



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ
ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ
ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΥΨΕΛΕΣ

ΔΗΛΕΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

A.M.: 818

Πάτρα 2017

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών & Πληροφορικής
Δηλές Γεώργιος

© 2017 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΑ ΣΕ ΜΙΚΡΟΚΥΨΕΛΕΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ιωάννης Γαροφαλάκης, Καθηγητής

Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης, Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Γεώργιος Αλεξίου, Καθηγητής

Κυριάκος Βλάχος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Ιωάννης Γαροφαλάκης, Καθηγητής

Σπύρος Δεμάζης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Σταύρος Κωτσόπουλος, Καθηγητής

Κωνσταντίνος Μπερμπερίδης, Καθηγητής

Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής

Στην Οικογένειά μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι κινητές επικοινωνίες έχουν γίνει ένα καθημερινό αγαθό. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, εξελίχθηκαν από το να θεωρούνται μια ακριβή τεχνολογία για λίγους, στα σημερινά συστήματα που χρησιμοποιούνται απανταχού και από την πλειοψηφία του πληθυσμού του πλανήτη. Αυτό δημιουργεί υψηλές απαιτήσεις από τις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης όσο αφορά κυρίως τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, τη καθυστέρηση και τη χωρητικότητα. Καθώς όμως η απόδοση ανά σύνδεσμο (link) πλησιάζει το θεωρητικό όριο στα τελευταίας γενιάς δίκτυα, το επόμενο άλμα επίδοσης στα ασύρματα δίκτυα αναμένεται να προέλθει από την εξελιγμένη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων. Η έννοια των ετερογενών δικτύων στα κινητά δίκτυα αφορά τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης ανά μονάδα επιφανείας, χρησιμοποιώντας ένα μείγμα από μικροκυψέλες (macrocell, picocell, femtocell) και relay σταθμών βάσης. Τα ετερογενή δίκτυα επιτρέπουν ευέλικτη και χαμηλού κόστους υλοποίηση και προσφέρουν μια ομοιογενή ευρυζωνική πρόσβαση στους χρήστες ανεξάρτητα της θέσης τους στο δίκτυο.

Ενώ η τοποθέτηση των macrocell σταθμών βάσης σε ένα δίκτυο βασίζεται σε προσεκτικό σχεδιασμό, η τοποθέτηση των small cells μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο τυχαία (ad hoc), με βάση μόνο μια πρόχειρη γνώση των ζητημάτων της κάλυψης και της πυκνότητας της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Τέτοια ετερογενή συστήματα θα είναι σημαντικά πιο περίπλοκα στην ανάπτυξή τους από ότι τα σημερινά δίκτυα και ως εκ τούτου απαιτούν απλές, προσαρμόσιμες και εύρωστες στρατηγικές ανάπτυξης σε σύγκριση με μια προσέγγιση ανάπτυξης συμβατικών υποδομών δικτύων κινητής τηλεφωνίας, ενώ για την ενίσχυση της απόδοσης και την εξαγωγή του μέγιστου οφέλους από τα δίκτυα αυτά, προηγμένες τεχνικές συντονισμού και μετάδοσης θα χρειαστούν.

Καθότι τα μελλοντικά δίκτυα πέμπτης γενιάς αναμένεται να περιλαμβάνουν πυκνότερες δομές small cells που θα εγκαθίστανται από απλούς χρήστες, η ρύθμιση των παραμέτρων μετάδοσης, προκειμένου να επιτύχουν την βέλτιστη απόδοση χωρίς να επηρεάζουν τα παρακείμενα δίκτυα, θα αναδειχτεί σε κρίσιμο παράγοντα στα κινητά δίκτυα. Παράλληλα και καθώς ο αριθμός των χρηστών και των σταθμών βάσεων θα πολλαπλασιάζεται, θα αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας και η ενεργειακή απόδοση των δικτύων αυτών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στόχος της παρούσης διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη των μηχανισμών μετάδοσης και των τεχνικών ανάπτυξης σε ετερογενή δίκτυα κινητών επικοινωνιών επόμενης γενιάς καθώς και η ανάπτυξη νέων μεθόδων/μηχανισμών για τη βελτιστοποίηση τους. Πιο συγκεκριμένα στόχος μας είναι ο έξυπνος συντονισμός μεταξύ των σταθμών βάσης, οι καλύτερες στρατηγικές επιλογής εξυπηρετητή και οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι ακύρωσης των παρεμβολών με σκοπό σημαντικά οφέλη στην απόδοση και την εμπειρία του χρήστη και στις επιδόσεις των δικτύων όσο αφορά τη χωρητικότητα και την ενεργειακή κατανάλωση.

Η διατριβή αυτή επικεντρώνεται στα femtocells, που αποτελούν την χαμηλότερη βαθμίδα στα small cells ως προς την εμβέλεια και ισχύ, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνουν εντονότερα και τα «προβληματικά» χαρακτηριστικά τους: πυκνότερες ad hoc

εγκαταστάσεις ανά μονάδα επιφάνειας, εγκατάσταση από τον χρήστη και όχι από τον διαχειριστή του ευρύτερου δικτύου άρα και αδυναμία κεντρικού συντονισμού, και αποκλειστικότητα πρόσβασης στους ιδιοκτήτες άρα και υψηλά φαινόμενα παρεμβολών σε μη έχοντες πρόσβαση χρήστες. Προς αποφυγή των παραπάνω, εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα υβριδικής πρόσβασης των σταθμών αυτών που επιτρέπουν την επιβολή ρυθμιζόμενων πολιτικών ως προς τους χρήστες (εγγεγραμμένους ή μη) που θα εξυπηρετήσουν αλλά και τους πόρους που θα διαθέσουν σε αυτούς. Πάνω σε αυτήν την ιδιότητα, καταρχήν αναπτύσσεται και αξιολογείται μηχανισμός βάση του οποίου καθορίζονται οι παράμετροι μετάδοσης και η διαχείριση των πόρων των εν λόγω femtocells με στόχο την μείωση παρεμβολών και την δικαιότερη κατανομή των πόρων αυτών.

Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε αλγόριθμος για πυκνές συστοιχίες femtocells βάση του οποίου καθορίζεται το ποσοστό του φάσματος που θα διατεθεί από τους femto σταθμούς βάσης στους μη εγγεγραμμένους χρήστες. Ο απώτερος στόχος του μηχανισμού βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του αρνητικού αντίκτυπου των femtocells στους μη εξυπηρετούμενους από αυτούς χρήστες και η προσπάθεια αναπαραγωγής της επίδοσης των τελευταίων σε επίπεδα που απολάμβαναν πριν την εγκατάσταση του femtocell. Όταν λοιπόν κοντινό femtocell προκαλεί έντονες παρεμβολές σε έναν χρήστη, ο σταθμός βάσης μπαίνει σε υβριδική λειτουργία και ο καταμερισμός φάσματος καθορίζεται βάση των προηγούμενων μετρήσεων της ρυθμαπόδοσης του χρήστη. Οι εγγεγραμμένοι χρήστες διατηρούν πάντα προτεραιότητα στους πόρους του σταθμού βάσης, για αυτό και ο μηχανισμός δεν εγγυάται στους υπόλοιπους χρήστες την προηγούμενη απόδοση. Η σύγκλιση που επέφερε ο μηχανισμός ήταν σημαντική σε σενάρια πυκνών συστοιχιών που μελετήθηκαν.

Επιπλέον ως συνέχεια του παραπάνω μηχανισμού σε πυκνές συστοιχίες femtocells, αναπτύχθηκε μηχανισμός εξισορρόπησης της πτώσης απόδοσης εγγεγραμμένων χρηστών λόγω της μετάβασης από κλειστή πρόσβαση σε υβριδική λειτουργία. Ο μηχανισμός βασίστηκε στον έλεγχο ισχύος μεταξύ των σταθμών βάσης, προκειμένου να μετριαστεί η πτώση σε όσους σταθμούς λειτουργούν υβριδικά (άρα υφίστανται καταμερισμό φάσματος), μειώνοντας την ισχύ μετάδοσης σε γειτονικούς σταθμούς ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές στους πρώτους. Πρόκειται για κατανεμημένη συνεργασία μεταξύ των σταθμών, με απώτερο αποτέλεσμα το βάρος εξυπηρέτησης μη εγγεγραμμένων χρηστών να κατανέμεται σε όλα τα γειτονικά femtocell, ώστε αντί ορισμένα μόνο εξ αυτών να υφίσταται μεγάλη μείωση, όλα τα μέλη του cluster να υφίστανται μικρή. Τα οφέλη του μηχανισμού είναι πολλαπλά. Πρώτον, σε καταστάσεις πολλαπλών κοντινών femtocells (συστοιχίες), οι συσσωρευμένες παρεμβολές μπορούν να στραγγαλίσουν έναν μη εγγεγραμμένο χρήστη. Η ελεγχόμενη υβριδική λειτουργία προσφέρει αφενός τους απαραίτητους πόρους, αφετέρου σέβεται τους δικαιωματικά σε προτεραιότητα χρήστες, ενώ προσαρμόζεται ευέλικτα στις καταστάσεις αντί της προσέγγισης σταθερού καταμερισμού. Δεύτερον, ο έλεγχος ισχύος σε καταστάσεις συστοιχιών προσφέρει ομοιογένεια και μικρότερες μεταπτώσεις στην επίδοση των εγγεγραμμένων χρηστών. Τρίτον, καθώς ο έλεγχος ισχύος γίνεται με σκοπό τη μείωση των παρεμβολών, γίνεται πάντα μειώνοντας την ισχύ μετάδοσης, γεγονός που μειώνει και το σύνολο των παρεμβολών.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε νέος αλγόριθμος, πάλι με στόχο την κατανομή πόρων σε συστοιχίες femtocells, ο οποίος όμως βασίζεται στην δημιουργία και ιεράρχηση ομάδων χρηστών. Οι ομάδες αποτελούνται από τους εγγεγραμμένους και μη εγγεγραμμένους χρήστες και τους εγγεγραμμένους χρήστες σε κάποιο άλλο femtocell-μέλος. Η εισαγωγή αυτή της τρίτης κατηγορίας χρηστών στην διατριβή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μια επέκταση της βασικής ιδέας της υβριδικής πρόσβασης, προορισμένη για σενάρια όπου υπάρχει σταθερά μεγάλη κινητικότητα των χρηστών εντός μια περιοχής, και η οποία ορίζεται από κάποιο κοινό συμφέρον, όπως οι εργαζόμενοι στο κτίριο μια εταιρίας. Αυτό επιτρέπει την εναλλαγή των ενδιαφερόμενων χρηστών στα εμπλεκόμενα femtocells ανάλογα με τη θέση των χρηστών κάθε στιγμή και την προστασία χρηστών που υφίστανται υψηλές παρεμβολές. Ο αλγόριθμος επιτυγχάνει αύξηση της συνολικής χωρητικότητας που προσφέρουν όλα τα μέλη της συστοιχίας στους χρήστες τους, αύξηση των εξυπηρετούμενων χρηστών και προστασία του κύριου χρήστη των femtocells σεβόμενοι την προτεραιότητα πρόσβασης στους διαθέσιμους πόρους.

Τέλος, εξερευνώντας τρόπους για καλύτερη ενεργειακή απόδοση υιοθετούμε την γνωστή πρακτική της απενεργοποίησης των macrocell σταθμών βάσης (sleep mode) στο στρώμα των femtocells. Το sleep mode είναι μια ενδιάμεση κατάσταση χαμηλής ισχύος, κατά την οποία έχουν απενεργοποιηθεί μερικά από τα εξαρτήματα του femtocell. Βασισμένοι στην ιδέα ότι με κάθε νέα εγκατάσταση ενός femtocell κλειστής πρόσβασης, εμφανίζεται μεγάλη παρεμβολή στους κοντινούς χρήστες που με τη σειρά τους μπορεί να βρουν τη λύση της κακής επίδοσης σε ένα δικό τους femtocell κλειστής πρόσβασης, αυτό θα οδηγήσει σε ένα μεγάλο αριθμό femtocells αναπτυγμένο σε μια μικρή περιοχή. Ως εκ τούτου ο αριθμός τους θα αντικατοπτρίζει την αποκλειστικότητα της χρήσης από τους χρήστες και όχι τις απαιτήσεις τους σε ρυθμό δεδομένων. Υπό αυτό το πρίσμα, αναπτύχθηκε αλγόριθμος βάσει του οποίου σε ένα τέτοιο σύστημα, επιλέγονται κάποια femtocells να λειτουργήσουν σε sleep mode, αναδιανέμοντας τους χρήστες τους με τρόπο που θα είναι προς το συμφέρον των χρηστών (εγγεγραμμένων και μη), και του δικτύου, οδηγώντας σε μείωση παρεμβολών, εξυπνότερη κατανομή των χρηστών, βελτιωμένους ρυθμούς μετάδοσης και καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Εξερευνώντας διαφορετικές πολιτικές όσο αφορά την επιλογή των σταθμών βάσης που θα απενεργοποιηθούν αλλά και το πότε ο μηχανισμός ενεργοποιείται, υπολογίζεται για όλες τις περιπτώσεις και για διάφορα σενάρια πυκνότητας των εγκαταστημένων femtocells η βελτίωση στην επίδοση όλων των εμπλεκόμενων χρηστών και στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου.

EXECUTIVE SUMMARY

Mobile communications have become an everyday commodity. During the last decades, they evolved from being regarded as an expensive technology for a few to the current systems that are used worldwide and by the majority of the world's population. This creates high expectations by the wireless access technologies, especially regarding their capabilities for data transmission rates, delay and capacity. But as the data rate per link in the latest generation networks approaches the theoretical limit, the next performance leap in wireless networks is expected to come from the advanced utilization of available resources. The concept of heterogeneous networks in mobile networks aims to the improvement of the spectral efficiency per unit area, using a mix of macrocell, picocell, femtocell base stations and relay stations. Heterogeneous networks allow flexible and low-cost deployment and provide a homogeneous broadband experience to users regardless of their location in the network.

While macrocell base stations location in a network is determined by careful planning, the placement of small cells may be more or less ad hoc, based on a limited knowledge of the issues of coverage and density of traffic on the network. Such heterogeneous systems will be considerably more complex in their development than the current networks and therefore require simple, customizable and robust development strategies compared with deployments of conventional mobile network infrastructures, and advanced coordination and transmission techniques will be needed in order to enhance the efficiency and export the maximum benefits by these networks.

Since future fourth and fifth-generation networks are expected to comprise of dense small cells deployments that will be mostly installed by ordinary users, setting transmission parameters to achieve optimal performance without affecting the adjacent networks, emerges as a critical factor. At the same time, and as the number of users and base stations is increasing exponentially, the energy efficiency of these networks is emerging as a critical factor.

Considering the above, the aim of this thesis is to study the transmission mechanisms and the development of techniques in heterogeneous next generation mobile communications networks as well as the introduction of new methods/mechanisms for their optimization. More specifically, our goal is towards intelligent coordination between base stations, better strategies for station selection and effective methods for interference cancellation aimed to harvest significant benefits in user performance and experience and network capacity and energy consumption.

This thesis specially focuses on femtocells, which are the lowest rank in small cells in radius and power, thus strongly affected by their 'problematic' characteristics: dense ad hoc deployments per unit area, user installation rather than by a network administrator hence lack of central coordination, and exclusive access to owners and therefore high interference phenomena towards other users. Taking advantage of hybrid access mode of femtocells, which allows the imposition of policies with regard to which users (registered or not) will be served and the allocation of available resources, and the flexibility of 4G systems (LTE-Advanced) in spectrum management we first develop and evaluate a

mechanism which defines the transmission parameters and the resource management of these femtocells in order to reduce interference and impose fairer distribution of these resources.

More specifically we developed an algorithm for dense femtocells deployments (clusters) which determines the amount of spectrum to be assigned by the stations to unregistered users. The ultimate aim of the mechanism is based on minimizing the negative impact of femtocells to macrocell users and trying to recreate the performance of the latter to levels enjoyed before femtocell installation. So when a proximal femtocell causes severe interference to a user, the base station enters hybrid mode and the spectrum allocation is determined based on the previous measurements of the user throughput. Registered users always retain priority to the base station's resources, thus the mechanism does not guarantee other users' past performance, however, the convergence brought by the mechanism was found to be almost complete in dense scenarios.

In addition, following the above mechanism in clusters, we developed a mechanism to balance the performance drop in registered users due to the transition from restricted access to hybrid mode. The mechanism is based on power control between base stations in order to mitigate the decline in hybrid mode femtocells (which thus suffer by the spectrum allocation), reducing transmission power in adjacent stations to reduce interference to the former. It is a distributed collaboration between the stations, with the ultimate goal to spread the burden of non-registered users over all the neighboring femtocells. Thus, instead of some of them suffering a large reduction, all members of the cluster undergo small decrease. The benefits of the mechanism are multiple. First, in multiple femtocells installations, the accumulated interference can strangle an unregistered user. Controlled hybrid operation provides the necessary resources in those users while respecting rightfully prioritized owners, and it flexibly adapts to situations compared to the fixed allocation approach. Second, the power control in clusters offers homogeneity and smaller swings in performance of registered users. Thirdly, since the power control always happens downwards, and as a result the total interference is reduced.

Then, a new algorithm was developed, again with a view to allocating resources in femtocells clusters, which however, is based on the creation and prioritization of user groups. The groups consist of registered and non-registered users and registered users to a neighboring femtocell. The introduction of the third class of users in this thesis can be seen as an extension of the basic idea of the hybrid access, intended for scenarios where there is high mobility of users within a region, and which is defined by a common interest, such as employees in a building of a company. This allows stations to exchange users depending on their location and also to protect users who suffer from high interference. The algorithm achieves an increase of the overall capacity offered by the members of the cluster to their users, increases the number of served users and protects the subscribers of femtocells respecting their priority of access to available resources.

Finally, exploring ways for better energy efficiency we adopt the known practice of disabling macrocell base stations (sleep mode) in femtocells layer. Sleep mode is a medium state of low power, where femtocells have turned off only some of their components. Based on the idea that with every new deployment of a closed access femtocell, large interference appears on nearby users who they may find the solution of poor service to a

closed access femtocell of their own. This will lead to a great number of femtocells deployed in a small area, where their number will reflect the exclusivity of usage by the users and not their demands on capacity. In this light, we developed an algorithm for such a case, where some femtocells are selected to operate in sleep mode, redistributing their users in a way that would be in the interests of users (registered or not), and the network, leading to reduced interference, smarter user allocation, improved data rates and better energy efficiency. Exploring different policies regarding which base stations will be disabled and when the transition will take place, we evaluate for all cases and for different density scenarios the improvement in the performance of all involved users and the energy savings of the network.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί τον επίλογο των μεταπτυχιακών μου σπουδών στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής (ΤΜΗΥΠ) του Πανεπιστημίου Πατρών. Ο τίτλος της διδακτορικής διατριβής είναι «Τεχνικές Ανάπτυξης Και Βελτιστοποίησης Ετερογενών Κινητών Δικτύων Επομένης Γενιάς Βασισμένα Σε Μικροκυψέλες».

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όσους με βοήθησαν, με συμβούλευσαν και μου συμπαρασταθήκαν όλο αυτό το διάστημα. Ο Καθηγητής μου Χρήστος Μπούρας, Καθηγητής του ΤΜΗΥΠ του Πανεπιστημίου Πατρών και Επιστημονικός Υπεύθυνος της Ερευνητικής Μονάδας 6 του Ι.Τ.Υ.Ε., υπήρξε ο σύμβουλος και δάσκαλός μου σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Θέλω να τον ευχαριστήσω θερμά για την καθοδήγηση και την επιμονή του για συστηματική δουλειά, η οποία θέλω να ελπίζω ότι έφερε αποτελέσματα και να του ευχηθώ πάντα επιτυχίες και αντοχή.

Στη συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής: τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ, κ. Ιωάννη Γαροφαλάκη και τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Κωνσταντίνο Μπερμπερίδη, 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 διατριβής: τον Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Γεώργιο Αλεξίου, τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΤΜΗΥΠ κ. Κυριάκο Βλάχο, τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών κ. Σπύρο Δενάζη 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, οι οποίοι με καθοδήγησαν και με βοήθησαν σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας με τις πολύτιμες και ουσιαστικές τους γνώσεις και συμβουλές.

Κλείνοντας, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Δημήτριο και Αλίκη καθώς και στην αδερφή μου, Άννα, για τη συμβολή και τη στήριξη τους σε αυτή την προσπάθεια αλλά και για όλα όσα έχουν κάνει για εμένα.

Πάτρα 2017
Δηλές Γεώργιος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
EXECUTIVE SUMMARY	10
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	13
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	15
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	18
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	29
ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	30
2.1. <i>Επίδραση των κινητών δικτύων</i>	30
2.2. <i>1^η – 2^η γενιά</i>	32
2.3. <i>3^η γενιά</i>	33
2.4. <i>4^η γενιά</i>	35
2.5. <i>5G and beyond</i>	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: 4G-5G	37
4G – 5G	38
3.1. <i>LTE/LTE-A στόχοι και εξέλιξη</i>	38
3.2. <i>LTE-A προδιαγραφές</i>	40
3.3. <i>LTE-A Αρχιτεκτονική</i>	41
3.3.1. <i>Αρχιτεκτονική Συστήματος</i>	41
3.3.2. <i>Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων</i>	44
3.4. <i>LTE-A τεχνολογίες</i>	45
3.4.1. <i>Έκδοση 8</i>	45
3.4.2. <i>Έκδοση 9</i>	48
3.4.3. <i>Έκδοση 10</i>	48
3.4.4. <i>Έκδοση 11</i>	49
3.4.5. <i>Έκδοση 12</i>	49
3.4.6. <i>Εκδόσεις 13-14</i>	50
3.4.7. <i>Έκδοση 15 (LTE evolution και IMT 2020)</i>	50
3.5. <i>5G</i>	51

3.6.	5G επιδόσεις.....	52
3.7.	5G Radio Access Network	53
3.8.	5G Machine-type communication	55
3.9.	5G Χρήση Φάσματος	55
3.10.	Επιπλέον 5G τεχνολογίες.....	56
3.11.	5G Αρχιτεκτονική.....	58
3.12.	Οργανισμοί και χρονοδιάγραμμα 5G	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: FEMTOCELLS		63
FEMTOCELLS		64
4.1.	Εισαγωγή	64
4.2.	Ο ρόλος των femtocells στις νέες γενιές δικτύων	68
4.3.	Λειτουργικότητα.....	69
4.4.	Παρεμβολές.....	70
4.5.	Λειτουργίες πρόσβασης	80
4.6.	Ανίχνευση και ακύρωση παρεμβολών	84
4.6.1.	Ορισμός	84
4.6.2.	Μέθοδοι ανίχνευσης παρεμβολών	85
4.7.	Τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών.....	86
4.7.1.	ICIC.....	86
4.7.2.	eICIC - FeICIC.....	93
4.1.	Αρχιτεκτονική	95
4.2.	Αυτο-οργανώσιμα δίκτυα.....	98
4.3.	Sleep mode	99
4.4.	Πρωτόκολλο Επικοινωνίας X2	101
4.5.	Άλλα τεχνικά ζητήματα.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ		105
ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ		106
5.1.	Πολιτικές υβριδικής πρόσβασης για δίκτυα femtocells	106
5.2.	Στρατηγικές κατάστασης αναμονής στο femtocell στρώμα	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ		113
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ		114
6.1.	Μοντέλο ανάλυσης παρεμβολών.....	114
6.2.	Μοντέλο sleep λειτουργίας femtocell	116
6.3.	Εξομοιωτής	118
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ		122
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ.....		123
7.1.	Αλγόριθμος αποζημίωσης και έλεγχος ισχύος	123

7.1.1.	Απόφαση κατωφλίου φάσματος.....	124
7.1.2.	Έλεγχος ισχύος.....	125
7.2.	Αξιολόγηση επίδοσης αλγορίθμου.....	127
7.2.1.	Παράμετροι εξομοίωσης.....	127
7.2.2.	Πειραματικά αποτελέσματα.....	128
7.3.	Αλγόριθμος ανακατανομής χρηστών.....	132
7.3.1.	Συστοιχίες femtocells.....	133
7.3.2.	Κατηγορίες χρηστών.....	133
7.3.3.	Πολιτική κατανομής φάσματος.....	134
7.4.	Αξιολόγηση επίδοσης αλγορίθμου.....	136
7.4.1.	Παράμετροι εξομοίωσης.....	136
7.4.2.	Πειραματικά αποτελέσματα.....	136
7.5.	Συνδυασμός αλγορίθμων.....	139
7.6.	Περιορισμοί.....	144
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ.....	147
	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ.....	148
8.1.	Αλγόριθμος κατάστασης αναμονής.....	148
8.2.	Ενεργειακή απόδοση.....	151
8.3.	Παράμετροι εξομοίωσης.....	152
8.4.	Πειραματικά αποτελέσματα.....	153
8.5.	Έλεγχος ισχύος.....	156
8.6.	Πειραματικά αποτελέσματα.....	158
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	161
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	162
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10:	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	167
	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	168
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I:	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ.....	171
	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ.....	172
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II:	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	179
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	180
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV:	ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	189
	ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	190

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Κάλυψη του παγκόσμιου πληθυσμού από κινητά δίκτυα (ITU Statistics)	31
Εικόνα 2. Στάδια εξέλιξης και σημαντικότερες βελτιώσεις των εκδόσεων LTE.	39
Εικόνα 3. Η αρχιτεκτονική του EPS.	42
Εικόνα 4. Οι λειτουργικές αρμοδιότητες του E-UTRAN και του EPC.	42
Εικόνα 5. Η αρχιτεκτονική του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN.	43
Εικόνα 6. Η User Plane Στοιβά Πρωτοκόλλων.	45
Εικόνα 7. Η Control Plane στοιβά πρωτοκόλλων.	45
Εικόνα 8. Ο διαχωρισμός του φάσματος σε φορείς βάση του OFDMA (downlink) και SC-FDMA (uplink).	46
Εικόνα 9. Κάθε τύπος υπηρεσίας θα χρησιμοποιεί το δικό της slice δικτύου	59
Εικόνα 10. Οι 5G υποδομές θα παρέχουν ολοκληρωμένη δικτύωση και θα παρέχουν υψηλές δυνατότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας	60
Εικόνα 11. Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης προς το 5G από την ITU	61
Εικόνα 12. Αριθμός παραγγελιών small cells τα τελευταία 4 χρόνια.....	69
Εικόνα 13. Τα femtocells συνδέονται με το δίκτυο κορμού (CN) διαμέσου της backhaul σύνδεσης του χρήστη.....	69
Εικόνα 14. Ο χρήστης 1 δεν μπορεί να γνωρίζει ποιοι υπο-φορείς χρησιμοποιούνται ήδη, αν δεν ενημερωθεί από το femtocell.	74
Εικόνα 15. Χωρίς την σωστή κατανομή των πόρων στο πεδίο της συχνότητας, μπορεί να προκύψουν ισχυρές παρεμβολές.	75
Εικόνα 16. Σενάρια διαστρωματικών παρεμβολών.	78
Εικόνα 17. Η κύρια πηγή των παρεμβολών στο downlink είναι τα femtocells προς τους χρήστες macrocell.	79
Εικόνα 18. Διαμερισμός συχνοτήτων σε PFR (πάνω) και SFR (κάτω).....	88
Εικόνα 19. Το SFFR αποτελεί συνδυασμό του SFR και ελέγχου ισχύος	88
Εικόνα 20. Τα femtocells μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ανεκμετάλλευτο φάσμα στο σημείο εγκατάστασής τους, αν ο διαμερισμός έχει γεωγραφικά χαρακτηριστικά.	90
Εικόνα 21. Η ανίχνευση των συνθηκών μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές σε λανθασμένα συμπεράσματα. Είτε στην αναίτια αύξηση της ισχύος του femtocell (αριστερά), είτε στην μείωσή της με αρνητικές επιπτώσεις στην εμβέλεια κάλυψης.	91
Εικόνα 22. ABS και RP-ABS.....	94
Εικόνα 23. FeICIC CRS ακύρωση παρεμβολών σε επίπεδο πομπού με τη χρήση ABS.....	95
Εικόνα 24. Η ενσωμάτωση των femtocells στην αρχιτεκτονική του δικτύου.	95
Εικόνα 25. Διάγραμμα ενός LTE δικτύου που περιλαμβάνει ένα δίκτυο femtocell.	96
Εικόνα 26. Λογικό μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου femtocells	97
Εικόνα 27. Η στοιβά πρωτοκόλλου ελέγχου που χρησιμοποιείται από τον εξοπλισμό δικτύωσης των LTE femtocells.	98
Εικόνα 28. Μέρη υλικού ενός τυπικού femtocell.....	101
Εικόνα 29. Ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ eNBs μέσω X2 κατά την Load Indication διαδικασία.....	102
Εικόνα 30. Ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ eNBs μέσω X2 κατά την Resource Status Reporting Initiation διαδικασία	102
Εικόνα 31. Γραφικό περιβάλλον εξομοιωτή	118

Εικόνα 32. Παράδειγμα παραγόμενων αποτελεσμάτων από τον εξομοιωτή.....	120
Εικόνα 33. Περίληψη των βασικών σημείων του αλγόριθμου	126
Εικόνα 34. Χωρητικότητα των macro χρηστών χωρίς παρεμβολές από το femtocell, με παρεμβολές και υπό καθεστώς υβριδικής προσβασης.....	128
Εικόνα 35. Απαιτούμενη διάθεση πόρων από femtocells για αναπαραγωγή της απόδοσης των macrocell χρηστών.....	129
Εικόνα 36. Χωρητικότητα συνδρομητικών χρηστών ανα femtocell σε CSG, απλή υβριδική και προτεινόμενη πρόσβαση	130
Εικόνα 37. Διαφορά στη ρυθμαπόδοση των συνδρομητών femtocells σε συστοιχίες.....	131
Εικόνα 38. Σύγκριση της συνολικής χωρητικότητας femtocells μεταξύ CSG προσέγγισης και του προτεινόμενου αλγορίθμου.....	132
Εικόνα 39. Κατανομή διαθέσιμου φάσματος femtocells βάσεις της κατηγορίας χρήση ..	134
Εικόνα 40. Περίληψη των βασικών σημείων του αλγορίθμου	136
Εικόνα 41. CDF των χρηστών κατηγορίας A πριν και μετά την είσοδο των χρηστών κατηγορίας Γ στο femto στρώμα	137
Εικόνα 42. CDF των συνδρομητών (A και B κατηγορίας) πριν και μετά την ανακατανομή τους	138
Εικόνα 43. Επίπτωση της ανακατανομής χρηστών δύο femtocells στη ρυθμαπόδοσή τους	139
Εικόνα 44. Ψευδοκώδικας συνολικού μηχανισμού	140
Εικόνα 45. Στιγμιότυπο της τοπολογίας του δικτύου κατά την εξομοίωση	141
Εικόνα 46. CDF του ρυθμού μετάδοσης των macrocell χρηστών και αναπαραγωγή της μέσω της σύνδεσής τους στα femtocells.....	142
Εικόνα 47. Ρυθμαπόδοση των συνδρομητών 7 femtocells στα διαδοχικά βήματα του μηχανισμού: Λειτουργία κλειστής πρόσβασης, λειτουργία υβριδικής πρόσβασης και έλεγχος ισχύος	142
Εικόνα 48. CDF της χωρητικότητας των femtocells οι χρήστες των οποίων παίρνουν μέρος στην ανακατανομή χρηστών. Η συνολική χωρητικότητα βελτιώνεται	143
Εικόνα 49. CDF της χωρητικότητας του συνόλου των συνδρομητικών χρηστών πριν και μετά την εφαρμογή του μηχανισμού. Ο έλεγχος ισχύος και η ανακατανομή των χρηστών καθιστούν την επίδραση της υβριδικής πρόσβασης ασήμαντη	144
Εικόνα 50. Προσθήκη του spectrum coordinator (SC) στην αρχιτεκτονική των femtocells	145
Εικόνα 51. Ψευδοκώδικας μηχανισμού.....	151
Εικόνα 52. Συνολικά σχηματιζόμενες συστοιχίες	153
Εικόνα 53. Ρυθμαπόδοση των συνδρομητικών χρηστών σε femtocells συστοιχιών.....	154
Εικόνα 54. Ρυθμαπόδοση μη συνδρομητικών χρηστών στην εμβέλεια συστοιχιών femtocells.....	155
Εικόνα 55. Ποσοστιαία (%) ενεργειακά κέρδη για όλα τα femtocells που ανήκουν σε συστοιχίες	156
Εικόνα 56. Αριθμός μερικώς απενεργοποιημένων femtocells για τις δύο εκδόσεις αλγορίθμου ως προς την πυκνότητα εγκατάστασης femtocells	158
Εικόνα 57. CDF της ρυθμαπόδοσης των χρηστών που είναι συνδρομητές σε femtocells – μέρη συστοιχιών	159
Εικόνα 58. CDF της ρυθμαπόδοσης μη συνδρομητικών χρηστών σε ακτίνα κάλυψης femtocell συστοιχιών	160

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Κύριες IMT-Advanced προδιαγραφές	40
Πίνακας 2. Ο αριθμός των διαθέσιμων resource blocks για κάθε εύρος φάσματος.....	46
Πίνακας 3. Κύριες διαφορές μεταξύ των picocells και femtocells.	67
Πίνακας 4. Πιθανές πηγές παρεμβολών κατά περίπτωση.	72
Πίνακας 5. Κατανάλωση ενέργειας των μερών του femtocell. Με αστερίσκο τα μέρη που απενεργοποιούνται.....	117
Πίνακας 6. Παράμετροι εξομοίωσης	127
Πίνακας 7. Παράμετροι εξομοίωσης	152

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ίσως ποτέ άλλοτε στην ιστορία, δεν είχε υπάρξει τέτοια δραστική αλλαγή στη ζωή του ανθρώπου και στη γενικότερη λειτουργία της ανθρωπότητας σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα, όσο αυτή που παρατηρούμε να συμβαίνει τον τελευταίο αιώνα και ειδικότερα τα τελευταία 20 χρόνια. Η βιομηχανική επανάσταση εισήγαγε νέες τεχνολογίες που συνεισέφεραν στην ταχύτερη ανάπτυξη της κοινωνίας. Αυτό οδήγησε σε ένα εποικοδομητικό κύκλο, όπου η ταχύτερη ανάπτυξη έφερε μεταξύ άλλων αύξηση του βιοτικού και μορφωτικού επιπέδου, ευρύτερη συμμετοχή των ανθρώπων στα κοινά και καλύτερη διάδοση πληροφορίας που με τη σειρά τους οδήγησαν σε μεγαλύτερη κατανόηση του κόσμου, με αποτέλεσμα την ανακάλυψη νέων επιδραστικών τεχνολογιών και ακόμα μεγαλύτερη ανάπτυξη. Ο κύκλος αυτός ανάπτυξης-καινοτομίας δείχνει να κινείται με ολοένα μεγαλύτερη ταχύτητα, με τους ειδικούς πλέον να δυσκολεύονται να προβλέψουν τις νέες τεχνολογίες ακόμα και για διάστημα λίγων ετών.

Στην εκρηκτική αυτή πορεία, σημαντικό ρόλο έχουν παίξει οι Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνίας (ΤΠΕ-IT), οι οποίες εκδημοκρατίζοντας την ροή πληροφορίας, διευρύνοντας τη διάδοσή της, αντικαθιστώντας χρονοβόρες διαδικασίες και καθιστώντας δυνατές νέες πρωτόγνωρες λειτουργίες και υπηρεσίες, έχουν επηρεάσει στον μεγαλύτερο ίσως βαθμό τον τρόπο ζωής μας. Σημαντικό μερίδιο στην επίδρασή τους στην καθημερινότητά μας έφερε η τεράστια ανάπτυξη και εξάπλωση των κινητών δικτύων. Αίροντας γεωγραφικούς, κοινωνικούς, και άλλους πρακτικούς περιορισμούς που μέχρι τώρα θεωρούνταν ανυπέρβλητοι, μπορούμε να πούμε ότι τα κινητά δίκτυα έδωσαν τη δυνατότητα στο άνθρωπο για μια μόνιμη σύνδεση και συνύπαρξη με την τεχνολογία παντού και πάντα. Αυτή η εύκολη, φθηνή, μόνιμη συνύπαρξη προσέφερε την ελευθερία και έστρωσε το έδαφος για πλήθος δυνατοτήτων, υπηρεσιών και ευκολιών που έχουν αλλάξει άρδην τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζουμε τον τρόπο ζωής μας στο σύνολό του.

