κινητικότητας. Επιπλέον αύξηση του transmission overhead στο 10%, οδηγεί στην ικανοποίηση όλων των χρηστών που συμμετέχουν στην υπηρεσία. Όταν προσομοιώνουμε 200 κινητούς χρήστες, παρατηρούμε πως για την περίπτωση του μοντέλου κίνησης πεζών, το απαραίτητο transmission overhead για την επίτευξη 90% ικανοποιημένων χρηστών είναι 20%, ενώ στην περίπτωση του μοντέλου κίνησης οχημάτων είναι αντίστοιχα 30%. Γενικά, η αύξηση του απαιτούμενου transmission overhead με την αύξηση του πληθυσμού των χρηστών είναι κάτι αναμενόμενο, εάν αναλογιστούμε τις ρυθμίσεις των μεταδόσεων και την επίδρασή τους στη συνολική απόδοση του δικτύου.

Επιπλέον η μορφή όλων των καμπυλών αναδεικνύει ένα σημείο επιλογής του transmission overhead, πέρα από το οποίο η αύξησή του δεν είναι αποδοτική, καθώς τα οφέλη στην απόδοση αποκωδικοποίησης των χρηστών συνολικά είναι ελάχιστα. Πιο αναλυτικά, όταν προσομοιώνουμε 200 πεζούς χρήστες, η εισαγωγή 18% transmission overhead πετυχαίνει περίπου 90% ικανοποιημένους χρήστες, με την αύξηση του transmission overhead πάνω από 55% να αποφέρει 98% ικανοποιημένους χρήστες. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό, η επιπλέον επιβάρυνση στο ποσό των μεταδιδόμενων δεδομένων είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη βελτίωση που προσφέρει. Βάσει αυτής της παρατήρησης, μπορούμε να εξάγουμε από κάθε καμπύλη ένα σημείο αποδοτικής επιλογής του transmission overhead ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου και τους στόχους που θέλουμε να επιτύχουμε. Χαρακτηριστικά, αναφέρουμε πως εάν υποθέσουμε πως η ικανοποίηση του 90% των χρηστών είναι μία αρκετά ικανοποιητική απόδοση, το βέλτιστο απαιτούμενο transmission overhead είναι 6% όταν η μετάδοση αφορά 100 χρήστες του μοντέλου κίνησης οχημάτων. Αντίστοιχα, για όλα τα σενάρια προσομοίωσης το βέλτιστο αυτό σημείο μπορεί να εξαχθεί άμεσα από τη μορφή των παρεχόμενων καμπυλών.

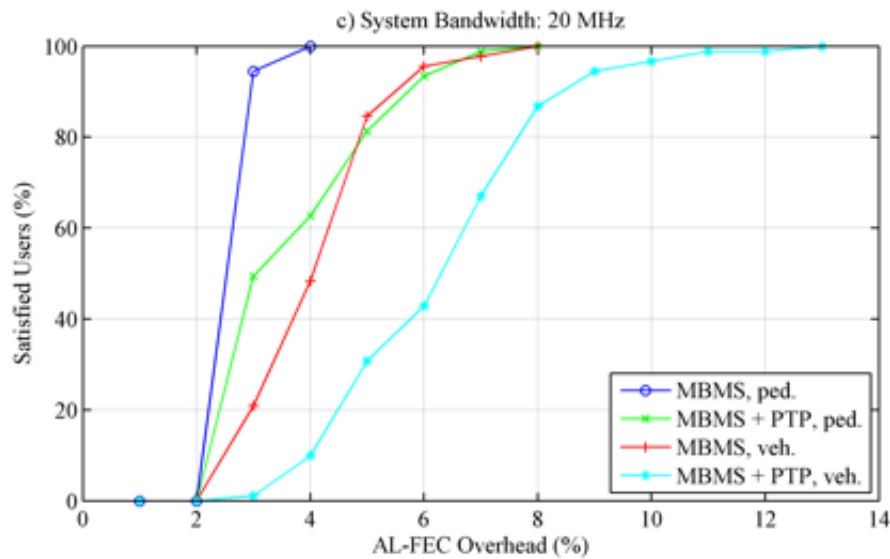
Στη συνέχεια, διερευνούμε την επίδραση της μεταβολής του ποσοστού των ικανοποιημένων χρηστών σε συνάρτηση με το ποσό του transmission overhead που εισάγεται στη μετάδοση για τα δύο διαφορετικά σενάρια μετάδοσης που έχουμε περιγράψει. Μελετάμε δηλαδή, τη συμπεριφορά της multicast υπηρεσίας με την παρουσία ή μη point-to-point παράλληλων μεταδόσεων IP κίνησης στους κινητούς παραλήπτες. Τα συγκεκριμένα πειράματα προσομοιώνουν τη συμπεριφορά 200 κινητών χρηστών σύμφωνα με το μοντέλο κίνησης πεζών αλλά και οχημάτων. Στην Εικόνα 7.5, 7.6 και 7.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διαφορετικά συχνοτικά εύρη λειτουργίας 5, 10 και 20 MHz αντίστοιχα.



ΣΧΗΜΑ 7.5: Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 5 MHz



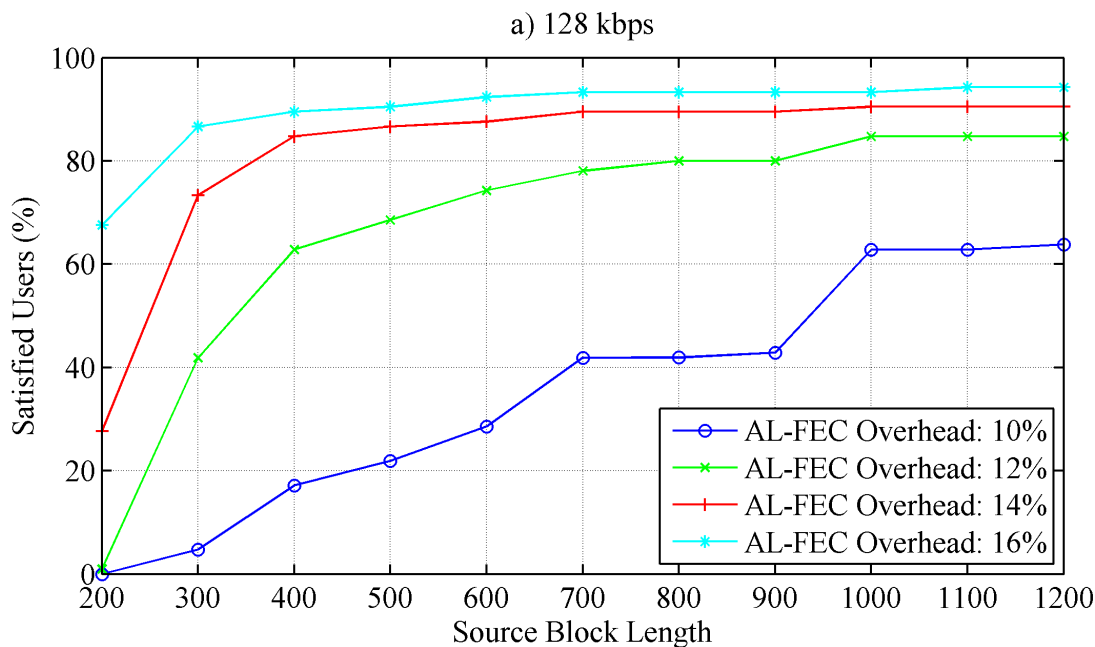
ΣΧΗΜΑ 7.6: Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 10 MHz



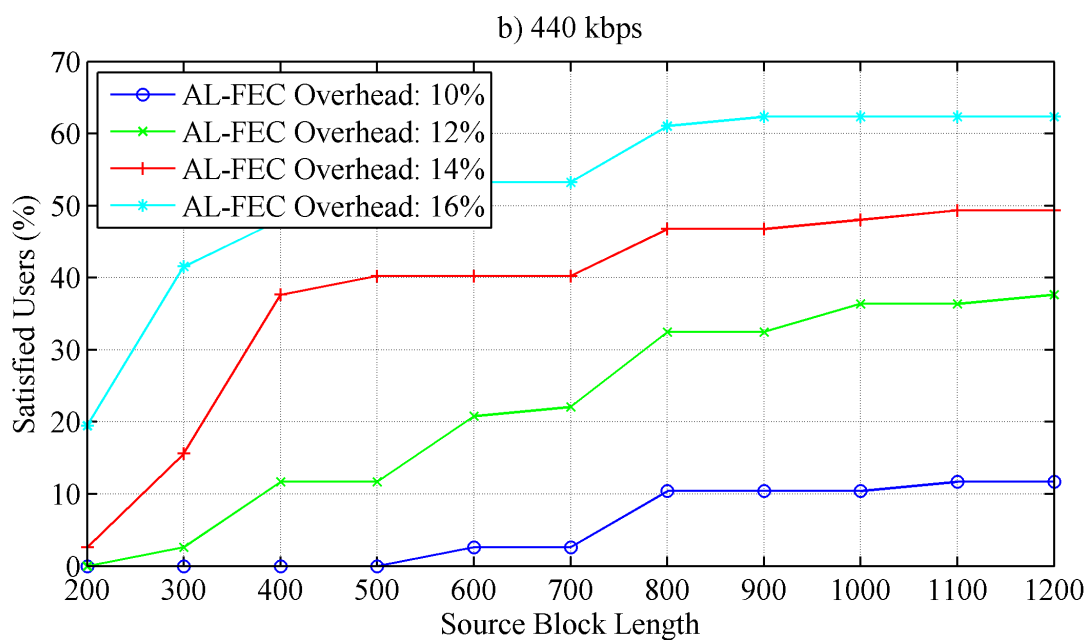
ΣΧΗΜΑ 7.7: Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 20 MHz

Αναλύοντας συνολικά, τις τρεις γραφικές παραστάσεις γίνεται άμεσα αντιληπτή η ευεργετική επίδραση της αύξησης του εύρους λειτουργίας του συστήματος. Ιδιαίτερα για την περίπτωση χρήσης εύρους 10 MHz σε σχέση με τα 5 MHz, οι διαφορές στην απόδοση είναι αξιοπρόσεκτα υψηλές. Ειδικότερα στην περίπτωση του σεναρίου συνδυασμένης μετάδοσης ενός point-to-multipoint με πολλαπλούς point-to-point bearers, η μείωση του απαιτούμενου transmission overhead φθάνει το 25% περίπου. Μία άλλη παρατήρηση, είναι οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται στην απόδοση μεταξύ του εύρους λειτουργίας των 10 και 20 MHz. Σύμφωνα με αυτό, μπορούμε να πούμε πως για τα συγκεκριμένα σενάρια προσομοίωσης η ιδανική επιλογή είναι η χρήση του συχνοτικού εύρους των 10 MHz, καθώς οι διαφορές σε σχέση με τα 20 MHz είναι της τάξης του 2%. Περαιτέρω, οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των δύο μοντέλων κινητικότητας είναι οι αναμενόμενες, όπως έχουν διερευνηθεί και στα προηγούμενα πειράματα.

Συνεχίζοντας, εξετάζουμε την επίδραση του πλήθους των FEC συμβόλων που προστατεύονται μαζί σε ένα πηγαίο FEC block κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης, πάνω στην ικανοποίηση των χρηστών. Στην Εικόνα 7.8 παρουσιάζεται η μεταβολή του ποσοστού των ικανοποιημένων χρηστών σε συνάρτηση με διάφορες τυπικές τιμές του πλήθους των FEC συμβόλων σε ένα πηγαίο block, όταν μεταδίδεται μία πολυμεσική ροή με ρυθμό κωδικοποίησης 128 kbps και αντίστοιχα στην Εικόνα 7.9 παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα για τη μετάδοση πολυμεσικού περιεχομένου κωδικοποιημένο όμως στα 440 kbps. Τα αποτελέσματα αφορούν την προσομοίωση 200 χρηστών, σύμφωνα με το μοντέλο κίνησης πεζών και με



ΣΧΗΜΑ 7.8: Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 128 kbps



ΣΧΗΜΑ 7.9: Transmission Overhead vs. Ικανοποίησης Χρηστών @ 440 kbps

το εύρος της κυψέλης στα 1000 μέτρα.

Αναλύοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις, παρατηρούμε πως η αύξηση του αριθμού των συμβόλων που προστατεύονται μαζί σε ένα πηγαίο FEC block είναι ευεργετική για την απόδοση της διαδικασίας αποκωδικοποίησης στην πλευρά των παραληπτών. Η συμπεριφορά

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: Η Επίδραση του Μήκους FEC Block στο Απαιτούμενο Transmission Overhead

Μήκος FEC block	Ρυθμός Κωδικοποίησης (kbps)		
	128	440	800
256	12%	30%	80%
512	9%	24%	71%
1024	8%	22%	68%
2048	7%	20%	65%

αυτή συνεπάγεται άμεσα από την ανάλυση της απόδοσης του κώδικα Raptor σύμφωνα με τη σχέση 3.3. Ειδικότερα για κάποιες συγκεκριμένες τιμές του μήκους του πηγαίου FEC block τα οφέλη είναι αξιοσημείωτα μεγάλα, θεωρώντας πάντα πως το transmission overhead παραμένει σταθερό. Επιπλέον, άξιο σχολιασμού είναι το γεγονός πως στην περίπτωση της μετάδοσης πολυμεσικού περιεχομένου κωδικοποιημένου σε υψηλούς ρυθμούς (δλδ. 440 kbps) το ποσοστό των ικανοποιημένων χρηστών είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με τη μετάδοση περιεχομένου στα 128 kbps, εξετάζοντας πάντα τις ίδιες τιμές για τις παραμέτρους της FEC κωδικοποίησης. Κάτι τέτοιο είναι απόλυτα λογικό, εάν αναλογιστεί κανείς πως ο αριθμός των πακέτων που μεταδίδονται σε ένα χρονικό διάστημα στην περίπτωση των 440 kbps είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της ροής των 128 kbps.

Προκειμένου να γίνει περισσότερο σαφής η επίδραση που μπορεί να έχει η μεταβολή του πλήθους των πηγαίων συμβόλων που προστατεύονται μαζί σε ένα πηγαίο FEC block ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει τη μεταβολή του μέσου transmission overhead, που είναι απαραίτητο να εισαχθεί στη μετάδοση των πολυμεσικών δεδομένων ώστε να επιτευχθεί η ικανοποίηση του συνόλου των παραληπτών, σε σχέση με τη μεταβολή του μήκους του κάθε πηγαίου FEC block.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.1 είναι άμεσα αντιληπτό πως η αύξηση του πλήθους των FEC συμβόλων ενός πηγαίου FEC block είναι ευεργετική για τη συνολική απόδοση της διαδικασίας αποκωδικοποίησης του μηχανισμού AL-FEC. Συνεπώς, μπορούμε να διαπιστώσουμε πως το transmission overhead δεν είναι η μόνη παράμετρος που είναι άξια διερεύνησης, καθώς ναί μεν το transmission overhead καθορίζει το ποσό της προστασίας που θα εισάγει η FEC κωδικοποίηση στη μετάδοση των δεδομένων, όμως σε κάθε περίπτωση η επιβάρυνση που προσθέτει στον όγκο των μεταδιδόμενων δεδομένων δεν είναι αμελητέα. Για αυτό το λόγο, όπως διαπιστώνεται και από τα πειραματικά αποτελέσματα, η προσεκτική επιλογή των παραμέτρων κωδικοποίησης συνολικά, θα μπορούσε να επιφέρει σημαντικά οφέλη ως προς την επιβάρυνση που προσθέτει στη μετάδοση ο μηχανισμός προστασίας AL-FEC.

7.2 Αξιολόγηση των Κωδίκων Raptor

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε μία εκτενής σύγκριση του νέου μέλους της οικογένειας κωδίκων Raptor, του κώδικα RaptorQ, με τον προκάτοχό του κώδικα Raptor. Αρχικά, παρουσιάζουμε μία θεωρητική σύγκριση της απόδοσής τους διερευνώντας τις βελτιώσεις που εισάγει ο νέος κώδικας Raptor. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε συγκριτικά αποτελέσματα της απόδοσης των δύο κωδίκων πάνω σε multicast περιβάλλοντα κυψελωτών δικτύων τέταρτης γενιάς χρησιμοποιώντας το περιβάλλον προσομοίωσης που έχουμε παρουσιάσει προηγουμένως. Διερευνώντας διάφορες παραμέτρους μετάδοσης σε συνδυασμό με τις παραμέτρους FEC κωδικοποίησης, παρουσιάζουμε διάφορα αποτελέσματα για την επίδραση των σχημάτων FEC στην απόδοση των multicast κινητών δικτύων.

Για την πειραματική αξιολόγηση της παραγράφου αυτής έχουμε χρησιμοποιήσει την πλατφόρμα προσομοίωσης που έχουμε περιγράψει προηγουμένως. Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από έναν κόμβο παραγωγής δεδομένων προς μετάδοση, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την προσομοίωση των δεδομένων των μοντελοποιημένων εφαρμογών και την προώθησή τους στο multicast GW. Επιπλέον η οντότητα αυτή είναι υπεύθυνη για την εφαρμογή της FEC προστασίας στο επίπεδο εφαρμογών. Στη συνέχεια το multicast GW αναλαμβάνει να προωθήσει τις IP multicast ροές στο μοντελοποιημένο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης όπου τελικά πραγματοποιείται η μετάδοση των δεδομένων από το σταθμό βάσης προς τους κινητούς χρήστες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2: Ρυθμίσεις Προσομοίωσης για την Αξιολόγηση των κωδίκων Raptor

Parameter	Units	Value
Cell layout		Hexagonal grid, 3 sectors per site
Cell radius	m	1000
Carrier frequency	MHz	2000
System bandwidth	MHz	5
Transmission time interval (TTI)	ms	80
Modulation scheme		16QAM
Channel model		3GPP Typical Urban (TU)
Path loss	dB	$L = 128.1 + 37.6 \log_{10} d$
Multipath		Jakes model
Penetration loss	dB	10
Shadowing		log-normal distribution
BS transmit power	dBm	43
BS antenna gain	dBi	14
BS antenna height	m	30
# UEs		100
UE Rx antennas		2
UE's mobility model		Random walk

Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι προσομοίωσης του δικτύου ασύρματης πρόσβασης. Επίσης, όσον αφορά το μοντελοποιημένο φυσικό επίπεδο εφαρμόζεται PHY-FEC προστασία με χρήση συνελικτικών κωδίκων με σταθερό ρυθμό $\frac{1}{3}$. Επίσης, εφαρμόζεται CRC προστασία 24-bit. Στο φυσικό επίπεδο η επιτυχής λήψη ενός PHY-FEC

block υπολογίζεται από το Signal to Noise Ratio (SNR) βάσει OFDM αρχείων απεικόνισης. Τέλος, τα blocks του φυσικού επιπέδου επανασυναρμολογούνται για να καθοριστεί εάν μπορούν να ανακτηθούν και προωθηθούν στα υψηλότερα επίπεδα.

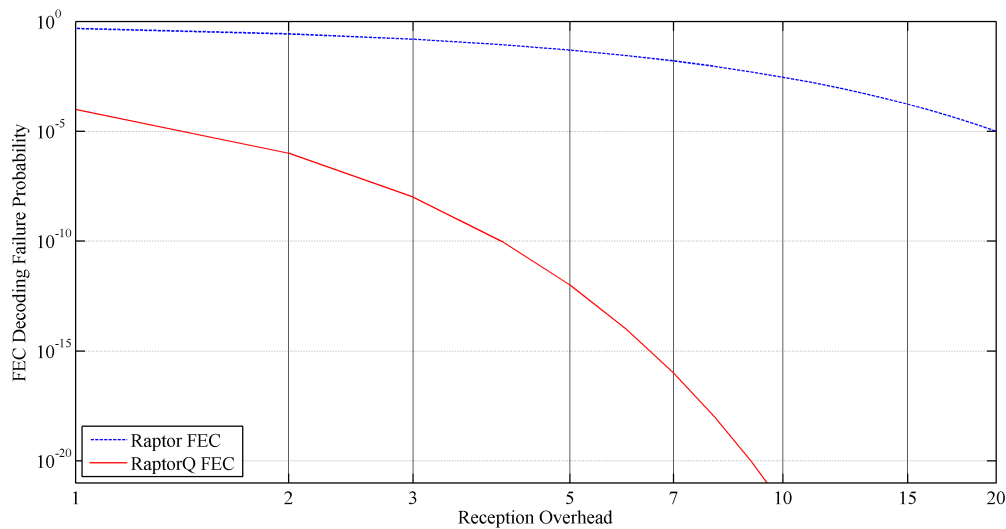
Η μοντελοποίηση της AL-FEC προστασίας γίνεται στο multicast source προτού τα πακέτα προωθηθούν στο multicast GW. Αναλόγως με το καθορισμένο source block length (SBL) τα προς μετάδοση πακέτα οργανώνονται σε AL-FEC source blocks και στη συνέχεια τα πλεονάζοντα σύμβολα παράγονται για το κάθε block. Ο αριθμός των πλεονάζοντων συμβόλων καθορίζεται από το transmission overhead που εισάγει το multicast source. Στη συνέχεια, τα κωδικοποιημένα source και repair σύμβολα, με την υπόθεση του ενός FEC συμβόλου ανά πακέτο, ανατίθενται σε IP multicast bearers προς μετάδοση.

7.2.1 Θεωρητική Συγκριτική Αξιολόγηση

Σε αυτή την υποενότητα παρέχουμε μία θεωρητική συγκριτική αξιολόγηση των δύο υπό αξιολόγηση AL-FEC σχημάτων. Είναι σαφές ότι το βασικό σημείο που χαρακτηρίζει την απόδοση ενός AL-FEC σχήματος είναι η πιθανότητα αποτυχίας αποκωδικοποίησης σε σχέση με τον αριθμό των επιπλέον συμβόλων που λαμβάνονται και περαιτέρω, ως άμεση συνέπεια αυτού, το ποσό του πλεονασμού μετάδοσης που απαιτείται για να αντιμετωπίσει διαφορετικούς ρυθμούς απώλειας πακέτων.

Προς αυτή την κατεύθυνση, αρχικά διερευνούμε την απόδοση αποκωδικοποίησης σε σχέση με το reception overhead που απαιτεί ο κάθε AL-FEC κώδικας για να ανακτήσει επιτυχώς τα προστατευμένα δεδομένα. Η Εικόνα 7.10 παρουσιάζει την πιθανότητα αποτυχίας της FEC αποκωδικοποίησης σε συνάρτηση με τον αριθμό των πρόσθετων συμβόλων που λαμβάνονται, δηλαδή, του reception overhead, συγκρίνοντας την απόδοση του κώδικα Raptor FEC με εκείνη του RaptorQ.

Συγκρίνοντας την συμπεριφορά των δύο καμπυλών, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, παρότι η πιθανότητα αποτυχίας του κώδικα Raptor μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του αριθμού των επιπλέον FEC συμβόλων, η υπεροχή του κώδικα RaptorQ στην απόδοση αποκωδικοποίησης φαίνεται να εξαλείφει αυτή τη συμπεριφορά του κώδικα Raptor. Ενδεικτικά, ενώ ο κώδικας RaptorQ απαιτεί μόνο δύο επιπλέον σύμβολα για να πετύχει μια πιθανότητα αποτυχίας πρακτικά σχεδόν μηδενική, ο κώδικας Raptor απαιτεί τη λήψη περισσότερων από

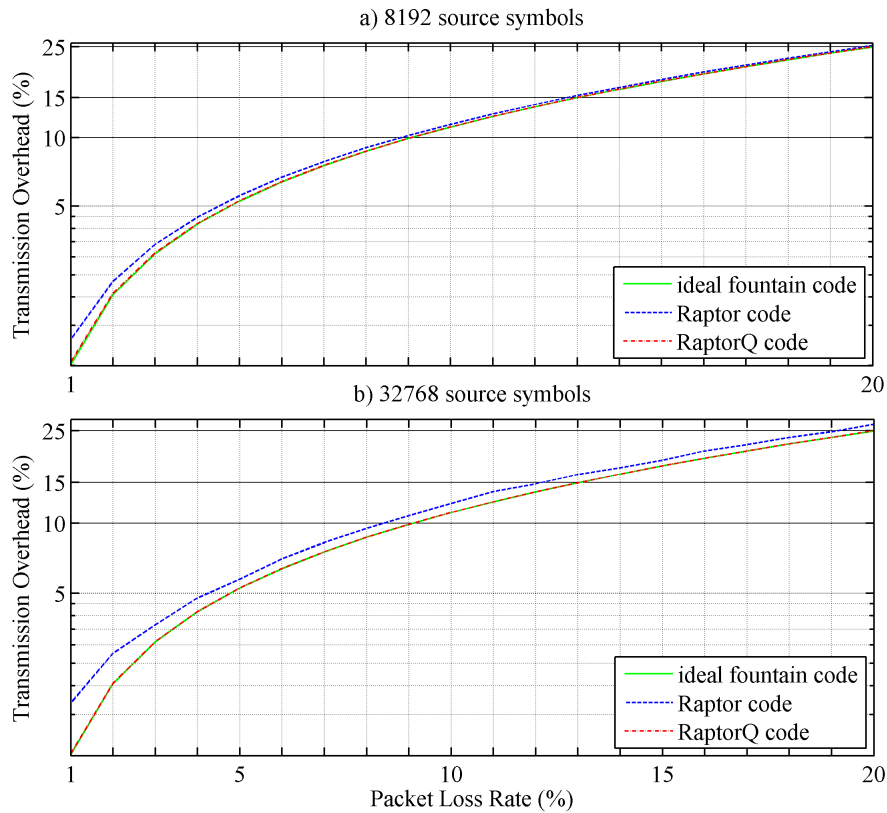


ΣΧΗΜΑ 7.10: Πιθανότητα Αποτυχίας FEC Αποκωδικοποίησης vs. Reception Overhead

20 συμβόλων. Με βάση αυτό, μπορούμε να πούμε ότι ο κώδικας RaptorQ προσομοιώνει ουσιαστικά την απόδοση ενός ιδανικού fountain FEC κώδικα.