Η ανάπτυξη στον τομέα αυτό δεν δείχνει σημάδια κόπωσης. Αντίθετα συνεχίζεται αδιάκοπα και αναμένεται να ακολουθήσει υψηλούς ρυθμούς καινοτομίας τουλάχιστον για τις επόμενες δεκαετίες. Οι νέες τεχνολογίες οδηγούν σε ακόμα πιο φιλόδοξες ιδέες και αυτές σε νέες τεχνολογικές καινοτομίες. Στην αυγή της 5^{ης} γενιάς κινητών δικτύων που διανύουμε αυτή τη στιγμή, οι στόχοι που έχουν τεθεί είναι εκθετικά φιλόδοξοι: μεγάλη υποστήριξη της δραματικής αύξησης στην κίνηση των δεδομένων, σύνδεση πολλαπλάσιων συσκευών σε σχέση με τώρα, υποστηρίζοντας τη διασύνδεση κάθε οντότητας που μπορεί να επωφεληθεί από τη σύνδεσή του στο δίκτυο, υπερ-υψηλές ταχύτητες, χαμηλότερη κατανάλωση, χαμηλότερη καθυστέρηση και υποστήριξη πλήθος νέων υπηρεσιών, τεχνολογιών και ιδεών όπως το Internet of Things (IoT) και το Machine to Machine communication (M2M). Οι φιλόδοξοι αυτοί στόχοι μεταφράζονται γρήγορα σε τεχνολογικές προκλήσεις που ζητούν απάντηση. Οι ανάγκες αυξάνονται ραγδαία ενώ οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι. Η απόδοση ανά link πλησιάζει το θεωρητικό όριο

και οι λύσεις αναζητούνται σε αποδοτικότερες τεχνολογίες και εξελιγμένες τοπολογίες που θα εξυπηρετήσουν τις αυξημένες απαιτήσεις ανά μονάδα επιφάνειας.

Κύριο συστατικό των νέων δικτύων αναμένεται να είναι η πυκνή ετερογενή δομή των σταθμών βάσης τους. Τα λεγόμενα *small cells*, ήτοι φθηνοί, εύκολοι στην εγκατάσταση σταθμοί βάσης μικρής εμβέλειας θα χρησιμοποιηθούν προκειμένου να βελτιώσουν τη φασματική απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας, και να καλύψουν τις αυξημένες ανάγκες. Χρησιμοποιώντας ένα μείγμα από *macrocell*, *picocell*, *femtocell* και *relay* σταθμούς βάσης, τα ετερογενή δίκτυα θα επιτρέπουν ευέλικτη και χαμηλού κόστους υλοποίηση και θα προσφέρουν μια ομοιογενή ευρυζωνική εμπειρία στους χρήστες ανεξάρτητα της θέσης τους στο δίκτυο. Τα *femtocells* που αποτελούν και τη μικρότερη έκδοση των *small cells* σε επίπεδο ισχύος και εμβέλειας (<15m), στοχεύουν στην ικανοποίηση μικρού αριθμού χρηστών (<10) καλύπτοντας τις ανάγκες μιας οικίας ή μιας επιχείρησης. Αποτελούν την πιο ρηξικέλευθη υλοποίηση των «αρχών» των *small cells* στοχεύοντας στην κάλυψη εξαιρετικά τοπικών αναγκών με τον φθηνότερο τρόπο, με την εγκατάστασή και συντήρησή να είναι κυρίως ευθύνη του ιδιοκτήτη, και τη σύνδεση με το *backhaul* να παρέχεται μέσω της οικιακής *Digital Subscriber Line (DSL)*, ή άλλης ευρυζωνικής σύνδεσης του ίδιου του χρήστη.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης όμως, τα ετερογενή δίκτυα εισάγουν και νέες προκλήσεις και κινδύνους. Ενώ η τοποθέτηση των *macrocell* σταθμών βάσης σε ένα δίκτυο βασίζεται σε προσεκτικό σχεδιασμό, η τοποθέτηση των *small cells* μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο *ad hoc*, με βάση μόνο μια πρόχειρη γνώση των ζητημάτων της κάλυψης και της πυκνότητας της κυκλοφορίας στο δίκτυο. Τέτοια ετερογενή συστήματα θα είναι σημαντικά πιο περίπλοκα στην ανάπτυξή τους από ότι τα σημερινά δίκτυα και ως εκ τούτου απαιτούν απλές, προσαρμοσμένες και εύρωστες στρατηγικές ανάπτυξης σε σύγκριση με μια προσέγγιση ανάπτυξης συμβατικών υποδομών δικτύων κινητής τηλεφωνίας, ενώ για την ενίσχυση της απόδοσης και την εξαγωγή του μέγιστου οφέλους από τα δίκτυα αυτά, προηγμένες τεχνικές συντονισμού και μετάδοσης θα χρειαστούν.

Η βελτίωση της συνεργασίας των σταθμών αυτών μέσω της μεταξύ τους κατανομημένης επικοινωνίας, θα συμβάλλει στην βελτίωση της απόδοσης των χρηστών τόσο του υποδικτύου αυτού, μέσω της καλύτερης εκμετάλλευσης πόρων και τη διαχείριση των χρηστών, αλλά και του ευρύτερου μακρο-κυψελοειδούς δικτύου μέσα από την μείωση του φόρτου σε αυτό το «στρώμα» χρηστών. Παράλληλα η χρήση καινοτόμων μεθόδων όπως η υβριδική λειτουργία των *small cells* και η μεταφορά υπαρχόντων τεχνικών του ανώτερου (*macro*) στρώματος όπως το *sleep mode* στο επίπεδο των *small cells* μπορούν να βελτιώσουν περεταίρω την απόδοση του δικτύου τόσο σε επιδόσεις ταχύτητας δεδομένων όσο και σε επίπεδο ενεργειακής κατανάλωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στόχος της παρούσης διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη των μηχανισμών μετάδοσης και των τεχνικών ανάπτυξης σε ετερογενή δίκτυα κινητών επικοινωνιών επόμενης γενιάς προκειμένου να βρεθούν νέοι τρόποι αξιοποίησης των μικροκυψελών και νέες μέθοδοι και μηχανισμοί για τη καλύτερη εκμετάλλευση των πόρων τους. Κατά τη διατριβή, διερευνήθηκαν οι δυνατότητες που

προσφέρουν οι πυκνότερες δομές femtocells της 4^{ης} και 5^{ης} γενιάς, σε επίπεδο μεταξύ τους συντονισμού για καλύτερη απόδοση μέσω της βελτίωσης στην κατανομή πόρων, και αναζητήθηκαν καλύτερες στρατηγικές επιλογής σταθμού βάσης. Επιπλέον, προτάθηκαν πιο αποτελεσματικές μέθοδοι ακύρωσης παρεμβολών αλλά και στρατηγικές ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των σταθμών για μείωση της κατανάλωσης.

Η παρούσα εργασία δομείται σε κεφάλαια ως εξής:

Η εργασία ξεκινάει με την παρουσίαση των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας με έμφαση στα κινητά δίκτυα επικοινωνιών επόμενης γενιάς. Αρχικά, γίνεται μία ιστορική αναδρομή και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων συστημάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται εκτενώς τα συστήματα 4^{ης} και 5^{ης} γενιάς. Το σύστημα 4^{ης} γενιάς LTE-Advanced περιγράφεται διεξοδικά και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά, η αρχιτεκτονική του δικτύου, οι κύριες τεχνολογίες και οι υπηρεσίες που εισήγαγε και επιτρέπουν την επίτευξη των απαιτητικών σχεδιαστικών στόχων. Στη συνέχεια αναφέρονται αντίστοιχα οι νέες τεχνολογίες και οι κύριες προσεγγίσεις που συγκεντρώνουν τις υψηλότερες πιθανότητες να ενσωματωθούν στο 5G πρότυπο που είναι ακόμα υπό εξέλιξη.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφιερώνεται στα femtocells. Αρχικά περιγράφεται η λειτουργία τους, η αρχιτεκτονική τους και η διασύνδεσή τους με το υπόλοιπο δίκτυο. Στη συνέχεια δίνονται τα εγνωσμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που εμφανίζουν, και τα επακόλουθα τεχνικά ζητήματα που εμφανίζονται στο δημιουργούμενο ετερογενές δίκτυο που χρήζουν επίλυσης ή βελτίωσης. Παρουσιάζεται αναλυτικά το πεδίο των παρεμβολών εξηγώντας τα πιθανά σενάρια εμφάνισης και τον τρόπο που επηρεάζουν την απόδοση του δικτύου. Τέλος, αναλύονται διάφορες στρατηγικές διαχείρισης πόρων και εξετάζονται οι γνωστότερες τεχνικές σε υπάρχοντα συστήματα που έχουν στόχο τη μέγιστη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων σε κινητά δίκτυα (ετερογενή και μη), μειώνοντας τις παρεμβολές και αυξάνοντας την απόδοση του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση της ερευνητικής περιοχής που σχετίζεται με το περιεχόμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Επίσης, αναφέρονται λεπτομερειακά οι εργασίες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής και παρουσιάζονται τα σημεία εκείνα τα οποία διαφοροποιούν τις προσεγγίσεις που ακολουθήθηκαν στις εν λόγω εργασίες με την προσέγγιση που προτείνονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Το έκτο κεφάλαιο παρουσιάζει το περιβάλλον προσομοίωσης που δημιουργήσαμε για την εξομοίωση και αξιολόγηση των προτεινόμενων τεχνικών. Περιγράφεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, οι παραδοχές που έγιναν και οι προδιαγραφές και παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο έβδομο και όγδοο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι προτεινόμενες τεχνικές που ερευνήθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται λεπτομερώς οι τρεις αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν και απεικονίζονται και αναλύονται τα ευρήματα από τα πειράματα αξιολόγησή τους μέσω του εξομοιωτή σε ενδεικτικές αλλά χαρακτηριστικές συνθήκες.

Το ένατο και δέκατο κεφάλαιο συγκεντρώνουν τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης εργασίας και προτείνουν ανοιχτά και νέα θέματα πάνω στο πεδίο αυτό, που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας και επέκτασης της παρούσης διατριβής, αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΚΙΝΗΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

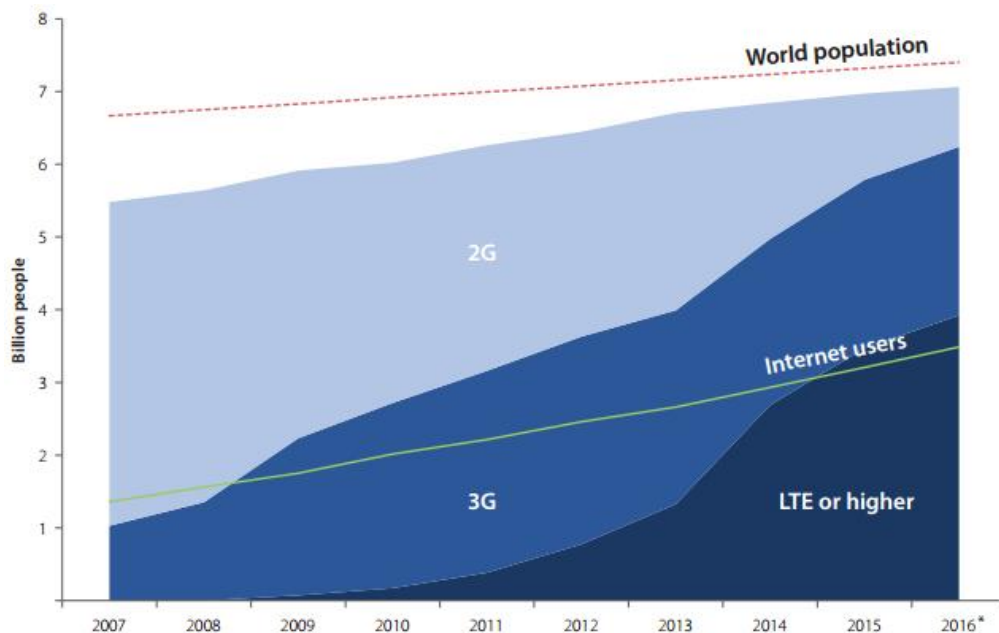
Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των κινητών δικτύων από την πρώτη εμφάνισή τους ως σήμερα. Το κεφάλαιο ακολουθεί και περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά και τα σημαντικότερα στοιχεία που εισήγαγε κάθε γενιά ξεκινώντας από τις βασικές, πρώιμες και περιορισμένων δυνατοτήτων τεχνολογίες της πρώτης γενιάς μέχρι και τις σύνθετες, εξελιγμένες τεχνολογίες της πέμπτης γενιάς που αναμένονται να παίξουν κύριο ρόλο στην κάλυψη των αυξημένων αναγκών του σύγχρονου τρόπου ζωής.

2.1. Επίδραση των κινητών δικτύων

Λίγοι τομείς μπορούν να περηφανευτούν για εξέλιξη τόσο ραγδαία όσο αυτή που χαρακτηρίζει τα κινητά δίκτυα επικοινωνιών. Λίγοι τομείς μπορούν επίσης να περηφανευτούν για την σαρωτική επίδρασή τους στην καθημερινότητα των πολιτών σε πλήθος εφαρμογών και εκφάνσεων του τρόπου ζωής μας. Η εξέλιξη των κινητών δικτύων ως προς την εμπορική αξιοποίηση τους αρχικά ξεκίνησε διστακτικά κυρίως την δεκαετία του '50, φθάνοντας με αργά βήματα ως την δεκαετία του '90 στο σημείο να χαρακτηρίζεται ως μια υπηρεσία για λίγους και πιθανώς υποσχόμενη. Από τότε οι προσδοκίες και των πιο αισιόδοξων υπερκαλύφθηκαν και οι ταχύτατοι ρυθμοί εξέλιξης έχουν πλέον γίνει μέρος της καθημερινότητας, χωρίς να φαίνεται ότι θα υπάρξει επιβράδυνση για τις δυο (τουλάχιστον) επόμενες δεκαετίες.

Η κρίσιμη καμπή της δεκαετίας του 90 δεν είναι καθόλου τυχαίο γεγονός. Φθάνοντας την τεχνολογία σε αρκετά ώριμο επίπεδο να υποστηρίξει χαμηλού κόστους ευρύτερη εμπορική αξιοποίηση, η άμεση αποδοχή από το αγοραστικό κοινό της ελευθερίας των επικοινωνιών που προσέφεραν οι ασύρματες τεχνολογίες ήταν κρίσιμη. Αντίστοιχα με την εκρηκτική εξέλιξη στον τομέα των υπολογιστών άπαξ και η τεχνολογία επέτρεψε στην αγορά να προσανατολιστεί από υψηλού κόστους εταιρικούς υπολογιστές σε υπολογιστές που μπορούσε να έχει κάθε σπίτι, η ζήτηση πλέον μπορούσε να υποστηρίξει μεγαλεπήβολα σχέδια εξέλιξης και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών. Οι ρυθμοί εξέλιξης πλέον έχουν φθάσει σε τέτοιο σημείο που οτιδήποτε πέραν της συνεχούς και ακατάπαυστης βελτίωσης σε υπηρεσίες θεωρείται απαράδεκτο τόσο σε ανταγωνιστικό επίπεδο μεταξύ των εταιριών κινητής τηλεφωνίας όσο και από την πλευρά των απαιτήσεων του καταναλωτή.

Παράλληλα, η εξάπλωση που επέφεραν οι δύο τελευταίες δεκαετίες είναι πρωτοφανής. Μέσα σε 20 χρόνια οι συνδρομές ανέρχονται σε μερικά δισεκατομμύρια και προσφέρεται κάλυψη στο 95% του παγκόσμιου πληθυσμού [1]. Η νέα γενιά 5G έχει θέσει στόχο την διασύνδεση των ανθρώπων αλλά και συσκευών τόσο με τους χρήστες όσο και μεταξύ τους (M2M) εκτοξεύοντας των αριθμό των διασυνδεδεμένων οντοτήτων σε ένα δίκτυο και επεκτείνοντας τη διεύθυνση των ασύρματων επικοινωνιών ακόμα περισσότερο στη ζωή μας.



Εικόνα 1. Κάλυψη του παγκόσμιου πληθυσμού από κινητά δίκτυα (ITU Statistics)

Δεν είναι δύσκολο να κατανοήσουμε τους λόγους που οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας συνάντησαν και συναντούν τέτοιας απήχησης. Οι ασύρματες επικοινωνίες ήσαν τους περιορισμούς που έθεταν οι ενσύρματες τεχνολογίες και δημιούργησαν έδαφος για την εκμετάλλευση υπηρεσιών σε νέες περιοχές. Η ανθρώπινη επικοινωνία, ως μια βαθιά ανάγκη του ανθρώπου διευκολύνθηκε φέρνοντας σε επαφή ανθρώπους ξεπερνώντας γεωγραφικούς περιορισμούς και μορφολογικές ιδιαιτερότητες. Λειτουργώντας παράλληλα ως κύριο συστατικό για τη συνεργασία, συνεννόηση άρα και πρόοδο των ανθρώπων έγινε όχημα μετάδοσης ιδεών και πλατφόρμα ανάπτυξης υπηρεσιών και εργαλείων που επηρέασαν όχι μόνο την επικοινωνία αλλά και ολόκληρη τη λειτουργία του σύγχρονου κόσμου όπως τον γνωρίζουμε σήμερα, από τον τομέα της εργασίας μέχρι τους τρόπους διασκέδασης και ψυχαγωγίας. Ακόμα πιο εντυπωσιακό είναι το γεγονός πως η εξέλιξη-επίδραση δεν έχει φθάσει επ' ουδενί στο τέλος της διαδρομής της. Αντίθετα οι άμεσες φιλοδοξίες και στόχοι για τις νέες γενιές αναμένεται να φέρουν μια ακόμα «επανάσταση» με τα χαρακτηριστικά τους να πλησιάζουν ότι πριν από λίγα μόλις χρόνια θεωρούνταν επιστημονική φαντασία.

Για να κατανοήσουμε όμως, το παρόν και το μέλλον, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το παρελθόν. Στη συνέχεια θα περιδιαβούμε συνοπτικά την αξιοθαύμαστη διαδρομή που ακολούθησε η εξέλιξη των κινητών δικτύων μέχρι σήμερα, αναφέροντας τις κυριότερες καινοτομίες κάθε γενιάς και τις τεχνολογίες-σταθμούς που θεωρούνται ότι έδωσαν την μεγαλύτερη ώθηση στον δρόμο της εξέλιξης των κινητών δικτύων σε αυτό που γνωρίζουμε σήμερα. Πιο συγκεκριμένα θα αναφερθούμε στα συστήματα 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς ενώ θα κάνουμε μια σύντομη αναφορά στην τρέχουσα (4^η) και επόμενη (5^η) γενιά. Αναλυτικά αυτές θα παρουσιαστούν σε επόμενα κεφάλαια, καθώς εκεί θα γίνει λεπτομερέστερη καταγραφή σε επίπεδο αρχιτεκτονικών, τεχνολογιών, στόχων κλπ.

2.2. 1^η – 2^η γενιά

Αν και θεωρείται πρόσφατη η διείσδυση της κινητής στη ζωή μας, η πρώτη εμπορική υπηρεσία τηλεφωνίας λειτούργησε επισήμως το 1946 από την εταιρεία AT&T. Συστήματα όπως το Mobile Telephone Service της ίδιας χρονιάς από την Bell System, και μετέπειτα το Improved Mobile Telephone Service το 1964, θεωρούνται ως οι πρόγονοι των μετέπειτα κυψελωτών συστημάτων, για αυτό και αναφέρονται συχνά ως 0G (zero generation) συστήματα. Αν και η χρήση τους ίσχυσε για μεγάλη περίοδο, μέχρι την άφιξη της πρώτης γενιάς συστημάτων τη δεκαετία του '80, ποτέ δεν μπόρεσαν να εξαπλωθούν εξαιτίας της ακριβής απαιτούμενης τεχνολογίας υλοποίησης την εποχή εκείνη και της μη πρακτικής εφαρμογής τους (ογκώδεις πομποδέκτες, μη αποδοτική χρήση διαθέσιμου φάσματος κλπ.).

Η ίδια εταιρεία εισήγαγε την ιδέα της κυψέλης διαμέσου της οποίας γινόταν εφικτή η επαναχρησιμοποίηση των ραδιοσυχνοτήτων. Η ιδέα αυτή κυριάρχησε σε όλα τα ακόλουθα δίκτυα και η εφαρμογή της το 1980 ορίζει την πρώτη γενιά κυψελωτών συστημάτων ή αλλιώς 1G (first generation). Ο διαχωρισμός του δικτύου σε κυψέλες, προκάλεσε ραγδαία εξέλιξη στις διαθέσιμες υπηρεσίες αυξάνοντας κατακόρυφα την απόδοση του δικτύου. Τα συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν αναλογική σηματοδότηση για τη διαμόρφωση της φωνής, αν και η επικοινωνία των σταθμών με το υπόλοιπο τηλεφωνικό σύστημα γινόταν ψηφιακά. Από τα πρώτα δίκτυα πρώτης γενιάς είναι το Nordic Mobile Telephone (NMT) το 1979 στη Σκανδιναβία, όπως και το Nippon Telegraph and Telephone (NTT) την ίδια εποχή στην Ιαπωνία. Οι ταχύτητες στο 1G κυμαίνονταν μεταξύ 2.9KBytes/s (28k modem) και 5.6KBytes/s (56k modem). Αν και η πρώτη γενιά έφερε επανάσταση στο πεδίο της ασύρματης επικοινωνίας, σύντομα έγινε φανερό πως η χρήση αναλογικών σημάτων περιόριζε σημαντικά την ποιότητα υπηρεσιών, αφού ήταν ευάλωτα σε φαινόμενα παρεμβολών, δεν επιδέχονταν εκτενή επεξεργασία και παρουσίαζαν χαμηλή φασματική απόδοση.

Η έλευση των ψηφιακών τηλεπικοινωνιών σηματοδότησε τη δεύτερη γενιά των δικτύων κινητής και επέτρεψε την αύξηση της χωρητικότητας των δικτύων, την παροχή μεγαλύτερης αξιοπιστίας και ποιότητας και τη δυνατότητα παροχής ευρύτερων υπηρεσιών. Τεχνικές όπως η διαίρεση χρόνου ή κώδικα που χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα εισάγονται σε αυτή τη γενιά. Εμφανίζονται επίσης και τα πρώιμα ετερογενή δίκτυα, με την εμφάνιση σταθμών διαφορετικών εμβλειών όπως macrocell, microcell και picocell για την κάλυψη κυψελών διαφορετικής έκτασης.

Καθώς η ανάπτυξη των δικτύων αυξανόταν με γρήγορους ρυθμούς, εμφανίστηκε η ανάγκη για συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων οντοτήτων. Μεταξύ των διάφορων προτύπων 2G, όπως τα cdmaOne (code-division multiple access One) και D-AMPS (Digital-Advanced Mobile Phone System), το πιο διαδεδομένο 2G πρότυπο αποδείχτηκε το Global System for Mobile communications (GSM), που αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Τηλεπικοινωνιακό Συμβούλιο (ETSI - European Telecommunications Standards Institute) με στόχο την ανάπτυξη ενός πανευρωπαϊκού δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Το αποτέλεσμα ήταν τόσο επιτυχημένο, που τελικώς υιοθετήθηκε παγκοσμίως, πλην της αμερικανικής

ηπείρου. Το GSM δίκτυο υποστηρίζει τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης τόσο στο πεδίο των συχνοτήτων (Frequency Division Multiple Access - FDMA), όσο και στο πεδίο του χρόνου (Time division multiple access - TDMA), ενώ λειτουργεί συνηθέστερα στις συχνότητες 900MHz, 1800MHz και 1900MHz.

Αν και επιτυχημένα, τα συστήματα αυτά είχαν σχεδιαστεί για μετάδοση φωνής και αδυνατούσαν να καλύψουν τις ανάγκες για υπηρεσίες που απαιτούσαν ευρύ φάσμα. Η τεχνολογία βασισμένη στη μεταγωγή πακέτου που εισήχθη στο σύστημα GSM για το σκοπό αυτό ονομάστηκε General Packet Radio Services (GPRS), και χαρακτηρίστηκε 2.5G. Η τεχνολογία αυτή επιτυγχάνει ταχύτητες έως και 114 kbit/s, προσφέροντας πολλές δυνατότητες και κάνοντας εφικτές υπηρεσίες όπως Short Message Service (SMS), Multimedia messaging service (MMS) και "Always on" διαδικτυακή πρόσβαση.

Σημαντική και άξια αναφοράς εξέλιξη αποτελεί και το πρότυπο Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE). Το EDGE επιτυγχάνει ταχύτητες έως και 500Kbits/s και καλύπτει πλήρως τις προδιαγραφές της 3^{ης} γενιάς, γεγονός που οδήγησε και στην επίσημη αποδοχή του ως 3G πρότυπο από την International Telecommunication Union (ITU). Παρόλα αυτά, καθώς αποτελεί ουσιαστικά μια βελτίωση των 2.5G GSM/GPRS δικτύων, θεωρείται μια προ-3G τεχνολογία.

2.3. 3^η γενιά

Καθώς η αύξηση στις ταχύτητες των ενσύρματων δικτύων εξοικείωσε τους χρήστες με την αποδοτική χρήση του διαδικτύου για ογκώδεις πολυμεσικές εφαρμογές, έγινε φανερό το χάσμα με τα ασύρματα δίκτυα. Ως εκείνη την εποχή, τα ασύρματα δίκτυα προσανατολιζόνταν κυρίως στη μεταφορά φωνής και όχι δεδομένων. Σε αυτήν την κατεύθυνση, η ITU, έθεσε συγκεκριμένα κριτήρια για την ανάπτυξη της νέας γενιάς κινητής τηλεφωνίας [2]. Τα κριτήρια αυτά ονομάστηκαν International Mobile Telecommunications -2000 (IMT-2000) και ήταν αρχικά προσανατολισμένα στη μετάδοση δεδομένων, περιλαμβάνοντας μεταξύ άλλων στόχους για όρια ταχύτητας τουλάχιστον 200 kbit/s, αλλά και για μεγαλύτερη αξιοπιστία στις παρεχόμενες υπηρεσίες.

Τα αρχικά στάδια ανάπτυξης για το 3G ξεκίνησαν στις αρχές του 1990, παράλληλα με την εξάπλωση των δικτύων δεύτερης γενιάς. Πολλά έργα ανά τον κόσμο (Ευρώπη, Ιαπωνία, ΗΠΑ και Νότια Κορέα) αναζήτησαν πρότυπα τα οποία θα εξυπηρετούσαν τις αυξανόμενες ανάγκες. Κοινό στοιχείο των περισσότερων ήταν η τεχνολογία Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA). Την εποχή εκείνη, κρίθηκε απαραίτητο να αφομοιωθεί ένα κοινό πρότυπο διεθνώς, ώστε να διευκολύνει τόσο τη δημιουργία ενιαίας αγοράς όσο και την υλοποίηση. Στο διαγωνισμό για το βέλτιστο πρότυπο, η ενοποιημένη πρόταση από Ιαπωνία και Ευρώπη προτιμήθηκε, και τέθηκε ως η επικρατέστερη τεχνολογία για τη Τρίτη γενιά. Για να διευκολυνθεί η συντονισμένη περαιτέρω προτυποποίηση του WCDMA, το έργο Third Generation Partnership Project (3GPP) δημιουργήθηκε, από οργανισμούς προτυποποίησης ανά τον κόσμο. Στόχος του έργου ήταν να αποφευχθεί η παράλληλη ανάπτυξη στις διάφορες περιοχές, υπέρ της δημιουργίας

κοινών προδιαγραφών. Στο 3GPP εκπροσωπούνται οι οργανισμοί από την Ιαπωνία, την Κίνα, την Ευρώπη, τις ΗΠΑ και την Νότια Κορέα.

Η πρώτη επίσημη έκδοση του προτύπου τρίτης γενιάς από το 3GPP, κάλυπτε τις απαιτήσεις IMT-2000 της ITU και καθόριζε μεταξύ άλλων, δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος φωνής και βίντεο, όπως και υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων πάνω από δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Το πρότυπο ονομάστηκε Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) και αρχικά επιτύγχανε ταχύτητες που έφταναν τα 384 kbit/s. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία W-CDMA, προκειμένου να προσφέρει αυξημένη φασματική απόδοση σε σχέση με παλιότερα συστήματα.

Η αρχιτεκτονική του μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη. τον κινητό σταθμό (Mobile Station - MS), δηλαδή τη συσκευή του χρήστη, το Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN) που αποτελεί την τεχνολογία του δικτύου ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Network - RAN) και το κεντρικό δίκτυο (core network) που περιέχει πύλες (gateways) για βασικές λειτουργίες, όπως διαχείριση κίνησης, πολιτική χρεώσεων, σύνδεση με άλλα δίκτυα κλπ. Το UTRAN αποτελείται από τους NodeBs, την εξέλιξη δηλαδή των σταθμών βάσης του GSM, και από τους Radio Network Controllers (RNC) που επιτελούν λειτουργίες όπως έλεγχος των NodeBs, διαχείριση συχνοτήτων κλπ. Το δίκτυο κορμού (core network) βασίζεται στο Mobile Application Part πρωτόκολλο όπως και τα δίκτυα GSM, γεγονός που μειώνει το κόστος αναβάθμισης σε 3G δίκτυα όσο αφορά τις εγκαταστάσεις. Σε κάποιες χώρες αντί της διασύνδεσης W-CDMA που χρησιμοποιεί frequency division duplexing (UTRA-FDD), χρησιμοποιούνται time division duplexing τεχνολογίες (UTRA-TDD). Υπάρχουν δύο UTRA-TDD υλοποιήσεις, η Time-division-Code division multiple access (TD-CDMA) και η Time Division Synchronous Code Division Multiple Access (TD-SCDMA) που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται στην Κίνα.

Παράλληλα με το πρότυπο της 3GPP, ο οργανισμός 3rd Generation Partnership Project 2 (3GPP2) παρουσίασε το δικό του πρότυπο CDMA2000 για 3G τηλεπικοινωνίες. Η διαφορετική προσέγγιση στόχευε στην συμβατότητα με τα 2G συστήματα cdmaOne (IS-95) που χρησιμοποιούνταν στην βόρεια Αμερική και τη νότιο Κορέα. Οι αρχικές εκδόσεις του προτύπου χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία ράδιο διασύνδεσης CDMA2000 1X (IS-2000) επιτυγχάνοντας θεωρητικές ταχύτητες έως και 153Kbit/s. Νεότερες εκδόσεις όπως η 1X Advanced και CDMA2000 1xEV-DO (Evolution-Data Optimized) προσφέρουν ταχύτητες μερικών Mbits/s και αυξημένη χωρητικότητα.

Αντίστοιχη εξέλιξη υπήρχε και στο σύστημα UMTS. Αρκετές αναβαθμίσεις πάνω στο W-CDMA πρότυπο, οδήγησαν στην δημιουργία του High Speed Packet Access (HSPA). Το πρότυπο αυτό ουσιαστικά αποτελείται από τα πρότυπα High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) and High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) που ορίζουν την downlink και την uplink διασύνδεση αντίστοιχα. Τα πρότυπα αυτά επέτρεπαν (θεωρητικά πάντα) ταχύτητες έως 14.4 Mbit/s στο downlink και 5.76 Mbit/s στο uplink.

Περαιτέρω βελτίωση είχε αποτέλεσμα το Evolved High Speed Packet Access (HSPA+) που πρόσφερε θεωρητικές ταχύτητες έως και 168 Mbit/s στο downlink και 22 Mbit/s στο uplink με την εκμετάλλευση της μεθόδου multiple-input and multiple-output (MIMO) που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές στη εκπομπή και λήψη. Καθώς η βελτίωση

στην απόδοση και τα χαρακτηριστικά των νέων προτύπων ήταν δραματική σε σχέση με τις αρχικές εκδόσεις 3G, για λόγους διαφοροποίησης τα πρότυπα αυτά κατηγοριοποιήθηκαν ως 3.5G ή 3G+.

Η απόδοση των 3G και 3G+ δικτύων επέτρεψε σε νέες υπηρεσίες να δημιουργηθούν. Υπηρεσίες όπως Mobile TV, Global Positioning System (GPS), Video Conferencing και Video on demand έγιναν διαθέσιμες στους καταναλωτές και άνοιξαν το δρόμο στη δραματική διεύδυση των κινητών δικτύων στη ζωή μας. Πάνω σε αυτό το δρόμο ξεκίνησε και η σχεδίαση και υλοποίηση των συστημάτων 4^{ης} γενιάς.

2.4. 4^η γενιά

Τον Μάρτιο του 2008, ο τομέας τηλεπικοινωνιών του ITU (ITU Radiocommunication Sector - ITU-R), έθεσε τις προδιαγραφές που θα έπρεπε να πληρούν τα αναπτυσσόμενα πρότυπα ώστε να θεωρηθούν 4ης γενιάς (4G ή 4th generation). Το σύνολο των προδιαγραφών ονομάστηκε International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced), και περιείχε μεταξύ άλλων κριτήρια για την ταχύτητα, την καθυστέρηση και την αποδοτικότητα φάσματος. Συγκεκριμένα όριζε τα νέα συστήματα να είναι επί του συνόλου τους δίκτυα μεταγωγής IP (Internet Protocol), παρέχοντας διασυνδεσιμότητα με τα υπάρχοντα ασύρματα πρότυπα. Μεταξύ των διαθέσιμων υπηρεσιών και των δυνατοτήτων του δικτύου, περιλαμβάνονται ultra-broadband πρόσβαση, διαδικτυακά παιχνίδια, τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, βίντεο τηλεδιασκέψεις και 3D βίντεο.

Τα πλέον κυρίαρχα και εμπορικά διαθέσιμα συστήματα που μπόρεσαν να χαρακτηριστούν 4ης γενιάς είναι το Mobile WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) του WiMAX Forum και το Long Term Evolution Advanced (LTE-A, εξέλιξη του LTE) από το 3GPP, οργανισμό υπεύθυνο και για τα GSM, GPRS και EDGE. Και τα δύο συστήματα αυτά, για να ανταποκριθούν στις αυξημένες απαιτήσεις IMT-A, βασίστηκαν στην τεχνολογία Orthogonal frequency-division Multiple Access (OFDMA) για την διαχείριση των καναλιών/φορέων. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στη διαδικασία Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM), που διαχωρίζει το διαθέσιμο φάσμα σε έναν αριθμό παράλληλων, ορθογώνιων υπο-φορέων (subcarriers), επιτρέποντας τη δυναμική ανάθεσή τους σε διαφορετικούς χρήστες και διαφορετικές χρονικές στιγμές, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης και μεγάλη φασματική απόδοση. Κύριο γνώρισμα της τεχνολογίας είναι η ορθογωνιότητα των υπο-φορέων και η μεγάλη ευελιξία στη χρήση τους, γεγονός που απέφερε μεγάλη ευρωστία στο σύστημα απέναντι σε φαινόμενα παρεμβολών εντός της κυψέλης. Η δυνατότητα ευέλικτης κατανομής των ορθογώνιων υπο-φορέων σε χρήστες οδηγεί στην εξάλειψη των παρεμβολών μεταξύ των χρηστών του ίδιου δικτύου που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη (intra-cell παρεμβολές) [3]. Από την άλλη, η επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας από γειτονικές κυψέλες, είναι δυνατόν να οδηγήσει στην χρήση ίδιων φορέων από κοντινούς χρήστες σε γειτονικά κελιά, με αποτέλεσμα την εμφάνιση παρεμβολών (inter-cell παρεμβολές) και μείωση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Αφιερώνουμε το τρίτο κεφάλαιο στην αναλυτική παρουσίαση του προτύπου Long Term Evolution και Long Term Evolution Advanced, περιγράφοντας τα χαρακτηριστικά, την αρχιτεκτονική του και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιεί.

2.5. 5G and beyond

Ακολουθώντας τον άτυπο κανόνα που ορίζει την εμφάνιση της επόμενης γενιάς κινητών δικτύων κάθε δέκα χρόνια, πολλαπλές κοινοπραξίες από τον βιομηχανικό, ερευνητικό και δημόσιο τομέα κινητοποιήθηκαν από τις αρχές της δεκαετίας που διανύουμε προκειμένου να προετοιμάσουν και να προετοιμαστούν για τη σχεδίαση της 5^{ης} γενιάς (5G) κινητών δικτύων. Το ασαφές σχεδιάγραμμα στο οποίο η συντριπτική πλειοψηφία συμφωνούσε ήταν πως τα στάδια ανάπτυξης δε θα ολοκληρώνονταν πριν το 2020 τοποθετώντας την εμπορική εγκατάσταση ενός 5G δικτύου μετά το έτος αυτό.

Επίσημες προδιαγραφές ακόμα δεν έχουν οριστεί και η ανάπτυξη του IMT-2020, ήτοι ο ορισμός τους από τη ITU, είναι ακόμα στα σκαριά. Παρόλα αυτά, πολλαπλές οντότητες που παίρνουν μέρος στην ανάπτυξη του 5G, όπως οι 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP), 3GPP και Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance, έχουν συγκλίνει ως προς τους στόχους του νέου συστήματος. Αυτοί περιλαμβάνουν:

- 1-10Gbps συνδέσεις
- 1 millisecond καθυστέρηση από άκρο σε άκρο
- 1000x εύρος ζώνης ανά μονάδα επιφάνειας
- 10-100x πλήθος συνδεδεμένων συσκευών
- 99.999% διαθεσιμότητα
- 100% κάλυψη
- 90% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας του δικτύου
- Έως 10 χρόνια διάρκεια ζωής της μπαταρίας για χαμηλής ισχύος συσκευές

Πέρα από τις υψηλές επιδόσεις σε ταχύτητα, διείσδυση, χωρητικότητα, κατανάλωση ενέργειας κλπ. η νέα γενιά δικτύων θα χαρακτηρίζεται και από νέα χαρακτηριστικά. Αυτά περιλαμβάνουν την επικοινωνία μεταξύ μηχανών (M2M), διαθεσιμότητα φάσματος πολύ μικρού κύματος και επικοινωνία μεταξύ συσκευών (direct device-to-device ή D2D). Σε επόμενο κεφάλαιο περιγράφουμε τα κύρια χαρακτηριστικά της 5^{ης} γενιάς κινητών δικτύων, προκειμένου να δείξουμε τη συνέχεια της εφαρμογής των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας και στο κοντινό μέλλον.