Οι ελάχιστες απαιτήσεις του κώδικα RaptorQ στον αριθμό των επιπλέον συμβόλων έχουν άμεσο αντίκτυπο σε ορισμένες πολύ σημαντικές πτυχές της απόδοσης ενός AL-FEC μηχανισμού. Το απαιτούμενο reception overhead χαρακτηρίζει άμεσα την ανθεκτικότητα ενός κώδικα FEC έναντι στις απώλειες πακέτων, κάτι που σημαίνει πως ένα σχήμα FEC που απαιτεί μικρότερο αριθμό από πρόσθετα σύμβολα μπορεί να αποκωδικοποιήσει επιτυχώς τα FEC προστατευμένα δεδομένα με ρυθμούς απώλειας πακέτων όπου ένας FEC κώδικας, με σημαντικά υψηλότερες απαιτήσεις reception overhead, θα αποτύχει. Κατά συνέπεια, ο κώδικας RaptorQ FEC μπορεί να λειτουργήσει επιτυχώς κάτω από πολύ χειρότερες συνθήκες λήψης σε σχέση με τον κώδικα Raptor καθώς, δεδομένου πάντα πως έχουν ληφθεί περισσότερα σύμβολα από τον αριθμό των πηγαιών συμβόλων, ο κώδικας RaptorQ μπορεί να αντιμετωπίσει κατά πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς απώλειας πακέτων από τον κώδικα Raptor.

Ένα άμεσο αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι πως το σχήμα προστασίας RaptorQ μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία απαιτώντας σημαντικά χαμηλότερο ποσό πλεονασμού. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι ο RaptorQ μπορεί να παρέχει ενισχυμένη προστασία με ταυτόχρονη επίτευξη υψηλής μείωσης στο απαιτούμενο transmission overhead καθώς και στην επιβάρυνση που εισάγει η διαδικασία κωδικοποίησης. Για να επαληθεύσουμε τον ισχυρισμό αυτό στο επόμενο μέρος της θεωρητικής αξιολόγησης εξετάζουμε πώς το transmission overhead κάθε AL-FEC μηχανισμού ποικίλλει, σε σχέση με το ρυθμό απώλειας πακέτων



ΣΧΗΜΑ 7.11: Transmission Overhead vs. Ρυθμού Απώλειας Πακέτων για Διαφορετικές Τιμές Μεγέθους Δεδομένων

στο επίπεδο εφαρμογών. Για την αξιολόγηση αυτή, εξετάζουμε την απόδοση της προστασίας του κώδικα Raptor και RaptorQ FEC σε σχέση με έναν ιδανικό fountain κώδικα. Για τη διεξαγωγή αυτής της σύγκρισης εξετάζουμε διαφορετικές τιμές του πλήθους των μεταδιδόμενων FEC πηγαίων συμβόλων. Στην Εικόνα 7.11 παρουσιάζουμε το απαιτούμενο AL-FEC transmission overhead που ο αποστολέας θα πρέπει να εισαγάγει στη μετάδοση προκειμένου να επιτευχθεί επιτυχημένη αποκωδικοποίηση των προστατευμένων δεδομένων, σε σχέση με το ρυθμό απώλειας πακέτων προσομοιώνοντας τη μετάδοση 8192 και 32768 συμβόλων στις Εικόνες 7.11a και 7.11b αντίστοιχα.

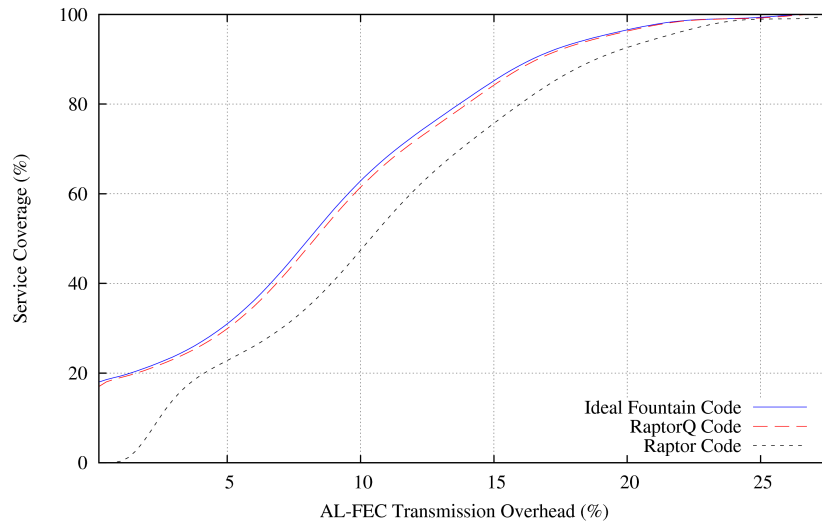
Η πρώτη τετριμμένη παρατήρηση από τις δύο γραφικές είναι η αναλογική αύξηση του απαιτούμενου AL-FEC transmission overhead με το ρυθμό απώλειας πακέτων. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι, όσο ο αριθμός των χαμένων πακέτων αυξάνεται, ο αποστολέας θα πρέπει να εισάγει όλο και μεγαλύτερο πλεονασμό στα μεταδιδόμενα δεδομένα, προκειμένου να αντιμετωπίσει τις αυξανόμενες απώλειες πακέτων. Επιπλέον, μία άλλη παρατήρηση είναι πως ο RaptorQ FEC λειτουργεί εξαιρετικά κοντά στην απόδοση ενός ιδανικού fountain κώδικα σε αντίθεση με τον κώδικα Raptor. Η επίδοση αυτή συνεπάγεται άμεσα από το

σημαντικά χαμηλότερο reception overhead του κώδικα RaptorQ που σχεδόν επιτυγχάνει τη λειτουργία ενός ιδανικού τέτοιου κώδικα.

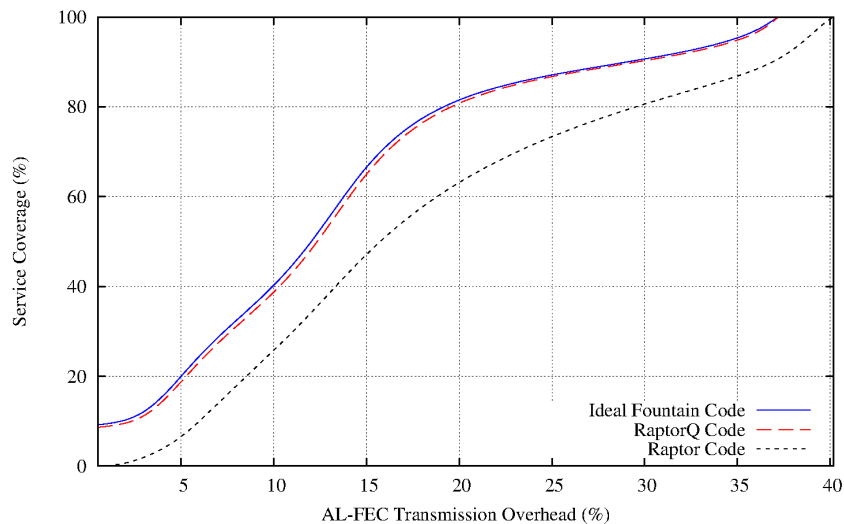
Επιπλέον, παρατηρώντας πιο προσεκτικά την καμπύλη του Raptor σε αντίθεση με την καμπύλη του RaptorQ μπορούμε να σημειώσουμε ότι, με την αύξηση του ρυθμού απώλειας πακέτων, η απόδοση του Raptor FEC πλησιάζει ολοένα και περισσότερο αυτήν του RaptorQ. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός πως καθώς ο αριθμός των χαμένων πακέτων αυξάνεται και κατά συνέπεια όλο και περισσότερα πλεονάζοντα σύμβολα απαιτούνται από τον κωδικοποιητή FEC, η αύξηση αυτή μειώνει συνεχώς την υπεροχή του κωδικά RaptorQ στο reception overhead δεδομένου ότι η διαφορά στα απαιτούμενα πρόσθετα σύμβολα μεταξύ των δύο κωδίκων FEC παραμένει σταθερή καθώς είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες λήψης. Τέλος, εξετάζοντας τις δύο γραφικές συγκριτικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στην περίπτωση των 32768 συμβόλων οι διαφορές στο απαιτούμενο transmission overhead μεταξύ του Raptor και του RaptorQ είναι υψηλότερες από ότι στην περίπτωση των μικρότερων σε μέγεθος μεταδιδόμενων δεδομένων. Αυτό είναι λογικό, λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιότητες κωδικοποίησης των δύο AL-FEC κωδίκων. Όπως έχει ήδη σημειωθεί ο κώδικας Raptor μπορεί να κωδικοποιήσει μέχρι και 8192 σύμβολα σε ένα πηγείο block, έτσι στη δεύτερη περίπτωση το μεταδιδόμενο αντικείμενο χωρίζεται σε πολλαπλά FEC blocks, ενώ με τη χρήση του κωδικοποιητή RaptorQ το σύνολο του αντικειμένου μπορεί να μεταδοθεί ως ένα ενιαίο block. Αυτή η ιδιότητα του RaptorQ μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητα της κωδικοποίησης, δεδομένου ότι επιτρέπει την καλύτερη κατανομή της FEC προστασίας σε ολόκληρο το αρχείο σε ένα μόνο πηγείο FEC block.

7.2.2 Service Coverage

Οι προσομοιώσεις της παρούσας παραγράφου εξετάζουν πώς το ποσό του εισαχθέντος AL-FEC transmission overhead επηρεάζει το ποσοστό των multicast χρηστών που μπορούν να λάβουν με επιτυχία τα μεταδιδόμενα δεδομένα, το οποίο αναφέρεται σαν service coverage της υπηρεσίας MBMS. Για την αξιολόγηση αυτή εξετάζουμε την αποκλειστική χρήση του AL-FEC χωρίς τη χρήση μίας ptp ή ptm διαδικασίας επισκευής μετά την παράδοση (post-delivery repair). Προσομοιώνουμε τη μετάδοση σε 100 UEs που συμμετέχουν σε μία multicast download υπηρεσία. Οι χρήστες είναι τυχαία κατανεμημένοι στην κυψέλη εκπομπής και προσομοιώνουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις του μοντέλου κινητικότητας με τα UEs να κινούνται με 3 και 30 χ.α.ω., αντιστοιχώντας σε μοντέλο κίνησης πεζών και



ΣΧΗΜΑ 7.12: Service Coverage vs. Transmission Overhead για Μοντέλο Κίνησης Πεζών



ΣΧΗΜΑ 7.13: Service Coverage vs. Transmission Overhead για Μοντέλο Κίνησης Οχημάτων

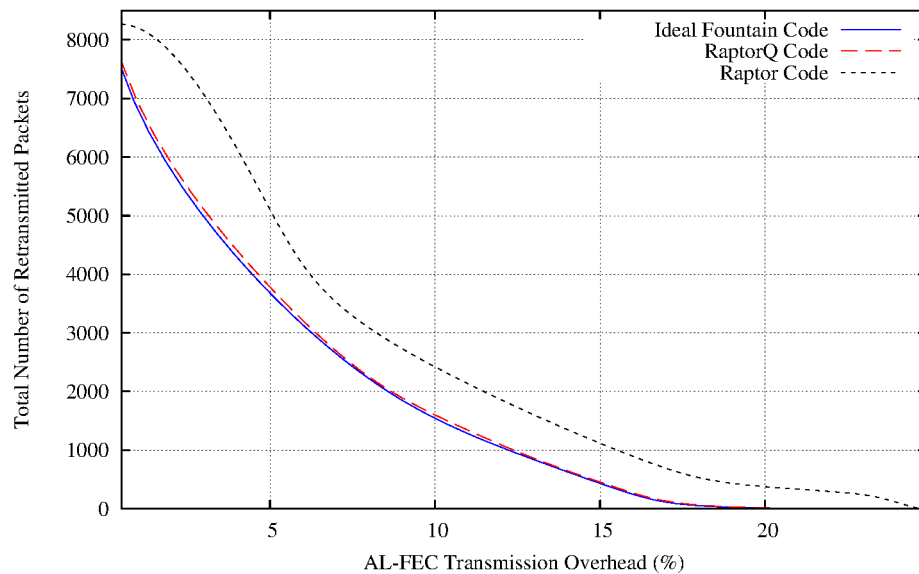
οχημάτων σε αστικά περιβάλλοντα στις Εικόνες 7.12 και 7.13 αντίστοιχα. Το μεταδιδόμενο αντικείμενο αποτελείται από 2048 πακέτα με το μέγεθός τους να είναι 512 B και το SBL της κωδικοποίησης 1024 σύμβολα σύμφωνα με τις συνιστώμενες ρυθμίσεις του [27].

Παρατηρώντας τις καμπύλες της Εικόνας 7.12 μπορούμε να διαπιστώσουμε άμεσα την εξαιρετικά κοντά στην ιδανική απόδοση του κώδικα RaptorQ, καθώς ο ιδανικός FEC κώδικας επιτυγχάνει λιγότερο από 1% καλύτερο service coverage από τον κώδικα RaptorQ. Από την άλλη πλευρά, ο κώδικας Raptor παρουσιάζει επιδόσεις αρκετά μακριά από τον ιδανικό FEC κώδικα και επιτυγχάνει μόνο μία καλύτερη απόδοση, λίγο πιο κοντά στην απόδοση

του RaptorQ, για υψηλές τιμές του transmission overhead, όπου η προστασία AL-FEC έχει να αντιμετωπίσει UEs με υψηλούς ρυθμούς απώλειας πακέτων. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι ο κώδικας RaptorQ απαιτεί μόνο 2 επιπλέον σύμβολα για να επιτύχει την απόδοση του ιδανικού FEC κώδικα σύμφωνα με το κατώφλι για την πιθανότητα αποτυχίας της κωδικοποίησης που έχουμε θεωρήσει, ενώ ο κώδικας Raptor απαιτεί reception overhead ίσο με 24 επιπρόσθετα σύμβολα ανά πηγαίο block. Βάσει αυτού μπορούμε να σημειώσουμε ότι ο κώδικας RaptorQ μπορεί να λειτουργήσει σχεδόν ιδανικά από τη λήψη των πρώτων κιόλας επιπρόσθετων συμβόλων, ενώ ο κώδικας Raptor απαιτεί σημαντικά περισσότερα σύμβολα για να παρέχει τη δυνατότητα επιτυχούς ανάκτησης των προστατευμένων δεδομένων.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα του μοντέλου κίνησης οχημάτων που παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.13 μπορούμε να παρατηρήσουμε άμεσα ότι το απαιτούμενο transmission overhead είναι σαφώς υψηλότερο από την περίπτωση του μοντέλου κίνησης πεζών, λόγω του αναμενόμενου υψηλότερου ρυθμού απώλειας πακέτων ο οποίος οφείλεται στην υψηλότερη ταχύτητα κίνησης των UEs. Ενδεικτικά, μπορούμε να αναφέρουμε ότι το απαιτούμενο transmission overhead για να επιτύχει ο κώδικας RaptorQ 90% service coverage είναι περίπου 30% για το μοντέλο κίνησης οχημάτων σε αντίθεση με το 15% που απαιτείται για το μοντέλο κίνησης πεζών. Συγκρίνοντας τους δύο κώδικες AL-FEC, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο RaptorQ μπορεί να πετύχει 80% service coverage απαιτώντας περίπου 18% transmission overhead, ενώ ο κώδικας Raptor απαιτεί 30% για το ίδιο αποτέλεσμα, γεγονός που αναδεικνύει την υπεροχή του κώδικα RaptorQ. Επιπλέον, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι καμπύλες του service coverage και των δύο AL-FEC κωδίκων για το μοντέλο κίνησης οχημάτων είναι λιγότερο ομαλές σε σχέση με τις καμπύλες που αντιστοιχούν στο μοντέλο κίνησης πεζών, καθώς, παρά τον υψηλότερο μέσο ρυθμό απώλειας πακέτων, η υψηλότερη ταχύτητα κίνησης προσφέρει τη δυνατότητα λιγότερα UEs να αντιμετωπίζουν μόνιμα πολύ κακές συνθήκες λήψης καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Επιπλέον, όσον αφορά τη συμπεριφορά των καμπυλών και στις δύο γραφικές, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι υπάρχει ένα αποδοτικό διάστημα επιλογής του transmission overhead για το κάθε σενάριο κινητικότητας. Αυτό το αποδοτικό εύρος μπορεί να προσδιοριστεί μεταξύ 5% και 15% για το σενάριο κίνησης πεζών και μεταξύ 10% και 20% για το σενάριο κίνησης οχημάτων. Αποσαφηνίζοντας το τελευταίο, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση του transmission overhead στο συγκεκριμένο διάστημα τιμών οδηγεί σε μία αναλογική αύξηση στο ποσοστό των UEs που ανακτούν με επιτυχία τα προστατευμένα κατά AL-FEC δεδομένα,



ΣΧΗΜΑ 7.14: Επαναποσταλθέντα Πακέτα vs. Transmission Overhead

ενώ πέραν αυτής της ζώνης τιμών του transmission overhead το κέρδος που παρατηρείται στο service coverage του συστήματος μειώνεται συνεχώς.

7.2.3 Επαναποστολή Πακέτων

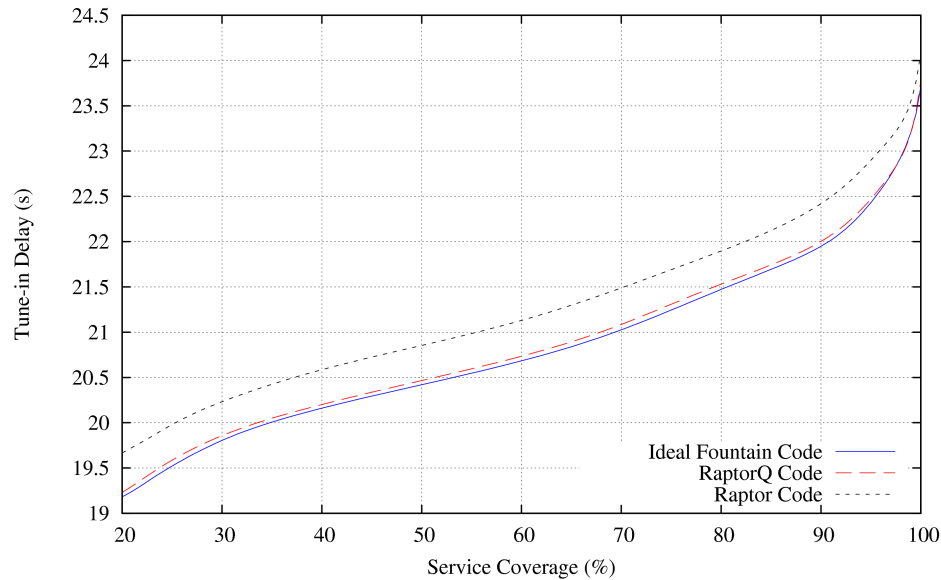
Σε αυτό το μέρος των πειραματικών αποτελεσμάτων η Εικόνα 7.14 παρουσιάζει πώς ο συνολικός αριθμός των επαναποσταλθέντων πακέτων κατά τη διάρκεια μίας MBMS download συνόδου ποικίλλει εξετάζοντας την εφαρμογή των δύο μηχανισμών Raptor AL-FEC σε συνδυασμό με την rtp διαδικασία επισκευής αρχείου μετά την ολοκλήρωση της αποστολής σε UEs του μοντέλου κίνησης πεζών. Η προσομοίωση της φάσης επισκευής αρχείου rtp μετά την παράδοση εφαρμόζεται όπως περιγράφεται στο τμήμα 2.7.6.1, έως ότου όλα τα UEs είναι ικανά να ανακτήσουν με επιτυχία το μεταδιδόμενο αντικείμενο. Για την αξιολόγηση αυτή προσομοιώνουμε τη μετάδοση 2048 συμβόλων με το SBL ίσο με 1024 πακέτα μεγέθους 512 B.

Όπως και στο προηγούμενο τμήμα των αποτελεσμάτων, οι καμπύλες αποκαλύπτουν αμέσως την υπεροχή του RaptorQ καθώς επιτυγχάνει σημαντικά χαμηλότερο αριθμό επαναποσταλθέντων πακέτων σε σύγκριση με τον κώδικα Raptor. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι επιδόσεις του RaptorQ είναι μόλις ένα βήμα πίσω από την απόδοση του ιδανικού κώδικα

FEC. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο συνολικός αριθμός των επαναποσταληθέντων πακέτων είναι ανεξάρτητος από το reception overhead του κάθε κώδικα και εξαρτάται μόνο από το service coverage, διότι εάν ένα UE αποτύχει να αποκωδικοποιήσει το προστατευόμενο FEC block τότε μόνο αιτείται την αναμετάδοση του ακριβή αριθμού των χαμένων πηγαίων πακέτων. Επιπλέον, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η καμπύλη του κώδικα Raptor παρουσιάζει μία αρχική καθυστέρηση μέχρι να φθάσει τη μορφή της καμπύλης του ιδανικού κώδικα FEC. Αυτό είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της συμπεριφοράς που έχει περιγραφεί προηγουμένως στην Εικόνα 7.12, αφού η αναποτελεσματικότητα του κώδικα Raptor FEC είναι πιο έντονη για χαμηλές τιμές του transmission overhead.

7.2.4 Tune-in Delay

Σε αυτή την αξιολόγηση εξετάζουμε τις επιπτώσεις της AL-FEC προστασίας στο tune-in delay μίας streaming συνόδου σε σχέση με το service coverage της υπηρεσίας MBMS όπως ορίστηκε προηγουμένως. Το tune-in delay ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ της έναρξης της λήψης πακέτων μέχρι την έναρξη της αποκωδικοποίησης των λαμβανόμενων πακέτων από κάθε πηγαίο FEC block. Το tune-in delay παρατηρείται σε έναν χρήστη ο οποίος εγγράφεται στη multicast streaming σύνοδο και το πρώτο πακέτο που λαμβάνει δεν είναι από τα αρχικά του FEC block. Κατά τη διαδικασία του tune-in ένας δέκτης συγχρονίζεται αρχικά στο τρέχον FEC block, και περιμένει για τη λήψη και την επιτυχή επεξεργασία του κάθε FEC block, πριν επιχειρήσει να αποκωδικοποιήσει τα πολυμεσικά δεδομένα. Συνεπώς, το tune-in delay υπολογίζεται συναρτήσει της FEC χρονικής περιόδου προστασίας και της καθυστέρησης αποκωδικοποίησης, και ορίζεται ως $tune-in\ delay = protection\ period + \epsilon$ [122]. Είναι προφανές ότι το tune-in delay εξαρτάται από τις παραμέτρους της FEC κωδικοποίησης και πιο συγκεκριμένα από το επιλεγμένο μήκος του πηγαίου FEC block καθώς και του εισαχθέντος AL-FEC transmission overhead. Βάσει αυτού, στην Εικόνα 7.15 παρέχουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με την εφαρμογή των δύο υπό εξέταση μελών της οικογένειας κωδίκων Raptor σε σχέση με τον ιδανικό FEC κώδικα. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναφέρονται στην προσομοίωση του μοντέλου κινητικότητας πεζών χρησιμοποιώντας μία πολυμεσική ροή RTP H.264 κωδικοποιημένη στα 128 kbps θεωρώντας την non-interleaved λειτουργία δημιουργίας πακέτων [27]. Το AL-FEC SBL έχει οριστεί σε 512 σύμβολα και το μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων κυμαίνεται μεταξύ 672 B και 845 B.

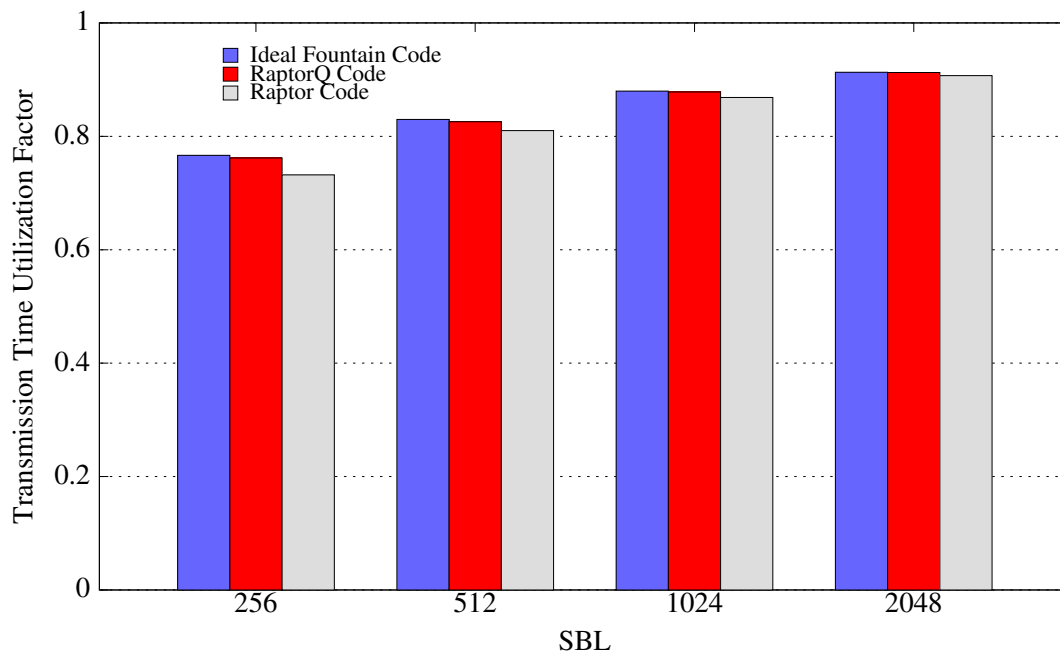


ΣΧΗΜΑ 7.15: Tune-in Delay vs. Transmission Overhead

Για ακόμα μία φορά, ο κώδικας RaptorQ μιμείται σχεδόν τέλεια την απόδοση του ιδανικού FEC κώδικα. Εξετάζοντας τις καμπύλες της γραφικής, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο RaptorQ απαιτεί σημαντικά χαμηλότερο χρόνο για τη διαδικασία του tune-in delay σε σύγκριση με τον κώδικα Raptor μέχρι το service coverage να φτάσει την τιμή του 95% περίπου. Για υψηλότερες τιμές του service coverage παρατηρούμε ότι η επιτευχθείσα μείωση του RaptorQ στο tune-in delay μειώνεται σταδιακά. Αυτή η συμπεριφορά, οφείλεται στο γεγονός ότι το AL-FEC transmission overhead έχει μία βέλτιστη ζώνη αποτελεσματικής λειτουργίας σε σχέση πάντα με τις τρέχουσες συνθήκες απώλειας πακέτων. Ως εκ τούτου, για υψηλές τιμές του service coverage, όπου και τα δύο σχήματα Raptor FEC έχουν να αντιμετωπίσουν ένα μικρό ποσοστό UEs με εξαιρετικά κακές συνθήκες λήψης, η αρκετά κοντινή απόδοση των δύο κωδίκων AL-FEC είναι αναμενόμενη, δεδομένου ότι το tune-in delay εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το transmission overhead και δεδομένου πάντα ότι το υπό εξέταση SBL παραμένει σταθερό.

7.2.5 Time Utilization

Σε αυτό το μέρος των αποτελεσμάτων προσομοίωσης διερευνούμε τις επιπτώσεις της επιλογής των FEC παραμέτρων κωδικοποίησης για την παράδοση δεδομένων σε UEs που προσομοιώνουν το μοντέλο κίνησης πεζών, εισάγοντας μία μετρική που ονομάζεται Time



ΣΧΗΜΑ 7.16: Παράγοντας Time Utilization vs. Μήκους FEC Block

Utilization. Ο παράγοντας Time Utilization κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 και ορίζει τη σπατάλη χρόνου μετάδοσης λόγω της εισαγωγής της AL-FEC προστασίας, όσον αφορά το χρονικό διάστημα που το multicast source μεταδίδει πλεονάζοντα δεδομένα σε σχέση με το χρόνο μετάδοσης πηγαιών δεδομένων. Η Εικόνα 7.16 παρουσιάζει πώς ο παράγοντας Time Utilization ποικίλλει ανάλογα με την επιλογή διαφορετικών τιμών για το SBL κατά τη διαδικασία κωδικοποίησης στοχεύοντας 85% service coverage σε μία MBMS streaming σύνοδο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιολογούν τέσσερις διαφορετικές τιμές του SBL, τις {256, 512, 1024, 2048}, για την ίδια ροή πολυμέσων RTP H.264 στα 128 kbps όπως και στην προηγούμενη παράγραφο.

Παρατηρώντας τη γραφική παράσταση της Εικόνας 7.16 μπορούμε να εξάγουμε κάποιες πολύ ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις σχετικά με τις επιπτώσεις της επιλογής του SBL για την αποδοτική μετάδοση και κατά συνέπεια, για την αποτελεσματικότητα της προστασίας που προσφέρει το κάθε σχήμα AL-FEC. Μπορούμε άμεσα να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση του SBL οδηγεί σε αξιοσημείωτη βελτίωση στην απόδοση της μετάδοσης, καθώς ο παράγοντας Time Utilization αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση του SBL. Πιο αναλυτικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το κέρδος αύξησης του SBL σε μέγεθος 2048 αποδίδει περίπου 20% υψηλότερο Time Utilization σε σύγκριση με την περίπτωση της μετάδοσης τη πολυμεσικής ροής χωρισμένης σε μικρότερα και συνεπώς περισσότερα FEC blocks, μεγέθους δηλαδή

256 συμβόλων. Η παρατηρούμενη αύξηση του Time Utilization με την αύξηση του SBL είναι άμεση απόρροια των ιδιοτήτων της AL-FEC αποκωδικοποίησης, όπως περιγράφεται και μαθηματικά από τη μοντελοποίηση της πιθανότητα αποτυχίας του κάθε κώδικα, καθώς αυξάνοντας το SBL, και κατά συνέπεια μειώνοντας την κατάρτηση των μεταδιδόμενων δεδομένων σε πολλαπλά blocks έχει σαν αποτέλεσμα την πιο αποδοτική κατανομή του εισαχθέντος πλεονασμού σε κάθε block και συνεπώς την επίτευξη χαμηλότερης πιθανότητας αποτυχίας της FEC αποκωδικοποίησης.

Αναλύοντας περαιτέρω τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της απόδοσης των κωδίκων AL-FEC για κάθε επιμέρους μέγεθος του SBL, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο αυξάνει το SBL οι διαφορές μεταξύ του Time Utilization που επιτυγχάνει κάθε σχήμα AL-FEC μειώνονται συνεχώς. Αποσαφηνίζοντας το τελευταίο, η αύξηση του αριθμού των συμβόλων του SBL μπορεί να μειώσει σημαντικά την αρνητική επίδραση που έχουν οι υψηλότερες απαιτήσεις σε reception overhead του κώδικα Raptor σε σχέση με τον κώδικα RaptorQ, όπως ομοίως συμβαίνει και στην περίπτωση σύγκρισης του κώδικα RaptorQ με τον ιδανικό fountain κώδικα.

Κεφάλαιο 8

Online AL-FEC Policy Πρόβλημα

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας, εισάγουμε ένα νέο πλαίσιο ανάπτυξης και αξιολόγησης αλγορίθμων για την εφαρμογή της προστασίας FEC σε multicast περιβάλλοντα μετάδοσης βασισμένο στους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης. Στοχεύουμε στην αποτελεσματική εφαρμογή του AL-FEC χρησιμοποιώντας το νέο κώδικα RaptorQ πάνω σε multicast περιβάλλοντα παράδοσης υπό το πλαίσιο της ανταγωνιστικής ανάλυσης. Παρέχουμε ένα μοντέλο ανάλυσης της ανταγωνιστικότητας των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης για την εφαρμογή της AL-FEC προστασίας για κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Επίσης, προτείνουμε και αναλύουμε τρεις αλγορίθμους άμεσης απόκρισης, για το πρόβλημα άμεσης απόκρισης που ορίζουμε, χρησιμοποιώντας διάφορες παραμέτρους της FEC κωδικοποίησης καθώς και βάσει των περιορισμών των κινητών δικτύων multicast μετάδοσης. Τα αποτελέσματα του παρόντος κεφαλαίου έχουν δημοσιευθεί στις εργασίες [127–130].

8.1 Το Πρόβλημα Άμεσης Απόκρισης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η προστασία AL-FEC προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για την εφαρμογή της σε multicast περιβάλλοντα, παρόλα αυτά η FEC προστασία έχει το δικό της κόστος, δεδομένου ότι η επιλογή του πλεονασμού που θα εισαχθεί δεν είναι ένα τετριμμένο θέμα. Ο multicast αποστολέας θα πρέπει να εισαγάγει αρκετό πλεονασμό στη μετάδοση, ώστε να εξασφαλίσει ότι οι πολλαπλοί παραλήπτες θα είναι σε θέση να ανακτήσουν το μεταδιδόμενο αντικείμενο ανάλογα με τις αυθαίρετες απώλειες δεδομένων που παρουσιάζει ο

καθénας. Την ίδια στιγμή, το ποσό της πλεονάζουσας πληροφορίας θα πρέπει να προσαρμοστεί αποδοτικά στις τρέχουσες συνθήκες λήψης ώστε να αποφευχθεί η σπατάλη πόρων του δικτύου. Είναι προφανές, ειδικά σε κινητά περιβάλλοντα μετάδοσης, ότι ο σχεδιασμός ενός μηχανισμού ανάδρασης από τους παραλήπτες με σκοπό τον έλεγχο των παραμέτρων της FEC κωδικοποίησης είναι περίπλοκος λόγω των ιδιαίτερων περιορισμών του multicast περιβάλλοντος μετάδοσης ή ακόμη και αδύνατος, λόγω της μεγάλης μεταβλητότητας του ασύρματου μέσου μετάδοσης. Επιπλέον, για την περίπτωση της streaming μετάδοσης δεδομένων, όπου η λήψη δεδομένων είναι στενά περιορισμένη από τον χρόνο, η χρήση των μεθόδων που βασίζονται στην αναμετάδοση των χαμένων πακέτων δεν είναι κατάλληλη. Είναι προφανές ότι μια αυθαίρετα μεγάλη ποσότητα πλεονασμού μπορεί να οδηγήσει σε σπατάλη των πόρων του δικτύου χωρίς τα αντίστοιχα αποτελέσματα προστασίας όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας ενώ, από την άλλη πλευρά, ένα μικρό ποσό πλεονασμού μπορεί να μην έχει καμία επίδραση στην προστασία από απώλειες. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την παροχή αξιόπιστης μετάδοσης σε streaming περιβάλλοντα είναι η εισαγωγή αρκετού πλεονασμού (δηλαδή, του AL-FEC transmission overhead), έτσι ώστε κάθε πακέτο να μεταδίδεται μόνο μία φορά. Κατά συνέπεια, ο multicast αποστολέας θα πρέπει να αποφασίσει την πλέον κατάλληλη ποσότητα πλεονασμού που θα εισάγει, έτσι ώστε να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις διαφορετικές απώλειες πακέτων που καταγράφονται σε κάθε χρήστη. Επιπλέον, ο αποστολέας θα πρέπει να αποφασίσει σχετικά με το ποσό της προστασίας που θα πρέπει να εισάγει σε κάθε κωδικοποιημένο AL-FEC block άμεσα κατά την κατασκευή του, χωρίς προηγούμενη γνώση σχετικά με τις συνθήκες απώλειας πακέτων που έχει να αντιμετωπίσει. Με βάση αυτό, ο σχεδιασμός ενός αλγορίθμου ο οποίος θα επιλέγει τον πλεονασμό που θα εισάγει η AL-FEC προστασία στη multicast μετάδοση μπορεί να αναχθεί σε ένα πρόβλημα άμεσης απόκρισης. Γενικά, οι αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης υποθέτουν ότι η πλήρης γνώση του συνόλου της εισόδου δεν είναι διαθέσιμη εκ των προτέρων αλλά η είσοδος αποκαλύπτετε σε τμήματα, με έναν αλγόριθμο άμεσης απόκρισης να ανταποκρίνεται σε κάθε νέα άφιξη της εισόδου. Έτσι, καθώς και ο multicast αποστολέας δεν γνωρίζει εκ των προτέρων όλη την πληροφορία που θα πρέπει να προστατέψει με την AL-FEC κωδικοποίηση, με τον κωδικοποιητή να πρέπει ουσιαστικά να παίρνει απόφαση με την παροχή κάθε πακέτου προς αυτόν και χωρίς καμία γνώση των συνθηκών που επικρατούν στο δίκτυο, η εφαρμογή της αποδοτικής AL-FEC προστασίας μπορεί να αντιμετωπιστεί με αλγορίθμους άμεσης απόκρισης.

Βάσει των παραπάνω, προτείνουμε τρεις αλγορίθμους άμεσης απόκρισης για το πρόβλημα

που ορίζουμε αναλυτικά στη συνέχεια με στόχο την αποτελεσματική εφαρμογή του AL-FEC. Ο πρώτος αλγόριθμος είναι ένας απλοϊκός πιθανοτικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης για την αποτελεσματική παράδοση δεδομένων σε multicast download υπηρεσίες. Επίσης προτείνουμε έναν ντετερμινιστικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης για τη multicast streaming υπηρεσία παράδοσης. Και οι δύο αυτοί αλγόριθμοι εφαρμογής της AL-FEC προστασίας είναι σε θέση να παρέχουν αξιόπιστη παράδοση δεδομένων απαλλαγμένη από την ανάγκη παροχής ανάδρασης από τους πολλαπλούς παραλήπτες, καθώς δεν απαιτούν καμία γνώση σχετικά με τις συνθήκες του δικτύου. Τέλος, προτείνουμε έναν δεύτερο ντετερμινιστικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης ο οποίος επεκτείνει τον πρώτο ντετερμινιστικό αλγόριθμο εκμεταλλευόμενος έναν ήδη υπάρχοντα μηχανισμό παροχής ανάδρασης της υπηρεσίας MBMS.

Συνολικά, στο παρόν κεφάλαιο εισάγουμε και ορίζουμε το ανταγωνιστικό πλαίσιο υπό το οποίο μπορούν να σχεδιαστούν και αναλυθούν αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης για την εφαρμογή του AL-FEC. Επιπλέον, προτείνουμε τρεις αλγορίθμους άμεσης απόκρισης για το ανταγωνιστικό πρόβλημα που εισάγουμε και προσφέρουμε μία ανάλυση της απόδοσής τους.

8.2 Το AL-FEC Policy Πρόβλημα

Σε αυτή την ενότητα περιγράφουμε και ορίζουμε το πρόβλημα άμεσης απόκρισης το οποίο ονομάσαμε online AL-FEC policy problem. Επίσης περιγράφουμε το μοντέλο δικτύου που χρησιμοποιείται βάσει του οποίου σχεδιάζουμε τους προτεινόμενους αλγορίθμους άμεσης απόκρισης. Επιπλέον, περιγράφουμε το βέλτιστο offline αλγόριθμο για το πρόβλημα αυτό παρουσιάζοντας την ανταγωνιστική ανάλυση για το κόστος μετάδοσης.

Ορίζοντας το online AL-FEC policy πρόβλημα, η multicast πηγή παίρνει ως είσοδο μία ακολουθία πακέτων καθώς και διάφορες παραμέτρους FEC κωδικοποίησης και παράγει ως έξοδο τα FEC κωδικοποιημένα σύμβολα σχηματισμένα σε FEC blocks. Η multicast πηγή πρέπει να αποφασίσει για το ποσό του AL-FEC πλεονασμού που θα εισάγει στη μετάδοση, χωρίς να έχει καμία γνώση της απώλειας πακέτων που επικρατεί στο δίκτυο. Το μοντέλο του δικτύου που χρησιμοποιούμε αναφέρεται σε ένα τυπικό multicast ασύρματο περιβάλλον μετάδοσης. Μία multicast πηγή μεταδίδει τα ίδια δεδομένα σε ένα σύνολο χρηστών που συμμετέχουν στην multicast σύνοδο μέσω ενός αναξιόπιστου ασύρματου καναλιού. Τα μεταδιδόμενα δεδομένα, θεωρούμε πως είναι ένα συνεχές αντικείμενο, το οποίο ενθυλακώνεται σε μία UDP/IP ροή.

Για τον AL-FEC μηχανισμό προστασίας, θεωρούμε την εφαρμογή του νέου κώδικα RaptorQ FEC. Ο multicast αποστολέας εισάγει την πλεονάζουσα πληροφορία μεταξύ των πηγαίων δεδομένων, προκειμένου να καταστεί δυνατό στους multicast αποδέκτες να αντιμετωπίσουν τις ανεξάρτητες απώλειες πακέτων και να ανακατασκευάσουν τα μεταδιδόμενα δεδομένα με επιτυχία. Σχετικά με την κωδικοποίηση AL-FEC, το μεταδιδόμενο αντικείμενο κατακερματίζεται σε ένα ή περισσότερα blocks. Κάθε FEC block αποτελείται από k πηγαία σύμβολα, με το k , να εξαρτάται από την επιλογή των παραμέτρων κωδικοποίησης. Το μέγεθος του κάθε FEC block συμβολίζεται ως sbl . Με την κωδικοποίηση του RaptorQ, για κάθε FEC block, παράγεται ένα ορισμένο ποσό πλεοναζόντων συμβόλων, που ονομάζονται επίσης σύμβολα επισκευής, σύμφωνα με την επιθυμητή ποσότητα προστασίας που εισάγει ο multicast αποστολέας. Ένα μοναδικό αναγνωριστικό ID ανατίθεται σε κάθε προκύπτον κωδικοποιημένο σύμβολο, το οποίο μπορεί να είναι ένα πηγαίο ή ένα σύμβολο επισκευής, προκειμένου να προσδιορίσει τον τύπο του συμβόλου σύμφωνα με την αποδιδόμενη τιμή. Στην πλευρά του αποδέκτη, μετά τη λήψη των δεδομένων κάθε multicast χρήστης εκτελεί την AL-FEC αποκωδικοποίηση για να ανακτήσει τα πηγαία FEC blocks. Ένας multicast παραλήπτης είναι σε θέση να καθορίσει, για κάθε FEC block, ποια πηγαία σύμβολα θα έπρεπε να έχουν ληφθεί αλλά δεν έχουν, και επίσης είναι σε θέση να προσδιορίσει τον αριθμό των κωδικοποιημένων συμβόλων που έχει λάβει.

Στο μοντέλο του δικτύου υποθέτουμε τη μετάδοση μίας ακολουθίας πακέτων εφαρμόζοντας ανεξάρτητες μάσκες απώλειας πακέτων βάσει αρχείων προσομοίωσης απωλειών multicast κινητών δικτύων σε κάθε multicast αποδέκτη σύμφωνα με τον υπό εξέταση κάθε φορά ρυθμό απώλειας πακέτων του δικτύου. Σχετικά με την μεταδιδόμενη ακολουθία πακέτων, κάθε πακέτο χαρακτηρίζεται μοναδικά από την τριάδα $\{uid, SBN, (r_i, l)\}$ όπου:

- uid : είναι ένα μοναδικό αναγνωριστικό που προσδιορίζει κάθε AL-FEC πακέτο σε κάθε FEC block
- sbn : είναι ο αριθμός του FEC block που ανήκει το συγκεκριμένο πακέτο
- (r_i, l) : ορίζει εάν το συγκεκριμένο πακέτο έχει χαθεί στο δέκτη i με την boolean τιμή l να είναι 0, εάν το πακέτο έχει χαθεί

Το πρότυπο απώλειας πακέτων που εφαρμόζεται στην αλληλουχία των μεταδιδόμενων πακέτων συμβολίζεται ως p , που αντιστοιχεί στο μέσο ποσοστό απώλειας πακέτων του δικτύου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1: Παράδειγμα Απώλειας Πακέτων σε Multicast Χρήστες

User 1	(1,0)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,1)	(1,0)	(1,0)
User 2	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)
User 3	(3,1)	(3,0)	(3,1)	(3,1)	(3,0)	(3,0)	(3,0)	(3,1)	(3,1)	(3,0)
User 4	(4,1)	(4,1)	(4,1)	(4,1)	(4,1)	(4,1)	(4,0)	(4,1)	(4,1)	(4,1)
User 5	(5,1)	(5,1)	(5,1)	(5,0)	(5,1)	(5,1)	(5,1)	(5,1)	(5,1)	(5,1)

Η μεταβλητή p παίρνει τιμές στο εύρος $[0, 1]$. Σε κάθε multicast αποδέκτη, μία μάσκα απώλειας πακέτων εφαρμόζεται ανεξάρτητα με βάση την τιμή του p . Επιπλέον, οι απώλειες πακέτων κατανομούνται τυχαία στους διάφορους multicast αποδέκτες. Ο Πίνακας 8.1 απεικονίζει ένα παράδειγμα της ακολουθίας απωλειών που εφαρμόζεται σε ένα σύνολο από multicast χρήστες. Αναλυτικότερα, ο Πίνακας 8.1 παρουσιάζει την επιτυχημένη ή όχι λήψη 10 μεταδιδόμενων πακέτων σε 5 multicast παραλήπτες με την τιμή του p να είναι 0.2 σύμφωνα με τις παραδοχές του μοντέλου του δικτύου που παρουσιάσαμε. Κάθε γραμμή του πίνακα, αναφέρεται σε ένα χρήστη που συμμετέχει στη multicast παράδοση και κάθε στήλη σε ένα πακέτο που μεταδίδεται. Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στην έκβαση της λήψης κάθε πακέτου σύμφωνα με την τιμή του (r_i, l) όπως περιγράφεται παραπάνω. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι η μάσκα απώλειας πακέτων είναι τυχαία κατανομημένη στο σύνολο του μεταδιδόμενου αντικειμένου και πως κάθε μεταδιδόμενο πακέτο περιέχει ένα AL-FEC σύμβολο σταθερού μήκους.

Σε κάθε multicast αποδέκτη η AL-FEC αποκωδικοποίηση μοντελοποιείται σύμφωνα με την πιθανότητα αποτυχίας αποκωδικοποίησης όπως περιγράφεται στο (3.4), προκειμένου να υπολογιστεί εάν το εξεταζόμενο AL-FEC block μπορεί να ανακατασκευαστεί με επιτυχία ή όχι. Για τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης, υποθέτουμε ότι ένα επαρκές κατώφλι για την πιθανότητα αποτυχίας ενός ανακτηθέντος πηγαίου block είναι 10^{-2} ή μικρότερη, όπως προτείνεται στο [121].