Τέλος, αν και εξαιρετικά νωρίς, υπάρχει μια πρώιμη κινητικότητα όσο αφορά τη συζήτηση σχετικά με το μέλλον των κινητών δικτύων μετά την εγκατάσταση των πρώτων 5G συστημάτων. Αυτή αφορά τόσο τη δεύτερη φάση του 5G (περίοδο από το 2025 έως το 2030), όσο και την γενιά που θα ακολουθήσει. Κάποια σημεία που διερευνά είναι το που θα εμφανισθούν τα νέα προβλήματα (bottlenecks), πώς θα γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ αστικών-απομακρυσμένων περιοχών, πως θα βελτιωθούν περαιτέρω τεχνολογίες όπως Massive MIMO, και συστήματα πρόβλεψης συμπεριφορών αλλά και πως θα επηρεάσουν τον κλάδο οι νέες τεχνολογίες όπως κβαντικός υπολογισμός και νανοτεχνολογία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: 4G-5G

4G – 5G

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι δύο τελευταίες γενιές κινητών δικτύων. Καταρχήν παρουσιάζεται η σύγχρονη τεχνολογία LTE-A, για την καλύτερη κατανόηση των μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια της εργασίας. Μετά την ιστορική ανασκόπηση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, παρουσιάζονται οι ανάγκες που αποτέλεσαν τη βάση στην σχεδίαση του συστήματος, η αρχιτεκτονική και οι βασικές τεχνολογίες στις οποίες βασίζεται το LTE-A. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια αναμενόμενα χαρακτηριστικά της υπό έρευνας τεχνολογίας πέμπτης γενιάς.

3.1. LTE/LTE-A στόχοι και εξέλιξη

Όσο τα δίκτυα κινητής αποκτούσαν ολοένα και μεγαλύτερη εξάπλωση, ήταν φανερό πως η εξέλιξη των δικτύων κατευθυνόταν σαφώς στην επίτευξη ολοένα μεγαλύτερων ταχυτήτων και μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων. Ήδη, από το 2004 ξεκίνησαν διαβουλεύσεις για να θεσπιστούν οι απαιτήσεις της νέας 3GPP LTE τεχνολογίας [4]. Το LTE έθεσε βασικούς σχεδιαστικούς στόχους τους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε όλη την επιφάνεια της κυψέλης, τη χαμηλή καθυστέρηση, την ελαστικότητα στη χρησιμοποίηση του φάσματος, και την φασματική απόδοση [5]. Για την επίτευξη των παραπάνω υιοθετήθηκε η τεχνολογία OFDM για το downlink και η Discrete Fourier transform -precoded OFDM (DFT-OFDM) για το uplink. Η πρώτη επίσημη έκδοση του LTE παρουσιάστηκε το 2008 και ονομάστηκε LTE Έκδοση 8.

Την ίδια εποχή περίπου, ο τομέας ραδιοεπικοινωνιών της ITU (ITU-R) ανακοίνωσε τις απαιτήσεις IMT-Advanced, οι οποίες καθόριζαν τις ελάχιστες προδιαγραφές για τα δίκτυα 4G. Οι προδιαγραφές αυτές έθεταν, μεταξύ άλλων, στόχους για τον επιτεύξιμο ρυθμό δεδομένων που απαιτούν οι σύγχρονες υπηρεσίες, την ελάχιστη καθυστέρηση για την προώθηση διαδραστικών εφαρμογών και την χωρητικότητα συνολικά του δικτύου, ώστε να καλύψει την ολοένα αυξανόμενη ανταλλαγή δεδομένων. Αυτό τροφοδότησε διεργασίες μέσα στην 3GPP για την εξέλιξη του LTE προς την κατεύθυνση αυτή.

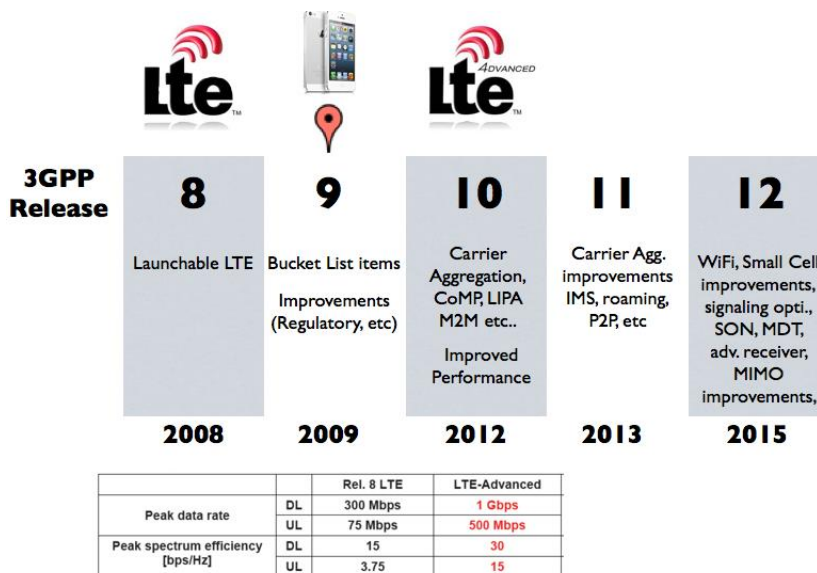
Το LTE στην πρώτη επίσημη έκδοση του επιτυγχάνει θεωρητικά ταχύτητες της τάξης των 100 Mbit/s, αν και τέτοια επίπεδα αφορούν ιδανικές συνθήκες που σπάνια συναντώνται. Το κεντρικό του δίκτυο (core network ή CN), αποτελεί εξέλιξη του CN στο GPRS και ονομάζεται Evolved Packet Core (EPC), ενώ η ασύρματη διασύνδεση είναι η εξέλιξη του UTRAN ή αλλιώς evolved-UTRAN (e-UTRAN). Το δίκτυο του LTE στο σύνολό του είναι αποκλειστικά δίκτυο μεταγωγής πακέτου, και υποστηρίζει Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service - QoS), καθώς και Frequency Division Duplex (FDD) και Time Division Duplex (TDD) σχήματα. Κύρια χαρακτηριστικά του είναι η χαμηλή καθυστέρηση, η μεγάλη φασματική ευελιξία και απόδοση, και η χρήση τεχνολογίας OFDMA στη χρήση καναλιού στο downlink και Single-carrier FDMA (SC-FDMA) στο uplink.

Η έκδοση που ακολούθησε (Έκδοση 9), εμπλούτισε την προϋπάρχουσα έκδοση, χωρίς τροποποιήσεις στην υποδομή και αρχιτεκτονική. Με την βελτίωση της δυνατότητας

4x4 multiple-input and multiple-output (MIMO), ήτοι πολλαπλές κεραιές παράλληλης μετάδοσης, τριπλασίασε σχεδόν τη μέγιστη ταχύτητα, αγγίζοντας τα 300 Mbit/s στο downlink, και 75 Mbit/s στο uplink. Οι εκδόσεις αυτές δεν κάλυπταν πλήρως τις προδιαγραφές του IMT-Advanced, και για αυτό χαρακτηρίστηκαν 3.9G τεχνολογίες. Κάτω από την πίεση του μάρκετινγκ, όμως, κατάφεραν να χαρακτηριστούν και να προωθηθούν εμπορικά ως 4ης γενιάς υπηρεσίες, με τις μετέπειτα ανώτερες και επαρκείς βάσει IMT-Advanced εκδόσεις να διαφοροποιούνται με τον όρο «πραγματικό 4G» (true 4G).

Η έκδοση 10 που ακολούθησε (Έκδοση 10), κατατέθηκε για έγκριση το 2009 και οριστικοποιήθηκε το 2011, και βελτιώνει αρκετά στοιχεία των προκατόχων του. Η έκδοση αυτή επέτρεπε ανώτερες τεχνικές MIMO έως 8x8, και εισήγαγε τη δυνατότητα σύμπραξης των φορέων (carrier aggregation - CA), αυξάνοντας το μέγιστο εύρος ζώνης από 20 MHz σε 100 MHz. Με αυτό τον τρόπο, η μέγιστη ταχύτητα φθάνει και ξεπερνάει το 1 Gbit/s στο downlink και τα 500 Mbit/s στο uplink. Πέραν των παραπάνω, η νέα έκδοση εισάγει ή βελτιώνει αρκετά ακόμα χαρακτηριστικά, όπως η δυνατότητα Coordinated Multipoint (CoMP) μετάδοσης και λήψης, η αναβάθμιση της δυνατότητας του δικτύου για συντονισμό, η διασύνδεση μεταξύ των eNodeBs (evolved NodeBs), οι προδιαγραφές των HeNBs (Home eNodeBs), κλπ..

Η έκδοση αυτή ήταν η πρώτη που κάλυπτε τις απαιτήσεις IMT-Advanced ώστε να θεωρηθεί true 4G. Για αυτό το λόγο, η έκδοση ονομάστηκε LTE-Advanced και τέθηκε υποψήφια στην ITU-R για το παγκόσμιο πρότυπο 4G. Στην Εικόνα 2 διακρίνονται τα στάδια εξέλιξης του LTE χρονικά, μαζί με τις κυριότερες επεκτάσεις που σηματοδοτούσε κάθε έκδοση.



Εικόνα 2. Στάδια εξέλιξης και σημαντικότερες βελτιώσεις των εκδόσεων LTE (www.sonlte.com).

Οι διεργασίες για την εξέλιξη και βελτίωση του LTE-Advanced φυσικά δε σταμάτησαν εκεί αντίθετα είναι συνεχής. Πλέον έχει φθάσει στην 13 έκδοση και οι εργασίες για την 14 και 15 έχουν ήδη ξεκινήσει.

Εκτός του LTE υπήρχαν και άλλες προσεγγίσεις για την επίτευξη των 4G στόχων. Το Mobile WiMAX του WiMAX Forum είναι μετά το LTE του 3GPP το δεύτερο εμπορικά διαθέσιμο σύστημα που μπόρεσε να χαρακτηριστεί 4^{ης} γενιάς. Το Mobile WiMAX προέρχεται και έχει ομοιότητες με το Wi-Fi, αλλά με τη δυνατότητα κάλυψης μεγαλύτερων περιοχών, όπως μια ολόκληρη πόλη. Με την έκδοση 802.16m-2011 μπόρεσε να φτάσει σε ιδανικές συνθήκες το 1 Gbit/s (και 100 Mbit/s σε κίνηση).

Αν και το Mobile WiMAX προηγήθηκε του LTE (2006-2008), άργησε να υλοποιηθεί και έχασε σύντομα έδαφος εμπορικά, με αποτέλεσμα την προτίμηση των παρόχων ή και την μετακίνησή τους από Mobile WiMAX σε LTE. Οι ανώτερες υπηρεσίες που προσφέρει το LTE και το μικρότερο κόστος σε σχέση με τον ανταγωνισμό, το έχουν καταστήσει τον ισχυρότερο φορέα 4G τεχνολογίας, και λόγω της σχεδόν καθολικής αποδοχής του, το πρώτο σχεδόν παγκόσμια υιοθετημένο πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας.

3.2. LTE-A προδιαγραφές

Οι σχεδιαστικοί στόχοι που αναφέρθηκαν παραπάνω καθόρισαν την βάση της θέσπισης των ελάχιστων προδιαγραφών του LTE-A. Το 3GPP τις ανανεώνει, προσαρμόζει και ενημερώνει όποτε κάτι τέτοιο κρίνεται απαραίτητο. Οι προδιαγραφές αρχειοθετούνται στο [6] και ο Πίνακας 1 απεικονίζει τις βασικότερες εξ αυτών.

Πίνακας 1. Κύριες IMT-Advanced προδιαγραφές

Εύρος φορέα	5–20 MHz, κλιμακωτά
Ρυθμός μετάδοσης (στατικό χρήστη)	1 Gbit/s
Ρυθμός μετάδοσης (κινούμενο χρήστη)	100 Mbit/s
Φασματική απόδοση (downlink)	15 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (uplink)	6.75 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (Συστήματος)	3 bit/s/Hz/cell
Χαρακτηριστικά	<ul style="list-style-type: none"> • Αποκλειστικά-Internet Protocol (IP) δίκτυο μεταγωγής πακέτου • Διασυνδεσιμότητα με υπάρχοντα ασύρματα πρότυπα • Δυναμικός διαμοιρασμός πόρων • Υψηλής ποιότητας υπηρεσίες για υποστήριξη πολυμέσων • Παγκόσμια περιαγωγή

Αν και ο πρωταρχικός στόχος ήταν να καλυφθούν οι απαιτήσεις του IMT-Advanced, σε πολλά στοιχεία οι επιδόσεις πλέον έχουν ξεπεράσει κατά πολύ τις προδιαγραφές αυτές, αποτελώντας μια μακροπρόθεσμη εγγύηση για την κάλυψη των

μελλοντικών αναγκών στο χώρο των κινητών τηλεπικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, ως μέγιστη επιτεύξιμη ταχύτητα τέθηκε να είναι τουλάχιστον το 1 Gbit/s για το downlink, ενώ για χρήστες με υψηλή κινητικότητα η ταχύτητα αναμένεται να φτάνει στα 100 Mbit/s. Ο στόχος για το uplink τέθηκε να είναι 500 Mbps και η μέγιστη ταχύτητα χρήστη που υποστηρίζεται φτάνει τα 350 km/h.

Πέρα από τη μέγιστη ταχύτητα, ορίστηκε η ελάχιστη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, που εκφράζεται μέσω του βαθμού εκμετάλλευσης του φάσματος. Η μετρική αυτή ονομάζεται spectrum efficiency ή φασματική απόδοση, ορίζεται ως bps/Hz, και τέθηκαν στόχοι τόσο για το σύνολο της κυψέλης όσο και για τις περιοχές στα όριά της.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε και στη μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση ώστε να διευκολυνθούν διαδραστικές εφαρμογές και άλλες υπηρεσίες για τις οποίες η καθυστέρηση είναι κρίσιμης σημασίας. Συγκεκριμένα, για μετάβαση από Idle mode σε Connected mode η μέγιστη καθυστέρηση ορίστηκε στα 50 ms, ενώ αντίστοιχα για μετάβαση από dormant state σε active ορίστηκε σε 10 ms.

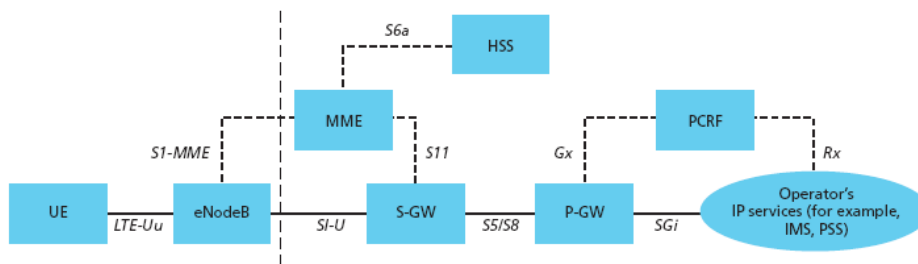
Οι απαιτήσεις για κάλυψη δικτύου, συγχρονισμό δικτύου καθώς και διαχείριση των πόρων συχνοτήτων ακολουθούν τις απαιτήσεις του LTE (Έκδοση 8). Έμφαση δόθηκε και στη συμβατότητα των τερματικών, αφού κρίθηκε σημαντικό μια συσκευή χρήστη (User Equipment - UE) οποιασδήποτε έκδοσης να λειτουργεί απροβλημάτιστα και ανεξάρτητα από το αν το περιβάλλον είναι LTE ή LTE-Advanced. Το ίδιο σημαντικό είναι και η αρμονική συνύπαρξη μεταξύ των συστημάτων, δηλαδή η λειτουργία LTE και LTE-Advanced στο ίδιο φάσμα, όπως και η ύπαρξη συστημάτων GSM EDGE Radio Access Network (GERAN)/UTRA/E-UTRA σε γειτονικά κανάλια.

3.3. LTE-A Αρχιτεκτονική

3.3.1. Αρχιτεκτονική Συστήματος

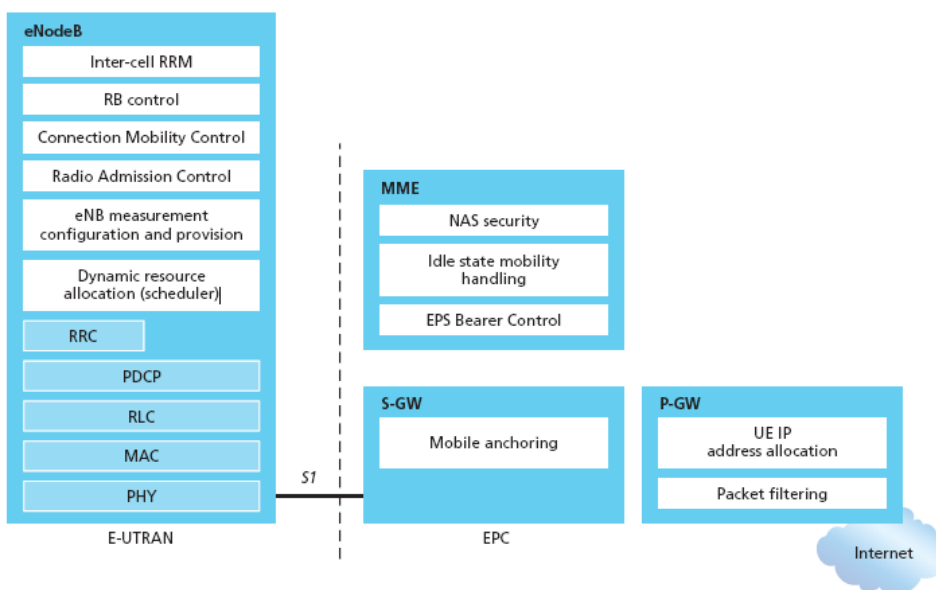
Σε αντίθεση με τα δίκτυα βασισμένα στο μοντέλο μεταγωγής κυκλώματος, το LTE σχεδιάστηκε να υποστηρίζει αποκλειστικά υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Κύρια μέριμνα είναι να παρέχει στο χρήστη αδιάλειπτη σύνδεση Internet Protocol (IP), μεταξύ του χρήστη και του δικτύου πακέτου δεδομένων (Packet Data Network ή PDN).

Παράλληλα με την ανάπτυξη του εξελιγμένου δικτύου ασύρματης πρόσβασης UMTS για το LTE μέσω του E-UTRAN, πραγματοποιήθηκαν ανεξάρτητες διεργασίες με στόχο την εξέλιξη και του κεντρικού δικτύου (CN), έργο που πήρε την ονομασία System Architecture Evolution (SAE). Η εξέλιξη του CN οδήγησε στη δημιουργία του Evolved Packet Core (EPC) network [7]. Ο συνδυασμός LTE και SAE ονομάστηκε Evolved Packet System (EPS).



Εικόνα 3. Η αρχιτεκτονική του EPS (Alcatel-Lucent).

Η IP κίνηση ανάμεσα σε μια πύλη (gateway) του PDN και στο UE, εκφράζεται μέσω της έννοιας του EPS ασύρματου φορέα μετάδοσης (EPS bearer). Ένα bearer είναι μια ροή πακέτων IP μεταξύ της πύλης και του UE με καθορισμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Το EPC και το E-UTRAN μαζί διευθετούν και απελευθερώνουν bearer όπως απαιτείται από τις εφαρμογές. Το EPS παρέχει στον χρήστη συνδεσιμότητα σε ένα PDN για πρόσβαση στο Internet, αλλά και για υπηρεσίες όπως Voice over IP (VoIP), με συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας. Επίσης παρέχει ασφάλεια και ιδιωτικότητα για το χρήστη. Η Εικόνα 3 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του συνολικού δικτύου μαζί με τα ξεχωριστά στοιχεία του και τις προτυποποιημένες διασυνδέσεις. Η φυσική υλοποίηση επαφίεται στην κρίση του διαχειριστή του δικτύου, όπως και η δυνατότητα συγχώνευσης στοιχείων. Ο λειτουργικός διαχωρισμός του δικτύου σε EPS και E-UTRAN φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4. Οι λειτουργικές αρμοδιότητες του E-UTRAN και του EPC (Alcatel-Lucent).

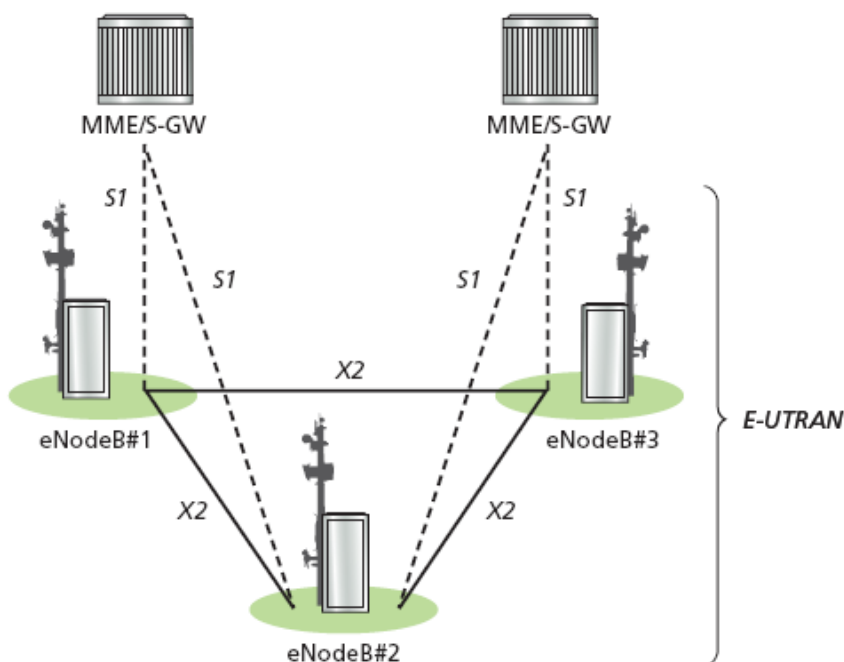
Συνοπτικά, το CN είναι υπεύθυνο για το συνολικό έλεγχο του UE και την εγκαθίδρυση των bearers. Οι βασικές λογικές μονάδες του EPC είναι οι παρακάτω:

- PDN Gateway (P-GW): Η μονάδα P-GW είναι υπεύθυνη για την ανάθεση διεύθυνσης IP στους χρήστες και για την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας βάση των κανόνων του PCRF (που περιγράφεται παρακάτω). Λειτουργεί επίσης ως συνδετικός κρίκος για λειτουργίες με μη 3GPP τεχνολογίες.

- Serving Gateway (S-GW): όλα τα πακέτα IP μεταφέρονται διαμέσου της S-GW, λειτουργώντας ως συνδετικός κρίκος για τους bearers όταν το UE μετακινείται μεταξύ των eNodeB. Επίσης, διατηρεί τις πληροφορίες για τους bearers όταν το τερματικό είναι σε αδρανή κατάσταση (idle) και προσωρινά αποθηκεύει τα δεδομένα προς downlink όσο η μονάδα Mobility Management Entity (MME) κάνει το paging των UE.
- Mobility Management Entity (MME): Η MME είναι η μονάδα που επεξεργάζεται τη σηματοδότηση μεταξύ του UE και του CN. Τα πρωτόκολλα μεταξύ τους ονομάζονται πρωτόκολλα Non Access Stratum (NAS).
 - Home Subscriber Server (HSS): Η μονάδα αυτή περιέχει στοιχεία των συνδρομητών, πληροφορίες σχετικά με τα PDNs που επιχειρεί να συνδεθεί ο χρήστης και πληροφορίες σχετικά με τη MME που εξυπηρετεί το χρήστη.
 - Policy Control and Charging Rules Function (PCRF): Η μονάδα αυτή είναι υπεύθυνη για τις αποφάσεις σχετικά με τον έλεγχο των πολιτικών, όπως και για τον έλεγχο των λειτουργιών χρέωσης.

Πέραν των παραπάνω λειτουργικών μονάδων, υπάρχει και η μονάδα IP Multimedia Subsystem (IMS) με αρμοδιότητα τον έλεγχο πολυμεσικών εφαρμογών όπως VoIP. Όμως η συγκεκριμένη μονάδα δε θεωρείται μέρος του EPS.

Από την άλλη, το δίκτυο πρόσβασης του LTE E-UTRAN αποτελείται αποκλειστικά από ένα δίκτυο από eNodeBs όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Σε κανονική χρήση (δηλαδή όχι broadcast), δεν υπάρχει κεντρικός ελεγκτής. Αντίθετα τα eNodeBs συντονίζονται μεταξύ τους επικοινωνώντας μέσω της διασύνδεσης X2. Για το λόγο αυτό η αρχιτεκτονική του E-UTRAN θεωρείται επίπεδη. Με το EPC επικοινωνούν μέσω της διασύνδεσης S1, και συγκεκριμένα με το S1-MME για τη σύνδεση με το MME και με το S1-U για τη σύνδεση με το S-GW. Τα πρωτόκολλα μεταξύ των eNodeBs και των UE ονομάζονται AS πρωτόκολλα.



Εικόνα 5. Η αρχιτεκτονική του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN (Alcatel-Lucent).

Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για όλες τις σχετικές με ασύρματη μετάδοση λειτουργίες. Αυτές χωρίζονται σε:

- Radio resource management (RRM): Λειτουργίες σχετικά με τα bearers, όπως ο έλεγχός τους, ο χρονοπρογραμματισμός και η δυναμική ανάθεση πόρων σε UEs.
- Header Compression: Η συγκεκριμένη λειτουργία εξυπηρετεί στην αποδοτική χρήση της διασύνδεσης μέσω της συμπίεσης των επικεφαλίδων των IP πακέτων.
- Ασφάλεια: Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του δικτύου, όλα τα δεδομένα που αποστέλλονται μέσω της ασύρματης διασύνδεσης είναι κρυπτογραφημένα.
- Συνδεσιμότητα με το EPC: η συγκεκριμένη λειτουργία αναφέρεται στη σηματοδότηση για τη σύνδεση με τη μονάδα MME και τη S-GW.

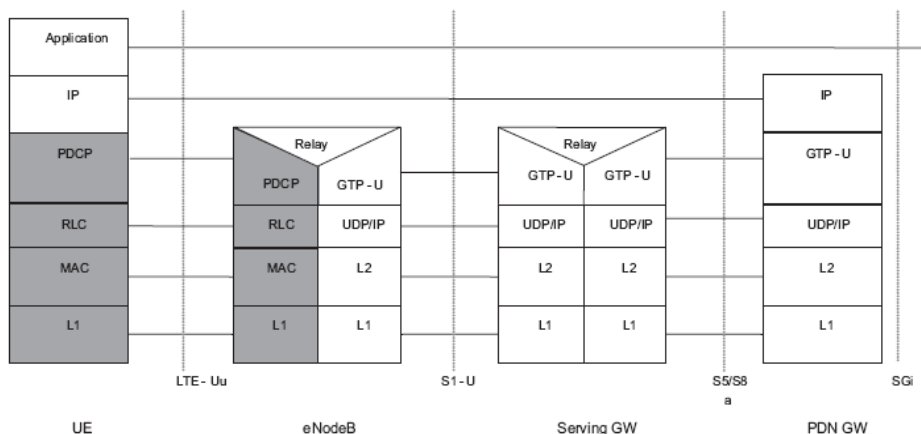
Από την πλευρά του δικτύου, αυτές οι λειτουργίες γίνονται αποκλειστικά στα eNodeBs, καθένα από τα οποία μπορεί να είναι υπεύθυνο για πολλαπλές κυψέλες. Σε αντίθεση με προηγούμενες τεχνολογίες, στο LTE το eNodeB περιλαμβάνει το ραδιοελεγκτή. Αυτό επιτρέπει τη στενή διασύνδεση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων πρωτοκόλλων RAN, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την απόδοση. Η κατανομημένη φύση του ελέγχου που προκύπτει, εξαλείφει την ανάγκη για απαιτητικούς ελεγκτές, μειώνοντας σημαντικά και το κόστος. Συνέπεια της έλλειψης κεντρικού ελεγκτή, είναι πως στην περίπτωση που το UE μετακινηθεί, το δίκτυο πρέπει να μεταφέρει όλη τη σχετική πληροφορία στο αντίστοιχο eNodeB με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου X2.

Την ίδια στιγμή, ένα eNodeB μπορεί να εξυπηρετηθεί από πολλαπλά MME/S-GWs. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος πως αντί για την ανάθεση ενός MME/S-GWs σε ένα eNodeB, αποφασίστηκε ένα σύνολο MME/S-GWs να ανατίθεται για την εξυπηρέτηση μια κοινής περιοχής. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τα UEs σε ένα ή περισσότερα κελιά που ελέγχονται από ένα eNodeB, να μοιράζονται μεταξύ πολλαπλών CN μονάδων, με στόχο την κατανομή φόρτου, και την ευρωστία του συστήματος απέναντι σε ενδεχόμενη αστοχία των CN μονάδων.

3.3.2. Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων

User plane

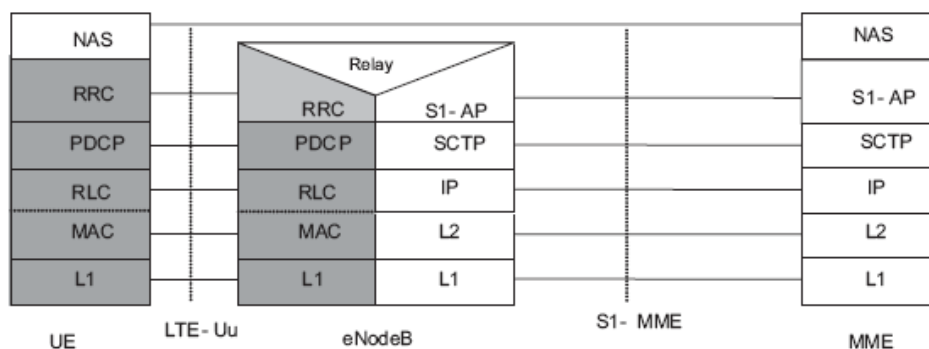
Ένα IP πακέτο ενθυλακώνεται σε ένα συγκεκριμένο EPC πρωτόκολλο και μεταφέρεται από την πύλη P-GW προς το eNodeB για μετάδοση στο UE. Διαφορετικά πρωτόκολλα μεταφοράς χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές διασυνδέσεις. Πάνω από διασυνδέσεις CN, S1 και S5/S8.1 χρησιμοποιείται το GPRS Tunneling Protocol (GTP) [8]. Το πρωτόκολλο E-UTRAN user plane απεικονίζεται στην Εικόνα 6, και αποτελείται από τα Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) και Medium Access Control (MAC) υποστρώματα που τερματίζουν στο eNodeB από την πλευρά του δικτύου.



Εικόνα 6. Η User Plane Στοιβά Πρωτοκόλλων.

Control plane

Η στοιβά του πρωτοκόλλου control plane μεταξύ του UE και της μονάδας MME απεικονίζεται στην Εικόνα 7. Η σκιασμένη περιοχή αποτελεί τα AS πρωτόκολλα. Τα κατώτερα στρώματα έχουν τις ίδιες λειτουργίες με τα αντίστοιχα του user plane, με την εξαίρεση πως στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει λειτουργία συμπίεσης επικεφαλίδων. Το πρωτόκολλο Radio Resource Control (RRC) είναι γνωστό ως “layer 3” στη στοιβά του πρωτοκόλλου AS. Αποτελεί την κύρια λειτουργία ελέγχου στο AS, όντας υπεύθυνο για την εγκατάσταση των bearers, και ρυθμίζοντας όλα τα κατώτερα στρώματα.



Εικόνα 7. Η Control Plane στοιβά πρωτοκόλλων.

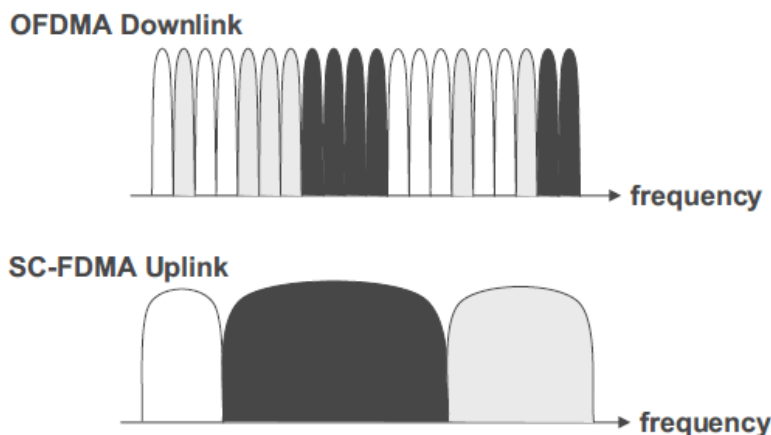
3.4. LTE-A τεχνολογίες

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες και τα χαρακτηριστικά που καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό τις επιδόσεις του συστήματος, κατηγοριοποιημένα ως προς την έκδοση στην οποία έκαναν την εμφάνισή τους.

3.4.1. Έκδοση 8

Η έκδοση 8 ήταν η πρώτη έκδοση του LTE, ορίζοντας τις βάσεις της τεχνολογίας. Τα κύρια στοιχεία του συστήματος ήταν:

Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM): Το LTE χρησιμοποιεί την τεχνολογία OFDM για το downlink. Αυτό σημαίνει πως ο σταθμός βάσης μεταδίδει δεδομένα στο τερματικό μέσω πολλαπλών φορέων μικρού εύρους, αντί της μεταφοράς μέσω ενός μοναδικού σήματος που καλύπτει το σύνολο του εύρους ζώνης. Οι φορείς αυτοί ονομάζονται υπο-φορείς (subcarriers) και είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους, ούτως ώστε είτε ατομικά είτε ως γκρουπ να μεταφέρουν ανεξάρτητες ροές δεδομένων.



Εικόνα 8. Ο διαχωρισμός του φάσματος σε φορείς βάση του OFDMA (downlink) και SC-FDMA (uplink).

Η τεχνολογία Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) επεκτείνει την τεχνολογία του OFDM ώστε να παράγει ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με μεγάλο βαθμό ελευθερίας. Οι υποφέρουσες ομαδοποιούνται σε resource blocks (12 subcarriers). Τα resource blocks έχουν μέγεθος 180 kHz στο πεδίο της συχνότητας και 0.5 ms στο πεδίο του χρόνου. Σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένας αριθμός από resource blocks. Όσο περισσότερα resource blocks/χρήστη και όσο ανώτερο σχήμα διαμόρφωσης υιοθετηθεί, τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται. Την ανάθεση των resource blocks στους χρήστες στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αναλαμβάνει ένα σύνολο μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού. Στο LTE-A, ο διαθέσιμος αριθμός των resource blocks έχει προτυποποιηθεί και εξαρτάται από το διαθέσιμο φάσμα. Ο Πίνακας 2. απεικονίζει αυτήν την αντιστοιχία.

Πίνακας 2. Ο αριθμός των διαθέσιμων resource blocks για κάθε εύρος φάσματος.

Εύρος φάσματος (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Resource blocks	6	15	25	50	75	100

Η τεχνολογία OFDMA παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα:

- Παρέχει μεγάλη ευρωστία απέναντι σε φαινόμενα channel selectivity χωρίς μεγάλη πολυπλοκότητα υλοποίησης.
- Παρέχει πρόσβαση στο πεδίο της συχνότητας, ενεργοποιώντας μεγαλύτερη ευελιξία στους χρονοπρογραμματιστές, σε σχέση με αυτούς που λειτουργούν μόνο στο πεδίο του χρόνου. Αυτό επιτρέπει τη χρήση τεχνικών επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων που εξυπηρετούν στο συντονισμό του συστήματος.
- Διευκολύνεται η δυνατότητα λειτουργίας του LTE σε διαφορετικά διαθέσιμα εύρη φάσματος, μέσω της προσαρμογής του αριθμού των υπο-φορέων, απλοποιώντας την ανάπτυξη και υλοποίηση των τερματικών.

Ένα μειονέκτημα της τεχνολογίας OFDM είναι το υψηλό Peak to Average Power Ratio (PAPR). Το υψηλό PAPR απαιτεί ακριβούς και μη αποδοτικούς ενισχυτές ισχύος και τερματικά υψηλού κόστους και με μικρό σχετικά χρόνο ζωής της μπαταρίας. Για το λόγο αυτό, το LTE χρησιμοποιεί στο uplink μια προ-κωδικοποιημένη έκδοση του OFDM που ονομάζεται Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA). Η επίτευξη μικρού PAPR βελτιώνει επίσης την κάλυψη και την απόδοση στα όρια της κυψέλης.