8.2.1 Ο Offline Βέλτιστος Αλγόριθμος

Όσον αφορά το βέλτιστο offline αλγόριθμο του προβλήματος, υποθέτουμε ότι ένας multicast αποστολέας, ο οποίος έχει εκ των προτέρων γνώση της απώλειας πακέτων του δικτύου, θα εισάγει ένα συγκεκριμένο, βέλτιστο αριθμό πλεοναζόντων συμβόλων. Το εξεταζόμενο online AL-FEC policy πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα άμεσης απόκρισης ελαχιστοποίησης κόστους. Με βάση αυτό, η βέλτιστη πολιτική υπό το πρίσμα του κόστους μετάδοσης δεν

είναι η εισαγωγή ενός τεράστιου ποσού πλεονασμού με σκοπό να καταστεί δυνατή η επιτυχής ανάκτηση του μεταδιδόμενου αντικειμένου ακόμα και από το χρήστη/χρήστες με τον υψηλότερο ρυθμό απώλειας πακέτων που συμμετέχουν στη multicast σύνοδο. Συνεπώς, ο βέλτιστος αλγόριθμος θα πρέπει να εισάγει τον ελάχιστο αριθμό από απαιτούμενα πλεονάζοντα σύμβολα, έτσι ώστε να αντιμετωπίσει τη μέση τιμή του ρυθμού απώλειας πακέτων του δικτύου, με στόχο να ικανοποιήσει όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες. Το σύστημα που μπορεί να εξασφαλίσει τη βέλτιστη επιλογή του transmission overhead περιγράφεται από μία multicast πηγή που επιλέγει το ποσό του πλεονασμού που θα εισάγει σε μία τιμή κοντά στο μέσο ποσοστό απώλειας πακέτων του δικτύου. Στην παρούσα ανάλυση, ο multicast αποστολέας μπορεί να εκμεταλλευτεί το σχεδόν μηδενικό reception overhead του κώδικα RaptorQ, καθώς όπως περιγράφεται στη σχέση (3.4), ο RaptorQ μπορεί να επιτύχει το καθορισμένο κατώφλι πιθανότητας αποτυχίας απαιτώντας τη λήψη καθόλου επιπρόσθετων συμβόλων από τον αριθμό των πηγαίων μεταδιδόμενων συμβόλων. Συνεπώς, η βέλτιστη πολιτική επιλογής του AL-FEC μπορεί να εισάγει τόσα σύμβολα επισκευής, όσα και ο μέσος αριθμός των χαμένων συμβόλων που καταγράφεται στους multicast χρήστες. Με βάση αυτό, ο αριθμός των συμβόλων επισκευής r που ο βέλτιστος offline αλγόριθμος θα εισάγει σε κάθε FEC block μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: $r \geq (sbl + r) \cdot p$.

Κατά συνέπεια, το κόστος του βέλτιστου offline αλγορίθμου για κάθε πηγαίο block, που ορίζεται ως: $OPT = sbl + r$ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (8.1):

$$OPT = \frac{sbl}{1 - p} \quad (8.1)$$

8.3 Αλγόριθμοι Άμεσης Απόκρισης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τους τρεις αλγορίθμους άμεσης απόκρισης που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για το online AL-FEC policy πρόβλημα που παρουσιάσαμε προηγουμένως και επίσης παρέχουμε την ανταγωνιστική ανάλυση του κάθε αλγορίθμου καθώς και προσομοιώσεις σχετικά με την απόδοσή του. Αρχικά εισάγουμε έναν απλοϊκό πιθανοτικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε έναν ντετερμινιστικό προσαρμοστικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης ο οποίος θα ήταν ιδιαίτερα αποδοτικός στους ιδιαίτερους περιορισμούς της multicast streaming μετάδοσης και

τέλος παρουσιάζουμε μία εξελεγμένη παραλλαγή αυτού του ντετερμινιστικού αλγορίθμου ο οποίος εκμεταλλεύεται ένα μηχανισμό παροχής ανάδρασης της υπηρεσίας MBMS.

8.3.1 Πιθανοτικός Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης

Σε αυτό το τμήμα παρουσιάζουμε έναν πιθανοτικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης για την πολιτική επιλογής του εισαχθέντος AL-FEC πλεονασμού σε μία multicast μετάδοση. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος 1 επεξεργάζεται μια ακολουθία πακέτων σ σύμφωνα με την επιλεγμένη τιμή του sbl , επιλέγοντας ισοπίθانا μια τιμή i όταν σχηματίζεται κάθε FEC block. Η τιμή του i υποδηλώνει το transmission overhead που θα εισαχθεί στη μετάδοση, και παίρνει τιμές στο εύρος $[0.05, 0.5]$ με βήμα 0.01. Στο τελευταίο σύμβολο του κάθε block ο αλγόριθμος κάνει μία τυχαία επιλογή για την ποσότητα των πλεοναζόντων πακέτων που ο AL-FEC κωδικοποιητής θα παράξει για το συγκεκριμένο block. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος εφαρμόζει μία τυχαία κατανομή του εισαχθέντος πλεονασμού σε όλα τα block στα οποία κατακερματίζεται το μεταδιδόμενο αντικείμενο.

Algorithm 1 Πιθανοτικός AL-FEC Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης

```

1: procedure ( $pkt, sbl$ )
2:   if  $pkt.uid \bmod sbl = 0$  then    ▷ check if the processed packet is the last of the
      block
3:     select equiprobably a value  $i$  from the set  $\{0.05 : 0.01 : 0.5\}$  ▷ randomly select
      the introduced overhead for each source block
4:      $transmission\ overhead \leftarrow \lceil sbl * i \rceil$     ▷ assign the selected overhead to the
      current source block
5:   end if
6: end procedure

```

Ο πιθανοτικός αλγόριθμος απαιτεί ουσιαστικά σαν είσοδο μόνο το uid του τρέχοντος πακέτου και το επιλεγμένο μήκος του κάθε AL-FEC πηγαίου block. Με βάση την τιμή αυτών των δύο παραμέτρων, ο αλγόριθμος είναι σε θέση να κατανέμει τα πακέτα σε blocks ώστε στη συνέχεια να καθορίσει το ποσό της προστασίας που θα εισαχθεί σε κάθε block που σχηματίζεται σύμφωνα με την τυχαία διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω.

8.3.1.1 Ο Λόγος Απόδοσης του Πιθανοτικού Αλγορίθμου

Το κόστος του πιθανοτικού αλγορίθμου 1 άμεσης απόκρισης μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση (8.2), δεδομένου ότι ο αριθμός των μεταδιδόμενων πακέτων είναι $sbl + sbl \cdot i$ ανά FEC block:

$$ALG_1 = sbl \cdot (1 + E(I)) \quad (8.2)$$

όπου το $E(I)$ δηλώνει τη μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής I .

Δεδομένου ότι το online AL-FEC policy πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους, ο λόγος απόδοσης c_1 του πιθανοτικού αλγορίθμου 1 μπορεί να οριστεί ως η ελάχιστη τιμή του c για την οποία ισχύει:

$$E[ALG_1(\sigma)] - c_1 \cdot OPT(\sigma) \leq \alpha \quad (8.3)$$

Συνεπώς, καθώς ο ορισμός του online AL-FEC policy προβλήματος μας επιτρέπει να θέσουμε την τιμή της ποσότητας α ίση με 0, ο λόγος απόδοσης c_1 του αλγορίθμου 1 μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (8.3), ως:

$$c_1 = \max \frac{ALG_1}{OPT}$$

Συνεπώς, καθώς η μέση τιμή $E(I)$ της τυχαίας μεταβλητής I είναι 0.275, ο λόγος απόδοσης του αλγορίθμου 1 είναι:

$$c_1 = 1.275 \cdot (1 - p)$$

Είναι προφανές πως η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου 1 εξαρτάται από την τιμή του ρυθμού απώλειας πακέτων p που ο αντίπαλος θα εισάγει κατά την ανταγωνιστική ανάλυση. Ωστόσο, ο στόχος μας εδώ δεν είναι η ανάλυση χειρότερης περίπτωσης του λόγου απόδοσης, αλλά η διερεύνηση της απόδοσης του πιθανοτικού αλγορίθμου σε τυπικά σενάρια απώλειας πακέτων στο δίκτυο.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να επισημάνουμε ότι ο βέλτιστος αλγόριθμος έχει πρότερη γνώση των συνθηκών απώλειας πακέτων των multicast χρηστών σε αντίθεση με τον αλγόριθμο άμεσης απόκρισης που δεν γνωρίζει ή δεν μπορεί να προβλέψει το αποτέλεσμα των μεταδιδόμενων πακέτων. Έτσι αρχικά μπορούμε να πούμε πως μία a priori αυθαίρετη επιλογή του εισαχθέντος πλεονασμού σε ένα λογικό εύρος τιμών αποτελεί μία απλοϊκή αλλά εφαρμόσιμη λύση.

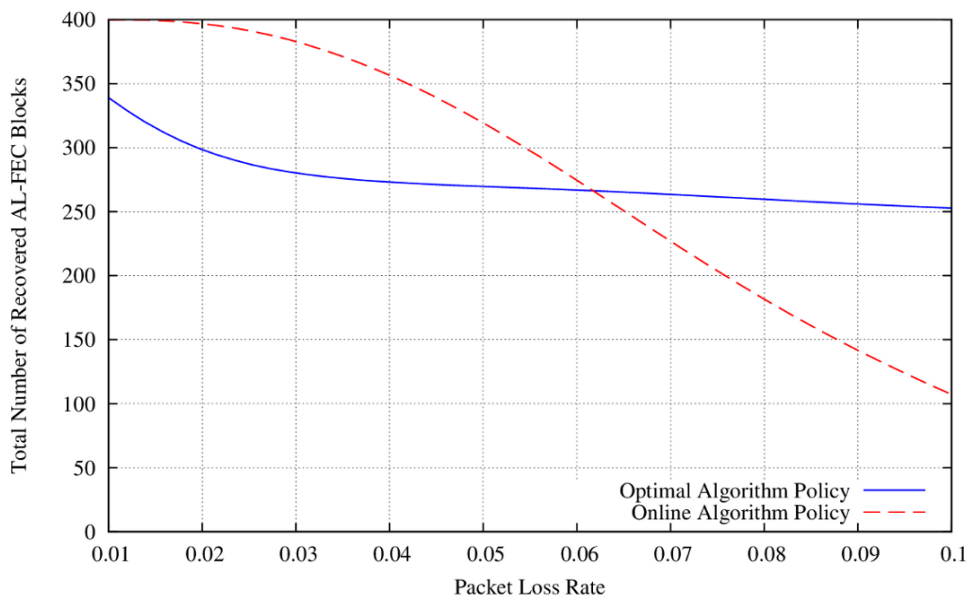
Όσον αφορά την πολυπλοκότητα του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγορίθμου, ο αλγόριθμος επεξεργάζεται μία ακολουθία πακέτων σχηματίζοντας FEC blocks μεγέθους sbl . Για κάθε επεξεργασμένο πακέτο, ο αλγόριθμος παραγματοποιεί κάποιους απλοϊκούς υπολογισμούς κόστους $O(1)$. Ως εκ τούτου, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου για ένα FEC block μεγέθους sbl είναι $O(sbl)$.

8.3.1.2 Αξιολόγηση της Απόδοσης του Πιθανοτικού Αλγορίθμου

Η παρούσα υποενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του πιθανοτικού αλγορίθμου 1 άμεσης απόκρισης σε σύγκριση με την απόδοση του offline βέλτιστου αλγορίθμου. Για τη διεξαγωγή της αξιολόγησης προσομοιώσαμε 100 multicast χρήστες με το μέσο ποσοστό απώλειας πακέτων στο δίκτυο να κυμαίνεται μεταξύ 1% και 10%.

8.3.1.2.1 Ανακτηθέντα AL-FEC Πηγαία Blocks Η παράγραφος αυτή παρουσιάζει αποτελέσματα προσομοίωσης για το ποσό των επιτυχώς αποκωδικοποιηθέντων AL-FEC blocks σε όλους τους multicast χρήστες. Η Εικόνα 8.1 παρουσιάζει το συνολικό αριθμό των ανακτηθέντων blocks σε σχέση με το ρυθμό απώλειας πακέτων του δικτύου. Για την αξιολόγηση αυτή προσομοιώνουμε τη μετάδοση 4 AL-FEC blocks μεγέθους 128 συμβόλων το καθένα.

Παρατηρώντας τη γραφική παράσταση της Εικόνας 8.1 μπορούμε να σημειώσουμε ότι η απόδοση του πιθανοτικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης εξαρτάται μόνο από τις συνθήκες απώλειας πακέτων που έχει να αντιμετωπίσει. Για χαμηλές τιμές του ρυθμού απώλειας πακέτων ο αλγόριθμος άμεσης απόκρισης μπορεί να λειτουργήσει αρκετά αποδοτικά, ενώ όσο ο ρυθμός απώλειας πακέτων αυξάνει όλο και περισσότεροι χρήστες αδυνατούν να ανακτήσουν τα μεταδιδόμενα blocks. Ο offline βέλτιστος αλγόριθμος παρουσιάζει μία πολύ πιο σταθερή απόδοση πετυχαίνοντας συνεχώς έναν πολυ ικανοποιητικό αριθμό από επιτυχώς αποκωδικοποιημένα blocks σε ολόκληρο το εύρος του ρυθμού απώλειας πακέτων. Η

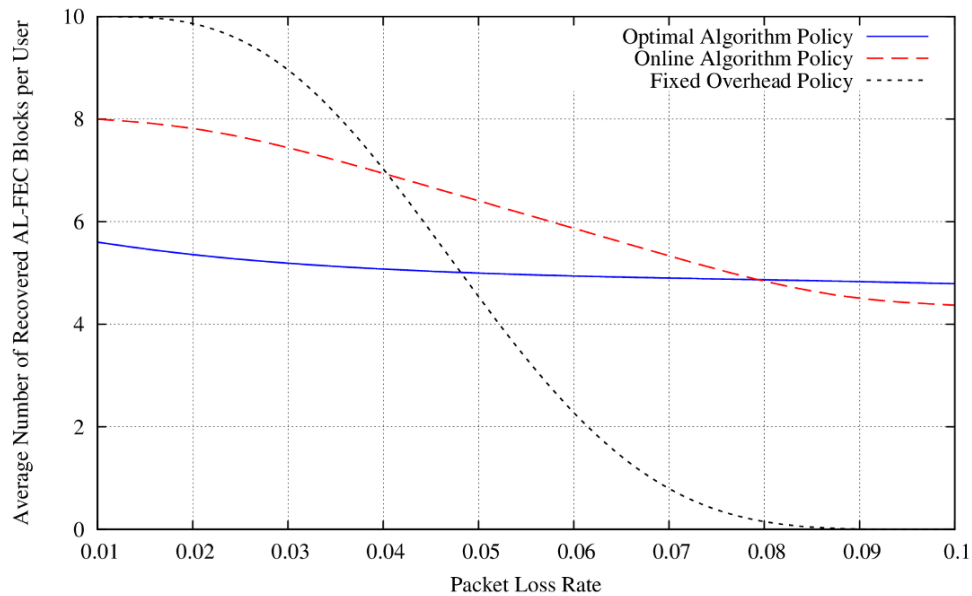


ΣΧΗΜΑ 8.1: Συνολικός Αριθμός Ανακτηθέντων FEC Blocks vs. Ρυθμού Απώλειας Πακέτων

σταθερή συμπεριφορά του βέλτιστου αλγόριθμου είναι αναμενόμενη ως άμεση συνέπεια της πολιτικής που ακολουθεί για την επιλογή του πλεονασμού που εισάγει.

Η μορφή της καμπύλης του πιθανοτικού αλγορίθμου δικαιολογείται από το εύρος των τιμών της τυχαίας μεταβλητής που ορίζει το AL-FEC transmission overhead. Ωστόσο, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο αλγόριθμος μπορεί να αντιμετωπίσει αρκετά ικανοποιητικά ένα μεγάλο εύρος τιμών του ρυθμού απώλειας πακέτων, ενώ μια πολιτική σταθερής επιλογής του transmission overhead θα μπορούσε να λειτουργήσει αποδοτικά μόνο κάτω από πολύ πιο συγκεκριμένες τιμές του ποσοστού απώλειας πακέτων και θα οδηγούσε σε πολύ μεγαλύτερη σπατάλη των πόρων του δικτύου σε σχέση με τον απλοϊκό πιθανοτικό αλγόριθμο.

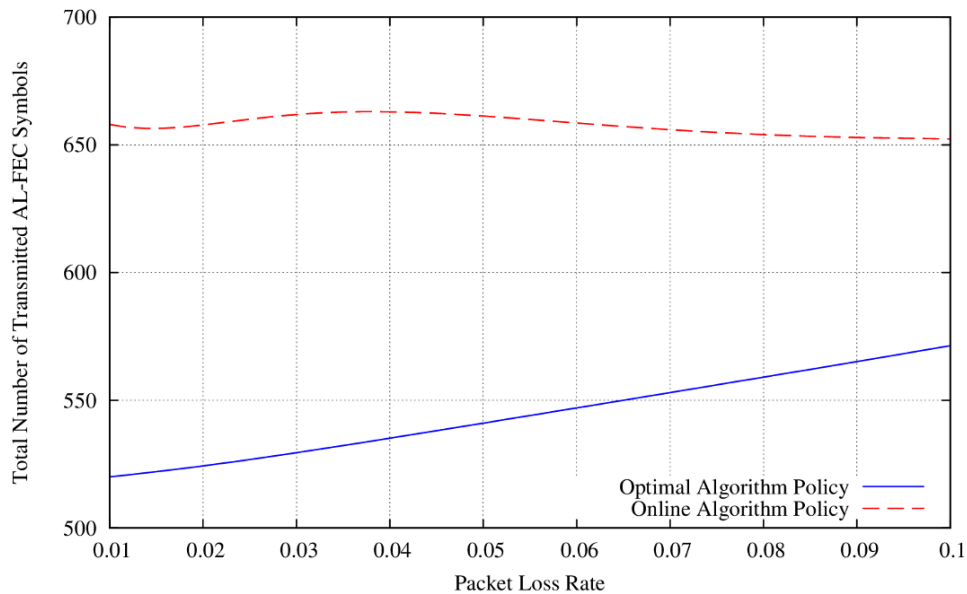
Για να αποσαφηνίσουμε περαιτέρω τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης σε σύγκριση με μία πολιτική σταθερής επιλογής του AL-FEC transmission overhead, στην Εικόνα 8.2 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα προσομοίωσης αξιολογώντας το μέσο αριθμό των επιτυχώς ανακτηθέντων AL-FEC blocks ανά χρήση. Προσομοιώνουμε τη μετάδοση ενός αντικειμένου κατακερματισμένου σε 10 blocks με μέγεθος 128 σύμβολα το καθένα, συγκρίνοντας την απόδοση του πιθανοτικού αλγορίθμου σε σχέση με την εισαγωγή σταθερού transmission overhead ίσο με 5%.



ΣΧΗΜΑ 8.2: Μέσος Αριθμός Ανακτηθέντων FEC Blocks ανά Χρήστη vs. Ρυθμού Απώλειας Πακέτων

Η μορφή των καμπυλών της Εικόνας 8.2 αποκαλύπτει άμεσα τα πλεονεκτήματα που προσφέρονται από την τυχαία κατανομή του AL-FEC πλεονασμού από τον πιθανοτικό αλγόριθμο σε σχέση με την εφαρμογή σταθερού ποσού πλεονασμού. Μπορούμε να παρατηρήσουμε πως η εισαγωγή 5% σταθερού transmission overhead μπορεί να παρέχει επαρκή προστασία μόνο σε ένα μικρό φάσμα του ρυθμού απώλειας πακέτων, αφού για τιμές μεγαλύτερες από 6% επιτυγχάνει επιτυχής αποκωδικοποίηση μόλις 1 block κατά μέσο όρο από τα 10 που μεταδίδονται συνολικά.

Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, δεδομένου ότι η εισαγωγή σταθερού πλεονασμού σημαίνει πως η AL-FEC προστασία μπορεί να είναι αποτελεσματική μόνο για τις τιμές του ρυθμού απώλειας πακέτων κοντά στην τιμή του σταθερού transmission overhead. Για ρυθμούς απώλειας πακέτων μικρότερους από το transmission overhead, η σταθερή πολιτική μπορεί πράγματι να πετύχει μία πολύ ανθεκτική μετάδοση σε λάθη, αλλά σίγουρα με ταυτόχρονη τεράστια σπατάλη πόρων του δικτύου. Ταυτόχρονα, είναι προφανές ότι το σταθερό transmission overhead δεν είναι ικανό να αντιμετωπίσει υψηλότερες τιμές του ρυθμού απώλειας πακέτων. Από την άλλη πλευρά, ο πιθανοτικός αλγόριθμος φαίνεται πως μπορεί να λειτουργήσει αρκετά καλά κάτω από ένα ευρύτερο φάσμα του ρυθμού απώλειας πακέτων επιτυγχάνοντας πιο αποτελεσματική προστασία για μεγαλύτερο εύρος τιμών και, θα μπορούσαμε να πούμε, την παροχή μιας πιο σταθερής απόδοσης στην προστασία που προσφέρει



ΣΧΗΜΑ 8.3: Μεταδιδόμενα Σύμβολα vs. Ρυθμού Απώλειας Πακέτων

το AL-FEC.

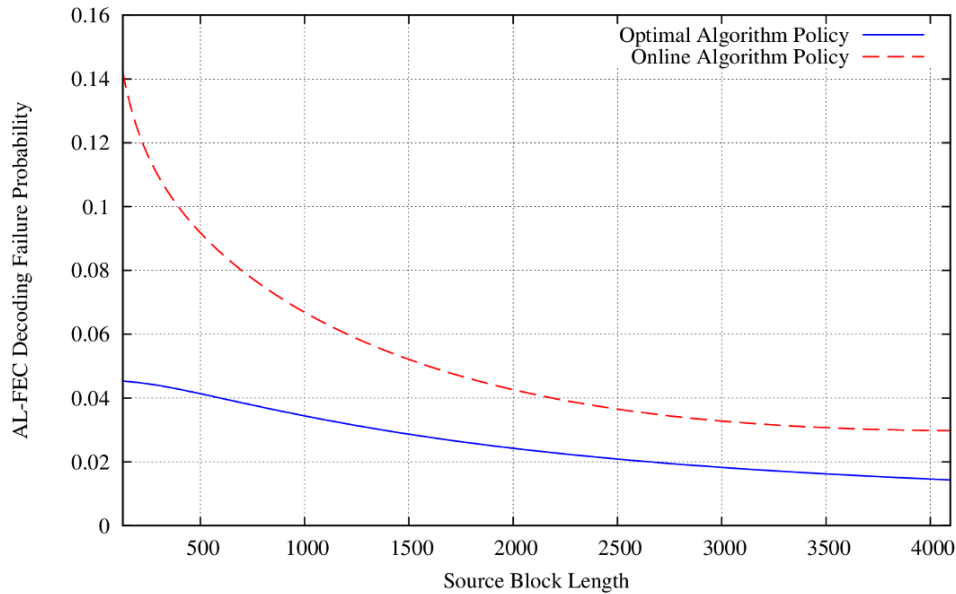
8.3.1.2.2 Συνολικό Πλήθος Μεταδοθέντων Πακέτων Στην παράγραφο αυτή αξιολογούμε το συνολικό αριθμό των μεταδιδόμενων AL-FEC συμβόλων, συμπεριλαμβανομένων των συμβόλων επισκευής, που ο πιθανοτικός αλγόριθμος εισάγει στη multicast μετάδοση, συγκρινόμενος με τον offline βέλτιστο αλγόριθμο. Η Εικόνα 8.3 παρουσιάζει το συνολικό αριθμό των παραγόμενων AL-FEC συμβόλων για τους δύο αλγόριθμους για διάφορες τιμές του ρυθμού απώλειας πακέτων του δικτύου. Το μεταδιδόμενο αντικείμενο σχηματίζεται, όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, από 4 blocks των 128 συμβόλων το καθένα.

Η γραφική παράσταση της Εικόνας 8.3 αντανακλά άμεσα την πολιτική επιλογής του transmission overhead από το βέλτιστο offline αλγόριθμο. Για το βέλτιστο αλγόριθμο ο αριθμός των μεταδιδόμενων συμβόλων, συμπεριλαμβανομένων και του ποσού των πλεοναζόντων, αυξάνει με την αύξηση του μέσου ποσοστού απώλειας πακέτων του δικτύου. Η αύξηση αυτή είναι άμεση απόρροια από τη βέλτιστη πολιτική επιλογής του πλεονασμού που περιγράψαμε προηγουμένως, δεδομένου πάντα, πως ο βέλτιστος αλγόριθμος εκμεταλλεύεται τη γνώση του σχετικά με τις τρέχουσες συνθήκες απώλειας πακέτων και προσαρμόζει ανάλογα τον πλεονασμό που εισάγει.

Από την άλλη πλευρά, παρατηρούμε ότι ο πιθανοτικός αλγόριθμος εισάγει σχεδόν σταθερό ποσό πλεοναζόντων AL-FEC συμβόλων και προφανώς πάντα περισσότερα από το βέλτιστο αλγόριθμο. Ωστόσο, το γεγονός κατά μέσο όρο ο πιθανοτικός αλγόριθμος μεταδίδει ένα σχεδόν σταθερό αριθμό πλεοναζόντων συμβόλων δεν σημαίνει ότι λειτουργεί όπως ένας αλγόριθμος που θα εισήγαγε ένα σταθερό transmission overhead. Στην πραγματικότητα, εξετάζοντας διάφορα στιγμιότυπα της εφαρμογής του πιθανοτικού αλγορίθμου, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο αλγόριθμος εισάγει πολύ διαφορετικές τιμές transmission overhead, με την προσδοκία απλώς να μαντέψει κοντά στην τιμή του μέσου ρυθμού απώλειας πακέτων. Αυτό είναι πράγματι ο στόχος του πιθανοτικού αλγορίθμου αφού χωρίς καμία γνώση για τις συνθήκες λήψης του δικτύου και με την τιμή του *sbl* σταθερή, η πιο απλή πιθανοτική λύση είναι η προσπάθεια να επιτύχει μία επαρκή απόδοση εφαρμόζοντας μία τυχαία κατανομή του transmission overhead στα διαφορετικά AL-FEC blocks.

8.3.1.2.3 Πιθανότητα Αποτυχίας της AL-FEC Αποκωδικοποίησης Σε αυτό το μέρος των αποτελεσμάτων προσομοίωσης εξετάζουμε τον αντίκτυπο της αύξησης του *sbl* στην πιθανότητα αποτυχίας της AL-FEC αποκωδικοποίησης. Για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης μεταδίδουμε 4 πηγαία blocks μεγέθους {128, 256, 512, 1024, 2048, 4096}, με το μέσο ρυθμό απώλειας πακέτων του δικτύου να είναι 8%. Η Εικόνα 8.4 παρουσιάζει πως μεταβάλλεται η πιθανότητα αποτυχίας της αποκωδικοποίησης για τον πιθανοτικό και το βέλτιστο αλγόριθμο, προσομοιώνοντας τη μετάδοση ενός αντικειμένου σταθερού μεγέθους που κατακεραματίζεται σε blocks ανάλογα με τις τιμές του *sbl* της αξιολόγησης.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.4 μπορούμε να εξάγουμε κάποιες πολύ ενδιαφέρουσες διαπιστώσεις. Είναι άμεσα προφανές ότι και οι δύο αλγόριθμοι επιτυγχάνουν βελτιωμένη απόδοση με την αύξηση του αριθμού των AL-FEC συμβόλων που προστατεύονται μαζί σε ένα block. Ωστόσο, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση του επιλεγμένου *sbl* ωφελεί περισσότερο την απόδοση του πιθανοτικού αλγορίθμου σε σχέση με το βέλτιστο offline αλγόριθμο. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αύξηση του *sbl* από 128 σε 2048 σύμβολα οδηγεί σε σημαντική μείωση την πιθανότητα αποτυχίας της AL-FEC αποκωδικοποίησης του αλγορίθμου άμεσης απόκρισης από 0.14 σε περίπου 0.03. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί από την εφαρμοζόμενη τυχαία εξάπλωση της προστασίας σε κάθε πηγαίο AL-FEC block, η οποία ενισχύεται από τον κατακεραματισμό του μεταδιδόμενου αντικειμένου σε λιγότερα και μεγαλύτερα σε μέγεθος AL-FEC blocks όταν αυξάνει το *sbl*.



ΣΧΗΜΑ 8.4: Πιθανότητα Αποτυχίας AL-FEC Αποκωδικοποίησης vs. Μήκους Πηγαιού Block

8.3.2 Weighted Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε έναν προσαρμοστικό ντετερμινιστικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης για την επιλογή του εισαχθέντος AL-FEC transmission overhead για multicast περιβάλλοντα μετάδοσης, ο οποίος θα μπορούσε να θεωρηθεί καταλληλότερος για εφαρμογή σε streaming υπηρεσίες. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος 2 βασίζεται στην ανάθεση βαρών σε κάθε AL-FEC πακέτο που επεξεργάζεται. ο αλγόριθμος παίρνει ως είσοδο κάθε προς επεξεργασία πακέτο και αποδίδει ένα βάρος στο πακέτο αυτό σύμφωνα με το μοναδικό αναγνωριστικό του. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος προσδιορίζει εάν το πακέτο θα πρέπει να συμπεριληφθεί στον υπολογισμού του πλεονασμού που θα εισαχθεί για το συγκεκριμένο AL-FEC block συγκρίνοντας το βάρος που του έχει ανατεθεί με ένα επιλεγμένο κατώφλι t . Η τιμή του t καθορίζει την απαιτούμενη προστασία που θα πρέπει να προσφέρει ο μηχανισμός του AL-FEC. Τέλος, ο αλγόριθμος εξετάζει εάν το τρέχον πακέτο είναι το τελευταίο πακέτο του τρέχοντος FEC block, προκειμένου να υπολογίσει το transmission overhead που θα εισαχθεί στη multicast μετάδοση.

Στον παραπάνω αλγόριθμο τα pkt, sbl, t περιγράφουν κάθε προς επεξεργασία πακέτο, το μέγεθος του AL-FEC block στο οποίο ανήκει το τρέχον πακέτο, και το επιλεγμένο κατώφλι που επιλέγεται από το multicast αποστολέα, αντίστοιχα.

Algorithm 2 Weighted AL-FEC Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης

```

1: procedure (pkt, sbl, t)
2:   pkt.w ←  $\log_2(\text{pkt.uid})/\log_2(\text{sbl})$  ▷ compute the weight of the processed packet
3:   if pkt.w ≤ t then ▷ determine if the processed packet will be included in the
   overhead
4:     count ← count + 1
5:   end if
6:   if pkt.uid mod sbl = 0 then ▷ check if the processed packet is the last of the
   block
7:     transmission overhead ← count ▷ assign the computed transmission
   overhead to the current source block
8:   end if
9: end procedure

```

Ο ντετερμινιστικός αλγόριθμος 2 άμεσης απόκρισης εισάγει χαρακτηριστικά προσαρμογής στην εφαρμογή του AL-FEC, υπό την έννοια της μείωσης του transmission overhead με την αύξηση του μήκους του AL-FEC block. Ουσιαστικά, το βάρος που ανατίθεται σε κάθε πακέτο μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του AL-FEC block. Ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος εισάγει λιγότερα σε πλήθος AL-FEC σύμβολα επισκευής όσο το block μεγαλώνει για μία συγκεκριμένη τιμή του κατώφλιου.

8.3.2.1 Ο Λόγος Απόδοσης του Weighted Αλγορίθμου

Όσον αφορά την ανάλυση του κόστους του προτεινόμενου ντετερμινιστικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης, το πλήθος των πλεοναζόντων AL-FEC πακέτων για κάθε block μπορεί να εξαχθεί εύκολα όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια σύμφωνα με τη μέθοδο ανάθεσης βάρους που περιγράψαμε και πάντα σε σχέση με το επιλεγμένο κατώφλι t .

$$\frac{\log_2(\text{pkt.uid})}{\log_2(\text{sbl})} \leq t \Rightarrow \log_2(\text{pkt.uid}) \leq t \cdot \log_2(\text{sbl}) \Rightarrow$$

$$2^{\log_2(\text{pkt.uid})} \leq 2^{t \cdot \log_2(\text{sbl})} \Rightarrow \text{pkt.uid} \leq \left(2^{\log_2(\text{sbl})}\right)^t \Rightarrow$$

$$\text{pkt.uid} \leq \text{sbl}^t \tag{8.4}$$

Ως εκ τούτου, δεδομένου ότι ο αριθμός των AL-FEC πακέτων επισκευής μπορεί να εξαχθεί από τη σχέση (8.4) σύμφωνα με το *uid* του τελευταίου πακέτου που περνά το κατώφλι, το κόστος του αλγορίθμου 2 όσον αφορά το συνολικό αριθμό των μεταδιδόμενων πακέτων ανά AL-FEC πηγαίο block μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (8.5):

$$ALG_2 = sbl + \lfloor sbl^t \rfloor \quad (8.5)$$

Κατά συνέπεια, σύμφωνα με τον ορισμό του λόγου απόδοσης ενός αλγορίθμου άμεσης απόκρισης όπως περιγράφηκε νωρίτερα και δεδομένου ότι ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους ο λόγος απόδοσής του c_2 του μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$c_2 = \max \frac{ALG_2}{OPT}$$

Συνεπώς, ο λόγος απόδοσης c_2 του αλγορίθμου 2 μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις (8.5) και (8.1), σαν:

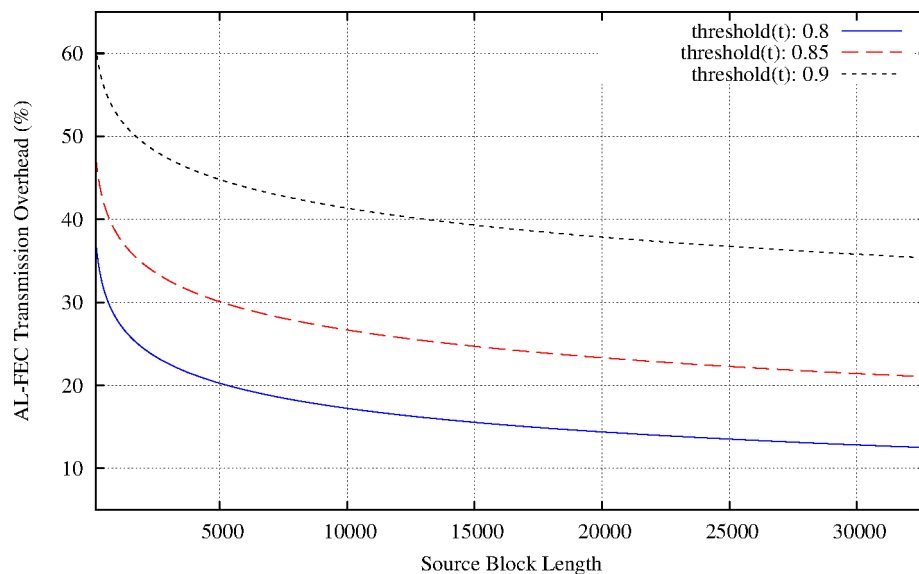
$$c_2 = (1 + sbl^{t-1})(1 - p)$$

Σχετικά με την πολυπλοκότητα του ντετερμινιστικού αλγορίθμου, ο αλγόριθμος επεξεργάζεται ένα block από sbl πακέτα, εκτελώντας κάποιους $O(1)$ υπολογισμούς για κάθε πακέτο. Έτσι, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι $O(sbl)$ για κάθε block μεγέθους sbl .

8.3.2.2 Αξιολόγηση της Απόδοσης του Weighted Αλγορίθμου

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζουμε την αξιολόγηση του Weighted αλγορίθμου 2 άμεσης απόκρισης μέσα από εκτενή αποτελέσματα προσομοίωσης της λειτουργίας του.

8.3.2.2.1 AL-FEC Transmission Overhead Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε τη λειτουργία του αλγορίθμου άμεσης απόκρισης για την επιλογή του AL-FEC transmission overhead που εισάγει στη multicast μετάδοση. Πιο συγκεκριμένα, η Εικόνα 8.5 παρουσιάζει πως ο αλγόριθμος προσαρμόζει το AL-FEC transmission overhead για διαφορετικές



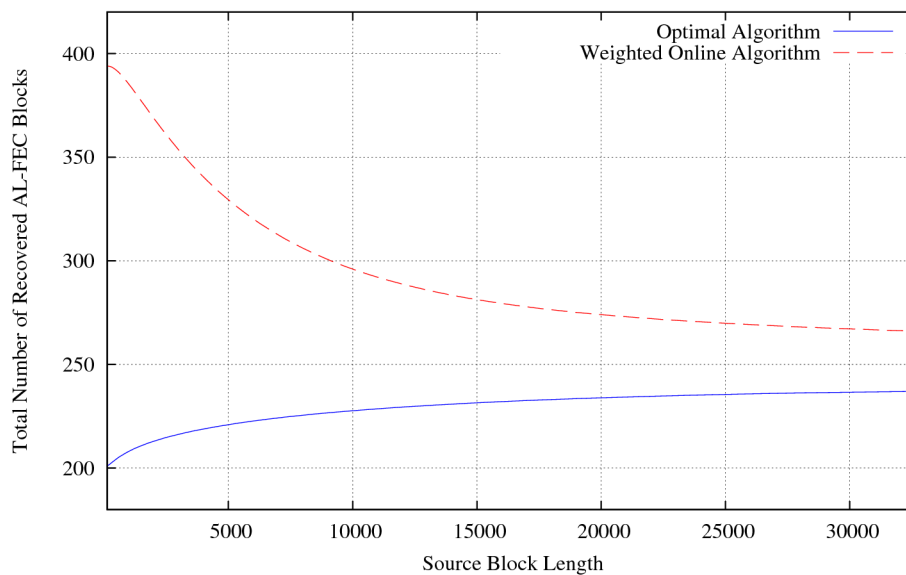
ΣΧΗΜΑ 8.5: AL-FEC Transmission Overhead vs. Μήκους Πηγαίου Block

τιμές του sbl και του κατωφλίου t . Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προσομοιώνουν το μήκος του block μεταξύ 128 και 32768 σύμβολα ανά block ενώ οι τιμές του κατωφλίου t που εξετάζονται είναι οι 0.8, 0.85 και 0.9.

Οι καμπύλες που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.5 αντικατοπτρίζουν τη λειτουργία του ντετερμινιστικού αλγορίθμου για την επιλογή του AL-FEC transmission overhead όπως την έχουμε περιγράψει. Μπορούμε άμεσα να επισημάνουμε ότι ο αλγόριθμος ακολουθεί μια εκθετική μείωση στο ποσό του AL-FEC πλεονασμού που θα εισάγει όσο το sbl αυξάνεται. Το γεγονός αυτό αποτελεί άμεση συνέπεια της μεθόδου υπολογισμού του τελευταίου uid του πακέτου που θα συμπεριληφθεί στον υπολογισμό των AL-FEC συμβόλων επισκευής που θα παραχθούν, με την τιμή του κατωφλίου t να καθορίζει το ποσό της προστασίας που ένας multicast αποστολέας επιθυμεί να εισάγει στη μετάδοση.

Στο υπόλοιπο της ενότητας αυτής παρέχουμε αποτελέσματα προσομοίωσης, που δείχνουν πώς η λειτουργία του αλγορίθμου επηρεάζει την απόδοση του AL-FEC καθώς και κάποιους περιορισμούς των streaming υπηρεσιών.

8.3.2.2 Ανακτηθέντα AL-FEC Blocks Στο τμήμα αυτό παρουσιάζουμε αποτελέσματα προσομοίωσης αξιολογώντας την αποτελεσματικότητα της προστασίας που παρέχει ο ντετερμινιστικός αλγόριθμος σε σχέση με το βέλτιστο offline αλγόριθμο του προβλήματος.



ΣΧΗΜΑ 8.6: Ανακτηθέντα AL-FEC Blocks vs. Μήκους Πηγαίου Block

Η Εικόνα 8.6 παρουσιάζει πως ο συνολικός αριθμός των επιτυχώς ανακτηθέντων AL-FEC blocks μεταβάλλεται σε σχέση με το sbl . Για την αξιολόγηση αυτή εξετάζουμε το sbl μεταξύ του εύρους τιμών 128 και 32768 σύμβολα, και προσομοιώνουμε τη μετάδοση ενός αντικειμένου που κωδικοποιείται σε 4 blocks και μεταδίδεται σε 100 multicast χρήστες με το μέσο ρυθμό απώλειας πακέτων να είναι 8% και το κατώφλι t του αλγορίθμου 0.7.

Στην περίπτωση του βέλτιστου αλγορίθμου, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι καθώς το sbl αυξάνει ο συνολικός αριθμός των ανακτηθέντων AL-FEC blocks αυξάνει και αυτός. Η παρατηρούμενη αύξηση στον αριθμό των ανακτηθέντων blocks, δηλαδή η επίτευξη ενισχυμένης προστασίας κατά των απωλειών του δικτύου είναι πιο απότομη για τιμές του sbl έως 4096 σύμβολα. Το γεγονός αυτό όμως δεν οφείλεται στο transmission overhead που εισάγει σε κάθε περίπτωση ο βέλτιστος αλγόριθμος αλλά στις ιδιότητες του κώδικα RaptorQ όπως αυτές έχουν περιγραφεί στην ανάλυση της απόδοσής του προηγουμένως.

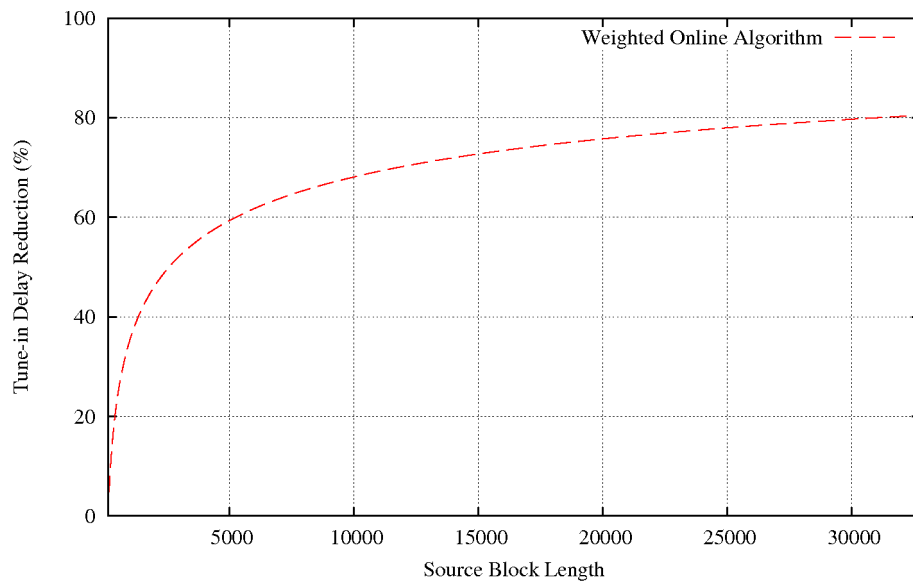
Από την άλλη πλευρά, από την ανάλυση της απόδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου άμεσης απόκρισης μπορούμε να παρατηρούμε αμέσως ότι ο αριθμός των επιτυχώς ληφθέντων blocks είναι ανάλογος προς το μέγεθος του sbl . Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι, όπως απεικονίζεται στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.5 το ποσό της AL-FEC προστασίας μειώνεται με την αύξηση του sbl . Επίσης, από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι εμφανές, ότο ακόμη και στην περιοχή των 128 με 4096 σύμβολα ανά block όπου η μείωση στην επιβάρυνση που εισάγεται στη μετάδοση είναι απότομη, το

κέρδος για την αποδοτικότητα της AL-FEC προστασίας είναι σημαντικά υψηλότερο από τις απώλειες που παρατηρούνται στην προστασία που παρέχεται στη μετάδοση. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι ο AL-FEC πλεονασμός μειώνεται σχεδόν 25%, ενώ ο αριθμός των ληφθέντων blocks μειώνεται περίπου 12% όταν το *sbl* αυξάνεται από 128 σε 4096 σύμβολα. Επιπλέον, συγκρίνοντας την ελάχιστη με τη μέγιστη τιμή του *sbl*, η μείωση στο πλεονασμό που εισάγεται φτάσει το 43.5%, ενώ η μείωση για τα επιτυχώς ληφθέντα blocks είναι 27.5%. Ως εκ τούτου, μπορούμε να πούμε ότι ο αλγόριθμος άμεσης απόκρισης μπορεί να πετυχαίνει σημαντική μείωση στο ποσό του AL-FEC πλεονασμού παρέχοντας ταυτόχρονα συγκριτικά επαρκή προστασία έναντι των απωλειών του δικτύου πάντα ανάλογα και με το επιλεγμένο κατώφλι του αλγορίθμου.

8.3.2.2.3 Μείωση στο Tune-in Delay Στόχος του αλγορίθμου 2 είναι να εισάγει αποτελεσματικά αξιοπιστία μέσω της εφαρμογής του RaptorQ AL-FEC σε multicast μετάδοση, μειώνοντας ταυτόχρονα τις όποιες επιπτώσεις που εισάγει η AL-FEC προστασία στους αυστηρούς περιορισμούς των υπηρεσιών streaming. Προς την κατεύθυνση αυτή, σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε τις επιπτώσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου άμεσης απόκρισης σε σχέση με μία τυπική μετρική για την εμπειρία του χρήστη των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, του tune-in delay.

Στην Εικόνα 8.7 παρουσιάζουμε την ποσοστιαία μείωση του tune-in delay την οποία πετυχαίνει η λειτουργία του αλγορίθμου άμεσης απόκρισης, συγκρίνοντας το μέσο tune-in delay για κάθε αξιολογούμενο μήκος block με το tune-in delay που προκύπτει από την εφαρμογή του εισαχθέντος πλεονασμού για την περίπτωση του μικρότερου μήκους block αυτής της αξιολόγησης, δηλαδή 128 σύμβολα ανά AL-FEC block, χωρίς την εφαρμογή του αλγορίθμου στη συνέχεια. Συνεπώς, η καμπύλη της Εικόνας 8.7 απεικονίζει πώς η λειτουργία του αλγορίθμου άμεσης απόκρισης μειώνει το tune-in delay με την αύξηση του μήκους του FEC block. Όπως και στο προηγούμενο τμήμα των αποτελεσμάτων, προσομοιώνουμε τη μετάδοση σε 100 multicast χρήστες, με το κατώφλι t του αλγορίθμου επιλεγμένο στο 0.7 και το μεταδιδόμενο αντικείμενο κατακερματισμένο σε 4 blocks.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.7, μπορούμε να παρατηρήσουμε αμέσως ότι η εφαρμογή του αλγορίθμου άμεσης απόκρισης παρέχει αξιόλογα κέρδη στο tune-in delay μίας multicast streaming υπηρεσίας. Πιο αναλυτικά, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για την περίπτωση των 512 συμβόλων για το *sbl* ο αλγόριθμος άμεσης



ΣΧΗΜΑ 8.7: Tune-in Delay vs. Μήκους Πηγαιού Block

απόκρισης επιτυγχάνει μία μείωση της τάξης του 20%, ενώ για την περίπτωση του μέγιστου μεγέθους sbl , δηλαδή 32768 σύμβολα, η μείωση φτάνει το 80%. Είναι αναμενόμενο η καμπύλη του tune-in delay να είναι αντίστροφη της καμπύλης του AL-FEC transmission overhead, καθώς όσο το sbl αυξάνει ο αλγόριθμος εισάγει συνεχώς μειούμενο πλεονασμό και κατά συνέπεια η επιτευχθείσα μείωση στο tune-in delay συνεχώς αυξάνεται.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.7 με αυτά της Εικόνας 8.6, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το κέρδος που προσφέρει ο αλγόριθμος άμεσης απόκρισης στο tune-in delay είναι σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με την απώλεια που έχουμε στην αποτελεσματικότητα της προστασίας από το μηχανισμό AL-FEC, όπως επίσης περιγράφεται και στην Εικόνα 8.6. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ιδιαίτερα για streaming υπηρεσίες όπου η ανοχή σε απώλειες πακέτων μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με υπηρεσίες download, όμως οι σφικτοί χρονικοί περιορισμοί είναι πολύ πιο σημαντικοί για τη συνολική εμπειρία ενός χρήστη υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.

8.3.3 Προσαρμοστικός Weighted Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο τρίτος προτεινόμενος αλγόριθμος άμεσης απόκρισης επεκτείνει τον αλγόριθμο 2 και έρχεται να ενισχύσει την απόδοσή του, εισάγοντας προσαρμοστικές

δυνατότητες με βάση το αποτέλεσμα των προηγούμενων multicast μεταδόσεων του μεταδιδόμενου αντικείμενου. Για τους σκοπούς του παρόντος αλγορίθμου, υποθέτουμε ότι η multicast πηγή μπορεί να παρακολουθεί και να καταγράφει την έκβαση κάθε multicast μετάδοσης. Τεκμηριώνοντας αυτή την υπόθεση, σημειώνουμε ότι πολλά κινητά multicast πρότυπα ορίζουν μία διαδικασία μετά το τέλος της παράδοσης για την παροχή επιπλέον δυνατοτήτων (π.χ. δυνατότητες επισκευής αρχείου) σε μία multicast download σύνοδο. Βάσει αυτού, ένας multicast χρήστης είναι σε θέση να καθορίσει, για κάθε πηγαίο block, τα σύμβολα που πρέπει να έχουν ληφθεί, αλλά δεν έχουν και είναι επίσης σε θέση να προσδιορίσει τον αριθμό των συμβόλων που έχει λάβει. Ως εκ τούτου, ένας multicast αποστολέας είναι σε θέση να καθορίσει ποιοι χρήστες απότυχαν να αποκωδικοποιήσουν το AL-FEC προστατευμένο αντικείμενο.