Channel-Dependent Scheduling and Rate Adaptation: Στον πυρήνα της μετάδοσης στο σύστημα LTE βρίσκεται η χρήση της μετάδοσης μέσω διαμοιρασμένου καναλιού μέσω της δυναμικής ανάθεσης πόρων μεταξύ των χρηστών στα πεδία χρόνου και συχνότητας. Ο χρονοπρογραμματιστής ελέγχει σε κάθε χρονική στιγμή σε ποιους χρήστες θα αναθέσει πόρους επιλέγοντας να αναθέσει περισσότερους πόρους στους χρήστες που παρουσιάζουν καλύτερη κατάσταση καναλιού (Channel-Dependent).

Inter-Cell Interference Coordination (ICIC): Το LTE σχεδιάστηκε να λειτουργεί με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας ανά κελί, που σημαίνει πως οι ίδιοι πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα σε γειτονικά κελιά. Ειδικά για αυτό, τα βασικά κανάλια ελέγχου έχουν σχεδιαστεί ώστε να λειτουργούν απροβλημάτιστα ακόμα και με σχετικά χαμηλό Signal-to-Interference ratio (SIR). Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό δίνει δυνατότητα για μεγαλύτερη απόδοση συνολικά, ίσως οδηγήσει δε, σε μεγάλες διακυμάνσεις στο SIR, και κατά συνέπεια και στον επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης, με τους χρήστες στα όρια της κυψέλης να αντιμετωπίζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα. Με γνώμονα τη βελτίωση της απόδοσης των τελευταίων, μπορεί να υπάρξει συντονισμός των πόρων μεταξύ των κελιών, αποφεύγοντας τη ταυτόχρονη χρήση φάσματος από τερματικά στα άκρα γειτονικών κυψελών ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα παρεμβολών. Η επικοινωνία για τον συντονισμό μεταξύ των eNodeB γίνεται μέσω της X2 διασύνδεσης. Οι μέθοδοι αυτές εκφράζονται με τον όρο ICIC. Καθώς αποτελεί σημαντική παράμετρος για την αποφυγή των παρεμβολών, περιγράφεται πιο αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.

Hybrid ARQ with Soft Combining: η λειτουργία Fast hybrid ARQ με soft combining χρησιμοποιείται στο LTE προκειμένου να επιτρέψει στο τερματικό την γρήγορη αίτηση αναμετάδοσης λανθασμένα λαμβανόμενων blocks και να παρέχει ένα εργαλείο για την προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων.

Μετάδοση πολλαπλών κεραιών: Τεχνικές μετάδοσης με πολλαπλές κεραιές θεωρούνται το σύνολο των τεχνικών που στηρίζονται στη χρήση ενός αριθμού κεραιών στον δέκτη ή/και στον μεταδότη, σε συνδυασμό με την απαραίτητη επεξεργασία σήματος

που κάτι τέτοιο επιφέρει. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση πολλών παραμέτρων της απόδοσης του συστήματος, όπως το diversity, το SINR και ο ρυθμός μετάδοσης. Η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing), γνωστή και ως MIMO, επιφέρει αύξηση στους ρυθμούς μετάδοσης, όποτε το επιτρέπουν οι συνθήκες καναλιού. Εναλλακτικά, πολλαπλά τερματικά μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης (multi-user MIMO). Με την έκδοση 8, υποστηριζόταν χωρική πολυπλεξία μέχρι και 4 στρωμάτων. Οι μετέπειτα εκδόσεις επέτρεψαν περισσότερο πολύπλοκα σχήματα.

Ευέλικτη χρήση φάσματος: Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του LTE είναι η μεγάλη δυνατότητα ευέλικτης χρήσης του φάσματος. Ο στόχος αυτού ήταν να επιτρέψει την εγκατάσταση του LTE RAN σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως άλλες παραμέτρους αμφίδρομης επικοινωνίας και διαφορετικά μεγέθη διαθέσιμου φάσματος.

3.4.2. Έκδοση 9

Η έκδοση 9 εισήγαγε νέα χαρακτηριστικά στην τεχνολογία LTE. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η υποστήριξη για Multicast και Broadcast, το positioning και το Dual Layer Beam-Forming.

Multicast and Broadcast: Οι υπηρεσίες Multimedia Broadcast Multicast Services (MBMS) υποστηρίζουν μετάδοση broadcast και multicast σε κυψελωτά συστήματα. Με τις υπηρεσίες αυτές τα ίδια δεδομένα μεταδίδονται σε πολλαπλούς χρήστες σε μια περιοχή που τυπικά αποτελείται από αρκετά κελιά. Όταν οι μεταδόσεις από τα διαφορετικά κελιά είναι συγχρονισμένα, το τερματικό μπορεί να θεωρήσει ότι η πηγή του σήματος είναι μοναδική. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται MBMS Single-Frequency Network (MBSFN).

Positioning: Στην έκδοση 9 εισήχθη μέθοδος για την εύρεση τοποθεσίας μέσω του RAN. Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση σημάτων αναφοράς που μεταδίδονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και από διαφορετικές κυψέλες.

Dual-Layer Beam-Forming: Στην έκδοση 9, εμπλουτίστηκε η υποστήριξη συνδυασμού χωρικής πολυπλεξίας με το beam-forming.

3.4.3. Έκδοση 10

Η έκδοση 10 (LTE-A) ήταν η πρώτη που κάλυψε τις απαιτήσεις των προδιαγραφών IMT-Advanced με τη βοήθεια νέων ή βελτιωμένων τεχνολογιών. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι η προσαύξηση των φορέων, το relaying, η ενισχυμένη τεχνολογία πολλαπλών κεραιών, και η υποστήριξη ετερογενών παρατάξεων.

Carrier aggregation: Η πρώτη έκδοση του LTE παρείχε μεγάλη υποστήριξη για διαφορετικές κατανομές φάσματος, με μέγιστο εύρος φάσματος τα 20 MHz. Στην έκδοση 10, το εύρος φάσματος διευρύνθηκε με τη μέθοδο carrier aggregation, βάσει της οποίας πολλαπλοί φορείς συνδυάζονται και χρησιμοποιούνται μαζί για μετάδοση από ένα τερματικό. Το LTE-A υποστηρίζει τον συνδυασμό μέχρι και 5 φορέων, φτάνοντας έτσι το

μέγιστο φάσμα που μπορεί να κατανεμηθεί σε έναν χρήστη στα 100 MHz. , αυξάνοντας σημαντικά το μέγιστο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης. Το LTE-A υποστηρίζει τρεις τρόπους συνδυασμού φορέων. Ο πρώτος αφορά το συνδυασμό διαδοχικών φορέων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ο δεύτερος επιτρέπει το συνδυασμό μη διαδοχικών φορέων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Τέλος, ο τρίτος υποστηρίζει το συνδυασμό φορέων που βρίσκονται σε διαφορετικές ζώνες.

Relaying: Το relaying είναι η προσέγγιση βάση της οποίας ένα τερματικό επικοινωνεί με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενός κόμβου αναμετάδοσης.

Ενισχυμένη μετάδοση πολλαπλών κεραιών: Στην έκδοση 10, η χωρική πολυπλεξία στο downlink επεκτείνεται ώστε να υποστηρίζει οχτώ στρώματα μετάδοσης στο downlink. Παράλληλα, εισάγεται μια ενισχυμένη δομή για σήματα αναφοράς, ώστε να βελτιωθεί η υποστήριξη των διάφορων προσεγγίσεων beam-forming.

Ετερογενείς παρατάξεις : Η ετερογενής παράταξη αναφέρεται σε οποιαδήποτε παράταξη περιλαμβάνει ένα σύνολο κελιών με διαφορετικά επίπεδα στην ισχύ μετάδοσης. Αναλυτικότερα περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4.4. Έκδοση 11

Διατηρώντας το όρο LTE-Advanced για όλες τις εκδόσεις από τη 10 και μετά, το 2013 ο οργανισμός 3GPP οριστικοποίησε την έκδοση 11. Οι σημαντικότερες αλλαγές που επέφερε στο πρότυπο ήταν:

Βελτιώσεις στο carrier aggregation: Αυτές περιλάμβαναν ευρύτερη κάλυψη πιθανών σεναρίων του χαρακτηριστικού στο uplink αλλά και καλύτερη υλοποίηση στο downlink σε περιπτώσεις μη γειτονικών intra-band συχνοτήτων.

Coordinated Multi-Point Operation for LTE (CoMP): Είναι από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που προστέθηκαν και αφορά τόσο ετερογενείς όσο και ομογενείς τοπολογίες. Το CoMP επιτρέπει τη λήψη και μετάδοση από διαφορετικά σημεία, μέσω σωστού συγχρονισμού. Αντίστοιχα μηχανισμοί έχουν σχηματισθεί και για το uplink [9].

Further enhanced non CA-based ICIC (feICIC): Πρόκειται για βελτιώσεις στο σύστημα συντονισμού μεταξύ των κελιών προς αποφυγή παρεμβολών (ICIC). Οι βελτιώσεις στοχεύουν σε καλύτερη επικοινωνία μεταξύ των κελιών και περισσότερη ανταλλαγή πληροφορίας, όπως υποστήριξη Almost Blank Subframes (ABS), scheduling κλπ.

RAN overload control for Machine Type Communication (MTC): Η διεύθυνση των M2M επικοινωνιών (η 3GPP χρησιμοποιεί τον όρο MTC - Machine Type Communications) θα επιφέρει μεγάλο φορτίο στο δίκτυο. Προς αποφυγή συμφόρησης εισάγονται καλύτεροι μηχανισμοί πληροφόρησης προκειμένου να ελέγχει καλύτερα την κατάσταση στο δίκτυο.

3.4.5. Έκδοση 12

Η έκδοση 12 οριστικοποιήθηκε το 2015 και ορισμένες από τις σημαντικότερες βελτιώσεις που έφερε στο πρότυπο είναι:

Βελτιώσεις στις μικροκυψέλες: Στην έκδοση 12 έγιναν βήματα για την καλύτερη υποστήριξη κινητικότητας των χρηστών, τη μείωση του φόρτου σηματοδοσίας και την αύξηση της ρυθμαπόδοσης των χρηστών μέσω υποστήριξης 256QAM κωδικοποίησης, ταυτόχρονη συνδεσιμότητα σε δύο σταθμούς (τεχνική παρόμοια με το CoMP αλλά για small cells) και αποτελεσματικότερο πλαίσιο για καλύτερο handover (μεταπομπή) [10].

Device to Device communication (D2D): Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που εισήγαγε η έκδοση 12 είναι η υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας μεταξύ συσκευών, κυρίως για περιπτώσεις που αφορούν επείγουσες καταστάσεις (mission critical/public safety). Οι δυνατότητες αυτές πήραν το όνομα LTE Device-to-Device (D2D) Proximity Services (ProSe) και Group Call System Enablers (GCSE).

Enhanced Interference Mitigation & Traffic Adaption (eIMTA): Η eIMTA είναι μια τεχνική που βελτιώνει την LTE TDD προσέγγιση. Αυτό το καταφέρνει με το να επιτρέπει τη δυναμική ρύθμιση των σχισμών που αποτελούν ένα LTE πλαίσιο.

3.4.6. Εκδόσεις 13-14

Η έκδοση 13 είναι η πιο πρόσφατη έκδοση που έχει μπει σε κατάσταση ολοκλήρωσης, συγκεκριμένα τον Μάρτιο του 2016. Επέκτεινε αρκετά από τα χαρακτηριστικά της προηγούμενης έκδοσης και έφερε και κάποια νέα. Οι επεκτάσεις αφορούσαν πολλαπλούς τομείς όπως Active Antenna Systems (AAS), beamforming, MIMO, carrier aggregation, CoMP, ProSe και M2M (MTC). Κάποια νέα χαρακτηριστικά της έκδοσης αυτής που αξίζει να αναφέρουμε λίγο πιο αναλυτικά είναι:

Licensed Assisted Access for LTE (LAA): Το LAA είναι μια προσπάθεια από την 3GPP να προτυποποιήσει τη λειτουργία του δικτύου σε άλλες ζώνες κα κυρίως στις ζώνες που χρησιμοποιεί το WiFi. Προσπαθεί να επιτύχει αρμονική συνύπαρξη με τις άλλες τεχνολογίες, αφενός ψάχνοντας κομμάτια του μη αδειοδοτούμενου φάσματος με χαμηλό φορτίο, από την άλλη χρησιμοποιώντας μια τεχνική listen-before-talk, κατά την οποία ο πομπός βεβαιώνεται ότι δεν υπάρχει άλλη μετάδοση στη συχνότητα [11].

Narrowband IoT (NB-IoT): Το NB-IoT είναι μια τεχνολογία χαμηλής ισχύος WAN με στόχο την προσαρμογή του δικτύου σε IoT απαιτήσεις.

Η έκδοση 14 από την άλλη ξεκίνησε το 2014 και αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2017. Αν και ακόμα είναι νωρίς για την ολοκλήρωση των πεδίων έρευνας, κύριο επίκεντρο των ερευνών για την 14η έκδοση αποτελούν μεταξύ άλλων η βελτίωση στις κρίσιμες επικοινωνίες (mission critical), η υποστήριξη Vehicle-to-everything (V2X) υπηρεσιών, η μείωση στην καθυστέρηση και επεκτάσεις για περιπτώσεις carrier aggregation.

3.4.7. Έκδοση 15 (LTE evolution και IMT 2020)

Όπως είναι εμφανές, με κάθε νέα έκδοση το σύστημα LTE-A προσεγγίζει το σύστημα 5G ενσωματώνοντας τεχνολογίες όπως M2M, μικροκυψέλες, IoT, λειτουργία στην 5GHz ζώνη, virtualization κα. Το σύστημα που θα προκύψει από τη συνεχή εξέλιξη αναφέρεται ως LTE-Advanced evolution από την 3GPP που υποστηρίζει ότι θα υπάρχει για

πολλά χρόνια ακόμα είτε συγκλίνοντας είτε συνυπάρχοντας με το σύστημα 5G αν αυτό είναι ασύμβατο με τις προηγούμενες γενιές (κάτι που θεωρείται και το πιθανότερο) [12]. Η συνέχεια η οποία χαρακτηρίζει τις εξελίξεις έγινε εμφανής με το workshop της 3GPP το 2015 και τίτλο “RAN 5G Workshop - The Start of Something”. Η πρώτη κεφαλαιοποίηση της έρευνας αναμένεται να γίνει το 2018 με την οριστικοποίηση της έκδοσης 15 που ξεκίνησε το 2016 και αναμένεται να περιέχει τις προδιαγραφές για το 5G.

3.5. 5G

Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει κάποιο γενικά αποδεκτό πρότυπο για το πώς θα είναι ακριβώς το 5G, και διάφοροι οργανισμοί και κοινοπραξίες επεξεργάζονται προς το παρόν τις δικές τους υλοποιήσεις. Παρόλα αυτά η πλειοψηφία των πρωτοβουλιών αυτών έχει καταλήξει σε πολλαπλά κοινά σημεία όσο αφορά τους στόχους, τις κατευθύνσεις και τις υποψήφιες τεχνολογίες που συγκεντρώνουν υψηλές πιθανότητες να συμπεριληφθούν.

Οι διαβουλεύσεις για τη μορφή και τα στοιχεία της επόμενης γενιάς κινητών δικτύων ξεκίνησαν πριν ακόμα το 4G γίνει διαθέσιμο σε ευρεία κλίμακα. Βλέποντας τη μαζική έκταση των υπηρεσιών μέσω ασύρματης πρόσβασης, παράγοντες της βιομηχανίας και της έρευνας γρήγορα ξεκίνησαν τον αγώνα δρόμου προς το νέο πρότυπο, επιθυμώντας να αποκτήσουν το χρονικό πλεονέκτημα ως προς τους ανταγωνιστές τους. Τόσο ατομικά, όσο και μέσω ισχυρών συνεργασιών παγκοσμίως ξεκίνησαν οι συζητήσεις, καταρχήν να καθορίσουν το πλαίσιο στο οποίο θα κινηθεί το πρότυπο. Με αυτό το σκοπό, έγιναν προβλέψεις για τις μελλοντικές συνθήκες. Αυτές περιλάμβαναν τις ανάγκες σε επιδόσεις την επόμενη δεκαετία, όπως ταχύτητα δεδομένων, χωρητικότητα, καθυστέρηση, ενεργειακή κατανάλωση, ιδέες όπως IoT.

Τελικώς υπήρξε σύγκλιση σχετικά με τους στόχους και τις άτυπες προδιαγραφές που θα έπρεπε να επιτύχει. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν τη μορφή του δικτύου ως προς τις δυνατότητες που πρέπει να καλύπτει, τις επιδόσεις που πρέπει να επιτυγχάνει και κάποιες νέες ή βελτιωμένες τεχνολογίες που θα πρέπει να ενσωματώνει. Ο γενικός στόχος είναι να παρέχει πανταχού συνδεσιμότητα για κάθε είδους συσκευή και κάθε είδους εφαρμογή που μπορεί να επωφεληθεί με το να είναι συνδεδεμένες. Τα δίκτυα 5G δεν θα βασίζονται πιθανότατα σε μία συγκεκριμένη τεχνολογία πρόσβασης, αντίθετα θα είναι μια βεντάλια τρόπων πρόσβασης ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών και των συσκευών γενικότερα. Το 5G θα παρέχει ασύρματη συνδεσιμότητα για ένα ευρύ φάσμα νέων εφαρμογών και περιπτώσεις χρήσης, όπως σε συσκευές στα σπίτια, σε οχήματα, υπηρεσίες ασφάλειας, ιατρικής και βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτή η έκταση της διείσδυσης δείχνει πως το 5G θα αποτελέσει ζωτικής σημασίας παράγοντα για την επιτάχυνση της ανάπτυξης του IoT [13].

Το παραπάνω βέβαια μεταφράζεται σε ραγδαία αύξηση της κίνησης και της ζήτησης για συνδεσιμότητα μεγάλου εύρους ζώνης που θα χρειαστεί να υποστηρίξει. Θα πρέπει να υποστηρίξει επίσης μαζικό αριθμό συνδεδεμένων συσκευών και να ανταποκρίνεται σε κρίσιμες εφαρμογές αξιόπιστα και με χαμηλή καθυστέρηση.

Αυτό θα είναι εφικτό με την υιοθέτηση πολλαπλών ράδιο διασυνδέσεων που θα επιλέγονται βάσει της εφαρμογής και των απαιτήσεών της. Η συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών θα αποτελεί κύριο συστατικό του συστήματος μετατρέποντας τη διαλειτουργικότητα σε κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας. Αυτό θα βοηθήσει και τη ευκολότερη μετάβαση στη νέα γενιά αφού θα διευκολύνει την συνύπαρξη με τις τεχνολογίες που ήδη θα χρησιμοποιούνται τότε, όπως πιθανόν μια εξελιγμένη έκδοση του LTE-A.

3.6. 5G επιδόσεις

Καθώς ο κύκλος κάθε γενιάς παραδοσιακά καλύπτει περίπου μια δεκαετία, και αφού οι πρώτες εμπορικές αξιοποιήσεις του 5G τοποθετούνται χρονικά στο 2020, το νέο σύστημα πρέπει να σχεδιασθεί ώστε να καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες και απαιτήσεις που θα εμφανιστούν τη δεκαετία 2020-2030. Υπό αυτό το πρίσμα, οι απαιτήσεις για το νέο σύστημα σε σχέση με τα σημερινά υπάρχοντα συστήματα εκτινάσσονται και το άλμα στις επιδόσεις πρέπει να τις αντανakλά. Παρακάτω παρουσιάζουμε συνοπτικά κάποιες μετρικές και σε ποιο βαθμό το νέο σύστημα πρέπει να τις καλύπτει.

- **Χωρητικότητα:** Η κίνηση στα δίκτυα κινητής τα τελευταία χρόνια έχει εκτιναχθεί. Μελέτες για την πρόβλεψη της κίνησης στο άμεσο και απώτερο μέλλον έχουν δείξει ότι ο ρυθμός αύξησης θα παραμείνει σημαντικός [14][15]. Χοντρικές εκτιμήσεις τοποθετούν τον αριθμό των συνδεδεμένων χρηστών σε 7 δις και τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών σε 7 τρις. Άτυπα, η χωρητικότητα στα νέα δίκτυα αναμένεται να είναι 1000 φορές υψηλότερη συγκριτικά με τις δυνατότητες των δικτύων του 2010 [16]. Αυτό σημαίνει πως οι δυνατότητες των δικτύων σε χωρητικότητα οφείλουν να υποστηρίζουν τη δραματική αυτή αύξηση σε κίνηση με τρόπο οικονομικά βιώσιμο και ενεργειακά διαχειρίσιμο. Επίσης θα πρέπει να διαχειρίζονται επαρκώς και τα διαφορετικά είδη κίνησης και την επιβάρυνση που κάτι τέτοιο επιφέρει σε σηματοδοσία, συντονισμό κλπ.
- **Υψηλότερη ρυθμ απόδοση:** Ανάλογα με το σενάριο, οι ταχύτητες που θα μπορεί να επιτευχθούν θα είναι 10-100 φορές υψηλότερες σε σχέση με τις προδιαγραφές της προηγούμενης γενιάς [17]. Χοντρικά αναμένεται ότι θα φτάνει σε ταχύτητες έως και 10Gbps σε εσωτερικές συνθήκες, 100Mbps-1 Gbps σε αστικές συνθήκες και τουλάχιστον 10Mbps σε αγροτικές/απομακρυσμένες περιοχές.
- **Εξαιρετικά χαμηλό latency:** Το σύστημα θα πρέπει να υποστηρίζει από εφαρμογές που έχουν ακραίες απαιτήσεις για χαμηλό latency μέχρι εφαρμογές που ο παράγοντας αυτός δεν έχει καμία σημασία. Στόχος είναι να υποστηρίζει έως και 5 φορές μικρότερη end-to-end (E2E) latency, φθάνοντας τα 5ms για κρίσιμες εφαρμογές.
- **Αξιοπιστία και διαθεσιμότητα:** Το χαρακτηριστικό αυτό εντός του συστήματος αναφέρεται και ως ultra-reliable communications (URC). Κριτήριο για αυτό είναι το σύστημα να επιτυγχάνει επικοινωνίες εξαιρετικής αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας.
- **Ενεργειακή απόδοση δικτύου:** Η τεράστια κλιμάκωση σε παροχή υπηρεσιών και αριθμό συσκευών δημιουργεί προκλήσεις στους παρόχους για τη δημιουργία

οικονομικά βιώσιμων και οικολογικά φιλικών δικτύων. Ο στόχος που έχει τεθεί είναι μείωση 90% της ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με συστήματα 4G.

- Αποδοτικές συσκευές: Άτυπα ο στόχος είναι 10 φορές μεγαλύτερη διάρκεια μπαταρίας για τις συσκευές χαμηλής ισχύος. Επιπλέον, εφόσον ο αριθμός θα αυξηθεί δραματικά, το ίδιο πρέπει να συμβεί και για το κόστος ανά συσκευή προκειμένου το συνολικό κόστος να παραμείνει σε διαχειρίσιμα επίπεδα.

Για την επίτευξη των παραπάνω πλήθος καινοτόμων ιδεών και τεχνολογιών έχουν προταθεί. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά στις τεχνολογίες και τα χαρακτηριστικά που συγκεντρώνουν τις περισσότερες πιθανότητες να επιτύχουν τους στόχους αυτούς και να ενσωματωθούν στο νέο πρότυπο.

3.7. 5G Radio Access Network

Το 5G σχεδιάζεται να είναι πολυπρόσωπο, αποτελεσματικό και επεκτάσιμο. Αυτό θα πρέπει να αντανακλάται σε όλη την αρχιτεκτονική του, και ίσως περισσότερο στο RAN. Καταρχήν, οφείλει να αποδίδει σωστά σε όλο το εύρος απαιτήσεων, από χαμηλές ταχύτητες αισθητήρων μέχρι υψηλές ταχύτητες κατεβάσματος χρηστών. Κατόπιν, για την αποδοτικότερη και εξυπηρέτηση των διαφορετικών μεταξύ τους εφαρμογών, θα πρέπει να κάνει εκτενή αξιοποίηση των Software Defined Networks (SDN) και Network function virtualization (NFV). Αυτό λέγεται Network Slicing, κατά το οποίο εφαρμόζονται SDN και NFV, ώστε να επιτρέπεται η δημιουργία λογικών μεριδίων του δικτύου όπου το καθένα θα παραμετροποιείται με βάση την υπηρεσία που θα κληθεί να καλύψει. Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει το RAN είναι η υποστήριξη του D2D. Επιπλέον, ένα ακόμα κύριο γνώρισμα του νέου συστήματος είναι η αξιοποίηση υψηλών συχνοτήτων.

Τέλος κάποιες προδιαγραφές του RAN μεταφέρονται αυτούσια από τις γενικότερες προδιαγραφές του προτύπου. Μεταξύ αυτών είναι η ενεργειακή απόδοση που είναι σημαντικότερο χαρακτηριστικό του 5G και το RAN οφείλει να ανταπεξέλθει ανάλογα. Και είναι και η επεκτασιμότητα, κύριο γνώρισμα προτύπου που θέλει να θεωρείται επιτυχημένο για μια μακρά περίοδο, όπως προορίζεται να είναι το 5G.

Οι τεχνολογίες RAT (Radio Access Technology) πάνω στις οποίες θα βασιστεί το RAN οφείλουν να εξυπηρετούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Καθώς το εύρος εφαρμογών θα είναι μεγάλο, από MTC χαμηλών ρυθμών μετάδοσης και κατανάλωσης ενέργειας μέχρι Extreme Mobile Broadband (xMBB) υψηλότατης ρυθμαπόδοσης, μια μόνο τεχνολογία διασύνδεσης δε θα είναι αρκετή. Αντίθετα οι περισσότεροι αναμένουν ότι το 5G θα περιλαμβάνει αρκετές διαφορετικές τεχνολογίες φυσικού στρώματος στο RAT ή μία βασική αλλά παραμετροποιήσιμη. Κάτι τέτοιο θα επιτρέψει την υιοθέτηση της καταλληλότερης τεχνολογίας ανά περίπτωση. Για παράδειγμα, όταν απαιτείται ευρεία κάλυψη θα προτιμάται η υιοθέτηση του RAT που είναι αποτελεσματικότερο σε τέτοια σενάρια και λειτουργεί καλύτερα στις μικρές συχνότητες. Αντίθετα, σε σενάρια που απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης θα προτιμούνται RATs που είναι αποτελεσματικότερα σε υψηλότερες συχνότητες.

Αν και υπάρχει ομοφωνία ως προς τον τρόπο με τον οποίο το 5G θα εμπερικλείει πολλαπλές τεχνολογίες για το radio interface, ο αριθμός τους και ποιες θα είναι ακριβώς δεν έχει ακόμα καθοριστεί. Το έργο Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society 5G (METIS και METIS II), ένας από τους κύριους οδηγούς στην έρευνα για τη νέα γενιά κινητών δικτύων, έχει κατασταλάξει σε μια σειρά από χαρακτηριστικά που οι υποψήφιες τεχνολογίες πρέπει να καλύπτουν [18]. Αυτά είναι:

- Η χρήση μιας κυματομορφής με παραλλαγές ή συνύπαρξη διαφορετικών (π.χ. OFDM/FBMC (Orthogonal Frequency Division Multiplex/Filterbank Multi-Carrier))
- Η πλειοψηφία των κυριότερων υποψήφιων τεχνολογιών βασίζονται στη λογική του LTE-A για τη διαμοίραση πόρων στο χρόνο και τη συχνότητα
- Η ευρεία χρήση quadrature amplitude modulation (QAM)

Οι κυριότερες τεχνολογίες σύμφωνα με το METIS που μπορεί να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του 5G και καλύπτουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι:

OQAM (Offset Quadrature Amplitude Modulation)/FBMC: Σε αυτή την κυματομορφή γίνεται φιλτράρισμα ανά subcarrier, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των φορέων κάτι που συμβαίνει στο παραδοσιακό OFDM του LTE-A. Χρησιμοποιεί OQAM και δεν υπάρχει cyclic prefix.

QAM/FBMC: Παραλλαγή της προηγούμενης με QAM.

P-OFDM (Pulse shaped OFDM): άλλη μια υλοποίηση στην οποία έχουμε φιλτράρισμα των subcarriers, QAM και ορθογωνιότητα.

F-OFDM/UF-OFDM (Filtered/Universal Filtered OFDM): Σε αυτή την προσέγγιση το φιλτράρισμα γίνεται σε ένα υποσύνολο του φάσματος, δηλαδή σε έναν αριθμό από subcarriers. Οι παραπάνω 4 προσεγγίσεις μοιράζονται κάποια χαρακτηριστικά, όπως ευελιξία στο φάσμα, χαμηλές out of band εκπομπές λόγω φιλτραρίσματος κλπ.. Αν και είχαν σχεδιαστεί αρχικά για χρήση φάσματος κάτω από 6GHz, η εφαρμογή τους μπορεί να μεταφερθεί και σε υψηλότερες συχνότητες.

Cyclic prefix OFDM for xMBB in mmWave bands: Αυτή η κυματομορφή διατηρεί πολλά χαρακτηριστικά της κυματομορφής του LTE-A όπως cyclic prefix, ορθογωνιότητα με αποτέλεσμα να υπάρχει συμβατότητα προς τα πίσω. Καθώς προορίζεται κυρίως για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης, η χρήση της επικεντρώνεται σε φάσμα mm μήκους κύματος.

Cyclic prefix OFDM for cell-edge and energy efficient application: Με πολλά κοινά στοιχεία με την προηγούμενη, αυτή η κυματομορφή προορίζεται για χρήστες στις άκρες των κυψελών και για ενεργειακά κρίσιμες εφαρμογές. Κυρίως στοχεύει στην χρήση φάσματος κάτω από 6GHz.

Harmonized OFDM enhancements: Βασισμένη στο cyclic prefix OFDM με τη δυνατότητα διαφορετικών παραμέτρων ανάλογα τη συχνότητα, η κυματομορφή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλο το διαθέσιμο φάσμα.

Communication with relaxed synchronism (CRS): Κυρίως για D2D και MTC επικοινωνία, χαρακτηρίζεται μεταξύ άλλων από χαλαρότερες προδιαγραφές συγχρονισμού.

Χαρακτηριστικό των παραπάνω είναι πως οι περισσότερες προσεγγίσεις είναι μερικώς ή και πλήρως συμβατές με την OFDM προσέγγιση του LTE-A. Αυτό το γεγονός είναι που μας επιτρέπει να προβάλλουμε σε μεγάλο βαθμό τα ευρήματα της παρούσας διατριβής σε μελλοντικές υλοποιήσεις του 5G προτύπου. Πάνω σε αυτό θα αναφερθούμε εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

3.8. 5G Machine-type communication

Μια σημαντική πρωτοπορία του 5G είναι οι Machine-type communication (MTC). Οι MTC μπορούμε να πούμε ότι αναφέρονται σε σενάρια επικοινωνίας που τα από άκρη σε άκρη στοιχεία είναι μηχανές. Υπό τον ορισμό αυτό, μπορούμε να φανταστούμε ότι τα σενάρια, οι περιπτώσεις και οι δυνατότητες που ανοίγονται είναι άπειρα, ενώ εμπεριέχει και πλήθος εννοιών όπως IoT και IoE. Από έξυπνες πόλεις με δισεκατομμύρια αισθητήρες που καθορίζουν κρίσιμες λειτουργίες όπως την κίνηση στους δρόμους μέχρι τη μέτρηση μετρικών για την βελτίωση της ζωής των ανθρώπων.

Παρόλο που εκτείνονται σε μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών, μια πρώτη κατηγοριοποίηση, βασισμένη κυρίως στην τεχνολογική υλοποίηση, είναι η διαίρεση σε μαζικές MTC (massive MTC ή mMTC) και κρίσιμες (ultra reliable - uMTC) [19]. Οι mMTC αναφέρονται στη μαζική πρόσβαση ενός εξαιρετικά μεγάλου αριθμού συσκευών. Ο αριθμός μπορεί να φτάνει και μερικά δισεκατομμύρια και για αυτό το λόγο συνήθως αφορά συσκευές χαμηλής περιπλοκότητας, χαμηλού κόστους και μικρής κατανάλωσης ενέργειας, όπως οι αισθητήρες. Από την άλλη, η έτερη κατηγορία uMTC, αναφέρεται σε εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά αυστηρές προδιαγραφές στη διαθεσιμότητα, την αξιοπιστία και την καθυστέρηση. Η αυστηρότητα προέρχεται από το είδος των εφαρμογών που περιλαμβάνουν περιπτώσεις όπου η καθυστέρηση ή η έλλειψη αξιοπιστίας μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφικά αποτελέσματα. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών αποτελούν τεχνολογίες που αφορούν τη λειτουργία οχημάτων (vehicle-to-X ή V2X), την κυκλοφοριακή ασφάλεια και τον έλεγχο ακριβούς εξοπλισμού σε βιομηχανικές μονάδες.

3.9. 5G Χρήση Φάσματος

Προκειμένου να υποστηριχθούν οι απαιτήσεις της χωρητικότητας, έγινε νωρίς κατανοητό ότι θα έπρεπε να αναζητηθούν πόροι πέραν των 5GHz. Η απελευθέρωση του φάσματος οδήγησε σε εκτεταμένες έρευνες για την καλύτερη αξιοποίησή του τόσο κάτω από 6GHz μέχρι και 100GHz. Καθώς υπεύθυνος για τον ομαλό καταμερισμό του φάσματος για τις εκάστοτε χρήσεις, είναι διεθνώς ο οργανισμός ITU-R, κατά το World Radio Conference (WRC)-15 συμφωνήθηκε με αυτόν να γίνουν έρευνες σε ζώνες συχνοτήτων από 24.25 GHz μέχρι 86 GHz. Συγκεκριμένα οι ζώνες 24.25-27.5GHz, 31.8-33.4GHz, 37-40.5GHz, 40.5-42.5GHz, 42.5-43.5GHz, 45.5-47GHz, 447-47.2GHz, 7.2-50.2GHz, 50.4-52.6GHz, 66-76GHz και 81-86GHz. Οι έρευνες αναμένεται να κατασταλάξουν στην οριστική συμφωνία για την εκμετάλλευση των συχνοτήτων στο WRC-19.

Κατά μήκος του φάσματος οι διαφορετικές ζώνες παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Ως εκ τούτου, η εκμετάλλευση κάθε ζώνης στοχεύει στην κάλυψη διαφορετικών αναγκών και σεναρίων. Το φάσμα κάτω από 20 GHz και ιδιαίτερα κάτω από 6GHz παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά όσο αφορά τη χωρητικότητα και τη διάδοση. Από την άλλη, το φάσμα σε αυτές τις συχνότητες λόγω της ελκυστικότητας των χαρακτηριστικών του έχει οδηγήσει σε καταμερισμό του σε πολλές τεχνολογίες, μειώνοντας το διαθέσιμο φάσμα και διαιρώντας το φάσμα σε μικρά κομμάτια. Αν και το LTE-A ήδη έχει εισάγει την τεχνολογία carrier aggregation, κάνοντας εφικτή τη ταυτόχρονη χρήση φάσματος από διαφορετικές ζώνες, αυτό έχει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η πολυπλοκότητα των συσκευών και το overhead σήματος [20].

Από την άλλη οι ζώνες πάνω από 20 GHz, χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα εξαιρετικά υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Παράλληλα, ο καταμερισμός εδώ είναι πιο περιορισμένος, γεγονός που επιτρέπει τη κατανομή μεγάλων ποσοτήτων συνεχούς φάσματος και οδηγεί σε μικρότερη πολυπλοκότητα των συσκευών, λιγότερες παρεμβολές και μικρότερο overhead. Την ίδια στιγμή, οι ζώνες αυτές είναι σημαντικά ευάλωτες σε απώλειες λόγω απόστασης και έλλειψης Line of Sight, παρουσιάζοντας υψηλή εξασθένιση. Αυτό τις καθιστά ιδανικές για χρήση σε πυκνά δίκτυα υψηλών απαιτήσεων. Οι έρευνες δείχνουν ότι η χρήση τους παρουσιάζει εξαιρετικά αποτελέσματα για backhaul συνδέσεις και Device to device (D2D) [21]. Παράλληλα, δείχνουν ότι τα προβλήματα διάδοσης μπορούν να υπερκεραστούν με τη χρήση massive MIMO και beamforming ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει LoS [22]. Γενικά, πάντως οι υψηλές συχνότητες αναμένεται ότι θα χρησιμεύσουν ως συμπλήρωμα στις χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων παρέχοντας πρόσθετους πόρους για την επίτευξη υπερυψηλών ταχυτήτων μεταφοράς δεδομένων και αύξηση της χωρητικότητας σε απαιτητικά μέρη χαμηλών αποστάσεων, ήτοι πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές.

3.10. Επιπλέον 5G τεχνολογίες

Σαφώς, θα ξέφευγε από το σκοπό της διατριβής αυτής, η αναλυτική παρουσίαση κάθε τεχνολογικής καινοτομίας και βελτίωσης που έχει μέχρι τώρα υιοθετηθεί ή ερευνηθεί από τις ερευνητικές ομάδες που δουλεύουν πάνω στο σύστημα της νέας γενιάς. Παρακάτω, παρουσιάζουμε περιληπτικά κάποιες από τις σημαντικότερες τεχνολογίες ή προσεγγίσεις που προσθέτουν σημαντικά χαρακτηριστικά στο 5G.

Massive MIMO

Το massive MIMO (mMIMO) μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για ασύρματες συνδέσεις στο backhaul, πετυχαίνοντας εξαιρετικούς ρυθμούς μετάδοσης, όσο και στο δίκτυο πρόσβασης προσφέροντας ταυτόχρονη πρόσβαση σε πολλαπλούς χρήστες. Παράλληλα η χρήση του μπορεί να στοχεύσει τόσο για beamforming, όσο και για spatial multiplexing ή συνδυασμό τους [23]. Με το beamforming, οι περιοχές που εμφανίζονται παρεμβολές μειώνονται, η κάλυψη μεγαλώνει και οι ταχύτητες μεταφοράς αυξάνονται.

Με το spatial multiplexing που επιτρέπει το mMIMO, η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί έως και 10 φορές, και να πολλαπλασιαστεί ο αριθμός χρηστών που έχουν πρόσβαση ταυτόχρονα. Παράλληλα, το mMIMO επιτρέπει τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης έως και 100 φορές, εξαιτίας της συγκέντρωσης της ισχύος σε περιορισμένο χώρο [24].

Device to Device (D2D)

Η απευθείας επικοινωνία μεταξύ συσκευών χωρίς τη ανάγκη μεταφοράς μέσω του κυρίως δικτύου συζητείται ήδη από καιρό. Με την ονομασία proximity services (ProSe), η 3GPP έχει ήδη προχωρήσει στην ενσωμάτωση της δυνατότητας αυτής στην Release 12 του LTE-A. Καθώς το 5G είναι στη φάση του σχεδιασμού, έχει τη δυνατότητα να υλοποιήσει τη τεχνολογία εξαρχής και όχι ως συμπλήρωμα εκ των υστέρων όπως έγινε στην περίπτωση του LTE-A.

Ultra Dense Networks (UDN)

Όσο προηγμένες και να είναι οι τεχνολογίες ραδιοφάσματος, είναι προφανές πως οι δυνατότητες χωρητικότητας των παραδοσιακών αρχιτεκτονικών δε θα είναι αρκετές για την απαίτηση σε κίνηση που θα επιφέρει η κατακόρυφη αύξηση των συνδεδεμένων συσκευών. Αντίθετα, θα χρειαστεί η τοποθέτηση πολλαπλών σταθμών βάσεων διαφορετικών εμβλειών και χωρητικότητας. Τα υπερ-πυκνά αυτά δίκτυα (Ultra Dense Networks - UDN), θα αποτελούνται από τους κλασικούς κόμβους πρόσβασης μεγάλης εμβέλειας αλλά και από μικρότερους που θα στοχεύουν στην τοπική εξυπηρέτηση μιας περιοχής μεγάλων απαιτήσεων.

Ήδη τεχνολογίες small cells έχουν επιτυχημένα υιοθετηθεί στην προσπάθεια αύξησης της φασματικής απόδοσης αφαιρώντας σημαντικό φορτίο από το μακρο στρώμα και προσφέροντας υψηλές επιδόσεις σε χρήστες. Αυτό αναμένεται να συνεχιστεί τόσο ποσοτικά, δηλαδή με την κατακόρυφη αύξηση στη χρήση τους, όσο και ποιοτικά, δηλαδή με την ενσωμάτωση κινούμενων κόμβων πρόσβασης, σε αυτοκίνητα, τρένα κλπ. Κάποιοι ερευνητές προβλέπουν πως ο αριθμός τους πιθανόν να ξεπεράσει και αυτόν των ενεργών χρηστών [25]. Φυσικά, η παρουσία πολλαπλών σταθμών βάσεων σε μια μικρή περιοχή δε μπορεί να μη επιφέρει και μια σειρά προκλήσεων. Οι κυριότερες αφορούν τη διαχείριση παρεμβολών, την υποστήριξη κινητικότητας των χρηστών και την αντιμετώπιση του υψηλού κόστους τους [26]. Άλλες προκλήσεις περιλαμβάνουν τη συχνότητα των μεταπομπών, τους μηχανισμούς χρέωσης κλπ. Τα προβλήματα αυτά περιπλέκονται ακόμα περισσότερο αν κανείς λάβει υπόψη του πως υπάρχουν προτάσεις για διαχωρισμό της εξυπηρέτησης της uplink και της downlink κίνησης, καθώς και για διαχωρισμό του control και του user plane [27].

Το θέμα των παρεμβολών σε UDNs αποτελεί ουσιαστικά το κίνητρο πίσω από τη διατριβή αυτή και αφιερώνουμε σημαντικό μέρος στο επόμενο κεφάλαιο.

Σηματοδοσία

Οι διαδικασίες σηματοδοσίας ελέγχου και χρήσης θα πρέπει να σχεδιαστούν ώστε να προσαρμόζονται βάσει της εκάστοτε περίπτωσης. Στην περίπτωση κλασικής σύνδεσης χρήστη για παράδειγμα, ο διαχωρισμός του control και του user plane μπορεί να είναι ιδιαίτερα εξυπηρετικός. Ενώ τα δεδομένα μπορεί να στέλνονται στις υψηλές συχνότητες, τα σήματα ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιούν τις χαμηλές. Ένας εναλλακτικός διαχωρισμός μπορεί να γίνει σε επίπεδο στρωμάτων. Δηλαδή, τα data να προέρχονται από κοντινά small cells, ικανά για μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς, ή ακόμα και μέσω D2D επικοινωνίας και οι διαδικασίες ελέγχου να αποστέλλουν τις πληροφορίες μέσω του macrocell στρώματος. Από την άλλη, σε περιπτώσεις MTC, ενδείκνυται η στενή σχέση μεταξύ control και data plane και την ελαχιστοποίηση της σηματοδοσίας και μεταφερόμενης πληροφορίας [26].

Vehicle to Vehicle, Device and Infrastructure (V2X)

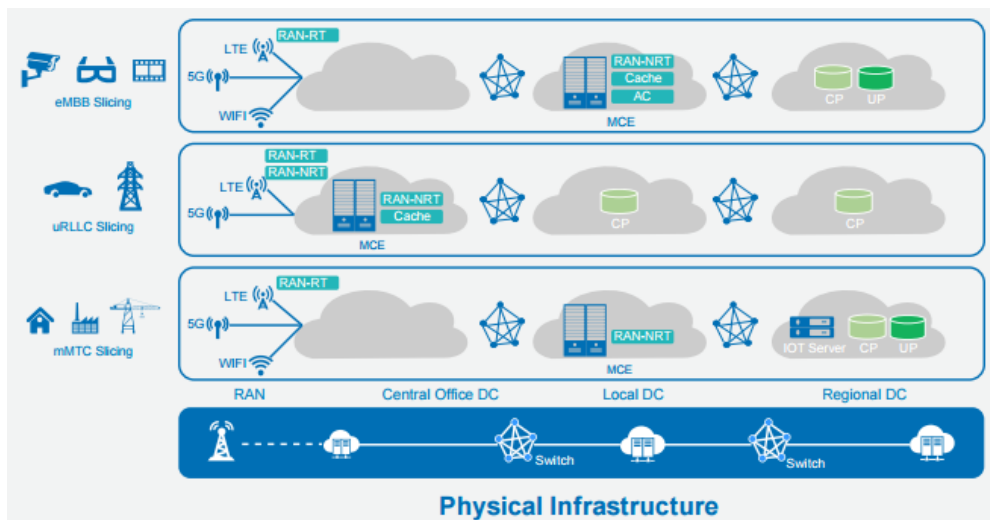
Η τεχνολογία V2X αφορά την επικοινωνία οχημάτων με άλλα οχήματα, συσκευές ή άλλες δομές. Οι δυνατότητες αυτής είναι εξαιρετικά σημαντικές περιλαμβάνοντας καλύτερο έλεγχο της κίνησης στους δρόμους, ενημέρωση των οδηγών, παροχή βοήθειας σε κρίσιμες καταστάσεις, καλύτερη ασφάλεια στο δρόμο κλπ. Φυσικά αυτές οι υπηρεσίες χαρακτηρίζονται από υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας καθώς οι κίνδυνοι για την ασφάλεια των οδηγών όσο και για την εύρυθμη κυκλοφοριακή λειτουργία είναι καταστροφικοί.

3.11. 5G Αρχιτεκτονική

Όπως θα έχει γίνει κατανοητό ως τώρα, το 5G θα επαναπροσδιορίσει το τι μπορεί να γίνει και τι όχι όσο αφορά τη συνδεσιμότητα των πάντων, αποτελώντας ένα τεράστιο βήμα για το όραμα του μέλλοντος. Η κλιμάκωση αυτή τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά με νέες προσεγγίσεις και δυνατότητες πρέπει να προσφέρει τις δυνατότητες να καλύψει τις ανάγκες των χρηστών έως το 2030. Πλέον δε μιλάμε για μονοδιάστατες προσεγγίσεις, αλλά για ένα πλαίσιο το οποίο είναι ικανό να περιέχει πλήθος τεχνολογικών δυνατοτήτων πολύ διαφορετικών μεταξύ τους και να υποστηρίζει ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών. Τα νέα αυτά σενάρια δε φέρνουν μόνο νέες απαιτήσεις, αλλά δημιουργούν την ανάγκη και για υποδομές με τεράστιες δυνατότητες επεξεργασίας και αποθήκευσης. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική πρέπει να υποστηρίζει τα παραπάνω με τρόπο ευέλικτο, αποδοτικό, ασφαλές, οικονομικά βιώσιμο και ενεργειακά αποδοτικό.

Αν και είναι νωρίς και η έρευνα ακόμα συνεχίζεται, οι περισσότεροι φορείς έχουν κατασταλάξει σε ορισμένες πτυχές της αρχιτεκτονικής που αναμένεται να έχει το 5G. Μια από τις κύριες διαφορές σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές είναι η μετάβαση από δίκτυα οντοτήτων σε δίκτυα λειτουργιών [18]. Αυτό σημαίνει ότι τα δίκτυα θα φτιάχνονται γύρω από τις λειτουργίες τις οποίες θα εξυπηρετούν έχοντας τη δυνατότητα να τις προσφέρουν κατ' απαίτηση.

Απέναντι σε αυτό το πλαίσιο, δημιουργήθηκε η έννοια network slicing. Το network slicing είναι ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του 5G, και θα παίξει κύριο ρόλο στην επίτευξη της ευελιξίας που απαιτείται από το δίκτυο. Ουσιαστικά σημαίνει πως οι πόροι του δικτύου θα μπορούν να χωρίζονται δυναμικά προκειμένου να δημιουργούν “slices”, ήτοι συλλογές από λειτουργίες που απαιτούνται για μια συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης. Τα slices θα αντιπροσωπεύονται από μια σειρά ρυθμίσεων που θα αντανακλούν συγκεκριμένους πόρους, τεχνολογίες RAT και συνδέσεις στο δίκτυο κορμού.



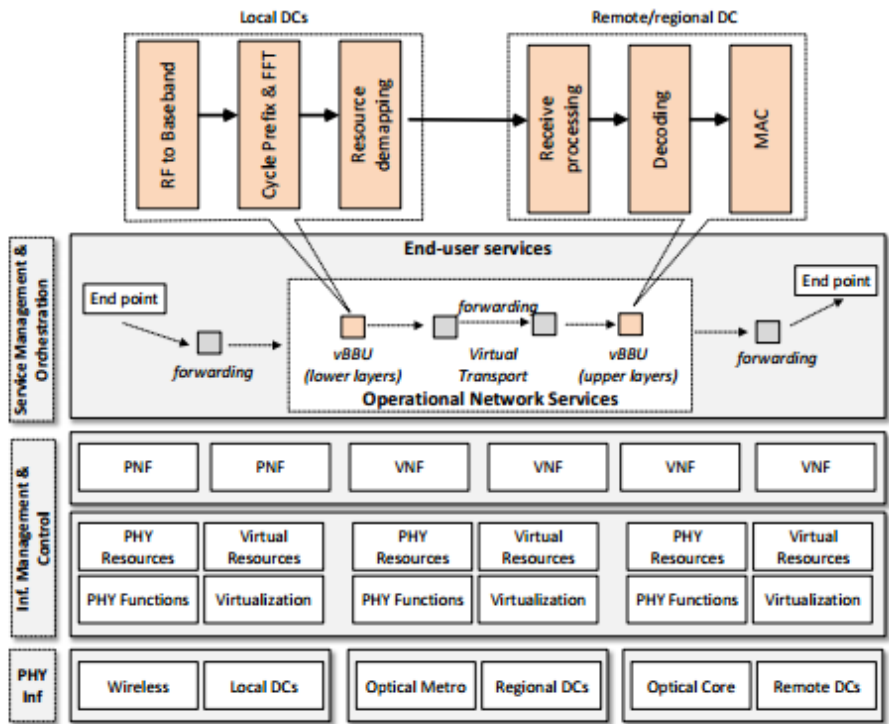
Εικόνα 9. Κάθε τύπος υπηρεσίας θα χρησιμοποιεί το δικό της slice δικτύου (Huawei)

Αυτές οι λειτουργίες μπορούν να θεωρηθούν είτε φυσικές-πραγματικές ή εικονικές δηλαδή συλλογή από πραγματικές λειτουργίες που αντιπροσωπεύουν μία συνολική δυνατότητα του δικτύου. Η διαχείριση του δικτύου σε επίπεδο εικονικών λειτουργιών βασίζεται στις προσεγγίσεις SDN και NFV πάνω στις οποίες θα βασίζεται μεγάλο μέρος του δικτύου.

Φυσικά κάτι τέτοιο επηρεάζει και τον τρόπο που προσδιορίζεται η φυσική αρχιτεκτονική του δικτύου. Η παραδοσιακή κατανομημένη προσέγγιση παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς όσο αφορά την κεντρική διαχείριση του δικτύου και το συντονισμό που απαιτείται. Αντίθετα η αρχιτεκτονική για το 5G μεταφέρει μεγάλο όγκο των μονάδων αποθήκευσης και υπολογιστικών μονάδων στο cloud. Αυτό το επιτυγχάνει με το φυσικό διαχωρισμό των BaseBand Unit (BBU) μονάδων με τις μονάδες radio, γεγονός που επιτρέπει την μαζική τοποθέτηση των BBU μονάδων κεντρικά και την απομακρυσμένη διαχείριση των σταθμών βάσεων. Η αρχιτεκτονική αυτή ονομάζεται Cloud Radio Access Network (C-RAN) και αν και απαιτεί υψηλότατο εύρος ζώνης στο δίκτυο μεταφοράς, αποτελεσματικό συγχρονισμό και ελάχιστες καθυστερήσεις, προσφέρει πλήθος πλεονεκτημάτων, όπως συντονισμό μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών και υπηρεσιών, καλύτερη διαχείριση των λειτουργιών, και γρηγορότερη εγκατάσταση των υποδομών.

Οι υποδομές του C-RAN αναμένεται να διαχωρίζονται σε τρία στρώματα. Στο πρώτο, που θα αποτελείται από micro Data Centers (DC) και θα ονομάζονται Mobile Edge Computing (MEC) θα βρίσκονται πολύ κοντά στο RAN. Το αμέσως επόμενο επίπεδο DC μεγαλύτερης κλίμακας θα καλύπτει τις απαιτήσεις σε τοπικό επίπεδο και το ανώτερο

στρώμα σε επίπεδο μιας μεγάλης περιοχής. Πάνω σε αυτή την ενοποιημένη υποδομή, και με τη χρήση NVF και SDN θα προσφέρονται τα λειτουργικά slices. Η ενοποίηση και κεντρική διαχείριση εξυπηρετεί τον συντονισμό σε μεγάλη κλίμακα, την καλύτερη διαχείριση πόρων, την εύκολη επέκταση ή σμίκρυνση των υποδομών και τη μείωση του κόστους εγκατάστασης και διαχείρισης.



Εικόνα 10. Οι 5G υποδομές θα παρέχουν ολοκληρωμένη δικτύωση και θα παρέχουν υψηλές δυνατότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας

3.12. Οργανισμοί και χρονοδιάγραμμα 5G

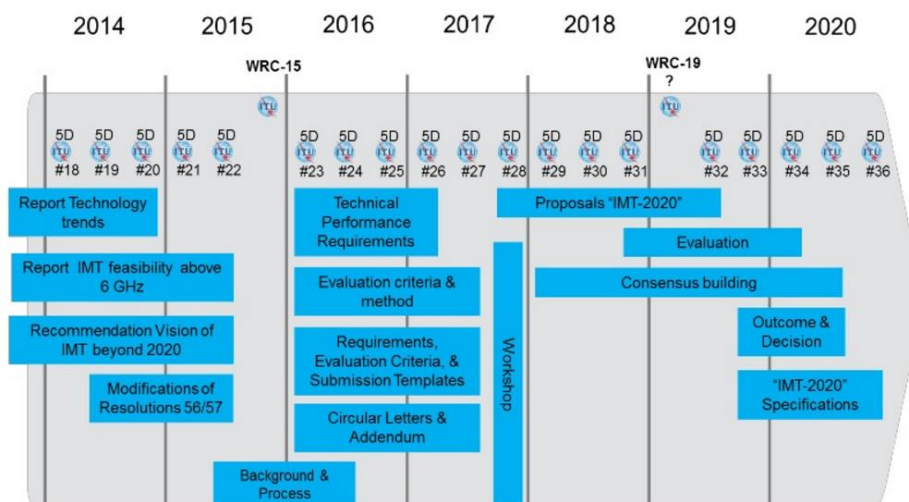
Σε ένα τέτοιας κλίμακας έργο όπως το 5G, πλήθος οργανισμών μετέχουν στην έρευνα και προτυποποίησή του, ο καθένας στοχεύοντας σε ένα συγκεκριμένο τομέα. Για τον καλύτερο συντονισμό τόσο σε οικονομικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο, έχουν δημιουργηθεί φορείς-ομπρέλες που αναλαμβάνουν μεταξύ άλλων την καλύτερη συνεννόηση μεταξύ των έργων και την αποφυγή επικάλυψης στην έρευνα. Παρακάτω αναφέρουμε κάποιους από τους σημαντικότερους φορείς και οργανισμούς:

5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP): Ο οργανισμός 5G PPP αποτελεί μια πρωτοβουλία της ευρωπαϊκής επιτροπής στην οποία συμμετέχουν πλήθος βιομηχανικών κατασκευαστών, παρόχων τηλεπικοινωνιών, ερευνητικών κέντρων, πανεπιστημίων και εταιρειών όπως οι Ericsson, Huawei Technologies Düsseldorf GmbH, Intel Mobile Communications, Deutsche Telekom κ.α. ενώ υπάρχει σύνδεση και με φορείς όπως ETSI και NGMN.

3rd Generation Partnership Project (3GPP): Κύριος στόχος του οργανισμού είναι η εξέλιξη του LTE ενώ πλέον επισήμως αποφάσισε η Release 15 να αφορά τις προδιαγραφές

του 5G. Ο οργανισμός προβλέπει ότι οι εργασίες για τη δημοσίευση των προδιαγραφών RAN θα ξεκινήσουν το 2017 και θα έχουν ολοκληρωθεί το 2018.

ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of the International Telecommunications Union): Ο ITU-T μέσω του ITU-T IMT 2020 καλύπτει όλους τους τομείς του δικτύου που αφορούν την αρχιτεκτονική, τη διαχείριση και τις SDN και NVF παραμέτρους τους.



Εικόνα 11. Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης προς το 5G από την ITU

Άλλοι: Άλλοι οργανισμοί με συμμετοχή στην έρευνα για το νέο πρότυπο κινητών δικτύων είναι οι European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Internet Engineering Task Force (IETF), Open Networking Forum (ONF) και oneM2M.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: FEMTOCELLS

FEMTOCELLS

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των femtocells, η ενσωμάτωσή τους σε δίκτυα νέας γενιάς, καθώς και τεχνικές προκλήσεις και ζητήματα που προκύπτουν από την εγκατάστασή τους.

4.1. Εισαγωγή

Η έννοια του femtocell για πρώτη φορά μελετήθηκε από τα Bell Labs της Alcatel-Lucent το 1999. Το 2002, η Motorola ανακοίνωσε το πρώτο σταθμό βάσης για οικιακή χρήση. Ωστόσο, ήταν το 2005 όταν η έννοια του σταθμού βάσης στο σπίτι, άρχισε να αποκτά ευρύτερη αποδοχή. Το 2006, υιοθετήθηκε ο όρος «femtocell». Τον Φεβρουάριο του 2007, ένας αριθμός εταιρειών παρουσίασε femtocells στο 3GSM World Congress (Βαρκελώνη), ανακοινώνοντας τις πρώτες δοκιμές. Τον Ιούλιο του 2007, το Femto Forum [28] ιδρύθηκε για την προώθηση της τεχνολογίας femtocell και την ανάπτυξή της σε όλο τον κόσμο. Όταν οι προτυποποιήσεις HNodeB (HNB) και HeNodeB (HeNB) εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην έκδοση 8 του LTE, ορίζοντας έτσι την υλοποίηση των femtocells σε περιβάλλον LTE, αποδείκνυε ότι είχε γίνει μια ευρέως αποδεκτή τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης.

Το μέλλον για τα femtocells αναμένεται ακόμα καλύτερο και στα προηγούμενα κεφάλαια ήδη αναφερθήκαμε στον κυρίαρχο ρόλο που θα παίξουν (όπως και τα small cells γενικότερα) στα νέα συστήματα κινητών δικτύων. Πριν φτάσουμε στο σημείο αυτό όμως, τα small cells αρχικά δημιουργήθηκαν να συμπληρώσουν το macro στρώμα σε σημεία που το σήμα της macrocell κεραίας δεν ήταν αρκετό. Καθώς, 2/3 των κλήσεων και πάνω από το 90% των υπηρεσιών δεδομένων συμβαίνουν σε εσωτερικούς χώρους, ήταν εξαιρετικά σημαντικό για τους παρόχους κινητής να παρέχουν καλή κάλυψη στο εσωτερικό των κτιρίων, όχι μόνο για υπηρεσίες φωνής, αλλά και βίντεο και άλλες υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων. Την ίδια στιγμή, ορισμένες έρευνες έδειχναν ότι το 45% των νοικοκυριών και το 30% των επιχειρήσεων [29], παρουσίαζαν σημαντικά προβλήματα κάλυψης. Καθώς η καλή κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους και η υψηλή ποιότητα των υπηρεσιών δημιουργούν περισσότερα έσοδα για τις επιχειρήσεις, η ενίσχυση της εμπιστοσύνης των συνδρομητών και η μείωση των αποσυνδέσεων, ήταν ψηλά στην ατζέντα των συνδρομητών. Αποτελούσε, όμως και μεγάλη πρόκληση για τους παρόχους.

Η τυπική προσέγγιση μέχρι πρόσφατα για την παροχή κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους και την εξυπηρέτηση πυκνοκατοικημένων περιοχών ήταν να χρησιμοποιηθούν macrocells. Αυτή η προσέγγιση, όμως έχει μια σειρά από μειονεκτήματα:

- Η εγκατάσταση και συντήρηση macrocell σταθμών βάσεων είναι αρκετά κοστοβόρα, ενώ απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό. Επιπλέον, για την εξυπηρέτηση εσωτερικών χρηστών επιβάλλει αύξηση της ισχύς μετάδοσης του σταθμού βάσης ώστε να υπερβεί την απώλεια λόγω των εξωτερικών τοιχωμάτων (penetration loss)

- Ένα δίκτυο υψηλής χωρητικότητας χρειάζεται πολλούς εξωτερικούς σταθμούς βάσης, η απόκτηση των οποίων όμως έχει γίνει ιδιαίτερα δύσκολη σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

- Όσο αυξάνεται η πυκνότητα, οι απαιτήσεις για σωστό σχεδιασμό του δικτύου προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα γίνονται εξαιρετικά πολύπλοκες.

- Η απόδοση του δικτύου (π.χ., ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) σε εσωτερικούς χώρους δεν μπορεί να διασφαλιστεί, ιδίως, στην πλευρά που δεν έχουν οπτική επαφή με τους σταθμούς βάσης. Για να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί δεδομένων, απαιτείται υψηλότερη διαμόρφωση και κωδικοποίηση. Αυτό με τη σειρά του απαιτεί καλύτερες συνθήκες καναλιού, που μπορεί να επιτευχθούν μόνο σε συνθήκες που είναι κοντά σε σταθμούς βάσης.

- Η διείσδυση σε κτίρια σημάτων που λειτουργούν στα 2 GHz ή παραπάνω (όπως θα συμβαίνει σε δίκτυα 5G και 4G), δυσχεραίνει ιδιαίτερα την επίδοση σε σχέση με προσεγγίσεις που ο σταθμός βρίσκεται εντός του χώρου εξυπηρέτησης και δημιουργεί υψηλή απαιτούμενη κατανάλωση από τους σταθμούς βάσης για τους εσωτερικούς χρήστες.

- Η απόσταση των συσκευών από μακρινούς σταθμούς macrocell έχει αποτέλεσμα τη μικρή διάρκεια μπαταρίας.

- Οι πόροι σε φάσμα είναι περιορισμένοι, και σε κυψέλες μεγάλης έκτασης η αξιοποίηση του παρουσιάζει στενά όρια, αφού όλοι οι χρήστες της περιοχής πρέπει να μοιραστούν το ίδιο φάσμα.

Από τα παραπάνω, έγινε προφανές πως τα small cells προσφέρουν μια ελκυστική και βιώσιμη επιχειρηματική πρόταση σε περιοχές όπως τα μεγάλα εμπορικά κέντρα, κτίρια γραφείων και μεγάλες εταιρείες. Αυτά τα συστήματα προσφέρονται και εγκαθίστανται από τους παρόχους προσφέροντας καλύτερη κάλυψη, αποφόρτιση κίνησης από το macrocell, ενίσχυση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών και καλύτερες υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας δεδομένων. Με τις λύσεις αυτές, και την αξιοποίηση στην ορθογωνιότητα στο φάσμα η φασματική απόδοση αυξάνεται δραματικά. Επιτυγχάνονται καλύτερες συνθήκες καναλιού που επιτρέπουν σύστημα υψηλής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών.

Ακόμη και αν λύσεις όπως τα picocells ή relaying κόμβοι είναι πιο αποδοτικές από τη χρήση εξωτερικών macrocells για κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους και για τοπικές ανάγκες, οι λύσεις αυτές εξακολουθούν να είναι σχετικά ακριβές ώστε να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις μικρότερης κλίμακας, όπως μικρά γραφεία και οικιακούς χρήστες (για προσωπικές επικοινωνίες, ψυχαγωγία, κ.λπ.). Αυτή η αγορά δεν έχει τη δυναμική που θα εξασφάλιζε κέρδος στους φορείς εκμετάλλευσης ώστε να αξίζει το αυξημένο κόστος εγκατάστασης ενός picocell. Αντίθετα, η ανάπτυξη των femtocells παρέχει μια καλή ευκαιρία για χαμηλού κόστους εσωτερική λύση για τις προαναφερόμενες περιπτώσεις, καθώς σε αντίθεση με τα picocells, τα femtocells εγκαθίστανται από τους ίδιους τους χρήστες. Παράλληλα, παρέχουν σύνδεση μεταξύ συσκευών κινητής στο δίκτυο του παρόχου κινητής τηλεφωνίας μέσω της οικιακής DSL, ή άλλης ευρυζωνικής σύνδεσης του ίδιου του χρήστη.

Απέναντι λοιπόν στις προκλήσεις της macrocells κάλυψης, τα femtocells παρουσιάζουν βασικά πλεονεκτήματα:

- Παρέχουν κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους όπου σταθμοί εγκατεστημένοι εξωτερικά δυσκολεύονται.

- Απαλλάσσουν φόρτο από το στρώμα macrocell βελτιώνοντας την απόδοσή του.

- Η προσθήκη ενός στρώματος femtocell βελτιώνει σημαντικά την συνολική χωρητικότητα του δικτύου με την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος.

- Προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας στα τερματικά. Οι απώλειες μετάδοσης λόγω τοιχωμάτων προς το εσωτερικά εγκατεστημένο femtocell είναι πολύ μικρότερες από ότι στην διαδρομή ως τον εξωτερικό σταθμό βάσης του macrocell, και έτσι η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής του UE μειώνεται. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στην παροχή υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας δεδομένων σε κινητά τερματικά.

- Εφόσον τα femtocells χρειάζεται να ενεργοποιηθούν μόνο όταν οι χρήστες βρίσκονται στο σπίτι ή στην εργασία, η χρήση τους είναι πιο «πράσινη» από τους άλλους τύπους σταθμών. Η κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό από το κόστος ενός δικτύου για τους χειριστές. Ένας σταθμός βάσης καταναλώνει πολύ μεγαλύτερη ισχύ από εκείνη που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση και λήψη σημάτων, εξαιτίας της χαμηλής αποτελεσματικότητας των ενισχυτών, του κοστοβόρου συστήματος για συνεχή διατήρηση σωστής θερμοκρασία και του εφεδρικού συστήματος σε περίπτωση απώλειας ισχύος.

- Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος της κυκλοφορίας (έως 70-80%) μπορεί να αποφορτιστεί από τους σταθμούς που χειρίζονται οι πάροχοι (macrocells, picocells), λιγότεροι τέτοιοι σταθμοί βάσης θα χρειαστούν. Η μείωση τους θα οδηγήσει σε τεράστια εξοικονόμηση κόστους για τις εταιρείες. Επιπλέον, απλοποιείται η μελέτη του χώρου και η διαδικασία σχεδιασμού των δικτύων. Οδηγεί επίσης σε λιγότερο ενοίκιο που θα πρέπει να καταβληθεί για τη χρήση των χώρων σταθμού βάσης.

Από τα παραπάνω φαίνεται πως τα femtocells συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των small cells απέναντι στις macrocell λύσεις αλλά παρουσιάζουν και σημαντικά πλεονεκτήματα απέναντι στα υπόλοιπου τύπου small cells. Συνοψίζοντας λοιπόν, μπορούν να βοηθήσουν τους παρόχους να προσφέρουν με οικονομικά βιώσιμο τρόπο, μεγαλύτερης χωρητικότητας δίκτυα και να δημιουργήσουν ένα πιο αποδοτικό σχέδιο αναβάθμισης του δικτύου τους με μειωμένους κινδύνους και οικονομικές επιβαρύνσεις. Προσφέρουν λύσεις χαμηλού κόστους για εσωτερική κάλυψη σε σύγκριση με άλλες προσεγγίσεις και οι χρήστες μοιράζονται ένα σημαντικό μέρος της εγκατάστασης (και της συντήρησης) των υποδομών του δικτύου. Επιπλέον, βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα των υπηρεσιών, αυξάνοντας την εμπιστοσύνη των πελατών και τη μείωση των αποσυνδέσεων. Παράλληλα, επιτρέπουν στους παρόχους κινητών επικοινωνιών να προωθήσουν τη χρήση υπηρεσιών δεδομένων με την παροχή σύνθετων υπηρεσιών (για παράδειγμα, μέσω σχεδίων ζώνης στο σπίτι και συνδυαστικά πακέτα), το οποίο θα ενισχύσει το μέσο κέρδος ανά χρήστη.

Οι παραπάνω διαφορές φυσικά αντανακλώνονται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Συνοπτικά, ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις κύριες διαφοροποιήσεις μεταξύ picocells και femtocells.

Πίνακας 3. Κύριες διαφορές μεταξύ των picocells και femtocells.

Παράμετρος	Picocells	Femtocells
Εγκατάσταση	Από τον διαχειριστή	Από τον χρήστη
Σύνδεση με το CN	Οπτική ίνα/Ομοαξονικό	ADSL, cable
Κόστος	Μικρό	Πολύ μικρό
Χωρητικότητα	10-50 χρήστες	3-15 χρήστες
Εμβέλεια	<100 m	<30 m

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα, μπορούμε να θεωρήσουμε τα femtocells ως μικρά picocells όπου οι ιδιότητές τους έχουν σμικρυνθεί για να μειωθεί το κόστος και να απλοποιηθεί η εγκατάσταση. Πέραν των «συρρικνωμένων» ιδιοτήτων τους (εμβέλεια, ισχύς, χωρητικότητα), παρουσιάζουν και δύο σημαντικές διαφορές όσο αφορά την υλοποίηση, και συγκεκριμένα στη σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο, και στον τρόπο εγκατάστασης.

Τα femtocells, σε αντίθεση με τα picocells, είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο του παρόχου μέσω ευρυζωνικής σύνδεσης των χρηστών. Το femtocell είναι ένας αυτόνομος σταθμός βάσης και συνδέεται με το δίκτυο κορμού, χρησιμοποιώντας IP. Για να διατηρηθεί η αυτονομία, το femtocell είναι αυτο-ρυθμιζόμενο σε αντίθεση με το picocell που ρυθμίζεται και από τον πάροχο. Αυτό υποδηλώνει πως η διασύνδεση μεταξύ του femtocell και του βασικού δικτύου πρέπει να είναι απλή για να αποφευχθεί οποιαδήποτε ανάγκη δράσης από τον πάροχο.

Όσο αφορά την εγκατάσταση, τα femtocells εγκαθίστανται από τους πελάτες μέσα στο σπίτι τους ενώ στην περίπτωση των picocells γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό κατόπιν προσεκτικής σχεδίασης και μελέτης. Αυτό σημαίνει πως η εγκατάσταση για τον χρήστη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη. Στην ιδανική περίπτωση, ο χρήστης πρέπει μόνο να συνδέσει την παροχή ρεύματος και το femtocell στην ευρυζωνική σύνδεση. Ως εκ τούτου η αυτο-ρύθμιση είναι πολύ σημαντική, καθώς αν έχουν αναπτυχθεί πολλά femtocells, οι επιχειρηματίες δεν μπορούν να αντέξουν οικονομικά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων όλων των femtocells, προκειμένου να μειωθεί η παρεμβολή με τα macrocells. Παρόλα αυτά, αυτό δε σημαίνει ότι τα femtocells δε μπορούν να αναπτυχθούν από τους ίδιους τους παρόχους, επιλέγοντας μια προσέγγιση παρόμοια με τα picocells, οπότε και υιοθετείται η λειτουργία δημόσιας πρόσβασης, και εγκαθίστανται πολλά femtocells για να εξασφαλιστεί η κάλυψη. Περισσότερα για τους τρόπους πρόσβασης, λειτουργίας και αρχιτεκτονικής των femtocell περιγράφονται σε επόμενα υποκεφάλαια.

Τέλος, ένα ακόμη πλεονέκτημα των femtocells είναι η ταύτισή τους με ένα συγκεκριμένο γκρουπ χρηστών (ενός σπιτιού ή εταιρίας). Οι χρήστες μπορούν να επωφεληθούν από υπηρεσίες που εκμεταλλεύονται την ατομικότητα των femtocells και από πακέτα υπηρεσιών που θα είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με το αν οι υπηρεσίες

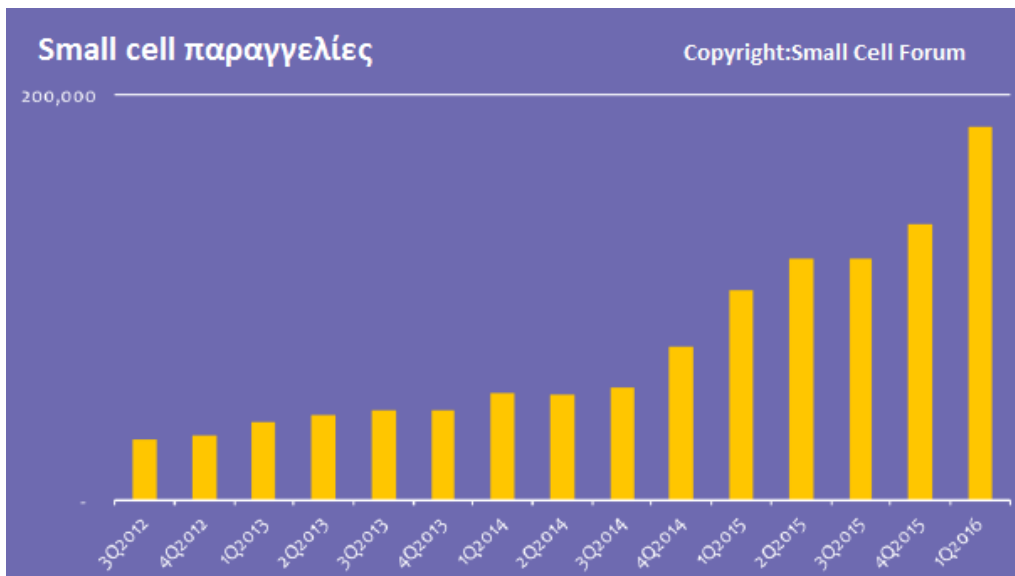
παρέχονταν από περισσότερους από έναν πάροχο. Το femtocell μπορεί να λειτουργήσει επίσης ως εστιακό σημείο για τη σύνδεση όλων των εσωτερικών συσκευών σε ένα διακομιστή στο σπίτι και να λειτουργεί ως πύλη για τη σύνδεση όλων των συσκευών στο Internet.