Βάσει αυτών, ο προσαρμοστικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης υπολογίζει μια ποσότητα που ονομάζεται *factor* μετά την ολοκλήρωση κάθε multicast μετάδοσης. Η ποσότητα *factor* δηλώνει την έκβαση της multicast παράδοσης, όσον αφορά την κάλυψη των multicast χρηστών. Ο όρος κάλυψη των χρηστών περιγράφει το ποσό των χρηστών (UEs) που ήταν σε θέση να ανακατασκευάσουν με επιτυχία τα AL-FEC προστατευμένα δεδομένα σε σχέση με το σύνολο των χρηστών (UEs) που συμμετέχουν στη multicast μετάδοση. Ως εκ τούτου, η ποσότητα *factor* υπολογίζεται ως εξής:

$$factor \leftarrow \frac{\#decoded\ UEs}{\#UEs}$$

όπου ένας *decoded UE* είναι ένας multicast χρήστης που επανασυναρμολόγησε με επιτυχία το AL-FEC προστατευμένο μεταδιδόμενο αντικείμενο.

Πιο αναλυτικά, ο προσαρμοστικός ντετερμινιστικός αλγόριθμος 3 άμεσης απόκρισης λαμβάνει σαν είσοδο μία ακολουθία συμβόλων, υποθέτοντας ένα σύμβολο ανά πακέτο, το μήκος του FEC block που θα δημιουργηθεί και μια ποσότητα που ονομάζεται *targetThreshold*. Η τιμή του *targetThreshold* καθορίζει την κάλυψη χρηστών που ο αλγόριθμος θα πρέπει να πετύχει. Εκτός αυτού, το *targetThreshold* αρχικοποιεί για τον πρώτο γύρο μετάδοσης την τιμή του *threshold* που ο αλγόριθμος 2 χρησιμοποιεί. Επιπλέον, σε κάθε AL-FEC σύμβολο ανατίθεται ένα βάρος w , με την τιμή του, σε συνδυασμό με την τιμή του *threshold*, να καθορίζει εάν το σύμβολο αυτό θα συμπεριληφθεί στον υπολογισμό του εισαχθέντος AL-FEC transmission overhead όπως δηλαδή λειτουργεί και ο αλγόριθμος 2.

Algorithm 3 Προσαρμοστικός Weighted AL-FEC Αλγόριθμος Άμεσης Απόκρισης

```

1: procedure (symbols, sbl, targetThreshold)
2:   compute factor
3:   if factor > targetThreshold then
4:     threshold  $\leftarrow$  threshold - (0.05 * threshold)
5:   else
6:     threshold  $\leftarrow$  threshold + (0.05 * (1 - threshold))
7:   end if
8:   count  $\leftarrow$  0
9:   for all symbols do
10:    symbol.w  $\leftarrow$   $\log_2(\text{symbol.uid})/\log_2(\text{sbl})$ 
11:    if symbol.w  $\leq$  threshold then
12:      count  $\leftarrow$  count + 1
13:    end if
14:    if symbol.uid mod sbl = 0 then
15:      transmission overhead  $\leftarrow$  count
16:    end if
17:  end for
18: end procedure

```

Ο προτεινόμενος προσαρμοστικός αλγόριθμος 3 είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί σε γύρους μετάδοσης και με βάση τις τιμές των ποσοτήτων που περιγράφηκαν παραπάνω, ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: Για κάθε γύρο μετάδοσης ο αλγόριθμος υπολογίζει την τιμή του παράγοντα *factor* του προηγούμενου γύρου. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος προσαρμόζει το κατώφλι *t* αξιοποιώντας τη γνώση του σχετικά με την κατάσταση του δικτύου σε προηγούμενους γύρους μετάδοσης. Στην περίπτωση που ο υπολογιζόμενος *factor* είναι μικρότερος ή ίσος με την τιμή του *targetThreshold* που έχει ζητηθεί από το χρήστη, ο αλγόριθμος αυξάνει την τιμή του *threshold* που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο 2 προκειμένου να αυξηθεί ο αριθμός των εισαχθέντων AL-FEC συμβόλων επισκευής σε σύγκριση με τον αριθμό των συμβόλων επισκευής που εισήχθησαν στον προηγούμενο γύρο και, ως εκ τούτου ο αλγόριθμος είναι σε θέση να ενισχύσει το ποσό της AL-FEC προστασίας. Από την άλλη πλευρά, όταν η τιμή του *factor* ξεπερνά την τιμή του *targetThreshold*, ο αλγόριθμος μειώνει το ποσό της εισαχθείσας AL-FEC προστασίας με την αύξηση της τιμής του *threshold*, προκειμένου να αποφευχθεί η σπατάλη πόρων σε σχέση με την αιτούμενη απόδοση της AL-FEC προστασίας. Τέλος, μετά τη φάση της προσαρμογής των παραμέτρων του αλγορίθμου, ο προσαρμοστικός αλγόριθμος εφαρμόζει τον αλγόριθμο 2 και επεξεργάζεται την ακολουθία

των πακέτων αποφασίζοντας, σύμφωνα με τις υπολογισμένες τιμές του w κάθε συμβόλου και του $threshold$, εάν το σύμβολο θα συμβάλει στον υπολογισμό του AL-FEC πλεονασμού, δηλαδή εάν ένα AL-FEC σύμβολο επισκευής θα παραχθεί για το τρέχον AL-FEC πηγαίο σύμβολο.

8.3.3.1 Ο Λόγος Απόδοσης του Προσαρμοστικού Weighted Αλγορίθμου

Όσον αφορά το κόστος του προσαρμοστικού αλγορίθμου 3 άμεσης απόκρισης, για κάθε γύρο μετάδοσης είναι το ίδιο με το κόστος του αλγορίθμου 2 το οποίο έχει υπολογιστεί προηγουμένως, και δίνεται από τη σχέση $ALG = sbl + sbl^{threshold}$.

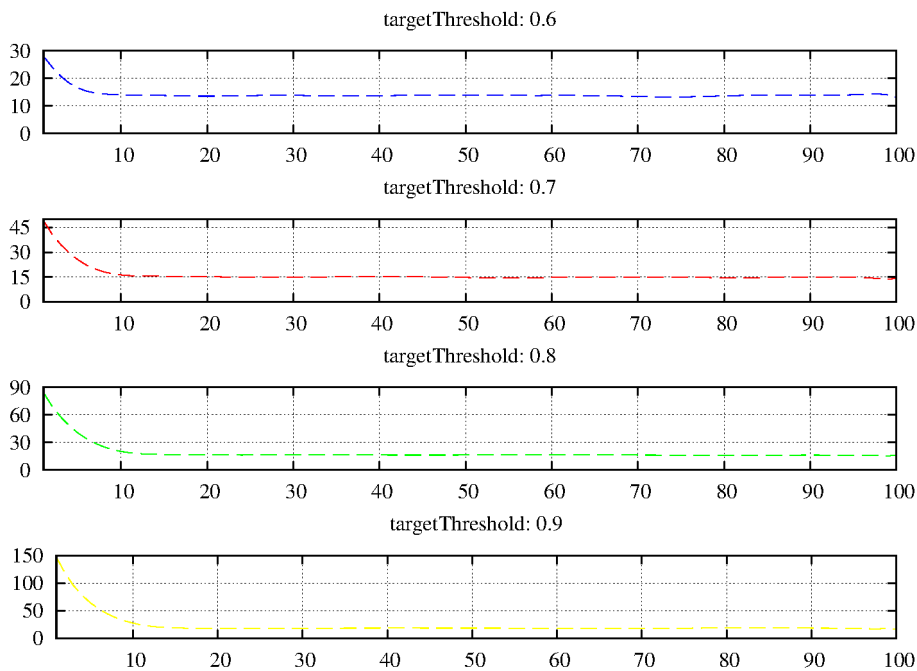
8.3.3.2 Αξιολόγηση της Απόδοσης του Προσαρμοστικού Weighted Αλγορίθμου

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του προτεινόμενου AL-FEC προσαρμοστικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης. Αρχικά, παρουσιάζουμε αποτελέσματα προσομοίωσης που εξετάζουν τη λογική λειτουργία του προτεινόμενου αλγορίθμου και στη συνέχεια παρέχουμε αποτελέσματα συγκρίνοντας τις επιδόσεις του σε σχέση με το βέλτιστο offline αλγόριθμο του προβλήματος.

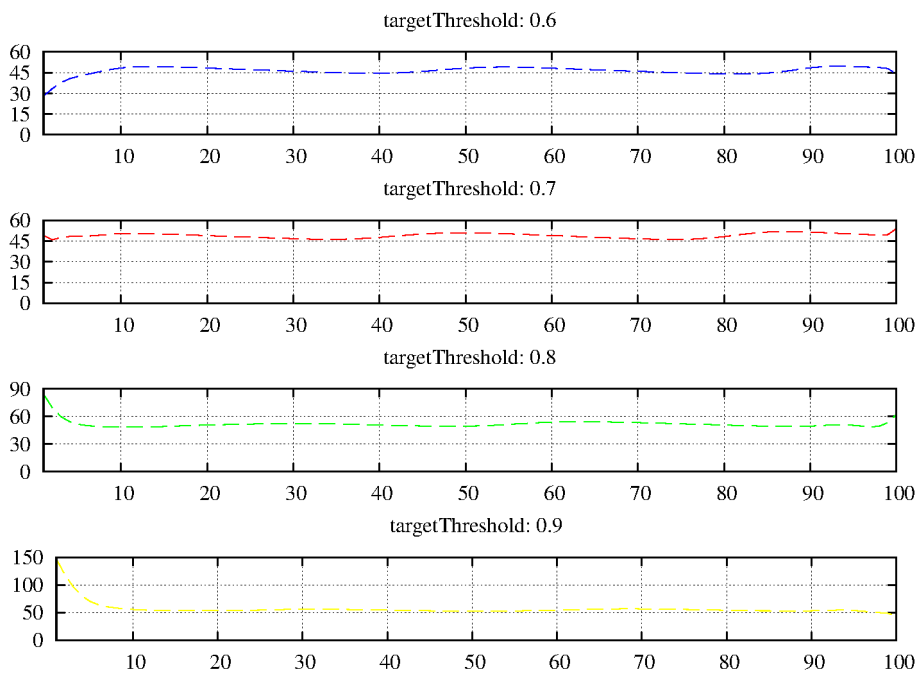
8.3.3.2.1 Σύγκλιση του Αλγορίθμου

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε τη λειτουργία του προσαρμοστικού αλγορίθμου. Διερευνούμε πώς ο αλγόριθμος μπορεί να συγκλίνει σε μία σχεδόν σταθερή κατάσταση σχετικά με την επιλογή του AL-FEC πλεονασμού που εισάγει, δεδομένου ότι ο αλγόριθμος λειτουργεί σε γύρους μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, στις Εικόνες 8.8 και 8.9 παρουσιάζουμε πως ο αλγόριθμος προσαρμόζει το AL-FEC transmission overhead προσομοιώνοντας 100 διαδοχικούς γύρους multicast μετάδοσης με το ρυθμό απώλειας πακέτων να είναι 5 % και 15% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στη μετάδοση ενός FEC block μεγέθους 256 συμβόλων σε 100 multicast χρήστες αξιολογώντας διαφορετικές αρχικές τιμές για το στόχο του $threshold$.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.8 για τέσσερις διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $targetThreshold$, μπορούμε να παρατηρήσουμε άμεσα ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος φτάνει σε μία σταθερή κατάσταση, δηλαδή κοντά σε σταθερή



ΣΧΗΜΑ 8.8: Πλεονάζοντα Σύμβολα vs. Γύρων Μετάδοσης @ PLR: 5%

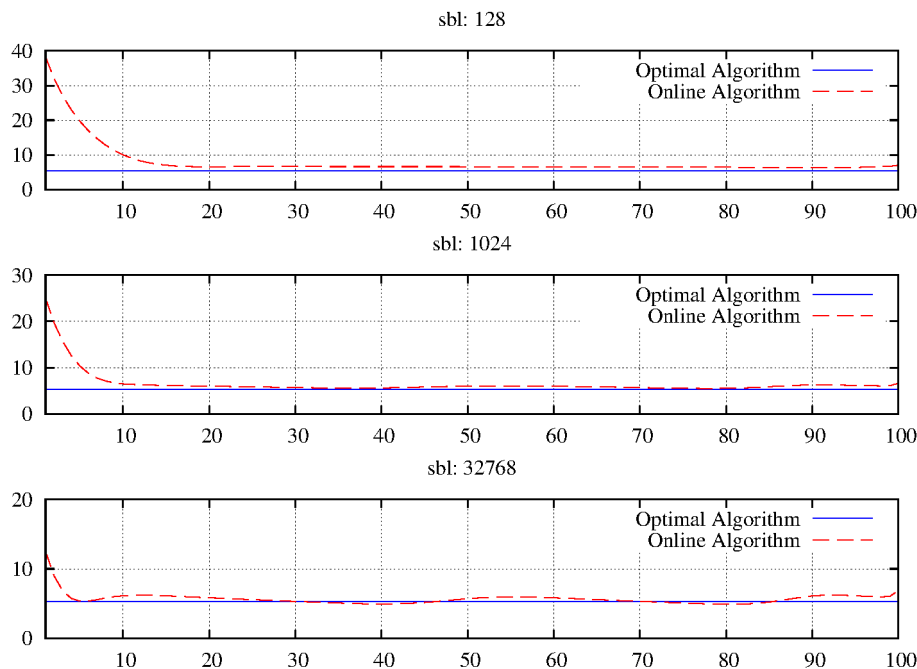


ΣΧΗΜΑ 8.9: Πλεονάζοντα Σύμβολα vs. Γύρων Μετάδοσης @ PLR: 15%

ποσότητα εισαχθέντων AL-FEC πλεοναζόντων συμβόλων μετά από σχεδόν δέκα συνεχόμενους γύρους multicast μετάδοσης. Αναλυτικότερα, στην πρώτη περίπτωση, όπου η τιμή του *targetThreshold* έχει οριστεί σε 0.6 ο αλγόριθμος συγκλίνει πολύ νωρίς, σχεδόν μετά από πέντε γύρους μετάδοσης. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην κοντινή τιμή του ρυθμού απώλειας πακέτων του δικτύου, που είναι 5%, με την τιμή του *targetThreshold*. Στη δεύτερη περίπτωση, όπου το *targetThreshold* έχει οριστεί σε 0.7 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η προσαρμογή απαιτεί περισσότερους γύρους μετάδοσης για να επιτευχθεί μία σταθερή κατάσταση σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, δεδομένου ότι ο αλγόριθμος εισάγει σχεδόν σταθερό αριθμό AL-FEC συμβόλων επισκευής μετά από οκτώ γύρους μετάδοσης. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην υψηλότερη τιμή που έχει ζητηθεί για το *targetThreshold*. Το ίδιο ακριβώς παρατηρείται και στις άλλες δύο περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος καθυστερεί περισσότερο να συγκλίνει με το γεγονός αυτό να οφείλεται στην όλο μεγαλύτερη διαφορά της αιτούμενης απόδοσης από το αρχικό *threshold* σε σχέση με τις συνθήκες λήψης που επικρατούν στους χρήστες του δικτύου.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.9, εξετάζουμε τη συμπεριφορά του προτεινόμενου αλγορίθμου για τις ίδιες τιμές *targetThreshold* αλλά για υψηλότερο ρυθμό απώλειας πακέτων, δηλαδή 15%. Σε γενικές γραμμές, επαληθεύεται πάλι ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος συγκλίνει σε μία σταθερή κατάσταση μετά από περίπου δέκα γύρους μετάδοσης. Αναλύοντας κάθε περίπτωση *targetThreshold*, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στην πρώτη περίπτωση του 0.6, ο προσαρμοστικός αλγόριθμος αυξάνει τον πλεονασμό μέχρι να φθάσει το *targetThreshold*, ενώ στις άλλες περιπτώσεις τον μειώνει όσο μεγαλώνει το *targetThreshold*. Είναι προφανές λοιπόν, ότι η λειτουργία του αλγορίθμου εξαρτάται στενά από την τιμή του *targetThreshold* που ορίζει και την αρχική τιμή του *threshold* του αλγορίθμου και πιο συγκεκριμένα εξαρτάται από το πόσο κοντά θα είναι το αιτούμενο *targetThreshold*, άρα και το *threshold* στις τρέχουσες συνθήκες λήψης του δικτύου.

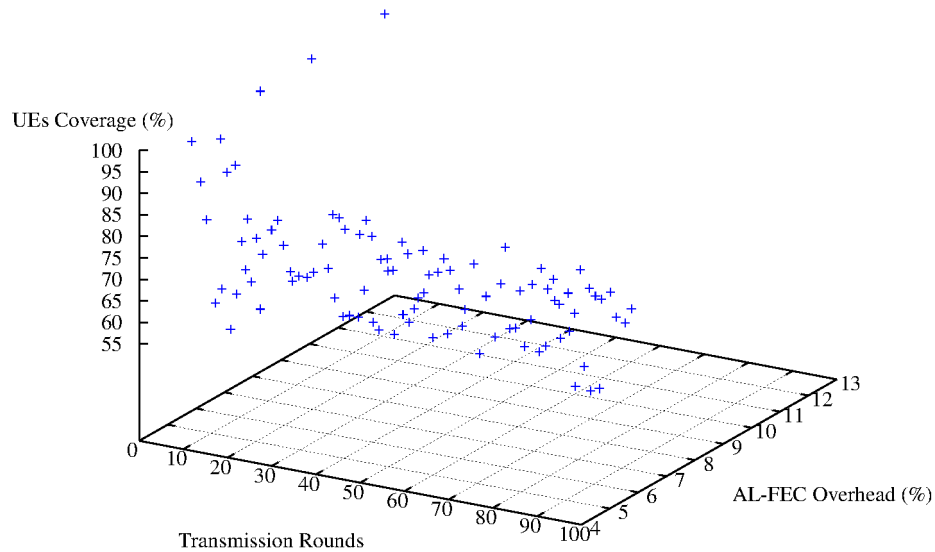
8.3.3.2.2 AL-FEC Transmission Overhead Σε αυτό το τμήμα των αποτελεσμάτων παρέχουμε αποτελέσματα προσομοίωσης συγκρίνοντας τον προτεινόμενο προσαρμοστικό αλγόριθμο με το βέλτιστο offline αλγόριθμο. Πιο συγκεκριμένα, στην Εικόνα 8.10 συγκρίνουμε το ποσοστιαίο εισαχθέν AL-FEC transmission overhead, για 100 διαδοχικούς γύρους multicast μετάδοσης με το ρυθμό απώλειας πακέτων να είναι 5% προσομοιώνοντας



ΣΧΗΜΑ 8.10: AL-FEC Transmission Overhead vs. Γύρων Μετάδοσης

τη μετάδοση FEC block μεγέθους ίσο με 128, 1024 και 32768 σύμβολα σε 100 multicast χρήστες με την τιμή του $targetThreshold$ να είναι 0.8.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.10, μπορούμε να παρατηρήσουμε άμεσα τις επιπτώσεις του συνδυασμού της προσαρμοστικότητας που προσφέρει ο προτεινόμενος αλγόριθμος 3 με τις ιδιότητες του αλγορίθμου 2, δεδομένου ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναφέρονται σε διαφορετικές τιμές του sbl . Με περισσότερες λεπτομέρειες, και οι τρεις περιπτώσεις αξιολόγησης διαφορετικών τιμών sbl επαληθεύουν και πάλι ότι ο προσαρμοστικός αλγόριθμος συγκλίνει στη χειρότερη περίπτωση μετά από δέκα γύρους μετάδοσης, επιτυγχάνοντας την εισαγωγή ενός σχεδόν σταθερού ποσού AL-FEC transmission overhead έχοντας απόδοση πάρα πολύ κοντά στην απόδοση του βέλτιστου offline αλγορίθμου. Επιπλέον, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όσο αυξάνει το sbl τόσο αυξάνει και η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου. Επίσης, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για το μεγαλύτερο μέγεθος του sbl δηλαδή 32768 σύμβολα, η μεταβολή του transmission overhead που επιλέγει να εισάγει ο αλγόριθμος σε κάθε γύρο μετάδοσης είναι πιο έντονη από τις περιπτώσεις μικρότερου μεγέθους sbl . Το γεγονός αυτό είναι κάτι το αναμενόμενο για μεγάλες τιμές AL-FEC block, καθώς σε αυτή την περίπτωση η μεταβολή που επιλέγει να κάνει ο αλγόριθμος είναι πιο βίαιη σε σχέση με μικρότερες τιμές του sbl .



ΣΧΗΜΑ 8.11: Κάλυψη Χρηστών vs. Γύρων Μετάδοσης

8.3.3.2.3 Κάλυψη Multicast Χρηστών Στο τελευταίο αυτό μέρος των παρεχόμενων αποτελεσμάτων προσομοίωσης, αξιολογούμε την απόδοση του προτεινόμενου προσαρμοστικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης στο ποσοστό της κάλυψης χρηστών. Στην Εικόνα 8.11 παρουσιάζουμε πώς η κάλυψη χρηστών ποικίλλει κατά τη διάρκεια διαδοχικών γύρων μετάδοσης σε σχέση με την τιμή του AL-FEC transmission overhead, που εισάγει ο αλγόριθμος σε κάθε γύρο μετάδοσης. Για την αξιολόγηση αυτή, προσομοιώνουμε 100 γύρους multicast μετάδοσης σε 100 χρήστες με το μέσο ρυθμό απώλειας πακέτων να είναι 5% και το *sbl* και *targetThreshold* να είναι στα 1024 και 0.7, αντίστοιχα.

Παρατηρώντας τις τιμές κάλυψης της Εικόνας 8.11, μπορούμε να διαπιστώσουμε πως για τους πρώτους δέκα γύρους μετάδοσης ο προσαρμοστικός αλγόριθμος άμεσης απόκρισης συνεχώς μειώνει τον AL-FEC πλεονασμό που εισάγει και ως εκ τούτου την κάλυψη χρηστών, μέχρι να φτάσει την τιμή του απαιτούμενου *targetThreshold* που έχει ζητηθεί από τον αλγόριθμο. Παρατηρούμε ότι όταν η κάλυψη χρηστών φτάσει το 70% οι επόμενες τιμές της κάλυψης βρίσκονται γύρω από την τιμή αυτή. Πράγματι, αυτή είναι η βασική λογική λειτουργίας του αλγορίθμου, καθώς προσαρμόζει το ποσό του AL-FEC transmission overhead μέχρι την επίτευξη κάλυψης χρηστών που να είναι ίδια με την τιμή του *targetThreshold* που έχει ζητηθεί.

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήσαμε την απόδοση του AL-FEC σε multicast υπηρεσίες κινητών δικτύων επικοινωνιών τέταρτης γενιάς καθώς επίσης και ενός πλαισίου πάνω στο οποίο θα μπορούσε να βασιστεί η αποδοτική εφαρμογή του AL-FEC με την ανάπτυξη και αξιολόγηση τεχνικών για την επίτευξη αυτού. Αρχικά μελετήσαμε την εφαρμογή των κωδίκων Raptor FEC στο επίπεδο εφαρμογών πάνω σε multicast υπηρεσίες κινητών δικτύων επικοινωνιών, διερευνώντας πως το ποσό της πλεονάζουσας πληροφορίας ποικίλλει σε πολλαπλούς χρήστες εισάγοντας ένα ρεαλιστικό περιβάλλον προσομοίωσης. Στη συνέχεια προχωρήσαμε στη μελέτη και αξιολόγηση του νεότερου μέλους της οικογένειας των κωδίκων FEC Raptor με την ονομασία RaptorQ. Αξιολογήσαμε την επίδραση των εξαιρετικών ιδιοτήτων ανάκτησης που παρουσιάζει ο κώδικας RaptorQ και συγκρίναμε τα οφέλη που εισάγει στην προστασία λαθών σε multicast περιβάλλοντα κινητών δικτύων επικοινωνιών σε σχέση με τον προκάτοχό του κώδικα Raptor. Στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, το οποίο είναι αφιερωμένο στη διερεύνηση της αποδοτικής εφαρμογής του FEC, εισάγαμε και ορίσαμε ένα πλαίσιο υπό το οποίο μελετάται η απόδοση τεχνικών εφαρμογής του FEC και ερευνήσαμε διάφορους αλγορίθμους για την επίτευξη αυτού. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήσαμε πως το πρόβλημα της αποδοτικής επιλογής του FEC πλεονασμού μπορεί να αναχθεί σε ένα πρόβλημα άμεσης απόκρισης και να αντιμετωπιστεί με το σχεδιασμό αλγορίθμων άμεσης απόκρισης. Βάσει αυτού, περιγράψαμε το πρόβλημα άμεσης απόκρισης που αναφέρεται στην αποδοτική εφαρμογή της AL-FEC προστασίας, το οποίο ονομάσαμε online AL-FEC policy problem και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και αξιολόγηση διαφόρων αλγορίθμων άμεσης απόκρισης. Επίσης, στα πλαίσια αυτού του προβλήματος άμεσης απόκρισης,

προτείνουμε και αξιολογήσαμε κάποιους αλγόριθμους άμεσης απόκρισης από έναν απλοϊκό πιθανοτικό αλγόριθμο έως και πιο εξελιγμένους ντετερμινιστικούς αλγόριθμους.