4.2. Ο ρόλος των femtocells στις νέες γενιές δικτύων

Στα παραπάνω χαρακτηριστικά των femtocells, που τα καθιστούσαν ιδανικά για συμπληρωματικές λύσεις στα δίκτυα, προστέθηκαν οι υψηλότερες απαιτήσεις των νέων δικτύων και οι νέες τεχνολογίες, που αναβάθμισαν το ρόλο των femtocells στα δίκτυα. Ήδη στο κεφάλαιο πάνω στο 5G παρουσιάσαμε το σημαντικό ρόλο που θα διαδραματίσουν τα ultra-dense networks, ήτοι πυκνές δομές σταθμών μικρής εμβέλειας (picocells, femtocells) στο νέο σύστημα τηλεπικοινωνιών προκειμένου να καλυφθεί η $\times 1000$ διαφαινόμενη κίνηση την επόμενη δεκαετία. Τα κυριότερα σενάρια εγκατάστασης τέτοιων σταθμών είναι υποβοήθηση του macro στρώματος σε μέρη υψηλής κίνησης (hotspots) και σε εσωτερικούς χώρους. Με τη σειρά τους λοιπόν τα femtocells θα παίξουν σημαντικό ρόλο στα ultra-dense networks μιας και αν τα hotspots αναμένεται να καλυφθούν από picocells και macrocells, σε εσωτερικούς χώρους τα femtocells θα κυριαρχήσουν.

Το χαρακτηριστικό αυτό είναι άμεσα συνδεδεμένο με ένα ακόμα στοιχείο κλειδί του 5G, που είναι η αξιοποίηση του φάσματος πέρα των 6GHz. Σε αυτές τις συχνότητες, επιτυγχάνεται υψηλότερη ρυθμαπόδοση καλύπτοντας τους στόχους που έχουν τεθεί για την απόδοση στο 5G. Όμως, η λειτουργία στις συχνότητες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλότερες απώλειες διαδρομής και διείσδυσης (pathloss και penetration loss), γεγονός που τις κάνει ιδανικές για μικρές αποστάσεις. Αν και η χρήση τεχνολογιών όπως MIMO και beamforming έχουν οδηγήσει σε υποσχόμενες δοκιμές για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, είναι προφανές πως οι υψηλές αποδόσεις σε μικρή εμβέλεια «φωτογραφίζουν» τη χρήση small cells.

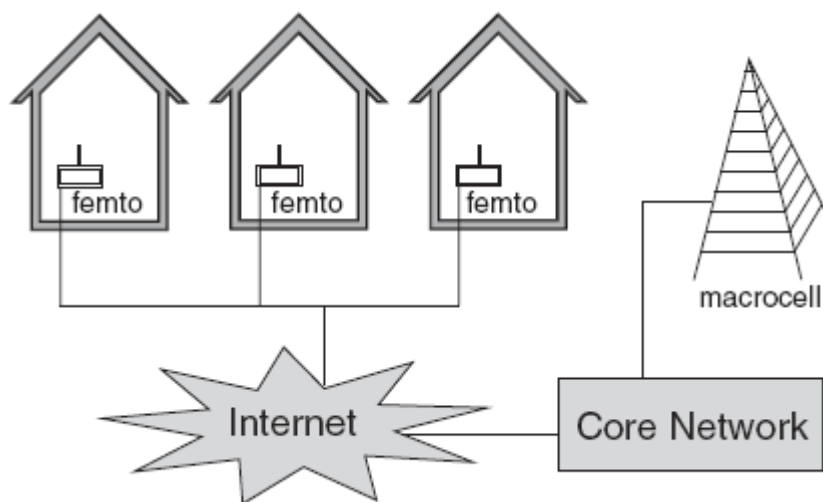
Δεν είναι τυχαίο λοιπόν πως τα femtocells παρουσίασαν αλματώδη ανάπτυξη, και αναμένεται ακόμα μεγαλύτερη τα επόμενα χρόνια. Σύμφωνα με την αναφορά του Small cell Forum που δημοσιεύθηκε το 2016 [30], έως αυτή τη στιγμή έχουν αποσταλεί 14 εκατομμύρια small cells, ενώ η ετήσια αύξηση ήταν 78%. Παράλληλα, τόσο η αναφορά αυτή όσο και η αναφορά του WinterGreen Research [31] προβλέπουν πως μέχρι το 2019 η αξία της αγοράς των small cells θα ξεπεράσει τα 5 δισεκατομμύρια δολάρια.



Εικόνα 12. Αριθμός παραγγελιών small cells τα τελευταία 4 χρόνια (Small cell forum)

4.3. Λειτουργικότητα

Λειτουργικά, η μονάδα femtocell ενσωματώνει την λειτουργικότητα ενός τυπικού σταθμού βάσης. Ένα femtocell μοιάζει με ένα σημείο πρόσβασης Wi-Fi. Εντούτοις, περιέχει επίσης στοιχεία λειτουργικότητας RNC (Radio Network Controller) στην περίπτωση του GSM. Έτσι, δεν απαιτεί την ύπαρξη macrocell δικτύου, απαιτώντας μόνο σύνδεση δεδομένων DSL ή cable με το Internet, μέσω του οποίου συνδέεται με το δίκτυο κορμού κινητής τηλεφωνίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 13. Ένα femtocell φαίνεται σαν ένα σημείο πρόσβασης Wifi (Wifi Access Point). Ωστόσο, στο εσωτερικό, είναι σημαντικά διαφορετικό αφού το πρώτο υλοποιεί τεχνολογίες Wifi (πρότυπα IEEE 802.11b, 802.11g και 802.11n), ενώ το δεύτερο υλοποιεί τεχνολογίες όπως GSM / GPRS / EDGE, UMTS / HSPA / LTE / LTE-A και mobile WiMAX (IEEE 802.16e).



Εικόνα 13. Τα femtocells συνδέονται με το δίκτυο κορμού (CN) διαμέσου της backhaul σύνδεσης του χρήστη.

Εφόσον εγκαθίστανται από τους χρήστες και όχι από τους διαχειριστές των δικτύων, θεωρούνται ως ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης. Για να εξασφαλιστεί η ελάχιστη δυνατή παρέμβαση στα macrocells και στα γειτονικά femtocells, ένα femtocell πρέπει να είναι σε θέση να ρυθμίσει αυτόματα τις παραμέτρους λειτουργίας του. Η αυτόματη ρύθμιση του femtocell μπορεί να χωριστεί στη φάση αίσθησης του περιβάλλοντος (sensing), που γίνεται συνήθως μέσω σάρωσης και κατά την οποία θα πρέπει να αξιολογηθούν οι συνθήκες της ασύρματης μετάδοσης στο περιβάλλον του femtocell, και στη φάση αυτό-ρύθμισης, στην οποία ρυθμίζονται παράμετροι όπως η ισχύς μετάδοσης στο downlink, κατανομή πόρων κ.λπ.

Σύμφωνα με την ικανότητά τους, τα femtocells μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: της μικρής κλίμακας, η οποία μπορεί να υποστηρίξει 3-8 ταυτόχρονους χρήστες, και της μεγαλύτερης, η οποία μπορεί να υποστηρίξει 8-16 χρήστες και προορίζεται για μεγάλες επιχειρήσεις. Οι αριθμοί αυτοί δεν είναι περιοριστικοί, δηλαδή κατασκευαστές femtocells δύναται να προσφέρουν προϊόντα με υποστήριξη παραπάνω χρηστών αλλά θα πρέπει να λάβουν υπόψη το περιορισμένο εύρος ζώνης του ADSL uplink.

Εφόσον το femtocell αποτελεί ιδιοκτησία, λειτουργεί συνηθέστερα με πολιτική συνδρομητών. Ο συνδρομητής ενός femtocell είναι ένας χρήστης εγγεγραμμένος σε αυτό. Οι συνδρομητές έτσι ορίζονται ως οι νόμιμοι χρήστες του femtocell, και είναι συνήθως τα κινητά τερματικά του ιδιοκτήτη του femtocell και συνήθως των τερματικών της στενής οικογένειά τους και φίλων ή συναδέλφων στην περίπτωση εταιρικών femtocells. Οι συνδρομητές των femtocells, αναφέρονται ως femto UE ή femto χρήστες. Για τους τρόπους πρόσβασης στο femtocell, αναφερόμαστε αναλυτικότερα σε επόμενο υποκεφάλαιο.

Τέλος, τα femtocells μπορούν να ταξινομηθούν και με βάση την τεχνολογία για την οποία έχουν σχεδιαστεί: UMTS femtocell, GSM femtocell, WiMAX femtocell, και ούτω καθεξής. Κάθε τύπος απαιτεί διαφορετική υλοποίηση προκειμένου να ενσωματωθεί στο αντίστοιχο δίκτυο. Σε επόμενο υποκεφάλαιο περιγράφουμε αναλυτικά το LTE/LTE-Advanced femtocell που είναι και η πιο εξελιγμένη μορφή femtocell τη στιγμή αυτή.

4.4. Παρεμβολές

Όπως έχουμε δει μέχρι τώρα, η εγκατάσταση των femtocells εισάγει αλλαγές στην τοπολογία των συμβατικών macrocell δικτύων. Η νέα αρχιτεκτονική του δικτύου αποτελείται από δύο σαφώς διαχωρισμένα στρώματα, το στρώμα macrocell και το στρώμα femtocell. Μια τέτοια αρχιτεκτονική του δικτύου ονομάζεται δύο στρώσεων (layers) ή δύο επιπέδων (tiers). Το πρώτο στρώμα περιλαμβάνει το πρωταρχικό macrocell δίκτυο, ενώ το δεύτερο ενσωματώνει αρκετά μικρότερα small cells μικρής εμβέλειας, είτε μέσω σχεδιασμού (π.χ. picocells) ή παραταγμένα με τυχαίο τρόπο (π.χ. femtocells). Στην περίπτωση των τελευταίων, εγκαθίστανται συνήθως εντός της ίδιας γεωγραφικής περιοχής που καλύπτεται από το μεγαλύτερο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (που ονομάζεται επίσης η macrocell ομπρέλα) και είναι πιθανόν να εκμεταλλεύονται το ίδιο φάσμα με αυτό. Ως εκ τούτου, ένα από τα πλεονεκτήματα των small cells σε μια τέτοια δομή του δικτύου είναι η αυξημένη κάλυψη σε περιοχές που δεν καλύπτονται επαρκώς από την macrocell ομπρέλα.

Η συνύπαρξη των δύο στρωμάτων ωστόσο, φέρνει νέα προβλήματα και δημιουργεί νέες προκλήσεις στο σχεδιασμό δικτύων. Όταν πολλοί πομποί εκπέμπουν τα σήματά τους στην ίδια ζώνη συχνοτήτων και μέσα στην ίδια γεωγραφική θέση προκειμένου να αυξηθεί η φασματική απόδοση, ένα σύστημα λήψης που λειτουργεί σε αυτήν τη ζώνη συχνοτήτων δεν θα είναι σε θέση να διακρίνει τον πομπό που ακούει. Αυτή είναι μια πολύ στοιχειώδης περιγραφή του προβλήματος των παρεμβολών σε συστήματα τηλεπικοινωνιών και αποτελεί μία από τις κύριες προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η ανάπτυξη των femtocells. Συστήματα όπως το OFDMA, καλούνται να υιοθετήσουν τεχνικές αποφυγής παρεμβολών και στρατηγικές σχεδιασμού συχνοτήτων για να αντιμετωπίσουν την παρουσία παρεμβολών λόγω της παρουσίας ενός στρώματος femtocell.

Τα femtocells προσφέρουν υψηλότερη απόδοση φάσματος, χωρική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και καλύτερη κάλυψη σε περιοχές που δεν καλύπτονται πλήρως από τα macrocells, όπως σε εσωτερικούς χώρους ή σε τοποθεσίες κοντά στα όρια του macrocell. Ωστόσο, αν η ακύρωση παρεμβολών ή τεχνικές αποφυγής δεν εφαρμόζονται, μπορεί να εμφανιστούν νεκρές ζώνες κατά μήκος της κυψέλης, εμποδίζοντας την υπηρεσία εντός της εμβέλειας ενός femtocell. Επιπλέον, η θέση των τυχαία εγκαταστημένων femtocells υποδηλώνει ότι η τυχαιότητα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση των θεμάτων αυτών, γεγονός που δυσκολεύει την επίλυση του ζητήματος. Σε πολυστρωματικά δίκτυα εμφανίζονται οι παρακάτω τύποι παρεμβολών.

Ομοστρωματικές παρεμβολές στο femtocell στρώμα. Ως ομοστρωματικές (co-layer) παρεμβολές αναφέρονται τα ανεπιθύμητα σήματα κατά τη λειτουργία ενός femtocell που προέρχονται από γειτονικά femtocells, μειώνοντας έτσι την ποιότητα της επικοινωνίας. Η ονομασία co-layer κάνει αναφορά στο γεγονός ότι όλα τα femtocells ανήκουν στο ίδιο στρώμα, σε αντίθεση με άλλα στοιχεία, όπως τους σταθμούς βάσης eNodeBs της κυψέλης, τα οποία ανήκουν στο macrocell επίπεδο. Οι co-layer παρεμβολές εμφανίζονται κυρίως μεταξύ γειτονικών σταθμών λόγω της μικρής απομόνωσης ανάμεσα στα σπίτια και τα διαμερίσματα. Αυτό το πρόβλημα είναι συνεπώς ανεξάρτητο από τη διαταραχή που προκαλείται στο στρώμα macrocell.

Δεδομένου ότι η ανάπτυξη των femtocells είναι τυχαία, είναι πιθανό αρκετά femtocells να εγκατασταθούν κοντά σε άλλα, για παράδειγμα, οριζόντια σε παρακείμενες πολυκατοικίες ή κάθετα σε πολυώροφα διαμερίσματα, με αποτέλεσμα να παρεμβαίνει το ένα στο άλλο. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι ένα femtocell συγκεκριμένης εμβέλειας εξυπηρετεί κάποιους χρήστες. Εάν υπάρχουν πρόσθετα σήματα από κοντινά femtocells με εμβέλεια που περιλαμβάνει ένα κομμάτι της περιοχής κάλυψης του αρχικού femtocell, χρησιμοποιώντας τα ίδια κανάλια συχνοτήτων, τότε η περιοχή κάλυψης αυτή λέγεται ότι υποφέρει από παρεμβολές co-channel και η απόδοση του συστήματος μειώνεται.

Αν ο λόγος σήματος προς παρεμβολές και θόρυβο (Signal to Interference and Noise Ratio - SINR) είναι πολύ μικρός, είναι πιθανό να καταστεί αδύνατο να υπάρξει επικοινωνία μέσω οποιουδήποτε femtocell και μια τέτοια περιοχή θεωρείται μια νεκρή ζώνη. Αυτό δεν πρέπει να συγχέεται με τη έννοια των οπών κάλυψης, η οποία, σύμφωνα με το [32], είναι περιοχές με χαμηλό SINR λόγω απωλειών κατά τη διαδρομή. Η υποβάθμιση της

επικοινωνίας ποικίλλει μεταξύ των διάφορων συστημάτων λόγω των διαφορετικών τους επιδόσεων και της διαφορετικής ευρωστίας τους απέναντι σε φαινόμενα παρεμβολών. Εφόσον τα femtocells μπορούν να αναπτυχθούν με φιλοσοφία κλειστής πρόσβασης (CSG), ανοικτής πρόσβασης ή με υβριδικό τρόπο λειτουργίας πρόσβασης, η έκταση του φαινομένου των παρεμβολών θα εξαρτάται και από τη μέθοδο πρόσβασης. Όταν πρόκειται για ανοικτής πρόσβασης femtocells, οι χρήστες μπορούν να κυκλοφορούν ελεύθερα μεταξύ των femtocells ανάλογα από ποιο λαμβάνουν το ισχυρότερο σήμα. Αντίθετα, προβλήματα δημιουργούνται όταν υιοθετείται προσέγγιση κλειστής ή υβριδικής πρόσβασης, όπως αναλύουμε παρακάτω.

Μια ακόμα παράμετρος για το είδος των παρεμβολών είναι και η πηγή αυτών. Στα femtocells δίκτυα, υπάρχουν δύο πιθανές πηγές ικανές να δημιουργήσουν co-layer παρεμβολές σε άλλα femtocells: το femtocell (downlink) και οι ίδιοι οι χρήστες (uplink). Σε Time Division Duplex (TDD) συστήματα και ανάλογα με το ποια είναι η πηγή του σήματος παρεμβολής, οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την αντιμετώπιση των παρεμβολών διαφέρουν. Εάν όλα τα femtocells μέσα στην ίδια περιοχή είναι συγχρονισμένα (δηλαδή η περίοδος downlink αρχίζει για 'αυτούς ταυτόχρονα στο χρόνο), οι θύτες παρεμβολών για ένα χρήστη femtocell είναι τα γειτονικά femtocells κατά τη διάρκεια του downlink. Αυτό σημαίνει ότι οι μεταδόσεις που προέρχονται από ένα femtocell θα προκαλέσουν παρεμβολές σε UEs των γειτονικών femtocells στο downlink και μόνο. Το ίδιο ισχύει και για το uplink. Στην περίπτωση που συγχρονίζονται οι περίοδοι uplink των κοντινών femtocells, οι χρήστες των femtocells θα είναι πηγές των παρεμβολών και ως εκ τούτου, οι μεταδόσεις που προέρχονται από ένα χρήστη femtocell θα ανιχνεύονται ως παρέμβαση στο uplink των γειτονικών femtocells. Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τα στοιχεία δικτύου που παίζουν το ρόλο των θυτών σε φαινόμενα παρεμβολών.

Πίνακας 4. Πιθανές πηγές παρεμβολών κατά περίπτωση.

	Co-layer	Cross-layer
Uplink	Femto χρήστες	Οποιοδήποτε UE
Downlink	Femto σταθμοί βάσης	Femto και Macro σταθμοί βάσης

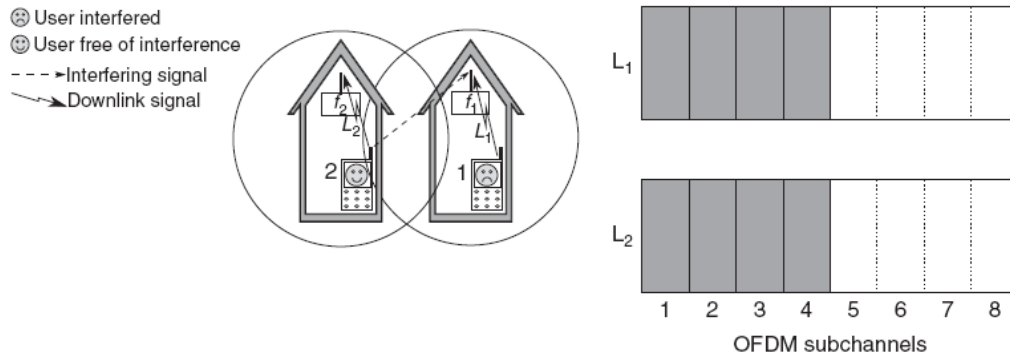
Στην περίπτωση που δεν υπήρχε συγχρονισμός μεταξύ των femtocells, η πηγή των παρεμβολών στο TDD θα ήταν ακαθόριστη. Οι περίοδοι ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης των διαφορετικών femtocells θα επικαλύπτονταν και θα δημιουργούνταν ετερογενείς πηγές παρεμβολών (femtocells και UEs). Σε αυτή την περίπτωση, οι παρεμβολές γίνονται δυσκολότερο να εντοπιστούν ως προς την προέλευση και να αποφευχθούν. Ο ακριβής συγχρονισμός αποτελεί επομένως ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των TDD femtocells έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η εξάλειψη των παρεμβολών.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως δεδομένου ότι οι macro σταθμοί βάσης ανήκουν στο ίδιο στρώμα δικτύου (το στρώμα macrocell), παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών macrocells θεωρούνται επίσης co-layer παρεμβολές. Ειδικότερα, καθώς το LTE σχεδιάστηκε να υιοθετεί επαναχρησιμοποίηση συχνότητας για καλύτερη φασματική απόδοση, οι παρεμβολές μεταξύ γειτονικών κελιών αντιμετωπίζουν συχνά προβλήματα. Ωστόσο, στην ανάπτυξη των macrocells τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται συχνά μέσω προσεκτικής σχεδίασης από τον πάροχο/ιδιοκτήτη του δικτύου, μέσω προσεκτικά μελετημένης τοπολογίας, επιλογής συχνότητας, κατανομής πόρων κλπ. Αυτό το πρόβλημα είναι συνεπώς ανεξάρτητο από την ανάπτυξη των femtocells. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της δομής του συστήματος μετάδοσης OFDMA το οποίο εξετάζουμε, και συγκεκριμένα λόγω της ευελιξίας στην κατανομή του φάσματος που υιοθετεί, ορισμένες τεχνικές αποφυγής παρεμβολών από τα femtocells εκμεταλλεύονται ορισμένα χαρακτηριστικά του στρώματος macrocell, τα οποία δημιουργήθηκαν για την αποφυγή co-layer παρεμβολών στο macrocell στρώμα. Τα χαρακτηριστικά αυτά θα περιγραφούν στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου. Παρακάτω περιγράφονται οι επιπτώσεις των co-layer παρεμβολών στις περιπτώσεις downlink και uplink.

Στις co-layer παρεμβολές στο uplink, τα femtocell UEs είναι οι θύτες, δηλαδή οι πηγές παρεμβολής. Από την άλλη πλευρά, τα γειτονικά femtocells είναι τα θύματα. Στο uplink OFDMA σε LTE femtocells, είναι πιθανό κάποια κανάλια ή κάποιο διαφορετικό μέρος του φάσματος να υπόκειται σε παρεμβολές και το υπόλοιπο να είναι ελεύθερο. Αυτό διευκολύνει την παραμετροποίηση του femtocell αφού δεν είναι απαραίτητο να ελέγξει ολόκληρο το φάσμα για την εξυπηρέτηση ενός χρήστη (τουλάχιστον σε φυσιολογικές απαιτήσεις QoS). Ως εκ τούτου, υπόκειται στα femtocells να καθορίσουν ποια κανάλια υφίστανται παρεμβολές και ποια όχι.

Για παράδειγμα, στην Εικόνα 14 φαίνεται ένα σενάριο στο οποίο ο χρήστης 2, εμπίπτει στην κάλυψη τομέα τόσο του femtocell που τον εξυπηρετεί (f_2) όσο και εκείνης ενός γειτονικού femtocell (f_1). Σε αυτήν την κατάσταση, τα κανάλια που χρησιμοποιούνται από το χρήστη 2 για να συνδεθεί με το f_2 θα πρέπει να ανιχνεύονται ως ακατάλληλα να χρησιμοποιηθούν από το f_1 λόγω παρεμβολών. Επιπλέον, το femtocell f_1 έχει επίσης ένα χρήστη συνδεδεμένο με αυτό (χρήστης 1). Ωστόσο, δεδομένου ότι ο χρήστης 1 δεν βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης του χρήστη 2, δεν υπάρχει τρόπος για τον χρήστη 1 να γνωρίζει ποια είναι τα κανάλια που υφίστανται παρεμβολές. Η ευθύνη για την κατανομή των πόρων για τον χρήστη 1 θα πρέπει ως εκ τούτου να επαφίεται στο femtocell.

Σε αντίθεση με συστήματα όπως το CDMA, όπου οι μεταδόσεις καταλαμβάνουν το σύνολο της ζώνης συχνοτήτων, στην περίπτωση του OFDMA η ύπαρξη των καναλιών και η ευελιξία στη χρήση τους καθιστά δυνατή τη μείωση των παρεμβολών και στο πεδίο των συχνοτήτων, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερες πιθανότητες για την αποφυγή παρεμβολών, όπως θα φανεί και στη συνέχεια.



Εικόνα 14. Ο χρήστης 1 δεν μπορεί να γνωρίζει ποιοι υπο-φορείς χρησιμοποιούνται ήδη, αν δεν ενημερωθεί από το femtocell.

Η περίπτωση των παρεμβολών στο uplink είναι αρκετά διαφορετική από του downlink. Αυτό συμβαίνει επειδή οι downlink παρεμβολές επηρεάζουν μόνο ένα χρήστη θύμα, ενώ οι παρεμβολές στο uplink καθιστούν το συγκεκριμένο κομμάτι του φάσματος άχρηστο σε όλους τους χρήστες του femtocell.

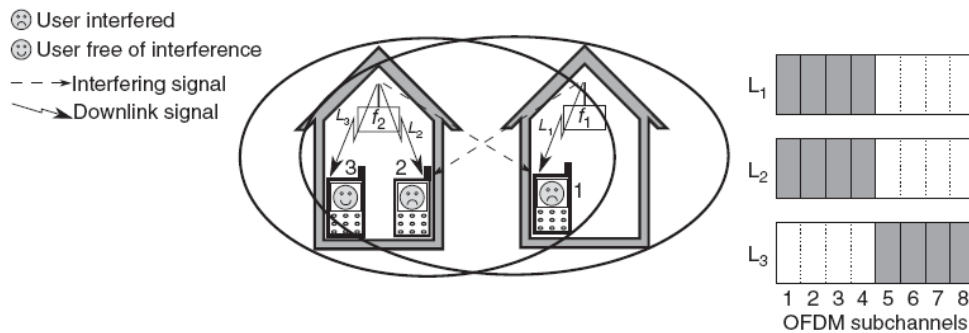
Στο downlink όσο αφορά τις co-layer παρεμβολές, τα femtocells είναι οι θύτες ή αλλιώς οι πηγές παρεμβολής, ενώ τα UEs των γειτονικών femtocells είναι τα θύματα. Εφόσον τα femtocells μπορεί να παραταχθούν σε κοντινή απόσταση το ένα με το άλλο, είναι πολύ πιθανό να παρεμβαίνουν το ένα στο άλλο μέσα από τα παράθυρα, τις πόρτες και τους κακώς μονωμένους τοίχους. Η ύπαρξη σημάτων από πολλά femtocells εντός της ίδιας περιοχής συμβάλουν στην αύξηση των παρεμβολών οδηγώντας πιθανώς το θόρυβο σε επίπεδα όπου η συνδεσιμότητα καθίσταται αδύνατη.

Για να αποφευχθούν οι παρεμβολές από femtocells στο downlink σε UEs των γύρω femtocells, η πρώτη σύσταση του 3GPP [33], είναι τα femtocells να ρυθμίζουν πολύ προσεκτικά τις παραμέτρους μετάδοσης ισχύος με χρήση προσαρμοστικών τεχνικών ελέγχου ισχύος. Αυτό είναι απαραίτητο ιδιαίτερα σε CSG femtocells όπου τα UEs δεν εξυπηρετούνται από το ισχυρότερο femtocell, αλλά από εκείνο στο οποίο έχουν εγγραφεί. Όπως και στην περίπτωση uplink, η downlink ισχύς εκπομπής μπορεί να αποφασιστεί από κάθε femtocell, με βάση τη λαμβανόμενη ισχύ από τα γειτονικά femtocells. Εφόσον περιοχές με ισχυρές παρεμβολές δημιουργούνται κυρίως στην παρουσία αρκετών femtocell σημάτων ταυτόχρονα, αρκετές τεχνικές έχουν προταθεί για την αποφυγή των παρεμβολών όπως θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

Μία σοβαρή περίπτωση co-layer παρεμβολών στο downlink συμβαίνει όταν ένας femtocell χρήστης βρίσκεται σε περιοχή εντός της εμβέλειας του δικού του femtocell, και το σήμα που προέρχεται από αυτό δεν είναι αρκετά υψηλό σε σύγκριση με την παρεμβολή που προέρχεται από τα γύρω femtocell. Το γεγονός αυτό μπορεί να διαταράξει τις downlink συνδέσεις. Ωστόσο, σε OFDMA συστήματα, πέραν της διαχείρισης ισχύος, η κατανομή των υπο-φορέων σε κάθε femtocell παίζει καθοριστικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα της παρεμβολής. Η ύπαρξη περιοχών με υψηλά φαινόμενα παρεμβολών εξαρτάται από την πληρότητα ή διαθεσιμότητα του φάσματος στην περιοχή αυτή. Δύο χρήστες femtocells μπορεί να βρίσκονται στην ίδια γεωγραφική θέση και μόνο ο ένας να

υφίσταται παρεμβολές από τα γύρω femtocells, δηλαδή να υπόκεινται σε παρεμβολές μόνο μερικά OFDMA υπο-κανάλια.

Για να φανεί αυτό, στην Εικόνα 15 φαίνονται δυο χρήστες 2 και 3 που επιθυμούν να λαμβάνουν downlink δεδομένα από το αντίστοιχο femtocell (f2 στην εικόνα). Το femtocell f2 κατανέμει τα κανάλια 1 έως 4 και 5 έως 8 στους χρήστες 2 και 3 αντίστοιχα. Σε αυτό το παράδειγμα, και οι δύο χρήστες βρίσκονται σε περιοχή ισχυρών παρεμβολών που προέρχονται από το γειτονικό f1 femtocell. Ωστόσο, το f1 απαιτεί μόνο τα υπο-κανάλια 1-4 για την σύνδεση με τον χρήστη που εξυπηρετεί (χρήστη 1). Ως εκ τούτου, μόνον οι χρήστες στα υπο-κανάλια 1 έως 4 θα υφίσταντο παρεμβολές, ενώ ο χρήστης 3 θα μπορεί να επικοινωνεί απροβλημάτιστα. Παρατηρούμε ότι ο χρήστης 1 στο παράδειγμα αυτό βρίσκεται επίσης σε περιοχή ισχυρών παρεμβολών που προέρχονται από το f2 και υφίσταται παρεμβολές λόγω της κατάληψης των υπο-καναλιών 1 έως 4. Η κατανομή των πόρων συχνότητας, συνεπώς είναι εξαιρετικά σημαντικό θέμα σε LTE (OFDMA) femtocells. Επιπλέον, το πεδίο του χρόνου παρέχει μια πρόσθετη διάσταση για την διαχείριση των υπο-καναλιών. Η κατανομή των πόρων έτσι αποκτά βαρύνουσα σημασία και για αυτό αποτελεί μία από τις πλέον βασικές τεχνολογίες για την εύρυθμη λειτουργία των OFDMA femtocells.



Εικόνα 15. Χωρίς την σωστή κατανομή των πόρων στο πεδίο της συχνότητας, μπορεί να προκύψουν ισχυρές παρεμβολές.

Διαστρωματικές παρεμβολές. Σε ετερογενή δίκτυα δύο επιπέδων, ένα σήμα θεωρείται ότι δημιουργεί διαστρωματικές (cross-layer) παρεμβολές εάν τα συστήματα του θύτη (πηγή παρεμβολών) και τα συστήματα των θυμάτων (δέκτης των παρεμβολών) ανήκουν σε διαφορετικά στρώματα του δικτύου. Για παράδειγμα, η παραμόρφωση που προκαλείται από ένα femtocell που μεταδίδει (μέλος του στρώματος femtocell) στο downlink ενός ή περισσότερων macrocell χρηστών (μέλη του στρώματος macrocell) είναι μια σαφής περίπτωση cross-layer παρεμβολής. Ομοίως, μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως παρεμβολή cross-layer, η παραμόρφωση που προκαλείται από ένα χρήστη macrocell (μέλος του στρώματος macrocell) στο uplink από ένα κοντινό femtocell (μέλος του στρώματος femtocell). Οι cross-layer παρεμβολές οφείλονται στο γεγονός ότι τόσο τα femtocells όσο και τα macrocells δύναται να χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων. Εκτός αυτού, και λόγω της προσαρμογής της ισχύος μετάδοσης, ενδεχόμενη αιφνίδια υψηλή ισχύς εκπομπής μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση περιοχών υψηλών παρεμβολών, μειώνοντας έτσι τη σκοπιμότητα αυτών των δικτύων.

Τα κύρια προβλήματα που προκαλούνται από την παρουσία των cross-layer παρεμβολών προκύπτουν όταν η περιοχή κάλυψης των απομονωμένων femtocells «εισβάλλει» στα γειτονικά σπίτια, έχοντας υψηλότερα επίπεδα ισχύος από το macrocell. Αν τα femtocells επρόκειτο να αναπτυχθούν στην ίδια ζώνη με το macrocell στρώμα (co-channel ανάπτυξη), οι χρήστες μέσα στα σπίτια που επιχειρούν να χρησιμοποιήσουν το macrocell, θα υποφέρουν από σοβαρές παρεμβολές και δεν θα είναι σε θέση να συνδεθούν. Γίνεται κατανοητό ότι όσο υψηλότερη είναι η πυκνότητα παράταξης των femtocells τόσο πιο εκτεταμένες θα είναι οι περιοχές για τις οποίες οι υπηρεσίες macrocell θα είναι περιορισμένες.

Όπως έχουμε δει, η τεχνολογία OFDMA επιτρέπει τη διάσπαση φάσματος για την αντιμετώπιση των cross-layer παρεμβολών. Η διάσπαση φάσματος προκύπτει διαιρώντας τη ζώνη συχνοτήτων σε δύο μέρη αναθέτοντας από ένα μέρος στο στρώμα macrocell και στο στρώμα femtocell για αποκλειστική χρήση [33]. Οι συνθήκες κατά τις οποίες η διαμέριση του φάσματος συνιστάται θα περιγραφούν στη συνέχεια. Με τον διαχωρισμό αφαιρούνται σχεδόν εντελώς οι cross-layer παρεμβολές. Εντούτοις, όταν οι δύο ζώνες είναι γειτονικές στο πεδίο συχνοτήτων, το παρακείμενο κανάλι μπορεί επίσης να εισαγάγει παρεμβολές [34], γεγονός που ίσως επηρεάσει το σχεδιασμό των ορίων ισχύος της μετάδοσης, έτσι ώστε ο λόγος Adjacent Channel Interference Rejection (ACIR) να ελαχιστοποιηθεί. Το ACIR ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ισχύος που μεταδίδεται από τον θύτη προς τη συνολική ισχύ των παρεμβολών που επηρεάζουν το θύμα και μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \quad (5.1)$$

όπου ACLR είναι ο λόγος Adjacent Channel Leakage Ratio που μετρά την αναλογία του μέσου όρου της ισχύος που αποστέλλεται σε γειτονικά κανάλια από τον πομπό εξαιτίας ατελών φίλτρων, προς το μέσο όρο ισχύος που πραγματικά αποστέλλεται στο κανάλι. Επιπλέον, το ACS (Adjacent Channel Selectivity) εκφράζει το λόγο της λαμβανόμενης εξασθένησης στο κανάλι, προς την εξασθένηση στο γειτονικό κανάλι. Ακόμη και σε παρατάξεις διαιρεμένου φάσματος, το επιτεύξιμο ACIR είναι περιορισμένο. Ως εκ τούτου, η δύναμη του femtocell και των UEs πρέπει να ρυθμίζονται ώστε να περιορίζονται οι επιπτώσεις στο macrocell. Πάντως, η επίπτωση των παρεμβολών από παρακείμενα κανάλια, θεωρούνται συγκριτικά ελάχιστα, και για αυτό στη ανάλυση της απόδοσης του δικτύου συνήθως αγνοούνται, πρακτική που θα ακολουθήσουμε και εμείς.

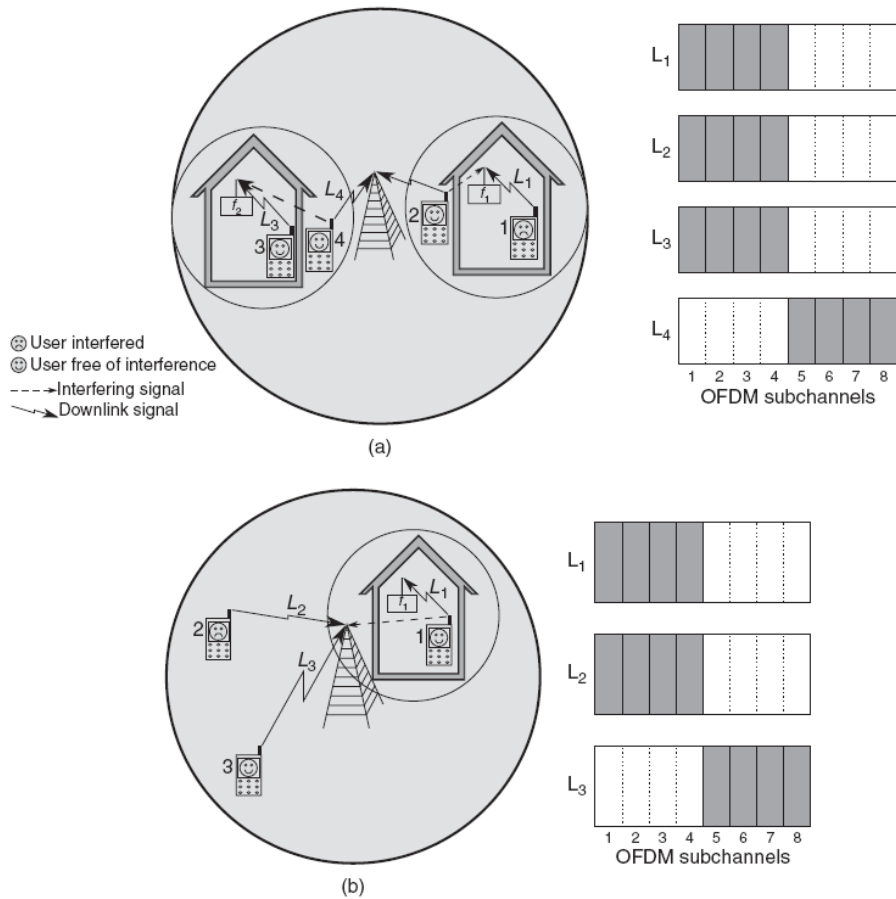
Αν και τα OFDMA συστήματα αποτελούν μια ελκυστική λύση, καθώς επιτρέπουν αποτελεσματική κατανομή των πόρων στο πεδίο συχνοτήτων για το σκοπό της αποφυγής παρεμβολών, εμφανίζουν ευαισθησία σε άλλου είδους προβλήματα, όπως θέματα συγχρονισμού και συχνότητας. Παρεμβολές που προέρχονται από άλλα στοιχεία του δικτύου (και co-layer και cross-layer) μπορούν να εισάγουν παρεμβολές σε επίπεδο φορέων λόγω μετατοπίσεων της συχνότητας. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στην

απώλεια της ορθογωνιότητας μεταξύ των υπο-φορέων, με κίνδυνο να μειωθεί δραματικά η απόδοση του συστήματος.

Τέλος, και όπως με την περίπτωση των παρεμβολών co-layer, πρέπει να σημειωθεί ότι ο συγχρονισμός μεταξύ των στρωμάτων κατά μήκος του δικτύου είναι εξαιρετικής σημασίας για τη διασφάλιση ότι τα femtocells και τα macrocells δεν υπερβαίνουν τις περιόδους μετάδοσης που τους αναλογούν. Ένας από τους κύριους σκοπούς του συγχρονισμού είναι συνεπώς να διευκολύνει την διαχείριση των φαινομένων των παρεμβολών. Σε επόμενη ενότητα, παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι προσεγγίσεις στο πρόβλημα των παρεμβολών cross-layer που αφορούν τα θέματα και τις προτεινόμενες λύσεις για OFDMA συστήματα.

Όπως και στην περίπτωση των co-layer παρεμβολών, διαχωρίζουμε τις παρεμβολές που επηρεάζουν το uplink από τις περιπτώσεις που επιδρούν στο downlink. Όσο αφορά το uplink, και μέσω της διαμέρισης φάσματος που αναφέρθηκε νωρίτερα, στην περίπτωση που υιοθετείται η αποκλειστική χρήση καναλιού για τα femtocells, είναι δυνατόν το διαθέσιμο φάσμα να διαιρείται ακριβώς στα όρια μεταξύ δύο OFDMA υπο-καναλιών. Κατά αυτόν τον τρόπο, ένας ακέραιος αριθμός υπο καναλιών εκχωρείται σε κάθε επίπεδο του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή οι cross-layer παρεμβολές είναι σχεδόν ανύπαρκτες, με τη μόνη πηγή παρεμβολής να προέρχεται από τα γειτονικά κανάλια. Το πρόβλημα ανακύπτει όταν τα femtocells έχουν αναπτυχθεί σε co-channel λειτουργία με τα macrocells, όπου δύο σενάρια παρεμβολής μπορεί να συμβούν στο uplink.

Τα δύο σενάρια είναι παρεμβολές στο femtocell και παρεμβολές στο macro BS. Όταν τα femtocells βρίσκονται κοντά στα όρια ενός macrocell, το macrocell μπορεί να ζητήσει σε κοντινά macrocell UEs να αυξήσουν την ισχύ εκπομπής τους, λόγω της μεγάλης απόστασης από το macro σταθμό βάσης. Εάν δεν χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα OFDMA κανάλια, αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει uplink παρεμβολές με το femtocell. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 16 (α), ο macro χρήστης 2 μεταδίδει με μεγάλη ισχύ στα ίδια υπο-κανάλια με τον femtocell χρήστη 1. Η απομόνωση που παρέχουν οι τοίχοι του σπιτιού πιθανόν να είναι ανεπαρκής σε αυτή την περίπτωση, προκαλώντας την απώλεια σύνδεσης uplink του χρήστη 1. Σε αυτή την περίπτωση, η κατάλληλη κατανομή των υπο-καναλιών OFDMA χαλαρώνει τους περιορισμούς ενέργειας που επιβάλλονται στους χρήστες. Είναι επομένως σημαντικό ότι τα femtocells (ιδίως εκείνα που βρίσκονται σε περιοχές με χαμηλή κάλυψη macrocell, όπως τα όρια της κυψέλης) να κατανέμουν τα υπο-κανάλια για το uplink, λαμβάνοντας υπόψη τη φασματική διαθεσιμότητα όπως απεικονίζεται στην εικόνα.

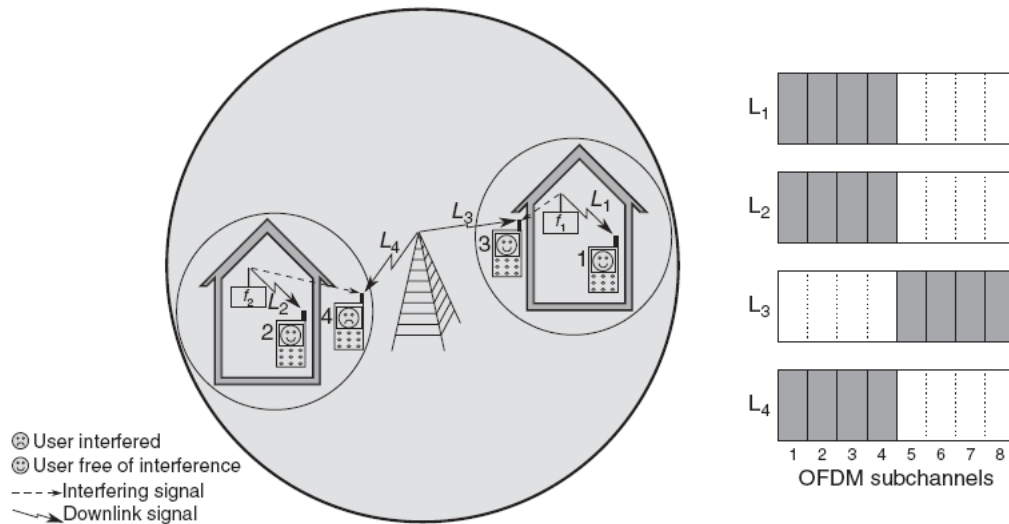


Εικόνα 16. Σενάρια διαστρωματικών παρεμβολών.

Ο δεύτερος τύπος παρεμβολής στο uplink συμβαίνει όταν τα femtocells βρίσκονται πολύ κοντά σε macro BS (παρεμβολή στο macro BS). Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 16 (β), όπου ο femto χρήστης 1 απαιτείται να μεταδώσει σε υψηλή ισχύ. Εάν η εν λόγω μετάδοση φτάσει στο MBS, τα υπο-κανάλια που καταλαμβάνονται από το femtocell χρήστη 1 καθίστανται άχρηστα για τα υπόλοιπα macrocell UEs. Προκειμένου να διασφαλιστεί η υπέρσχυση των macrocell πόρων, η αύξηση της ισχύος που μπορεί να ζητήσει ένα femtocell στους χρήστες του πρέπει να οριοθετείται. Στην περίπτωση του OFDMA, αυτό μπορεί να γίνει δυναμικά και εξαρτάται από την πληρότητα/διαθεσιμότητα των υπο-καναλιών OFDMA σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Στην Εικόνα 17, απεικονίζεται περίπτωση παρεμβολών στο downlink. Συγκεκριμένα, ο χρήστης 1 λαμβάνει δεδομένα στο σπίτι του από το femtocell τους (f1) μέσω της σύνδεσης L1. Για να εξασφαλιστεί η ποιότητα των υπηρεσιών, το f1 διαθέτει τα υπο-κανάλια 1 έως 4 στο downlink L1. Εντωμεταξύ, ο macrocell χρήστης 3 περνά από τη μπροστινή πόρτα του χρήστη 1, με αποτέλεσμα να βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης του f1. Αν αυτό είχε συμβεί στην περίπτωση ενός δικτύου CDMA δύο στρωμάτων, ο χρήστης 3 θα είχε βιώσει αμέσως μια ξαφνική αύξηση του επιπέδου θορύβου με απροσδιόριστες συνέπειες για την επικοινωνία. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, ο χρήστης 3 λαμβάνει δεδομένα από το macrocell μέσω του συνδέσμου L3, στο οποίο έχουν διατεθεί τα υπο-κανάλια 5-8 από το macrocell. Δεδομένου ότι αυτά τα υπο-κανάλια δεν

χρησιμοποιούνται από το femtocell f1, ο χρήστης 3 είναι απαλλαγμένος από παρεμβολές και η επικοινωνία δεν θα επηρεαστεί. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει πάντα. Η Εικόνα 17 παρουσιάζει επίσης και τη περίπτωση κατά την οποία στον macrocell χρήστη 4 κατανέμονται OFDMA υπο-κανάλια που χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από ένα κοντινό femtocell (το F2 σε αυτή την περίπτωση). Ο χρήστης 4 σε αυτή την περίπτωση θα υφίσταται σε μεγάλο βαθμό παρεμβολές. Παρατηρώντας την εικόνα, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι ο femtocell χρήστης 2 θα υποφέρει επίσης από παρεμβολές, λόγω της χρησιμοποίησης των υπο-καναλιών 1-4 από το macrocell. Ωστόσο, οι εξωτερικοί τοίχοι του σπιτιού εξασθενούν συνήθως επαρκώς το macrocell σήμα, και σε συνδυασμό με τη μικρή απόσταση από το femtocell επιτρέπουν αρκετά υψηλό SINR για το χρήστη 2. Συνεπώς, οι downlink cross-layer παρεμβολές δεν αποτελούν εξαιρετικό πρόβλημα για τους χρήστες femtocell, αφού αν υπάρχει ισχυρό σήμα macrocell, δεν υπάρχει και σημαντικός λόγος για την εγκατάσταση ενός femtocell εξαρχής.



Εικόνα 17. Η κύρια πηγή των παρεμβολών στο downlink είναι τα femtocells προς τους χρήστες macrocell.

Ομοστροφματικές παρεμβολές στο macrocell στρώμα. Όπως σημειώθηκε στο κεφάλαιο 3, το LTE σχεδιάστηκε να λειτουργεί με επαναχρησιμοποίηση συχνότητας ανά κελί. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει η πιθανότητα δύο χρήστες σε κοντινή απόσταση να χρησιμοποιούν τους ίδιους πόρους. Καθώς μέσα στο κελί υπάρχει η ορθογωνιότητα, και το παραπάνω σενάριο συμβαίνει μόνο σε χρήστες σε γειτονικά κελιά, κύρια θύματα των co-layer αυτών παρεμβολών είναι οι macro χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης.

Οι ομοστροφματικές (co-layer) παρεμβολές προσομοιάζουν τις αντίστοιχες μεταξύ των femtocells, αφού ουσιαστικά πρόκειται πάλι για χρήστες σε co-channel λειτουργία. Τα σενάρια δηλαδή που αφορούν τα femtocells σχετικά με την κατανομή των υπο-καναλιών, και την πιθανότητα παρεμβολής έχουν εφαρμογή και στο macrocell στρώμα. Η κύρια διαφορά έγκειται στη δυνατότητα καλύτερης προετοιμασίας των macrocell BS, μέσω καλύτερου σχεδιασμού, ελέγχου παραμέτρων και ευκολότερης κεντρικής διαχείρισης πόρων. Σε επίπεδο macrocell η κατανομή πόρων μπορεί να γίνει συντονισμένα προκειμένου να αποφευχθούν οι παρεμβολές.

Η λειτουργία ICIC στην οποία αναφερθήκαμε συνοπτικά στο κεφάλαιο 3 βασίζεται στον συντονισμό των πόρων μέσω κεντρικής διαχείρισης, ώστε να ανατίθεται φάσμα στους χρήστες κατά τέτοιον τρόπο που θα ακυρώνει ή ελαττώνει τις παρεμβολές μεταξύ των γειτονικών κελιών. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι διαμέρισης των πόρων στο πεδίο της συχνότητας, με το καθένα να προσδίδει διαφορετική προτεραιότητα στην απόδοση του δικτύου. Τα κυριότερα σχήματα του ICIC σε επίπεδο macrocell, περιγράφονται αναλυτικά αργότερα.

4.5. Λειτουργίες πρόσβασης

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των femtocells είναι η πολιτική που καθορίζει τα δικαιώματα πρόσβασης στους χρήστες που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς τους. Υπάρχουν τρεις πιθανές λειτουργίες πρόσβασης, κάθε μία με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα: Τα femtocells ανοιχτής πρόσβασης, ιδιωτικής πρόσβασης και υβριδικής πρόσβασης. Η επιλογή του τύπου πρόσβασης έχει δραματικές συνέπειες στη λειτουργία του δικτύου αφού καθορίζει τον τρόπο διαχείρισης μιας νέας πηγή σήματος στην περιοχή. Η πηγή αυτή δημιουργεί ανάλογα με τον τύπο πρόσβασης διαφορετικές συνθήκες στη λειτουργία του δικτύου, όσο αφορά τις παρεμβολές και τις μεταπομπές και μπορεί να επιδεινώσει ή να απαλύνει τα φαινόμενα παρεμβολών που περιγράφηκαν παραπάνω. Καθώς στη συνέχεια της διατριβής εκμεταλλευόμαστε εκτενώς τη λειτουργία υβριδικής πρόσβασης στους προτεινόμενους αλγόριθμους, παρουσιάζουμε αναλυτικά τις μεθόδους αυτές.

Femtocells ανοιχτής πρόσβασης. Σε δίκτυα femtocells, ένας εξωτερικός χρήστης θα μπορούσε να λαμβάνει ισχυρότερο σήμα από ένα κοντινό femtocell από ό, τι από ένα μακρινό macrocell. Με δημόσια πρόσβαση, σε αυτήν την περίπτωση ο χρήστης θα συνδεθεί με το femtocell ανεξάρτητα ακόμα και αν δεν είναι ιδιοκτήτης ή συνδρομητής της υπηρεσίας femtocell. Η μέθοδος αυτή ωφελεί τους χρήστες σε εξωτερικούς χώρους, οι οποίοι είναι σε θέση να κάνουν χρήση των κοντινών femtocells, μειώνοντας έτσι τη συνολική χρήση των πόρων του συστήματος (ισχύς, συχνότητα) και ως εκ τούτου και τις παρεμβολές. Αντίστοιχη κατάσταση ισχύει και μεταξύ γειτονικών femtocells. Υπάρχει η πιθανότητα (για παράδειγμα, σε πυκνοκατοικημένες περιοχές ή πολυώροφα κτίρια), η ισχύς του σήματος των γειτονικών femtocells να είναι υψηλότερη από το femtocell του πελάτη.

Τα πλεονεκτήματα της προσέγγισης αυτής είναι οι μειωμένες παρεμβολές αφού ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί σε μια κοντινή πηγή σήματος, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο σταθμός αυτός θα ήταν λόγος σημαντικών παρεμβολών. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει ακόμα στον χρήστη την δυνατότητα να συνδεθεί στο femtocell με το καλύτερο σήμα, βελτιώνοντας τη συνολική κάλυψη και χωρητικότητα του macrocell δικτύου.

Ταυτόχρονα, η ανοιχτή πρόσβαση παρουσιάζει και σημαντικά μειονεκτήματα. Καθώς τα οφέλη μοιράζονται σε όλους τους χρήστες και όχι μόνο στον ιδιοκτήτη ή στους συνδρομητές, οι τελευταίοι εκφράζουν διστακτικότητα στην υιοθέτηση της προσέγγισης αυτής [35][36], γεγονός που καθιστά την πλειοψηφία τέτοιων femtocells να εγκαθίστανται

από τους παρόχους, αφαιρώντας ορισμένα από τα πλεονεκτήματα των small cells που αναφέρθηκαν παραπάνω (μικρό κόστος παρόχου κλπ.). Αν παρόλα αυτά επιδιωχθεί εγκατάσταση από χρήστες, ο διαμοιρασμός των πόρων δημοσίως θα προκαλέσει μείωση στους ρυθμούς μετάδοσης των συνδρομητών. Η μείωση αυτή θα πρέπει να αποζημιωθεί από τον πάροχο συνήθως μέσα από χρηματικούς μηχανισμούς, οι οποίοι θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και θέματα ασφαλείας, αφού πέραν των πόρων του femtocell, η κίνηση των μη συνδρομητικών χρηστών θα περνάει από την backhaul σύνδεση του ιδιοκτήτη.

Μια ακόμα πρόκληση της ανοιχτής πρόσβασης είναι οι διαδικασίες μεταπομπής. Σε σενάρια χρηστών μεγάλης κινητικότητας, δημιουργούνται πολλές περιπτώσεις όπου χρήστες μεταβαίνουν γρήγορα την περιοχή εμβέλειας του femtocell την οποία άμεσα εγκαταλείπουν, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις όπου η εμβέλεια του σταθμούς βάσης διαχέεται μέσα από ένα παράθυρο στο πεζοδρόμιο. Ως εκ τούτου, μεγάλος αριθμός αποτυχημένων μεταπομπών δημιουργούνται επιβαρύνοντας το δίκτυο με μάταιη δέσμευση πόρων και αυξημένη σηματοδοσία.

Παράλληλα, τα ανοιχτής πρόσβασης femtocells βασίζονται στη συνεργασία μεταξύ των δύο στρωμάτων, macro και femto. Σε μελλοντικά συστήματα, όμως, η μαζική εγκατάσταση femtocells δημιουργεί τεράστια κλιμάκωση στις απαιτήσεις επικοινωνίας και συντονισμού μεταξύ του macrocell και των femtocells, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως η ανοιχτή πρόσβαση είναι μη ελκυστική λύση για χρήστες κατοικιών, αντίθετα μπορούν να ωφελήσουν μεγαλύτερης κλίμακας οντότητες, όπως παρόχους για βελτίωση κάλυψης και χωρητικότητας του δικτύου τους ή μεγάλες εταιρίες όπου επιθυμούν το ίδιο σε μεγάλης έκτασης κτίρια με κινητικούς υπαλλήλους να εξυπηρετούνται από μεγάλο αριθμό femtocell.

Ιδιωτικής πρόσβασης femtocells. Στην ιδιωτική πρόσβαση, μόνο μια λίστα εγγεγραμμένων χρηστών – συνδρομητών μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα femtocell. Η λειτουργία αυτή έχει ονομαστεί από την 3GPP Closed Subscriber Group (CSG). Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κλειστής πρόσβασης ακολουθούν προφανώς την αντίθετη κατεύθυνση της ανοιχτής πρόσβασης. Καθώς τα femtocells αποτελούν συνήθως ιδιωτική περιουσία και η κίνησή τους περνά από τη σύνδεση της οικίας του χρήστη, αυτός ο τύπος πρόσβασης είναι και ο κυρίαρχος για χρήση εντός κατοικιών. Εφόσον οι συνδρομητές δε διαμοιράζονται τους πόρους, απολαμβάνουν πάντοτε τη βέλτιστη κάλυψη και ρυθμό μετάδοσης που τους προσφέρει το femtocell και δεν επιβαρύνεται η σύνδεσή τους από την εξυπηρέτηση κίνησης αγνώστων. Το τελευταίο συμβάλει στην αίσθηση ιδιωτικότητας του χρήστη. Τα παραπάνω φυσικά αξιοποιούνται χρηματικά από τους παρόχους, αφού προφανώς τα κλειστής πρόσβασης femtocells θα πωλούνται σε μεγαλύτερη τιμή, ενώ δεν δημιουργείται και υποχρέωση οικονομικής αποζημίωσης. Όπως προκύπτει λοιπόν, η κλειστή πρόσβαση είναι κυρίως επιθυμητή σε κατοικίες ή μικρές επιχειρήσεις καθώς τους δίνεται πλήρης έλεγχος επί της ιδιοκτησίας τους. Πράγματι, έρευνες έχουν δείξει πως οι χρήστες θεωρούν άδικο να έχουν όλοι οι χρήστες που περνούν κοντά στο κτίριο του πελάτη το δικαίωμα να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες των femtocells, ενώ μόνο ο ιδιοκτήτης του femtocell να επιβαρύνεται οικονομικά [36].

Από μια τέτοια προσέγγιση όμως, δε λείπουν και σημαντικά μειονεκτήματα, το κυριότερο εξ αυτών είναι η επιδείνωση των co-tier και cross-tier παρεμβολών που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Καταρχήν δημιουργούνται σενάρια κατά τα οποία οι μη συνδρομητές δεν έχουν δικαίωμα πρόσβασης στο femtocell παρόλο που το σήμα το οποίο δέχονται από αυτό είναι ισχυρότερο από το macrocell σήμα. Το σενάριο αυτό είναι αρκετά πιθανό στην περίπτωση εσωτερικού των κτιρίων, όπου το macrocell σήμα εξασθενεί σημαντικά. Αν συνυπολογίσουμε τον αριθμό πολλών τέτοιων πηγών παρεμβολών σε υπερ-πυκνά δίκτυα, ένας macrocell χρήστης στην εμβέλεια αυτών θα βρεθεί σε δεινή θέση. Αντίστοιχο πρόβλημα δημιουργείται και στην αντίθετη κατεύθυνση αφού οι χρήστες αυτοί προκειμένου να βελτιώσουν τη σύνδεση με το macrocell, θα αυξήσουν την ισχύ μετάδοσή τους προκαλώντας αυξημένες παρεμβολές στη σύνδεση uplink των femtocell χρηστών.

Αντίστοιχα επιδεινώνονται οι παρεμβολές στο στρώμα των femtocells. Λόγω της τυχαίας εγκατάστασής τους, δημιουργείται συχνά η πιθανότητα ένας συνδρομητής ενός σταθμού να βρίσκεται κοντινότερα σε γειτονικό femtocell. Σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο και με την ανοιχτή πρόσβαση, ο χρήστης απλά θα συνδεόταν στο γειτονικό σταθμό με το ισχυρότερο σήμα, έχοντας ως παρεμβολή το ασθενέστερο σταθμό. Πλέον, όμως, με την κλειστή πρόσβαση, η πηγή εξυπηρέτησης είναι ο σταθμός με το ασθενές σήμα και το ισχυρό σήμα γίνεται πηγή παρεμβολής. Η μεγάλη πυκνότητα εγκατάστασης στο femto στρώμα φυσικά επιδεινώνει την κατάσταση και σε αυτό το σενάριο.

Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχει το περιθώριο βελτίωσης μέσα από έλεγχο ισχύος, scheduling φασματικών πόρων ή beamforming. Τέτοιες λύσεις μπορούν να έχουν σημαντικά οφέλη σε σενάρια χαμηλής κίνησης όπου ο χρονοπρογραμματισμός και η ισχύς προσαρμόζονται στις εκάστοτε ανάγκες της στιγμής. Σε πυκνά περιβάλλοντα όμως με πολλαπλούς σταθμούς, πολλαπλούς χρήστες ή και γενικά συσκευές συνδεδεμένες (IoT), και με υψηλές απαιτήσεις κίνησης σε χρόνους και ρυθμούς μετάδοσης, τέτοιες λύσεις δεν έχουν ουσιαστικά οφέλη. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία της τρίτης προσέγγισης πρόσβασης, της υβριδικής.

Femtocells υβριδικής πρόσβασης. Στην υβριδική πρόσβαση επιδιώκεται ένας εκατέρωθεν συμβιβασμός ώστε να απαλυνθούν τα μειονεκτήματα της ανοιχτής και κλειστής πρόσβασης που περιγράφηκαν παραπάνω. Η προσέγγιση προσπαθεί αφενός να σεβαστεί τον ιδιοκτήτη femtocell που έχει πληρώσει και για το femtocell, αλλά και για την ευρυζωνική σύνδεση με το Διαδίκτυο την οποία χρησιμοποιεί το femtocell. Αφετέρου, προσπαθεί να αποφύγει τον στραγγαλισμό σε παρακείμενους χρήστες εντός της εμβέλειας των femtocells.

Οι αντικρουόμενες αυτές απαιτήσεις οδηγούν στην υλοποίηση femtocell υβριδικής πρόσβασης, δηλαδή femtocells που επιλέγουν μεταξύ λειτουργίας κλειστής και ανοιχτής πρόσβασης ανάλογα τις περιβάλλουσες συνθήκες. Οι μεταβολές μπορεί να γίνονται στο πεδίο του χρόνου, όπου ανάλογα τα επίπεδα απαιτήσεων σε πόρους και τις παρεμβολές στο δίκτυο, το femtocell θα μετατρέπεται από κλειστή πρόσβαση σε ανοιχτή, αλλά συνηθέστερα πλέον στο πεδίο της συχνότητας, όπου μη-συνδρομητές δικαιούνται πρόσβαση μόνο σε ένα (μικρό) μέρος του διαθέσιμου φάσματος. Ο διαχωρισμός στο πεδίο

του χρόνου επικεντρώθηκε γύρω από τα συστήματα 3G, αφού η προσέγγιση αυτή ταίριαζε με την τεχνολογία πρόσβασης CDMA του συστήματος. Πλέον, ο διαχωρισμός στο πεδίο της συχνότητας έχει καταστεί ευκολότερος δεδομένης της OFDMA τεχνολογίας που περιγράψαμε στο κεφάλαιο για το 4G και συγκεκριμένα για το LTE-A. Η τεχνολογία αυτή όπως είδαμε χαρακτηρίζεται από ορθογωνιότητα των φορέων, διευκολύνοντας τον καταμερισμό του διαθέσιμου φάσματος σε διαφορετικά κομμάτια που εξυπηρετούν διαφορετικούς χρήστες ταυτόχρονα. Το σχήμα αυτό αναμένεται να συνεχιστεί και στην επόμενη γενιά αφού όπως αναλύσαμε στο σχετικό κεφάλαιο για το 5G, σε περιπτώσεις extreme mobile broadband, οι προτεινόμενες τεχνολογίες βασίζονται σε ορθογώνια σχήματα παραλλαγών του OFDM.

Κατά αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται ο στραγγαλισμός των μη συνδρομητικών χρηστών αφού τους δίνεται μια ελάχιστη εγγύηση σύνδεσης μέσω της εξυπηρέτησης του femtocell, απαλλάσσοντας το macro στρώμα από φορτίο κίνησης και το femto στρώμα από uplink παρεμβολές. Παράλληλα, διατηρώντας το μερίδιο σε μη συνδρομητικούς χρήστες μικρό, η επίδραση στην απόδοση των συνδρομητών είναι μικρή και εύκολα αποζημιώσιμη οικονομικά αν χρειαστεί. Ως εκ τούτου, οι ιδιοκτήτες είναι λιγότερο επιφυλακτικοί απέναντι στην υιοθέτηση αυτού του τύπου πρόσβασης.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της υβριδικής πρόσβασης πέραν των ανωτέρω, είναι πως λύνει τα χέρια των παρόχων ως προς τις απαιτήσεις για κλήσεις έκτακτης ανάγκης. Οι κλήσεις έκτακτης ανάγκης επιβάλλονται δια νόμου και πρέπει να παρέχονται είτε ο κάποιος είναι συνδρομητής σε ένα σταθμό είτε όχι. Σε κλειστή πρόσβαση, η λειτουργία αυτή πρέπει να διευθετηθεί ξεχωριστά. Αντίθετα, σε υβριδική, η περιορισμένη πρόσβαση λειτουργεί ιδανικά ως μέσο για την κλήσεις έκτακτης ανάγκης χωρίς περεταίρω ρυθμίσεις.

Φυσικά, η επιλογή του λεγόμενου κατωφλίου για το διαχωρισμό των πόρων του femtocell μεταξύ συνδρομητών και μη, είναι περίπλοκη διαδικασία αφού η αναζήτηση της χρυσής τομής μεταξύ των αντίθετων κινήτρων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως την απόσταση των χρηστών, τον αριθμό μη συνδρομητών που συνδέονται ταυτόχρονα, των QoS απαιτήσεων των συνδρομητικών χρηστών, τους μηχανισμούς pricing για κατανομή φάσματος κλπ. Αντίστοιχα, και η επιλογή για τη σειρά αποδοχής των μη συνδρομητών και του χρονοπρογραμματισμού τους είναι στα πλαίσια των παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν στα πλαίσια της υβριδικής λειτουργίας. Παράλληλα, το σύστημα παρουσιάζει μειωμένη φασματική απόδοση αν είναι στατικό, δηλαδή αν το κατώφλι διαχωρισμού πόρων μένει πάντα το ίδιο. Αυτό εξασφαλίζει πάντα σε μη συνδρομητές μια ελάχιστη σύνδεση αλλά μεταφράζεται και σε μη χρησιμοποιούμενο φάσμα σε ενδεχόμενο απουσίας τέτοιων χρηστών από την εμβέλεια του femtocell. Αντίθετα η δυναμική προσέγγιση είτε σε μικρή κλίμακα με συνεχή προσαρμογή, είτε σε μεγάλη χρονική κλίμακα όπως για παράδειγμα η μεγαλύτερη κατανομή σε μη συνδρομητές τις εργάσιμες ώρες, σε femtocells κατοικιών προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα με μόνο μειονέκτημα την επιβάρυνση σε υπολογισμούς και σηματοδότηση.

Όπως είναι κατανοητό, οι παράμετροι ελευθερίας στην υιοθέτηση της υβριδικής πρόσβασης είναι πληθώρα και το ζήτημα των ρυθμίσεων τους περίπλοκο ζήτημα, ένα από τα οποία μας απασχολεί στα πλαίσια της διατριβής αυτής. Στους αλγόριθμους που

εισάγουμε στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής προτείνουμε τις δικές μας πολιτικές στρατηγικής καθορισμού υβριδικής πρόσβασης, ενώ στο κεφάλαιο της ανασκόπησης ερευνητικής περιοχής παρουσιάζουμε ορισμένες στρατηγικές που προτείνονται στη σύγχρονη βιβλιογραφία.

4.6. Ανίχνευση και ακύρωση παρεμβολών

4.6.1. Ορισμός

Ο όρος Ακύρωση Παρεμβολών (Interference Cancellation - IC) αναφέρεται σε οποιαδήποτε μέθοδο χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των παρεμβολών στα συστήματα μετάδοσης. Το ενδιαφέρον σε αυτές τις τεχνικές στα δίκτυα femtocells προέρχεται από την αναπόφευκτη παρουσία co-channel παρεμβολών (δηλαδή παρεμβολών που οφείλονται στην χρήση του ίδιου καναλιού από θύτη και θύμα και σε αντίθεση με τις παρεμβολές εξαιτίας χρήσης παρακείμενων καναλιών) και την ανάγκη για συστήματα λήψης που μπορούν να λειτουργούν υπό την παρουσία υψηλού επιπέδου παρεμβολών. Ουσιαστικά, οποιαδήποτε μέθοδος που επιτρέπει σε ένα δέκτη να λειτουργεί με υψηλότερα επίπεδα co-channel παρεμβολών μπορεί να θεωρηθεί μια τεχνική εξουδετέρωσης παρεμβολών [37]. Οι πηγές των παρεμβολών μπορεί να είναι femtocells και macrocells, καθώς και femtocell και macrocell χρήστες όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι η πηγή παρεμβολής υποδηλώνει ως έναν βαθμό την καταλληλότερη διαδικασία για την ακύρωσή τους.

Αξίζει να επισημάνουμε ότι οι όροι co-channel παρεμβολές και co-layer παρεμβολές δεν θα πρέπει να συγχέονται. Οι πρώτες αναφέρονται στο γεγονός ότι το σήμα θύτης μοιράζεται τη ζώνη συχνοτήτων με το επιθυμητό σήμα. Από την άλλη πλευρά, το δεύτερο υποδηλώνει ότι το επίπεδο του θύτη είναι το ίδιο με εκείνο του συστήματος του θύματος. Παρά το γεγονός ότι σε femtocells δίκτυα οι co-layer παρεμβολές είναι συνήθως co-channel (οι παρεμβολές λόγω χρήσης παρακείμενου καναλιού θεωρούνται συνήθως αμελητέες), το αντίθετο δεν ισχύει απαραίτητα.

Οι περισσότερες τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών κάνουν υποθέσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά του σήματος παρεμβολής, όπως, για παράδειγμα, τη γωνία της άφιξης. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές συνήθως απαιτούν τη χρήση συστοιχιών κεραιών στο σύστημα λήψης, προκειμένου να γίνει αυτό εφικτό. Εφόσον τα femtocells στοχεύουν στη βελτίωση της κάλυψης της κινητής τηλεφωνίας, και η χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης σε κινητά τερματικά είναι ακόμα περιορισμένη, οι τεχνικές μοναδικής κεραίας ακύρωσης παρεμβολών (Single Antenna Interference Cancellation - SAIC) προτιμώνται, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι downlink παρεμβολές. Καθώς η έρευνα πάνω στη διαχείριση παρεμβολών είναι σημαντική και συνεχής, πολλές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί και πλήθος παραλλαγών έχουν προταθεί. Παρακάτω παρουσιάζουμε τις σημαντικότερες κατηγορίες όπως έχουν ταξινομηθεί και προταθεί από την 3GPP [38].

Προτού αναφερθούμε στις τεχνικές όμως, πρέπει να σημειώσουμε τις λειτουργίες που επιτρέπουν στα femtocells να υιοθετούν τις τεχνικές αυτές. Καθώς οι περισσότερες

τεχνικές λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες του περιβάλλοντος, θα αναφέρουμε συνοπτικά ποιες παραμέτρους χρησιμοποιούν τα femtocells ώστε να ανιχνεύσουν το περιβάλλον και να προσαρμόσουν ανάλογα τις λειτουργίες τους.

4.6.2. Μέθοδοι ανίχνευσης παρεμβολών

Ένα femtocell μπορεί να εκτελέσει διάφορους τύπους μετρήσεων ώστε να αποκτήσει επαρκείς πληροφορίες για τον περιορισμό των παρεμβολών αλλά και πληροφορίες απαραίτητες ώστε η κάλυψη υπηρεσιών του femtocell να μπορεί να διατηρηθεί. Ανάλογα με τον τύπο μέτρησης, μερικές από αυτές τις μετρήσεις πιθανόν να συλλέγονται μέσω των συνδεδεμένων σε femtocell UEs ή μέσω ενός δέκτη εντός του femtocell. Όταν η λειτουργία γίνεται στο femtocell ονομάζεται Network Listen Mode (NLM), Radio Environment Measurement (REM) ή "femtocell Sniffer". Αυτές οι μετρήσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτό-ρύθμισης του femtocell. Οι μετρήσεις που μπορεί να εκτελεστούν χωρίζονται σε μετρήσεις που μπορεί να γίνουν σε όλα τα κελιά, που αφορούν μόνο τα περιβάλλοντα κελιά, μετρήσεις που αφορούν το στρώμα macrocell και μετρήσεις σε σχέση με άλλα femtocells.

Ένας βασικός τύπος μέτρησης είναι η λαμβανόμενη ισχύς των παρεμβολών (Received Interference Power ή RIP). Η μέτρηση γίνεται από το femtocell, που υπολογίζει τις παρεμβολές στο uplink που προέρχονται από macrocell χρήστες εις βάρος του femtocell. Μια τιμή RIP υψηλότερη από μια προκαθορισμένη τιμή, θα μπορούσε να σημαίνει πως τουλάχιστον ένας macrocell χρήστης είναι κοντά στο femtocell και η ισχύς μετάδοσής του δημιουργεί ισχυρές παρεμβολές στο femtocell.

Αυτή η τιμή μέτρησης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής (path loss) μεταξύ του femtocell και του macrocell χρήστη υποθέτοντας ότι μόνο ένα macro τερματικό δημιουργεί το μεγαλύτερο μέρος της παρεμβολής. Είναι επίσης σημαντικό για το femtocell να μπορεί να διακρίνει μεταξύ της uplink παρεμβολής από το macro UE από σήματα των femtocell χρηστών ώστε να βελτιώσει την ακρίβεια της μέτρησης παρεμβολών. Ένας ακόμη τύπος μέτρησης είναι η μέτρηση Co-channel Reference Signal Received Power (RSRP). Αυτή μπορεί να εκτελεστεί από το femtocell, τον femtocell ή τον macrocell χρήστη και υπολογίζει ανάλογα την downlink παρεμβολή από το femtocell στα MUEs, τις παρεμβολές στο uplink από το femto UE στο macro στρώμα, τις uplink παρεμβολές από τα τους macro χρήστες στο femtocell, τις downlink παρεμβολές στα femtocells από τα γειτονικά femtocells και τις uplink παρεμβολές από τους femto χρήστες προς τα γειτονικά femtocells.

Πέραν των παραπάνω, υπάρχει η δυνατότητα τα femtocells μέσω του σήματος αναφοράς cell-specific reference signal (CRS) να διαπιστώνουν αν βρίσκονται κοντά σε macrocell που μπορεί να τα επισκιάσει, ή αν είναι κοντά στα όρια του macrocell. Έκτος των παραπάνω, που χρησιμεύουν κυρίως για την παραμετροποίηση προς αποφυγή των παρεμβολών, και άλλες μετρήσεις όπως η αναγνώριση του cell ID των γειτονικών κελιών, ή η μέτρηση των απωλειών διαδρομής από τους femtocell χρήστες ως το σταθμό βάσης του

macrocell ή ως το femtocell, είναι πιθανές και χρησιμοποιούνται για τον συντονισμό λειτουργίας μεταξύ των σταθμών βάσης των δύο στρωμάτων.