Αρχικά, παρουσιάσαμε και αναλύσαμε το περιβάλλον προσομοίωσης, το οποίο αναπτύχθηκε συγκεκριμένα για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, βασιζόμενο σε μία πλήρως λειτουργική πλατφόρμα προσομοίωσης των κινητών δικτύων τέταρτης γενιάς, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει το 3GPP. Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός προσομοίωσης υποστηρίζει πλήρως τις λειτουργίες ενός περιβάλλοντος μετάδοσης multicast υπηρεσιών, εστιάζοντας στη μοντελοποίηση της εφαρμογής του μηχανισμού AL-FEC. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός επιτρέπει τη διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος, εξετάζοντας ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων λειτουργίας, τόσο στο δίκτυο κορμού όσο και στο δίκτυο ασύρματης πρόσβασης.

Στόχος του μηχανισμού AL-FEC είναι η παροχή προστασίας έναντι σε απώλειες πακέτων κατά τη multicast μετάδοση πολυμεσικών δεδομένων. Σκοπός της κωδικοποίησης Raptor είναι η αντιμετώπιση των διαφορετικών απωλειών δεδομένων που παρουσιάζονται κατά τη μετάδοση σε διαφορετικούς multicast χρήστες, εισάγοντας πλεονάζουσα πληροφορία στη μετάδοση. Συνεπώς, η απόδοση του μηχανισμού AL-FEC εξαρτάται άμεσα από τη συμπεριφορά του δικτύου όσον αφορά το ρυθμό απώλειας πακέτων διαφορετικών παραληπτών. Για αυτό το λόγο, στο πρώτο τμήμα των πειραμάτων διερευνάται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων του συστήματος πάνω στο ρυθμό απώλειας πακέτων δεδομένων, προσφέροντας πολύτιμα συμπεράσματα. Εξετάσαμε πως επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος για διάφορες παραμέτρους του δικτύου όπως μοντέλα κινητικότητας, ο πληθυσμός των χρηστών και η διάταξη του ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Παρατηρήσαμε πως το πρότυπο τέταρτης γενιάς εκπληρώνει έναν από τους βασικούς του στόχους που είναι η υψηλή απόδοση ακόμα και σε συνθήκες υψηλής κινητικότητας των χρηστών, αφού οι διαφορές που ανέδειξε η διαδικασία προσομοίωσης είναι σχετικά μικρές και αποδεκτές ακόμα και για υψηλές ταχύτητες κίνησης. Επίσης, διερευνήθηκαν τα όρια χωρητικότητας ενός δικτύου multicast μετάδοσης, όσον αφορά το πλήθος των χρηστών που μπορεί να υποστηριχθούν αποτελεσματικά, για διάφορες διατάξεις του δικτύου πρόσβασης. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέροντα όσον αφορά την αναγκαιότητα της εφαρμογής ενός μηχανισμού προστασίας AL-FEC, αλλά και του τρόπου εφαρμογής του.

Στο επόμενο σκέλος της διδακτορικής διατριβής, διερευνάται η απόδοση της εφαρμογής του μοντελοποιημένου μηχανισμού AL-FEC, με χρήση των κωδίκων FEC Raptor, πάνω σε

σενάρια μετάδοσης όπως αυτά περιγράφηκαν προηγουμένως. Ένα από τα βασικά ζητήματα της εφαρμογής του FEC είναι η επιλογή του πλεονασμού, δηλαδή της πλεονάζουσας πληροφορίας που θα εισάγει ένας multicast αποστολέας στη μετάδοση, καθώς μικρό ποσό πλεονασμού μπορεί να οδηγεί στην αποτυχημένη αποκωδικοποίηση της προστατευμένης ροής δεδομένων σε διαφορετικούς χρήστες, ενώ η εισαγωγή υψηλού ποσού πλεονασμού μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος, καθώς για την ικανοποίηση ενός μικρού αριθμού παραληπτών που μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες επιβαρύνεται συνολικά η διαδικασία της multicast μετάδοσης. Αρχικά, ερευνάται η συμπεριφορά του AL-FEC πλεονασμού σε σχέση με παραμέτρους του δικτύου, όπως ο multicast πληθυσμός, διαφορετικά μοντέλα κινητικότητας και η διάταξη του ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Γενικά, παρατηρείται πως το μέσο απαιτούμενο transmission overhead σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά του ρυθμού απώλειας πακέτων, κάτι που είναι απόλυτα λογικό. Στη συνέχεια, προσπαθώντας να αναλύσουμε σε βάθος τα αποτελέσματα της εφαρμογής του AL-FEC, εξετάζουμε ξεχωριστά τη συμπεριφορά καθενός από τους multicast παραλήπτες διερευνώντας την απόδοση αποκωδικοποίησης των μεταδιδόμενων ροών για διάφορες τιμές του AL-FEC πλεονασμού.

Στη συνέχεια, προχωρήσαμε σε μία εκτενή αξιολόγηση των επιδόσεων της νέας, πολλά υποσχόμενης έκδοσης της οικογένειας κωδίκων Raptor διερευνώντας τις κύριες λειτουργικές βελτιώσεις που το νεότερο μέλος των κωδίκων Raptor, με την ονομασία RaptorQ, έχει εισάγει σε σύγκριση με τον παλαιότερο προτυποποιημένο κώδικα Raptor. Οι βελτιώσεις που εισάγει προσφέρουν αυξημένη αποτελεσματικότητα της AL-FEC προστασίας όσον αφορά το απαιτούμενο ποσό πλεονασμού κατά τη μετάδοση και όχι μόνο. Για να επαληθεύσουμε την ανωτερότητα του RaptorQ σε σχέση με τον κώδικα Raptor παρέχουμε αρχικά μία θεωρητική αξιολόγηση των δύο AL-FEC μηχανισμών, μέσω της οποίας εντοπίσαμε και αναδείξαμε τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά που μπορεί να εισάγει ο RaptorQ στην εφαρμογή της AL-FEC προστασίας πάνω σε multicast περιβάλλοντα ασύρματης μετάδοσης. Εκτός από τα συμπεράσματα που εξάγαμε από τη θεωρητική αξιολόγηση, χρησιμοποιώντας το περιβάλλον προσομοίωσης που αναπτύξαμε, προχωρήσαμε σε μία συγκριτική αξιολόγηση των δύο κωδίκων AL-FEC εξετάζοντας διάφορα σενάρια μετάδοσης καθώς και παραμέτρους κωδικοποίησης. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επαληθεύσαμε τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του νέου μηχανισμού RaptorQ FEC αξιολογώντας το νέο AL-FEC κώδικα υπό διάφορες προοπτικές και επίσης μελετήσαμε πώς η μαθηματική υπεροχή του RaptorQ μεταφράζεται στην πράξη στην απόδοση κινητών multicast υπηρεσιών. Η σχεδόν

ιδανική συμπεριφορά των απαιτήσεων του RaptorQ όσον αφορά το απαιτούμενο reception overhead επιτρέπει την αποδοτική λειτουργία με σημαντικά χαμηλότερο transmission overhead σε σύγκριση με τον κώδικα Raptor FEC. Αυτή η ιδιότητα είναι ευεργετική για την απόδοση του κινητού δικτύου καθώς η χρήση του κώδικα RaptorQ μπορεί να παράσχει αποτελεσματική προστασία κάτω από χειρότερες συνθήκες λήψης, επιτυγχάνοντας παράλληλα σημαντική μείωση στον απαιτούμενο πλεονασμό και ως εκ τούτου, προσφέροντας βελτιωμένη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου. Επιπλέον, εξετάσαμε πώς οι ενισχυμένες ιδιοότητες του RaptorQ αντανακλούν σε συγκεκριμένους περιορισμούς των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, παρέχοντας πάνω από 10% καλύτερη αξιοποίηση των πόρων και επαληθεύσαμε για μία ακόμη φορά την καθολική υπεροχή έναντι του υφιστάμενου κώδικα Raptor FEC.

Όσον αφορά συνολικά την αξιολόγηση της εφαρμογής των AL-FEC κωδίκων Raptor, τα αποτελέσματα μας έδειξαν πως η συνεχής αύξηση του εισαχθέντος πλεονασμού πέρα ενός σημείου δεν έχει σχεδόν κανένα όφελος για την απόδοση της μετάδοσης, αυξάνοντας απλώς τον όγκο των μεταδιδόμενων δεδομένων. Κάθε αποστολέας θα πρέπει να επιλέγει προσεκτικά τον πλεονασμό που θα εισάγει στη μετάδοση εξετάζοντας διάφορες παραμέτρους του δικτύου, αλλά και διάφορους περιορισμούς της εκάστοτε μεταδιδόμενης εφαρμογής. Επιπλέον, ερευνήθηκαν και άλλες παράμετροι της διαδικασίας κωδικοποίησης. Διαπιστώθηκε πως η απόδοση της διαδικασίας αποκωδικοποίησης δεν εξαρτάται μόνο από το ποσό του εισαχθέντος πλεονασμού, αλλά από μία συνολικά προσεκτική επιλογή των παραμέτρων του κωδικοποιητή FEC, καθώς διαπιστώθηκε πως η αύξηση των FEC συμβόλων που προστατεύονται μαζί σε ένα FEC block είναι ευεργετική για τη διαδικασία της FEC αποκωδικοποίησης. Συνεπώς, η αύξηση της προστασίας που προσφέρει ο μηχανισμός AL-FEC μπορεί να πραγματοποιηθεί όχι μόνο αυξάνοντας το ποσό του πλεονασμού, αλλά ρυθμίζοντας προσεκτικά τη λειτουργία του FEC κωδικοποιητή, δίνοντας τη δυνατότητα να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα η επιβάρυνση που προσθέτει η πλεονάζουσα πληροφορία.

Βάσει των συμπερασμάτων που εξάγαμε για την επιλογή των παραμέτρων κωδικοποίησης της AL-FEC προστασίας και δεδομένου ότι η σημαντικότερη παράμετρος που καθορίζει την αποδοτική εφαρμογή του FEC είναι η επιλογή της τιμής του πλεονασμού που θα εισαχθεί στα μεταδιδόμενα δεδομένα, με τη συγκεκριμένη όμως επιλογή να μην είναι τετριμμένη και να αποτελεί το βασικό σημείο τριβής καθώς, ο αποστολέας θα πρέπει να αποφασίσει άμεσα για τον πλεονασμό που θα εισάγει κατά την κατασκευή των FEC blocks χωρίς να γνωρίζει την επιτυχή ή μη λήψη της μεταδιδόμενης πληροφορίας σε πολλαπλούς παραλήπτες

υπό διαφορετικές συνθήκες λήψης, προχωρήσαμε στο επόμενο τμήμα της διδακτορικής διατριβής. Βάσει των παραπάνω, παρουσιάσαμε μία νέα προσέγγιση για την AL-FEC εφαρμογή σε multicast κινητές υπηρεσίες. Είναι η πρώτη φορά που η εφαρμογή της AL-FEC προστασίας ανάγεται σε ένα πρόβλημα άμεσης απόκρισης. Εισάγαμε το πρόβλημα άμεσης απόκρισης, το οποίο ονομάσαμε online AL-FEC policy problem το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση διαφόρων αλγορίθμων άμεσης απόκρισης για την αποδοτική εφαρμογή της AL-FEC προστασίας. Για την ανάλυση της απόδοσης των αλγορίθμων άμεσης απόκρισης για το πρόβλημα αυτό στη βάση της ανταγωνιστικής ανάλυσης, εισάγαμε ένα ρεαλιστικό μοντέλο για κινητά δίκτυα multicast μετάδοσης καθώς επίσης παρουσιάσαμε το βέλτιστο offline αλγόριθμο για το πρόβλημα αυτό και αναλύσαμε την απόδοσή του. Επιπλέον, σχεδιάσαμε και προτείναμε τρεις αλγορίθμους άμεσης απόκρισης για την αντιμετώπιση του AL-FEC policy προβλήματος, χρησιμοποιώντας σαν σχήμα εφαρμογής του AL-FEC τον κώδικα RaptorQ. Αρχικά προτείναμε έναν απλοϊκό πιθανοτικό αλγόριθμο άμεσης απόκρισης με στόχο την αποτελεσματική αντιμετώπιση της έλλειψης γνώσης σχετικά με τις συνθήκες απώλειας πακέτων που ο μηχανισμός AL-FEC προστασίας έχει να αντιμετωπίσει. Από την ανταγωνιστική ανάλυση του πιθανοτικού αλγορίθμου άμεσης απόκρισης, δείξαμε ότι ο λόγος απόδοσης του αλγορίθμου εξαρτάται από το ρυθμό απώλειας πακέτων που επικρατεί στο multicast περιβάλλον μετάδοσης. Στη συνέχεια, παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προτεινόμενου πιθανοτικού αλγορίθμου εξετάζοντας διάφορες παραμέτρους της απόδοσής του. Επιπλέον, προσφέρουμε μία σύγκριση της απόδοσης της προτεινόμενης πιθανοτικής πολιτικής με εκείνη της σταθερής επιλογής του AL-FEC πλεονασμού. Στη συνέχεια προτείναμε δύο ντετερμινιστικούς αλγορίθμους άμεσης απόκρισης για το πρόβλημα αυτό. Ο πρώτος ντετερμινιστικός αλγόριθμος βασίζεται σε ένα μηχανισμό ανάθεσης βαρών στα προς επεξεργασία σύμβολα. Ο αλγόριθμος αυτός δείξαμε πως μπορεί να βρει ιδιαίτερη εφαρμογή σε περιβάλλοντα μετάδοσης υπηρεσιών πραγματικού χρόνου αφού προσαρμόζει τον εισαχθέν πλεονασμό βασιζόμενος στις ιδιότητες αποκωδικοποίησης των κωδίκων RaptorQ. Ο δεύτερος ντετερμινιστικός αλγόριθμος αποτελεί ουσιαστικά μία επέκταση του πρώτου και εκμεταλλεύομενος κάποιες λειτουργίες παροχής ανάδρασης που προσφέρουν τα multicast πρωτόκολλα προσαρμόζει το εισαχθέν transmission overhead βασιζόμενος στις πρώτες συνθήκες λήψης του δικτύου. Κατά την ανάλυση της απόδοσης των δύο αυτών ντετερμινιστικών αλγορίθμων, δείξαμε ότι ο λόγος απόδοσής τους εξαρτάται από τις AL-FEC παραμέτρους κωδικοποίησης και, πιο συγκεκριμένα, από τον αριθμό των AL-FEC συμβόλων που προστατεύονται μαζί σε ένα AL-FEC block. Τέλος, παρουσιάσαμε αποτελέσματα προσομοίωσης της απόδοσης των δύο αυτών

αλγορίθμων άμεσης απόκρισης, εξετάζοντας την αποτελεσματικότητα της προστασίας που προσφέρουν έναντι σε απώλειες δεδομένων καθώς επίσης και τις επιπτώσεις της λειτουργίας τους στους χρονικούς περιορισμούς υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.

Συνοψίζοντας, στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήσαμε την απόδοση των πιο διαδομένων AL-FEC κωδίκων, εξάγοντας πολύτιμα συμπεράσματα για την αποδοτική εφαρμογή τους βάσει των ιδιοτήτων τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, ορίσαμε ένα πλαίσιο αναγωγής της αποδοτικής εφαρμογής της προστασίας AL-FEC σε πρόβλημα άμεσης απόκρισης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση αλγορίθμων εφαρμογής του AL-FEC. Τέλος προτείνουμε πιθανοτικούς και ντετερμινιστικούς αλγορίθμους άμεσης απόκρισης, βασιζόμενοι στις ιδιότητες των FEC κωδίκων Raptor, από την αξιολόγηση των οποίων εξάγαμε συμπεράσματα για τις δυνατότητες καθώς και τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει η εφαρμογή του AL-FEC σε κινητά δίκτυα επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 10

Μελλοντικές Επεκτάσεις

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο παρουσιάζουμε κάποια μελλοντικά ερευνητικά βήματα που θα μπορούσαν να ακολουθηθούν ή και να επεκτείνουν την παρούσα διδακτορική διατριβή.

Ένα πρώτο βήμα περαιτέρω διερεύνησης της απόδοσης του μηχανισμού προστασίας AL-FEC θα μπορούσε να είναι η ανάλυση της εφαρμογής του πάνω στην εξέλιξη της υπηρεσίας MBMS, όπου η πολυμεσική μετάδοση αφορά πολλαπλές γειτονικές χρονοσυγχρονισμένες κυψέλες σε ένα περιβάλλον Multimedia Broadcast multicast service over a Single Frequency Network (MBSFN)[65]. Στα πλαίσια εξέλιξης της υπηρεσίας MBMS, προσφέρεται η δυνατότητα η broadcast/multicast μετάδοση των πολυμεσικών υπηρεσιών να γίνεται πάνω από δίκτυο μίας συχνότητας (Single Frequency Network-SFN). Κατά την MBSFN λειτουργία, τα MBMS δεδομένα μεταδίδονται ταυτόχρονα από πολλαπλές, ισχυρά χρονοσυγχρονισμένες κυψέλες. Μία ομάδα από τέτοιες κυψέλες που πρόκειται να λάβουν τα MBSFN δεδομένα αποτελούν μία MBSFN περιοχή. Όλες οι κυψέλες μέσα σε μία MBSFN περιοχή συνεισφέρουν στην MBSFN μετάδοση και γνωστοποιούν τη διαθεσιμότητα της υπηρεσίας. Ένα UE θα λάβει πολλαπλές εκδόσεις του μεταδιδόμενου σήματος με διαφορετικές καθυστερήσεις, λόγω της μετάδοσης από πολλαπλές κυψέλες. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η πλευρά του UE να αντιλαμβάνεται τη μετάδοση σαν μετάδοση σε μία μεγάλη κυψέλη και να αντιμετωπίζει τις πολλαπλές μεταδόσεις, όπως τα φαινόμενα πολυδιόδευσης που παρατηρούνται κατά τη μετάδοση σε μία κυψέλη. Το UE δε χρειάζεται καν να γνωρίζει πόσες κυψέλες μεταδίδουν το σήμα.

Η λειτουργία της MBSFN μετάδοσης οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της φασματικής απόδοσης σε σύγκριση με την MBMS μετάδοση μίας κυψέλης, καθώς η MBSFN μετάδοση

ενισχύει πολύ το λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal to Interference Noise Ratio-SINR). Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ευεργετικό στα όρια μίας κυψέλης, όπου οι μεταδόσεις (οι οποίες στην MBMS μετάδοση μίας κυψέλης λαμβάνονται σαν παρεμβολή μεταξύ κυψελών) λαμβάνονται σαν ωφέλιμη ισχύς σήματος και συνεπώς η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος αυξάνεται [66]. Γενικά το MBSFN προσφέρει καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις κλασικές point-to-point ή point-to-multipoint μεταδόσεις [67]. Επιπλέον, η απόδοση της MBSFN μετάδοσης εξαρτάται από το πλήθος των κυψελών που μεταδίδουν την MBSFN υπηρεσία. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί πως η απόδοση του MBSFN αυξάνεται δραστικά όταν εκτός από τις κυψέλες που περιέχουν χρήστες, γειτονικές κυψέλες συνεπικουρούν και αυτές στη μετάδοση [68].

Επιπλέον, θα μπορούσε να εξεταστεί η απόδοση του FEC σε συνδυασμό με την υιοθέτηση προηγμένων MIMO τεχνικών που προσφέρουν τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς.

Επίσης, θα μπορούσε να διερευνηθεί η συνεργασία του πρόσφατου τομέα των συνεργατικών τηλεπικοινωνιών με την εφαρμογή ενός μηχανισμού FEC, όπου προσφέρονται και νέες μορφής κυψέλες, όπως οι οικιακές κυψέλες. Γενικά, οι συνεργατικές τηλεπικοινωνίες βασίζονται στην τεχνική του relaying, όπου η μετάδοση υποστηρίζεται και από ένα δεύτερο ενδιάμεσο κόμβο. Ήδη έχουν εμφανιστεί ενδιαφέρουσες προτάσεις συνδυασμού της τεχνικής relaying με μηχανισμούς AL-FEC.

Επίσης, η έρευνα της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να επεκταθεί περαιτέρω, εξετάζοντας παραμέτρους σε διάφορα επίπεδα και προτείνοντας ένα διαστρωματικό (cross-layer) σχεδιασμό του συστήματος όσον αφορά τις εφαρμογές MBMS streaming. Ξεκινώντας από το επίπεδο εφαρμογών, όπου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν προηγμένοι πολυμεσικοί κωδικοποιητές, σύμφωνα με την τεχνική της κλιμακωτής κωδικοποίησης video (Scalable Video Coding-SVC), όπου η πληροφορία κωδικοποιείται σε διαφορετικά στρώματα με διαφορετική προτεραιότητα το καθένα. Η εφαρμογή του FEC στο επίπεδο εφαρμογών θα μπορούσε να γίνει σύμφωνα με την τεχνική της άνισης προστασίας έναντι λαθών (Unequal Error Protection-UEP), όπου επίπεδα βασικής πληροφορίας θα λαμβάνουν μεγαλύτερη προστασία, ενώ θα μπορούσε να διερευνηθεί και ο ρυθμός της FEC κωδικοποίησης στο φυσικό επίπεδο.

Όσον αφορά το πρόβλημα άμεσης απόκρισης που εισάγαμε στην εργασία αυτή με την ονομασία online AL-FEC policy problem θεωρούμε ότι αποτελεί μία καινοτόμα βάση σχεδιασμού

και ανάλυσης αλγορίθμων άμεσης απόκρισης για την αποδοτική εφαρμογή της AL-FEC προστασίας στα πλαίσια της ανταγωνιστικής ανάλυσης. Σίγουρα, το δικτυακό μοντέλο που χρησιμοποιούμε στο πρόβλημα αυτό θα μπορούσε να εξελιχθεί και να εισαχθεί ένα αναλυτικό μοντέλο δικτύων για την περιγραφή του.

Θεωρούμε ότι ο ορισμός του προβλήματος αυτού δίνει τη βάση στην ερευνητική κοινότητα για το σχεδιασμό και την ανάλυση ντετερμινιστικών ή και πιθανοτικών αλγορίθμων άμεσης απόκρισης οι οποίοι θα έχουν σαν στόχο την αποδοτική εφαρμογή της AL-FEC προστασίας. Επίσης, θα μπορούσε να διερευνηθεί η αναγωγή του προβλήματος άμεσης απόκρισης που εισάγαμε σε ένα από τα βασικά και καλά μελετημένα προβλήματα άμεσης απόκρισης όπου θα μπορούσαν να εφαρμοστούν παραδοσιακοί αλγόριθμοι άμεσης απόκρισης σε αυτό.

Τέλος, με τη μεγάλη βελτίωση στις ιδιότητες ανάκτησης των προστατευμένων δεδομένων που εισήγαγε ο νέος κώδικας RaptorQ στους μηχανισμούς προστασίας AL-FEC, θεωρούμε πως θα μπορούσε να διερευνηθεί η απόδοση της εφαρμογής της AL-FEC προστασίας σαν αποκλειστικό μέσο προστασίας σε unicast περιβάλλοντα ασύρματης μετάδοσης.

Βιβλιογραφία

- [1] J.E. Padgett, C.G. Gunther, and T. Hattori. Overview of wireless personal communications. *Communications Magazine, IEEE*, 33(1):28–41, Jan 1995. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/35.339877.
- [2] NMT System Description. *Ericsson Document*.
- [3] M. Rahnema. Overview of the gsm system and protocol architecture. *Communications Magazine, IEEE*, 31(4):92–100, April 1993. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/35.210402.
- [4] S. Akesson. Gprs, general packet radio service. In *Universal Personal Communications. 1995. Record., 1995 Fourth IEEE International Conference on*, pages 640–643, Nov 1995. doi: 10.1109/ICUPC.1995.497087.
- [5] S. Acharya, M. Franklin, and S. Zdonik. Dissemination-based data delivery using broadcast disks. *Personal Communications, IEEE*, 2(6):50–60, Dec 1995. ISSN 1070-9916. doi: 10.1109/98.475988.
- [6] Richard E Blahut. *Theory and practice of error control codes*. Addison-Wesley, 1983.
- [7] Luigi Rizzo. On the feasibility of software fec. *Univ. di Pisa, Italy*, pages 1–16, 1997.
- [8] Stephen B Wicker and Vijay K Bhargava. *Reed-Solomon codes and their applications*. John Wiley & Sons, 1999.
- [9] Michael G Luby and Michael D Mitzenmacher. Loss resilient code with double heavy tailed series of redundant layers, February 27 2001. US Patent 6,195,777.

-
- [10] M.G. Luby, M. Mitzenmacher, M.A Shokrollahi, and D.A Spielman. Efficient erasure correcting codes. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 47(2):569–584, Feb 2001. ISSN 0018-9448. doi: 10.1109/18.910575.
- [11] Michael G Luby, Michael D Mitzenmacher, Mohammad Amin Shokrollahi, Daniel A Spielman, Volker Stemann, et al. Loss resilient decoding technique, June 6 2000. US Patent 6,073,250.
- [12] John W. Byers, Michael Luby, Michael Mitzenmacher, and Ashutosh Rege. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 28(4):56–67, October 1998. ISSN 0146-4833. doi: 10.1145/285243.285258. URL <http://doi.acm.org/10.1145/285243.285258>.
- [13] Armin Haken, Michael G Luby, Gavin Horn, Diane Hernek, John Byers, and Michael Mitzenmacher. Generating high weight encoding symbols using a basis, June 25 2002. US Patent 6,411,223.
- [14] Michael G Luby. Information additive code generator and decoder for communication systems, October 23 2001. US Patent 6,307,487.
- [15] Michael G Luby. Information additive group code generator and decoder for communications systems, November 20 2001. US Patent 6,320,520.
- [16] John W Byers, Michael Luby, Michael Mitzenmacher, and Ashutosh Rege. A digital fountain approach to reliable distribution of bulk data. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 28(4):56–67, 1998.
- [17] Adrian Perrig Ran, Ran Canetti, Dawn Song, and J. D. Tygar. Efficient and secure source authentication for multicast*. In *In Network and Distributed System Security Symposium, NDSS '01*, pages 35–46, 2001.
- [18] Soren Lassen, Michael Luby, and M Amin Shokrollahi. Multi-stage code generator and decoder for communication systems, June 27 2006. US Patent 7,068,729.
- [19] A Shokrollahi. Raptor codes. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 52(6):2551–2567, June 2006. ISSN 0018-9448. doi: 10.1109/TIT.2006.874390.
- [20] R. Karp, M. Luby, and A Shokrollahi. Finite length analysis of lt codes. In *Information Theory, 2004. ISIT 2004. Proceedings. International Symposium on*, June 2004.

-
- [21] Michael Luby, Amin Shokrollahi, Mark Watson, Thomas Stockhammer, and Lorenz Minder. Raptor forward error correction scheme for object delivery. *Internet Engineering Task Force (IETF), Tech. Rep. RFC*, 5053, 2007.
- [22] TS ETSI. 102 472 v1. 2.1. *IP Datacast over DVB-H: Content Delivery Protocols*, 2006.
- [23] Michael G Luby, Michael Mitzenmacher, Mohammad Amin Shokrollahi, and Daniel A Spielman. Efficient erasure correcting codes. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 47(2):569–584, 2001.
- [24] M. Luby. Lt codes. In *Foundations of Computer Science, 2002. Proceedings. The 43rd Annual IEEE Symposium on*, pages 271–280, 2002. doi: 10.1109/SFCS.2002.1181950.
- [25] Thomas Stockhammer, Amin Shokrollahi, Mark Watson, Michael Luby, and Tiago Gasiba. Application layer forward error correction for mobile multimedia broadcasting. Technical report, CRC Press, 2008.
- [26] Michael Luby and M Shokrollahi. Systematic encoding and decoding of chain reaction codes, 2003.
- [27] 3GPP. Technical specification 26.346, multimedia broadcast/multicast service (mbms) protocols and codecs (release 9), 2011.
- [28] A Shokrollahi. Raptor codes, tech. rep. dr2003-06-001, Digital Fountain (DF).
- [29] Michael Luby, Tiago Gasiba, Thomas Stockhammer, and Mark Watson. Reliable multimedia download delivery in cellular broadcast networks. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 53(1):235–246, 2007.
- [30] Prodip Chaudhury, Werner Mohr, and Seizo Onoe. The 3gpp proposal for int-2000. *Communications Magazine, IEEE*, 37(12):72–81, 1999.
- [31] Torbjörn Nilsson. Toward third-generation wireless communication. *Ericsson Review*, (2):68–77, 1998.
- [32] Mats Nilsson. Third-generation radio access standards. *ERICSSON REV(ENGL ED)*, 76(3):110–121, 1999.

-
- [33] NGMN Alliance. Next generation mobile networks beyond hspa & evdo. *White Paper, Dec, 5, 2006*.
- [34] IMT-TECH ITU-R M. Requirements related to technical performance for IMT-advanced radio interface(s), August 2008.
- [35] 3GPP. Technical report 36.913, requirements for further advancements of e-utra (lte-advanced) (release 10), 2011.
- [36] Jack H Winters. Optimum combining in digital mobile radio with cochannel interference. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 2(4):528–539, 1984.
- [37] R Price and PE Green. A communication technique for multipath channels. *Proceedings of the IRE*, 46(3):555–570, 1958.
- [38] 3GPP. 3gpp technical report 25.913, ‘requirements for evolved utra (e-utra) and evolved utran (e-utran) (release 7), 2009.
- [39] 3GPP. 3gpp technical specification 24.301, non-access-stratum (nas) protocol for evolved packet system (eps) stage 3 (release 8), 2009.
- [40] 3GPP. 3gpp technical specification 36.300, evolved universal terrestrial radio access (e-utra) and evolved universal terrestrial radio access network (e-utran) overall description stage 2 (release 8), 2010.
- [41] 3GPP. 3gpp technical specification 29.060, general packet radio service (gprs) gprs tunnelling protocol (gtp) across the gn and gp interface (release 8), 2010.
- [42] 3GPP. 3gpp technical specification 36.323, packet data convergence protocol (pdcp) specification (release 8), 2009.
- [43] 3GPP. 3gpp technical specification 36.322, ‘radio link control (rlc) protocol specification (release 8), 2010.
- [44] 3GPP. 3gpp technical specification 36.321, medium access control (mac) protocol specification (release 8), 2010.
- [45] Stefania Sesia, Issam Toufik, and Matthew Baker. *LTE: the UMTS long term evolution*. Wiley Online Library, 2009.
- [46] 3GPP. 3gpp technical specification 23.246, multimedia broadcast/multicast service (mbms) architecture and functional description (release 9), 2010.

-
- [47] 3GPP. 3gpp technical specification 22.146, multimedia broadcast/multicast service stage 1 (release 9), 2008.
- [48] 3GPP. 3gpp technical report 21.905, vocabulary for 3gpp specifications (release 8), 2009.
- [49] 3GPP. 3gpp technical report 23.882, system architecture evolution: Report on technical options and conclusions (release 8), 2008.
- [50] T Paila, M Luby, R Lehtonen, V Roca, and R Walsh. Flute-file delivery over uni-directional transport, october 2004. ietf rmt working group, request for comments. Technical report, RFC 3926.
- [51] Michael Luby, Jim Gemmell, Lorenzo Vicisano, Luigi Rizzo, and John Crowcroft. Asynchronous layered coding (alc) protocol instantiation. Technical report, RFC, 2002.
- [52] Michael Luby, Jim Gemmell, Lorenzo Vicisano, Luigi Rizzo, Mark Handley, and Jon Crowcroft. Layered coding transport (lct) building block. Technical report, RFC, 2002.
- [53] Mark Watson, Michael Luby, and Lorenzo Vicisano. Forward error correction (fec) building block. 2007.
- [54] 3GPP. 3gpp technical report 36.814, evolved universal terrestrial radio access (e-utra), further advancements for e-utra physical layer aspects (release 9), 2010.
- [55] R.C. Daniels, J.N. Murdock, T.S. Rappaport, and R.W. Heath. 60 ghz wireless: Up close and personal. *Microwave Magazine, IEEE*, 11(7):44–50, Dec 2010. ISSN 1527-3342. doi: 10.1109/MMM.2010.938581.
- [56] IWPC. Evolutionary and disruptive visions towards ultra high capacity networks, 2014.
- [57] 3GPP. 3gpp technical specification 26.234, transparent end-to-end streaming service (pss), protocols and codecs (release 9), 2010.
- [58] Sjoberg J., Westerlund M., Lakaniemi A., and Xie Q. Rtp payload format and file storage format for the adaptive multi-rate (amr) and adaptive multi-rate wideband (amr-wb) audio codecs. IETF, RFC 4867, Apr. 2007.

-
- [59] Sjoberg J. et al. Rtp payload format for the extended adaptive multi-rate wideband (amr-wb+) audio codec. IETF, RFC 4352, Jan. 2006.
- [60] nan der Meer J., Mackie D., Swaminathan V., Singer D., and Gentric P. Rtp payload format for transport of mpeg-4 elementary streams. IETF, RFC 3640, Nov. 2003.
- [61] Wenger S., Hannuksela M.M., Stockhammer T., Westerlund M., and Singer D. Rtp payload format for h.264 video. IETF, RFC 3984, Feb. 2005.
- [62] 3GPP. 3gpp technical specification 26.142, dynamic and interactive multimedia scenes (dms) (release 9), 2009.
- [63] Rey J. and Matsui Y. Rtp payload format for 3rd generation partnership project (3gpp) timed text. IETF, RFC 4396, Feb. 2006.
- [64] Handley M., Jacobson V., and Perkins C. Sdp: Session description protocol. IETF, RFC 4566, Jul. 2006.
- [65] A Alexiou, C. Bouras, V. Kokkinos, and G. Tsihrizis. Communication cost analysis of mbsfn in lte. In *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium on*, pages 1366–1371, Sept 2010. doi: 10.1109/PIMRC.2010.5672002.
- [66] Harri Holma and Antti Toskala. *LTE for UMTS-OFDMA and SC-FDMA based radio access*. John Wiley & Sons, 2009.
- [67] 3GPP. R1-071049, spectral efficiency comparison of possible mbms transmission schemes: Additional results.
- [68] 3GPP. R1-070051, performance of mbms transmission configurations.
- [69] M. Luby, A. Shokrollahi, M. Watson, T. Stockhammer, and L. Minder. Raptorq forward error correction scheme for object delivery. IETF, RFC 6330, Aug. 2011.
- [70] Qualcomm Incorporated. Raptorq technical overview. Technical report, Qualcomm, 2010.
- [71] Amin Shokrollahi and Michael Luby. Raptor codes, ser. *Foundations and trends in communications and information theory*. Now Publishers Inc, 6(3-4), 2011.
- [72] 3GPP. Tdocs4-110449, rationale for mbms al-fec enhancements, Apr. 2011. *TSG-SA4 64 meeting, San Diego, CA, USA*

-
- [73] Neal Young. Thek-server dual and loose competitiveness for paging. *Algorithmica*, 11(6):525–541, 1994.
- [74] Daniel D Sleator and Robert E Tarjan. Amortized efficiency of list update and paging rules. *Communications of the ACM*, 28(2):202–208, 1985.
- [75] Laszlo A. Belady. A study of replacement algorithms for a virtual-storage computer. *IBM Systems journal*, 5(2):78–101, 1966.
- [76] Mark Manasse, Lyle McGeoch, and Daniel Sleator. Competitive algorithms for on-line problems. In *Proceedings of the twentieth annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 322–333. ACM, 1988.
- [77] Ronald L Graham. Bounds for certain multiprocessing anomalies. *Bell System Technical Journal*, 45(9):1563–1581, 1966.
- [78] Sandy Irani. Page replacement with multi-size pages and applications to web caching. In *Proceedings of the twenty-ninth annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 701–710. ACM, 1997.
- [79] An Zhu. Analysis of queueing policies in qos switches. *Journal of Algorithms*, 53(2):137–168, 2004.
- [80] Edith Cohen, Haim Kaplan, and Uri Zwick. Connection caching. In *Proceedings of the thirty-first annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 612–621. ACM, 1999.
- [81] Edith Cohen, Haim Kaplan, and Uri Zwick. Connection caching under various models of communication. In *Proceedings of the twelfth annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures*, pages 54–63. ACM, 2000.
- [82] Amotz Bar-Noy, Ari Freund, Shimon Landa, and Joseph Seffi Naor. Competitive on-line switching policies. In *Proceedings of the thirteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, pages 525–534. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [83] Hisashi Koga. Balanced scheduling toward loss-free packet queuing and delay fairness. In *Algorithms and Computation*, pages 61–73. Springer, 2001.

- [84] Allan Borodin and Ran El-Yaniv. *Online computation and competitive analysis*. Cambridge University Press, 1998.
- [85] Susanne Albers. Online algorithms: a survey. *Mathematical Programming*, 97(1-2): 3–26, 2003.
- [86] 3GPP. Technical report 26.902, technical specification group services and system aspects; video codec performance (release 9), 2009.
- [87] 3GPP. Tsg system aspects wg4, s4-ahvic036, offline simulator for rtp/ip over utran, 2005.
- [88] The network simulator – ns-2. URL <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [89] Seacorn. URL <http://seacorn.ptinovacao.pt/>.
- [90] J Antoniou, V Vassiliou, A Pitsillides, G Hadjipollas, and N Jacovides. A simulation environment for enhanced umts performance evaluation. In *Proceedings of the Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference (ATNAC 2003)*, Melbourne, Australia, pages 8–10, 2003.
- [91] S. Schwarz, J.C. Ikuno, M. Simko, M. Taranetz, Q. Wang, and M. Rupp. Pushing the limits of LTE: A survey on research enhancing the standard. *IEEE Access*, 1: 51–62, 2013.
- [92] Josep Colom Ikuno, Martin Wrulich, and Markus Rupp. System level simulation of LTE networks. In *Proc. 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*, Taipei, Taiwan, May 2010.
- [93] Antonios Alexiou, Christos Bouras, and Andreas Papazois. Adopting forward error correction for multicasting over cellular networks. In *European Wireless Conference (EW), 2010*, pages 361–368. IEEE, 2010.
- [94] Thorsten Lohmar, Zhaoyi Peng, and Petri Mahonen. Performance evaluation of a file repair procedure based on a combination of mbms and unicast bearers. In *Proceedings of the 2006 International Symposium on on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, pages 349–357. IEEE Computer Society, 2006.
- [95] Mike Luby, Mark Watson, Tiago Gasiba, and Thomas Stockhammer. Mobile data broadcasting over mbms tradeoffs in forward error correction. In *Proceedings of the*

- 5th international conference on Mobile and ubiquitous multimedia*, page 10. ACM, 2006.
- [96] Xiaoli Wang, Yingjie Wang, and Yongsheng Zhang. A novel transmission policy for reliable embms download delivery. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2010 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [97] Antonios Alexiou, Christos Bouras, Vasileios Kokkinos, Andreas Papazois, and Georgia Tseliou. Enhancing fec application in lte cellular networks. In *Wireless Days (WD), 2010 IFIP*, pages 1–5. IEEE, 2010.
- [98] Thomas Stockhammer and Günther Liebl. On practical crosslayer aspects in 3gpp video services. In *Proceedings of the international workshop on Workshop on mobile video*, pages 7–12. ACM, 2007.
- [99] Tiago Gasiba, Wen Xu, and Thomas Stockhammer. Enhanced system design for download and streaming services using raptor codes. *European Transactions on Telecommunications*, 20(2):159–173, 2009.
- [100] 3GPP. Tsg-sa wg4 s4-ahp252, fec simulation parameters and assumptions for geran, sophia antipolis, france, Apr. 2005.
- [101] Junaid Afzal, Thomas Stockhammer, Tiago Gasiba, and Wen Xu. Video streaming over mbms: A system design approach. *Journal of Multimedia*, 1(5):25–35, 2006.
- [102] Daniele Munaretto, Dan Jurca, and Jörg Widmer. Broadcast video streaming in cellular networks: An adaptation framework for channel, video and al-fec rates allocation. In *Wireless internet conference (WICON), 2010 the 5th annual ICST*, pages 1–9. IEEE, 2010.
- [103] Antonios Alexiou, Christos Bouras, and Andreas Papazois. A study of forward error correction for mobile multicast. *International Journal of Communication Systems*, 24(5):607–627, 2011.
- [104] Antonio Virdis, Giovanni Stea, and Giovanni Nardini. Simulte: A modular system-level simulator for lte/lte-a networks based on omnet++. *proc. of SimulTech*, pages 28–30, 2014.
- [105] SimuLTE. URL <http://www.simulte.com>.

- [106] OMNeT++. URL <http://www.omnetpp.org>.
- [107] Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, Francesco Capozzi, and Pietro Camarda. Simulating lte cellular systems: An open-source framework. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(2):498–513, 2011.
- [108] The ns-3 network simulator. URL <http://www.nsnam.org/>.
- [109] Victoria Sgardoni, David R Bull, and Andrew R Nix. Spectrum efficient cross-layer adaptation of raptor codes for video multicasting over mobile broadband networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2014.
- [110] Yair Bartal, John W Byers, Michael Luby, and Danny Raz. Feedback-free multicast prefix protocols. In *Computers and Communications, 1998. ISCC'98. Proceedings. Third IEEE Symposium on*, pages 135–141. IEEE, 1998.
- [111] Jeannette Janssen, Danny Krizanc, Lata Narayanan, and Sunil Shende. Distributed online frequency assignment in cellular networks. *Journal of Algorithms*, 36(2):119 – 151, 2000. ISSN 0196-6774. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/jagm.1999.1068>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196677499910684>.
- [112] Longbi Lin, Ness B Shroff, and R Srikant. Asymptotically optimal energy-aware routing for multihop wireless networks with renewable energy sources. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 15(5):1021–1034, 2007.
- [113] Abbas El Gamal, Chandra Nair, Balaji Prabhakar, Elif Uysal-Biyikoglu, and Sina Zahedi. Energy-efficient scheduling of packet transmissions over wireless networks. In *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1773–1782. IEEE, 2002.
- [114] Ioannis Caragiannis, Aleksei V Fishkin, Christos Kaklamanis, and Evi Papaioannou. Randomized on-line algorithms and lower bounds for computing large independent sets in disk graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 155(2):119–136, 2007.
- [115] Giuseppe Piro, Nicola Baldo, and Marco Miozzo. An lte module for the ns-3 network simulator. In *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, SIMUTools '11*, pages 415–422, ICST, Brussels,

- Belgium, Belgium, 2011. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). ISBN 978-1-936968-00-8. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2151054.2151129>.
- [116] Tracy Camp, Jeff Boleng, and Vanessa Davies. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless communications and mobile computing*, 2(5): 483–502, 2002.
- [117] Video trace library. URL <http://trace.eas.asu.edu/>.
- [118] C. Bormann, C. Burmeister, M. Degermark, H. Fukushima, H. Hannu, L-E. Jansson, R. Hakenberg, T. Koren, K. Le, Z. Liu, A. Martensson, A. Miyazaki, K. Svanbro, T. Wiebke, T. Yoshimura, and H. Zheng. Robust header compression (rohc): Framework and four profiles: Rtp, udp, esp and uncompressed, july 2001. ietf rmt working group, request for comments. Technical report, RFC 3095.
- [119] 3GPP. Technical report 36.942, ‘technical specification group radio access network; e-utra; radio frequency system scenarios (release 9), 2010.
- [120] Ozgur Oyman, Jeffrey Foerster, Yong-joo Tcha, and Seong-Choon Lee. Toward enhanced mobile video services over wimax and lte [wimax/lte update]. *Communications Magazine, IEEE*, 48(8):68–76, 2010.
- [121] 3GPP. Tsg-sa4-34 tdoc s4-050107, simulation results for the performance and complexity of rs codes for mbms fec, 2005.
- [122] 3GPP. Tdoc s4-050250, report of fec selection for mbms, 2005.
- [123] Christos Bouras, Nikolaos Kanakis, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois. Application layer forward error correction for multicast streaming over lte networks. *International Journal of Communication Systems*, 26(11):1459–1474, 2013. ISSN 1099-1131. doi: 10.1002/dac.2321. URL <http://dx.doi.org/10.1002/dac.2321>.
- [124] Christos Bouras, Nikolaos Kanakis, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois. Evaluating raptorq fec over 3gpp multicast services. In *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2012 8th International*, pages 257–262. IEEE, 2012.

- [125] Christos Bouras, Nikolaos Kanakis, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois. Enhancing reliable mobile multicasting with raptorq fec. In *Computers and Communications (ISCC), 2012 IEEE Symposium on*, pages 82–87. IEEE, 2012.
- [126] Christos Bouras, Nikolaos Kanakis, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois. Embracing raptorq fec in 3gpp multicast services. *Wireless Networks*, pages 1–13, Springer US, 2012.
- [127] Christos Bouras and Nikolaos Kanakis. A competitive al-fec framework over mobile multicast delivery. In *The 9th International Wireless Communications and Mobile Conference*, IEEE, 2013.
- [128] Christos Bouras, Nikolaos Kanakis, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois. Deploying al-fec with online algorithms. In *Next Generation Mobile Apps, Services and Technologies (NGMAST), 2013 Seventh International Conference on*, pages 175–180. IEEE, 2013.
- [129] Christos Bouras, Nikolaos Kanakis, Vasileios Kokkinos, and Andreas Papazois. Deploying al-fec protection with online algorithms for multicast services over cellular networks. *Wireless Networks*, pages 1–14, Springer US
- [130] Christos Bouras and Nikolaos Kanakis. An adaptive weighted online al -fec algorithm over mobile multicas networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Istanbul, Turkey*. IEEE, April 6 - 9 2014.

Ευρετήριο

- κωδικοποιημένο σύμβολο, 53
- κυψέλη, 6
- πηγαίο σύμβολο, 57
- σύμβολο επισκευής, 71
- συστηματικός κώδικας, 76
- άμεσης απόκρισης, 85
- ανταγωνιστική ανάλυση, 86
- λόγος απόδοσης, 86
- ντετερμινιστικός, 86
- πιθανοτικός, 86
- πλεονασμός, 79
- VoIP, 18
- 3GPP, 12, 13
- 4G, 13
- AS, 27, 29
- BM-SC, 34
- CN, 25
- CoMP, 22
- Content Provider, 34
- DFT-S-OFDM, 15
- EPC, 24–26
- EPS, 24, 25, 32
- FEC, 44
- FLUTE, 45
- FTP, 25
- GERAN, 32
- GPRS, 32
- GTP, 29
- HSDPA, 21
- HSS, 26
- IMT-Advanced, 13
- IP, 24, 25, 33
- ITU-R, 15
- ITU, 13
- LTE-Advanced, 13
- LTE, 12, 13
- LT, 78
- MAC, 21, 29
- MBMS, 17
- MBSFN, 183
- MIMO, 20, 22
- MME, 26, 29
- NGMN, 13
- OFDMA, 19
- OFDM, 20
- P-GW, 26, 29
- PAPR, 20
- PCRF, 26
- PDCP, 29
- PDN, 24, 25
- QoE, 48
- QoS, 24, 25
- RAT, 15
- RIT, 14
- RLC, 29
- RRC, 29

RaptorQ, [76](#)
Raptor, [72](#)
Reed-Solomon, [79](#)
S-GW, [26](#)
SAE, [26](#)
SFN, [17](#), [183](#)
SGSN, [34](#)
SINR, [184](#)
UE, [15](#), [24](#), [25](#)
UMTS, [32](#)
UTRAN, [18](#), [32](#)
VoIP, [25](#)
bearer, [24](#), [25](#)
broadcast, [27](#)
competitive analysis, [86](#)
competitive ratio, [86](#)
control plane, [29](#)
downlink, [17](#), [19](#)
eNB, [18](#), [25](#)
eUTRAN, [24](#), [25](#)
fountain κώδικας, [76](#)
handover, [29](#)
inactivation decoding, [78](#)
online, [85](#)
permanent inactivation, [78](#)
service, [32](#)
uplink, [15](#), [17](#)
user plane, [29](#)