4.7. Τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών

Λόγω της σπουδαιότητας του προβλήματος των παρεμβολών σε ετερογενή δίκτυα, το ερευνητικό ενδιαφέρον πάνω στις τεχνικές αντιμετώπισής τους είναι μεγάλο, και οι προτάσεις πολλές. Παρακάτω, περιγράφουμε τις σημαντικότερες κατηγορίες τεχνικών που χρησιμοποιούνται και αφορούν κυρίως τον διαμερισμό στο πεδίο των συχνοτήτων και τον έλεγχο ισχύος των σταθμών βάσης που αφορούν ή επηρεάζουν το στρώμα femtocells. Επικεντρώνουμε το ενδιαφέρον μας στις τεχνικές που αφορούν το downlink των χρηστών, καθώς η επίτευξη υψηλών ρυθμών δεδομένων των χρηστών αποτελεί την κύρια μέριμνα της σχεδίασης δικτύου και αφετέρου, η ευελιξία της τεχνολογίας OFDMA που υλοποιείται στο downlink, επιτρέπει τον μεγάλο αριθμό διαθέσιμων τεχνικών.

4.7.1. ICIC

Διαμερισμός συχνότητας.

Ο διαμερισμός συχνοτήτων μεταξύ του macrocell και των femtocells αλλά και μεταξύ γειτονικών femtocells μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον περιορισμό των co- και cross layer παρεμβολών. Το femtocell μπορεί να πάρει τις πληροφορίες διαμέρισης συχνοτήτων που χρησιμοποιεί το στρώμα macrocell μέσω διαδικασιών μέτρησης που εκτελούνται στο femtocell ή μέσω απευθείας επικοινωνίας με το πρωτόκολλο X2, τις διαδικασίες του οποίου παρουσιάζουμε αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Λόγω της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων που υιοθετεί το LTE-A για μεγαλύτερη φασματική απόδοση, το ζήτημα των παρεμβολών είναι κυρίαρχο στη βιβλιογραφία. Η έρευνα για την επιλογή του καταλληλότερου σχήματος διαμερισμού και κατανομής του φάσματος είναι μεγάλη, και πλήθος προτάσεων έχουν κατατεθεί από την ακαδημαϊκή κοινότητα. Κάθε προσέγγιση χαρακτηρίζεται από τον συμβιβασμό δύο αντίθετων στόχων. Αφενός την επαναχρησιμοποίηση του μεγαλύτερου δυνατού μέρους φάσματος, αφετέρου την προστασία των χρηστών σε προβληματικές περιοχές. Ορισμένες μπορούν να εφαρμοστούν και στα δύο στρώματα (femto και macro), αν και πιθανόν να ταιριάζουν περισσότερο στο ένα από αυτά. Γενικά μπορούμε να χωρίσουμε τις πιθανές λύσεις διαμερισμού σε τρεις κατηγορίες: στατικές, ημι-στατικές, δυναμικές.

Σε στατικά ή ημι-στατικά σχέδια ισχύει μια προκαθορισμένη διαμέριση και κατανομή των συχνοτήτων από την κεντρική διαχείριση των macrocell ή των femtocells. Για παράδειγμα, μπορεί οι σταθμοί να έχουν προγραμματιστεί να κατανέμουν resource blocks στους χρήστες τους με βάση την τοποθεσία τους. Όταν ένα femtocell προσδιορίζει τη θέση του, θα ξέρει βάσει της συμφωνίας ποια μπλοκ συχνοτήτων προορίζονται για χρήση από ένα κοντινό macro UE και ποια είναι διαθέσιμα. Αντίστοιχα, τα σχήματα αυτά μπορούν να εφαρμοσθούν και μεταξύ femtocells προκειμένου να αποφευχθούν οι co-layer παρεμβολές στο femto στρώμα, αν και συνήθως αυτού του τύπου οι προσεγγίσεις

υλοποιούνται καλύτερα όταν υπάρχει κεντρική διαχείριση, γεγονός που ταιριάζει περισσότερο στο macro στρώμα.

Η απλούστερη στατική διαμέριση είναι υιοθέτηση παράγοντα επαναχρησιμοποίησης (Reuse Factor -RF) μεγαλύτερο του 1 ανά κελί. Στο RF3 το φάσμα χωρίζεται σε τρία ίσα μέρη και μοιράζεται στα γειτονικά κελιά. Αποφεύγοντας σημαντικά τις παρεμβολές μεταξύ γειτονικών σταθμών, η συγκεκριμένη λύση πάσχει από μικρή αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, το φάσμα διαχωρίζεται σε μέρη όπου επαναχρησιμοποιούνται μεταξύ των γειτονικών σταθμών και μέρη όπου κατανέμονται αποκλειστικά σε χρήστες σε προβληματικές περιοχές. Οι τεχνικές αυτές ονομάζονται Fractional Frequency Reuse (FFR). Η απλούστερη παραλλαγή ονομάζεται Partial Frequency Reuse (PFR). Με βάση την προσέγγιση αυτή, το φάσμα διαιρείται σε πολλαπλά μέρη και η κυψέλη σε περιοχές. Μέρη του φάσματος ανατίθενται προς χρήση για χρήστες που βρίσκονται σε περιοχές όπου δεν απειλούνται από παρεμβολές (όπως στην εσωτερική περιοχή ενός macrocell). Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η φασματική απόδοση του σχήματος. Τα υπόλοιπα μέρη ανατίθενται προς εκμετάλλευση από τις εξωτερικές περιοχές των κυψελών, με τρόπο που προσομοιάζει την κατανομή στο RF3. Πιο σύνθετη παραλλαγή αποτελεί η Soft Frequency Reuse (SFR).

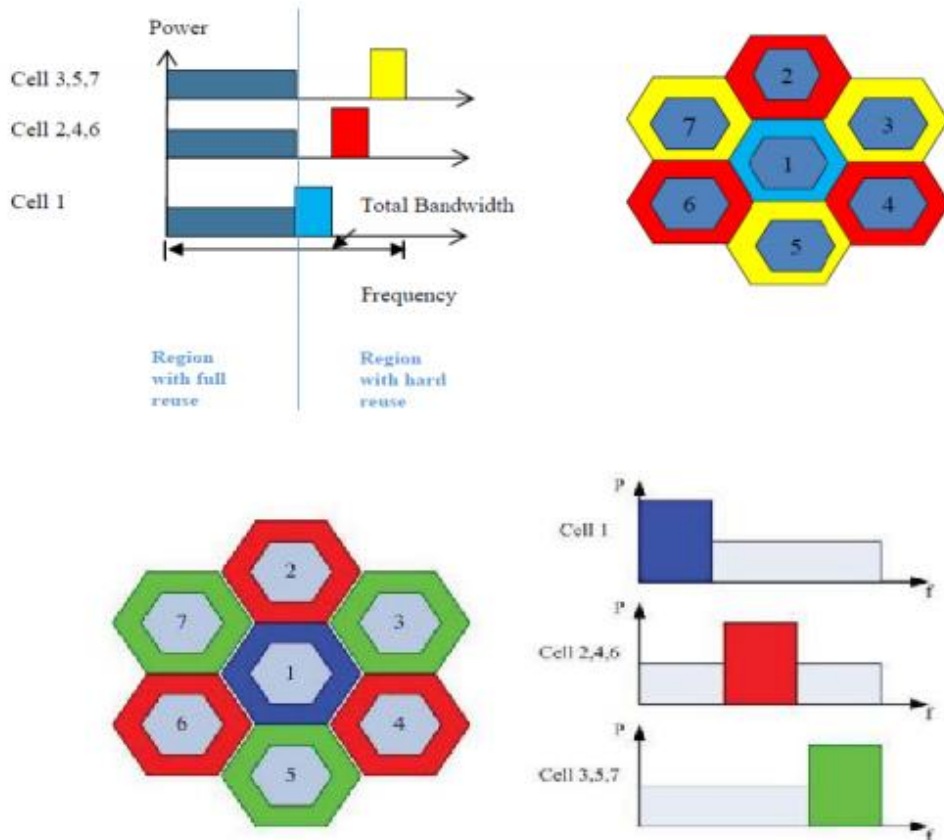
Με βάση αυτήν την προσέγγιση επιδιώκεται ακόμα μεγαλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος. Το SFR ακολουθεί την τακτική του PFR στον γεωγραφικό διαχωρισμό της κυψέλης (π.χ. εσωτερική και εξωτερική περιοχή), καθώς και στην ανάθεση τμήματος φάσματος στις εξωτερικές περιοχές. Σε αυτό που διαφοροποιείται από το FFR, είναι πως δεν αφιερώνει αποκλειστικά μέρος φάσματος στους χρήστες της εσωτερικής περιοχής των κελιών. Αντίθετα, εκείνοι έχουν πρόσβαση στην περιοχή συχνοτήτων που έχουν διατεθεί στους χρήστες της εξωτερικής περιοχής των γειτονικών κελιών. Όπως είναι φυσικό, η προσέγγιση αυτή, αν και επιτυγχάνει καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος, είναι περισσότερο ευάλωτη σε φαινόμενα παρεμβολών, λόγω της πιθανότητας συνύπαρξης κοντινών σχετικά χρηστών στο ίδιο μέρος του φάσματος.

Πολλές φορές τα παραπάνω σχήματα υλοποιούνται ή συνδυάζονται με έλεγχο ισχύος. Ο διαχωρισμός των περιοχών και των συχνοτήτων, επιτρέπει την εφαρμογή διαφορετικών επιπέδων ισχύος μετάδοσης ανά περιοχή και συχνότητα. Η προσέγγιση που ακολουθείται είναι οι συχνότητες που ανατίθενται στους χρήστες της εξωτερικής περιοχής (cell-edge user - CEU) και θεωρούνται μη προνομιούχοι να μεταδίδονται με μεγαλύτερη ισχύ, από τις αντίστοιχες για τους κεντρικούς χρήστες (cell-center user - CCU), οι οποίοι ούτως ή άλλως έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες υψηλής ποιότητας σήματος. Θεωρώντας ότι P_{int} συμβολίζει την ισχύ μετάδοσης του σταθμού βάσης όταν ο χρήστης είναι CCU και P_{ext} όταν πρόκειται για χρήστη CEU, ο λόγος b των επιπέδων ισχύος όπως ορίζεται στην παρακάτω εξίσωση ποικίλει:

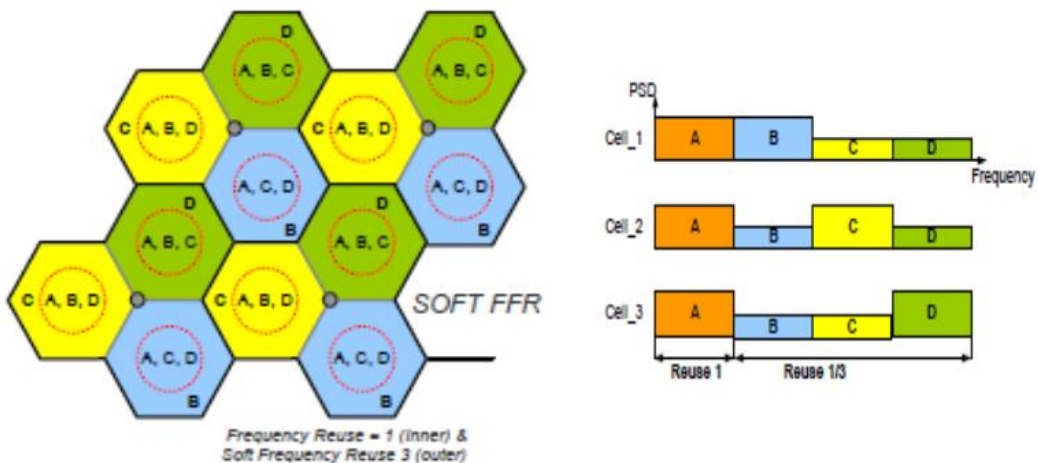
$$b = \frac{P_{ext}}{P_{int}} \quad (5.2)$$

με το λόγο b να παίρνει συνήθως τιμές από 1 έως 6 [39]. Κάθε τιμή παρουσιάζει διαφορετικές επιδόσεις, με την τιμή $b = 2$ να αποδεικνύεται η πιο συμβιβαστική μεταξύ

των επιλογών [39]. Η εφαρμογή ελέγχου ισχύος στο SFR έχει αποτέλεσμα το SFRR (Soft Fractional Frequency Reuse). όπου επιτρέπεται στους χρήστες να αξιοποιούν το σύνολο του φάσματος, αλλά τα μέρη που στο SFR δεν είχαν πρόσβαση, επιβάλλονται περιορισμοί ισχύος εκπομπής.



Εικόνα 18. Διαμερισμός συχνοτήτων σε PFR (πάνω) και SFR (κάτω)



Εικόνα 19. Το SFRR αποτελεί συνδυασμό του SFR και ελέγχου ισχύος

Όσο αφορά ημιστατικές μείωσης παρεμβολών που έχουν μελετηθεί από τη 3GPP αναφέρουμε δύο σχήματα. Το πρώτο [40] προσομοιάζει τις προσεγγίσεις FFR χωρίζοντας

το φάσμα σε ζώνες, αφιερώνοντας κατά αποκλειστικότητα ορισμένα μέρη σε οριακούς χρήστες και τα υπόλοιπα σε κεντρικούς. Τα μέρη που διανέμονται στους οριακούς είναι ορθογώνια προκειμένου να αποφευχθούν οι IC παρεμβολές. Ο διαχωρισμός των περιοχών, όπως και του φάσματος σε μέρη προσαρμόζεται βάσει του φόρτου κίνησης, γεγονός που δίνει τον ημιστατικό χαρακτήρα στο σχήμα. Το δεύτερο σχήμα [41] υλοποιεί το προηγούμενο σχήμα με έλεγχο ισχύος, δηλαδή οι κεντρικοί χρήστες έχουν δικαίωμα χρήσης του φάσματος που κατανέμεται στους οριακούς χρήστες αλλά με περιορισμούς ισχύος. Παράλληλα, το σχήμα προσαρμόζεται μερικώς στις συνθήκες, διαμοιράζοντας τα μέρη του φάσματος μεταξύ των οριακών χρηστών γειτονικών κελιών, όχι ισομερώς αλλά ακολουθώντας το φορτίο της εκάστοτε περιόδου.

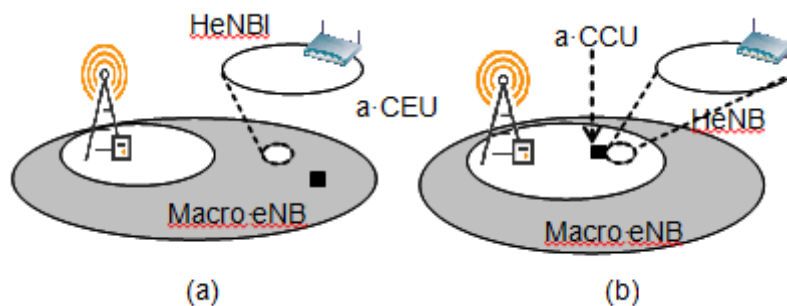
Αν και τα ημιστατικά σχήματα παρουσιάζουν κάποια δυνατότητα προσαρμογής στις συνθήκες, δεν μπορούν να εκμεταλλευθούν επαρκώς τις δυνατότητες που παρέχουν τα δυναμικά σχήματα. Αυτά μπορούν να προσαρμόζονται συνεχώς και ανά χρήση αξιοποιώντας στο έπακρο τις πληροφορίες του δικτύου κάθε στιγμή. Φυσικά, τα δυναμικά σχήματα παρουσιάζουν και προκλήσεις αφού η συνεχής προσαρμογή δημιουργεί μεγάλες απαιτήσεις συντονισμού, ειδικά στις περιπτώσεις κεντρικής διαχείρισης. Ως εκ τούτου, αν τα στατικά και ημιστατικά σχήματα συνήθως ταιριάζουν στο macro στρώμα, τα δυναμικά προσφέρονται περισσότερο για το femto στρώμα όπου ο ad hoc χαρακτήρας του ευνοεί τις κατανεμημένες λύσεις, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν μπορούν να εφαρμοσθούν και στα macrocells.

Θα μπορούσαμε λοιπόν τα δυναμικά σχήματα να τα χωρίσουμε σε κεντρικής διαχείρισης και κατανεμημένης. Στα πρώτα, ένας κεντρικός ελεγκτής συλλέγει το channel state information (CSI) κάθε χρήστη και διαμοιράζει ανάλογα τους πόρους του δικτύου. Αν και αποτελεσματική ως προς την απόδοση, η προσέγγιση αυτή πάσχει από υπερβολική αύξηση σε σηματοδοσία και συστήνεται μόνο σε μικρής έκτασης δίκτυα. Για τον λόγο αυτό, το LTE εισήγαγε την επικοινωνία μέσω του πρωτοκόλλου X2 στις δυνατότητες των σταθμών βάσης, προκειμένου να καταστήσει ικανό τον κατανεμημένο συντονισμό, χωρίς την ανάγκη για κεντρικού ελεγκτή. Τα κατανεμημένα συστήματα μπορούμε να τα χωρίσουμε περαιτέρω σε δύο κατηγορίες. Τα ημι-κατανεμημένα και τα πλήρως κατανεμημένα.

Στα πρώτα ο κεντρικός ελεγκτής είναι πάλι υπεύθυνος για τον διαμοιρασμό των πόρων μεταξύ των σταθμών, αλλά στη συνέχεια αναλαμβάνουν οι ίδιοι οι σταθμοί την κατανομή στους χρήστες τους. Με αυτή την προσέγγιση, ο αναγκαίος φόρτος μειώνεται αισθητά αφού ο κεντρικός έλεγχος λειτουργεί μόνο σε ανώτερο επίπεδο. Στα πλήρως κατανεμημένα σχήματα, ο ρόλος του κεντρικού ελεγκτή απαλείφεται αφού ο συνολικός συντονισμός προέρχεται μέσω της διαρκούς επικοινωνίας μεταξύ των σταθμών. Τα σχήματα αυτά, μειώνουν σημαντικά την επιπλέον μεταδιδόμενη πληροφορία αφού δεν υπάρχει συλλογή πληροφορίας κεντρικά, ενώ χαρακτηρίζονται από αποτελεσματικό συντονισμό μέσω του πρωτοκόλλου X2. Αυτό, ειδικά στα femtocells παίζει σημαντικό ρόλο αφού οι κεντρικές λύσεις μπορεί να γίνουν ιδιαίτερα επιβαρυντικές όταν ο αριθμός των femtocells αυξηθεί αρκετά ή όταν οι συνθήκες καναλιού και οι αιτήσεις για πόρους παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις.

Επίσης, στην κατανεμημένη προσέγγιση, κάθε femtocell, βάση των πληροφοριών που συλλέγει, μπορεί να διαπιστώσει αν υπάρχει σύγκρουση ανάμεσα σε αυτό και ένα κοντινό femtocell, αν για παράδειγμα η διαφορά μεταξύ ενός σήματος παρεμβολής και του σήματος μετάδοσης ξεπερνά κάποιο κατώφλι. Με τον εντοπισμό των συγκρούσεων αυτών, το πρόβλημα διαμερισμού συχνοτήτων μετατρέπεται σε πρόβλημα χρωματισμού γράφου, το οποίο μπορεί να λυθεί με κατανεμημένο τρόπο και μικρή περιπλοκότητα. Ενδεικτικοί αλγόριθμοι και οι επιδόσεις τους μπορεί να βρεθούν στα [42][43][44][45], για περιπτώσεις FDD και TDD, και σενάρια full ή non-full buffer.

Τα παραπάνω σχήματα εφαρμόζονται όπως είπαμε για τις co-layer παρεμβολές τόσο στο macro όσο και στο femto στρώμα με κάθε προσέγγιση να παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της. Μπορούν βέβαια να εφαρμοσθούν και στα δύο στρώματα ταυτόχρονα ή και συμπληρωματικά. Θα μπορούσε αφενός το σχήμα να λαμβάνει υπόψη τους σταθμούς βάσης και των δύο στρωμάτων. Αφετέρου, τα femtocell θα μπορούσαν να προσαρμόζονται στο σχήμα των macrocell. Για παράδειγμα σε FFR, με τη γνώση της διαμέρισης των πόρων στο πεδίο των συχνοτήτων [46], το femtocell γνωρίζοντας ποιο σύνολο των πόρων επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί για τους χρήστες macrocell που βρίσκονται στο κέντρο της κυψέλης, και ποιοι πόροι αναμένεται να χρησιμοποιηθούν για macrocell χρήστες στα όρια της κυψέλης, μπορεί να συντονίσει τη μετάδοση του έτσι ώστε να αποφύγει τις παρεμβολές σε κοντινούς macro UE χρονοπρογραμματίζοντας με υψηλή προτεραιότητα υπο-κανάλια που δεν χρησιμοποιούνται από κοντινούς macro χρήστες. Για παράδειγμα, αν το femtocell βρίσκεται στην άκρη του macrocell, το femtocell θα αναθέσει resource blocks που χρησιμοποιούνται από τους macro CCU για downlink μετάδοση. Αν αντίθετα, το femtocell βρίσκεται στο κέντρο του macrocell, το femtocell θα αναθέσει στους χρήστες του resource blocks που χρησιμοποιούνται από macro CEU για downlink (Εικόνα 20).



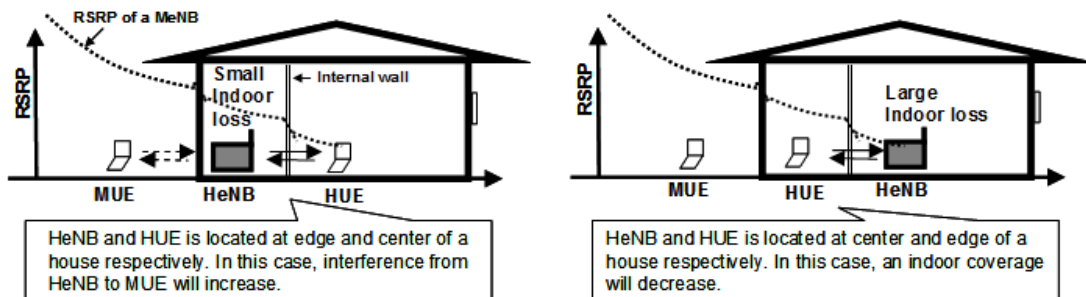
Εικόνα 20. Τα femtocells μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ανεκμετάλλευτο φάσμα στο σημείο εγκατάστασής τους, αν ο διαμερισμός έχει γεωγραφικά χαρακτηριστικά.

Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι RSRP μετρήσεις, οι πληροφορίες από τον μηχανισμό επιλογής του κυρίαρχου σταθμού βάσης (cell re-selection priority - CRP) και τα RRC μηνύματα των γειτονικών κυψελών, ώστε να επιλέξουν δυναμικά το φορέα συχνότητας που θα λειτουργήσουν [47][48].

Έλεγχος ισχύος. Όπως έχουμε αναφέρει, τα femtocells μπορεί να θέτουν τα επίπεδα ισχύος μετάδοσης μετρώντας τις περιβάλλουσες συνθήκες RF, προκειμένου να αποφύγουν τις παρεμβολές σε macrocell χρήστες, αλλά και να διατηρήσουν καλή κάλυψη

για τους χρήστες του femtocell. Ταυτόχρονα, ο έλεγχος ισχύος μπορεί να εξυπηρετήσει τα σχήματα διαμερισμού συχνότητας όπως είδαμε στην περίπτωση του SFFR. Παρόλα αυτά, μπορεί να υπάρξει μεγάλη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων από τα femtocells και τις συνθήκες που πραγματικά υφίστανται οι χρήστες. Ακόμα και σε εσωτερικούς χώρους τα femtocells και οι χρήστες μπορεί να μετρήσουν αρκετά διαφορετικές συνθήκες, είτε μεταξύ διαφορετικών δωματίων, ορόφων κλπ.

Ένα παράδειγμα της σημαντικής αυτής διαφοράς φαίνεται στην Εικόνα 21. Στα αριστερά, απεικονίζεται το σενάριο όπου ένα femtocell και ένας femto χρήστης βρίσκεται στην άκρη και το κέντρο του σπιτιού, αντίστοιχα, και ένας macro χρήστης βρίσκεται πολύ κοντά. Η άκρη και το κέντρο του σπιτιού θεωρούμε ότι είναι απομονωμένα από ένα εσωτερικό τοίχωμα. Στην περίπτωση αυτή η ισχύς εκπομπής του femtocell έχει οριστεί σε μια σχετικά υψηλή τιμή επειδή η στάθμη σήματος από το macro σταθμό βάσης (RSRP) είναι σχετικά υψηλή. Ως αποτέλεσμα, οι παρεμβολές στο macro τερματικό θα αυξηθούν σημαντικά και η εμβέλεια του femtocell θα αυξηθεί χωρίς κάτι τέτοιο να είναι απαραίτητο. Από την άλλη πλευρά, στην εικόνα στα δεξιά απεικονίζεται το σενάριο όπου ένα femtocell και ένας χρήστης του βρίσκεται στο κέντρο και την άκρη ενός σπιτιού, αντίστοιχως, και ένας macrocell χρήστης βρίσκεται κοντά στο σπίτι. Στην περίπτωση αυτή η ισχύς εκπομπής του femtocell τίθεται σε μια σχετικά χαμηλότερη τιμή επειδή η στάθμη σήματος από το macrocell είναι σχετικά χαμηλή. Ως αποτέλεσμα, η εσωτερική κάλυψη του femtocell μειώνεται σημαντικά, ενώ και οι παρεμβολές στο macro UE θα μειωθούν. Σε αυτά τα σενάρια, είναι απαραίτητο για το femtocell να εξετάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων των χρηστών του προκειμένου να καθορίσει κατάλληλα την ισχύ μετάδοσης.



Εικόνα 21. Η ανίχνευση των συνθηκών μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές σε λανθασμένα συμπεράσματα. Είτε στην αναίτια αύξηση της ισχύς του femtocell (αριστερά), είτε στην μείωσή της με αρνητικές επιπτώσεις στην εμβέλεια κάλυψης.

Προκειμένου να βελτιωθούν τα ανωτέρω προβλήματα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις από τους femto χρήστες για τη βελτιστοποίηση της ισχύς εκπομπής των femtocells μετά την αρχική παραμετροποίηση. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε co-channel παρατάξεις και μπορεί να προσφέρει καλύτερη προστασία στους macro χρήστες διατηρώντας παράλληλα καλή κάλυψη του femtocell.

Κάθε femtocell πρέπει αρχικά να θέσει την ισχύ εκπομπής βάσει των μετρήσεων των RF συνθηκών του macrocell όπως το RSRP. Στη συνέχεια οι femto χρήστες θα πρέπει να μετρούν το επίπεδο ποιότητας του σήματος αναφοράς από το femtocell, όπως το RSRP ή το RSRQ και να αναφέρουν αυτήν την τιμή στο femtocell. Με βάση τα αποτελέσματα των

μετρήσεων, το femtocell θα πρέπει να βελτιώσει την ισχύ εκπομπής, έτσι ώστε οι επόμενες αναφερόμενες τιμές μέτρησης να είναι κοντά σε μια προκαθορισμένη και συμφωνημένη τιμή. Αν συνδέονται πολλοί χρήστες με το femtocell, τότε θα πρέπει η μικρότερη τιμή των αναφερόμενων αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις κάθε χρήστη να φτάσει την τιμή-στόχο.

Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να βελτιώσει το πρόβλημα που απεικονίστηκε ανωτέρω. Στην εικόνα αριστερά το femtocell θα μειώσει την ισχύ εκπομπής και η παρεμβολή στο χρήστη του macrocell θα μετριαστεί, επειδή το αποτέλεσμα της μέτρησης από το femto UE δείχνει ικανοποιητική ποιότητα οπότε θεωρείται προτιμότερο να μειώσει την ισχύ μετάδοσης. Στο σχήμα δεξιά το femtocell θα αυξήσει την ισχύ εκπομπής και η εσωτερική κάλυψη θα πρέπει να διευρυνθεί, διότι το αποτέλεσμα της μέτρησης του femto UE δείχνει κακή ποιότητα οπότε κρίνεται προτιμότερο να αυξηθεί η ισχύς εκπομπής.

Πάνω στην λογική της περιοδικής καταμέτρησης μιας μετρικής ποιότητας υπηρεσιών, και την αντίστοιχη ρύθμιση της ισχύος έχουν προταθεί πλήθος αλγορίθμων. και η προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη μετρήσεις από τους χρήστες είναι ακριβής, η επιβάρυνση του φόρτου λόγω σηματοδοσίας, η αδυναμία όλων των τερματικών για ακριβείς μετρήσεις και η αυξημένη πολυπλοκότητα του σχήματος, κάνουν απλούστερες προσεγγίσεις προτιμητέες. Οι προσεγγίσεις αυτές βασίζονται στις μετρήσεις από το macro σταθμό βάσης, αλλά και από την εκτίμηση των απωλειών διαδρομής. Στην πρώτη περίπτωση οι παρεμβολές αποφεύγονται με τη ρύθμιση της ισχύς μετάδοσης του femtocell στο downlink με βάση μετρήσεις που αφορούν την συνολική λαμβανόμενη παρεμβολή, το δεχόμενο CRS από το κυρίαρχο macrocell κλπ. Στη δεύτερη περίπτωση το femtocell ρυθμίζει την ισχύ μετάδοσης λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες διαδρομής μεταξύ του femtocell και ενός εξωτερικού γειτονικού macrocell, περιλαμβάνοντας τις απώλειες διάδοσης λόγω διείσδυσης (penetration loss). Ως αποτέλεσμα, όταν το femtocell βρίσκεται κοντά στα όρια του macrocell, η ισχύς μετάδοσης θα μειώνεται ώστε να μην παρεμβάλλεται στην ασθενή σύνδεση του macro UE με το macrocell. Ένα παράδειγμα τέτοιου αλγορίθμου εμφανίζεται στο [49] και τον ακολουθούμε στα πλαίσια της εργασίας αυτής κατά τη διάρκεια των εξομοιώσεων. Βάσει της μεθόδου αυτής το femtocell χρησιμοποιεί τις απώλειες από το κοντινότερο macrocell προκειμένου να εξασφαλίσει σταθερή εμβέλεια για τους femto χρήστες. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας και της μαθηματικής έκφρασης του αλγορίθμου δίνεται στο κεφάλαιο 6. Η παραπάνω μέθοδος υλοποιημένη στον προσομοιωτή θα αναφέρεται από δω και στο εξής ως μέθοδος ελέγχου ισχύος σταθερής εμβέλειας.

Άλλες μέθοδοι. Πέραν των μεθόδων ελέγχου ισχύος και διαμέρισης συχνοτήτων, υπάρχουν εναλλακτικές μέθοδοι για την αποφυγή και εξάλειψη των παρεμβολών. Μία από αυτές είναι και η αλλαγή του CSG ID ενός femtocell κλειστής πρόσβασης δυναμικά, μεταξύ του προκαθορισμένου κατά την εγκατάστασή του CSG ID, και ενός ειδικού CSG ID, που ορίζεται από τον διαχειριστή του συστήματος. Όταν γίνεται η αλλαγή του CSG ID στο ειδικό CSG ID, το μέχρι πρότινος κλειστής πρόσβασης femtocell γίνεται προσβάσιμο σε κάθε περαστικό UE εντός εμβέλειας, εξαλείφοντας τις παρεμβολές προς το macrocell στρώμα. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί παραλλαγή της υβριδικής πρόσβασης που αναφέραμε παραπάνω υλοποιημένη στο πεδίο του χρόνου.

Με τη δυναμική αλλαγή του CSG ID με συντονισμένο τρόπο, μπορεί να διασφαλιστεί πως ο αριθμός των femtocells κλειστής πρόσβασης που λειτουργούν με το αρχικό CSG ID, δεν ξεπερνά ένα προκαθορισμένο πάνω όριο σε κάθε χρονική στιγμή. Με τον τρόπο αυτό, ενδεχόμενη μεγάλη αύξηση του αριθμού των femtocells δε θα σημαίνει αύξηση των συνολικών παρεμβολών κατά μήκος της κυψέλης, αφού οι αριθμός των femtocells-θυτών, παραμένει σταθερός. Περεταίρω παραμετροποιήσεις και παραλλαγές του μηχανισμού περιλαμβάνουν διαφορετικά όρια ανά macrocell, ανά κατάσταση φόρτου του δικτύου, ενεργοποίηση συγκεκριμένες ώρες κλπ. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να είναι καταναμημένος ή να λαμβάνει χώρα μέσω κεντρικού ελέγχου.

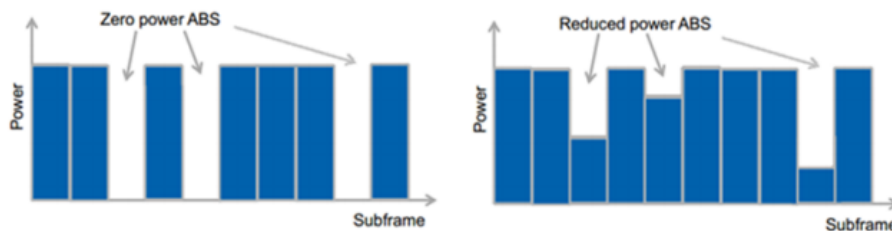
Τέλος, μια ακόμα μέθοδος αποφυγής παρεμβολών, είναι ο περιορισμός των πόρων μετάδοσης του femtocell, όταν υπάρχει κοντά UE το οποίο υφίσταται παρεμβολές. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι οι περιορισμοί στη μετάδοση του femtocell τίθενται μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο, δηλαδή ξεχωριστά για κάθε χρήστη. Για να βρεθεί αν υπάρχουν UEs θύματα στην εμβέλεια ενός femtocell, υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις. Στην πρώτη η απόφαση παίρνεται στο macrocell ή στο femtocell, βασισμένα στις αναφορές μετρήσεων από τα UE. Στη δεύτερη η απόφαση λαμβάνεται από το femtocell βασισμένο στην ανίχνευση μεταδόσεων uplink από ενδεχόμενα UEs θύματα. Αν και μια τέτοια προσέγγιση έχει ιδανικά αποτελέσματα καθώς προσαρμόζεται ακριβώς σε κάθε χρήστη, η πολυπλοκότητα του συστήματος και η επιβάρυνση στη σηματοδοσία αποτελούν παράγοντες που δυσχεραίνουν την υλοποίησή της.

4.7.2. eICIC - FeICIC

Καθώς η 3GPP θεωρεί το ζήτημα παρεμβολών το μεγαλύτερο περιοριστικό παράγοντα για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης, διερευνά συνεχώς βελτιωμένες και νέες μεθόδους σε επίπεδο IC. Στις προδιαγραφές της δέκατης έκδοσης του LTE, συμπεριελήφθησαν βελτιώσεις που ονομάστηκαν enhanced ICIC (eICIC). Πέραν των βελτιώσεων στις κλασικές τεχνικές, η σημαντικότερη συνεισφορά του eICIC ήταν η εισαγωγή των Almost Blank Subframes (ABS) ως μία εκ των τεχνικών απέναντι σε παρεμβολές.

Τα ABS αποτελούν μια τεχνική βασισμένη στο επίπεδο του χρόνου (TDM) που στοχεύει στη μείωση των παρεμβολών μέσω συντονισμένου χρονοπρογραμματισμού μεταξύ των συγκρουόμενων σταθμών. Ουσιαστικά, η μετάδοση ενός σταθμού σε ορισμένα υποπλαίσια περιορίζεται ώστε τις στιγμές μετάδοσής τους οι κοντινοί σταθμοί να προγραμματίζουν μεταδόσεις χωρίς να υφίστανται παρεμβολές. Κατά τη διάρκεια των ABS λοιπόν, δεν μεταδίδεται κανένα σήμα δεδομένων, παρά μόνο ορισμένα αναγκαία σήματα ελέγχου. Τις χρονικές στιγμές αυτές, άλλοι σταθμοί, είτε small cells είτε macrocells, χρονοπρογραμματίζουν τις μεταδόσεις σε χρήστες που βρίσκονται κοντά στην αρχική πηγή παρεμβολής. Η τεχνική αυτή επιτρέπει μεγαλύτερη ακτίνα CRE για τα small cells. Ο συντονισμός μεταξύ των σταθμών για τον προγραμματισμό των ABS γίνεται μέσω του X2 πρωτοκόλλου, που υποστηρίζει μηνύματα όπως ABS pattern info.

Στην έκδοση 11 LTE η συνέχεια της έρευνας είχε αποτέλεσμα το Further Enhanced ICIC (FeICIC). Μια σημαντική βελτίωση αφορούσε τα ABS. Αρχικά, τα κανάλια μετάδοσης δεδομένων στα ABS ήταν πλήρως κενά. Πολλές φορές όμως αυτό δεν είναι απαραίτητο και απλή μείωση της ισχύος στα κανάλια αυτά είναι αρκετή να μειώσει τις παρεμβολές. Αυτό ακριβώς συμβαίνει με μια εκδοχή των ABS, τα Reduced Power Almost Blank Subframes (RP-ABS). Με αυτή την προσέγγιση αυξάνεται η φασματική απόδοση του δικτύου, αφού το macrocell δεν διακόπτει πλήρως τη μετάδοση και μπορεί να εξυπηρετεί κοντινούς σε αυτό χρήστες. Από την άλλη μεριά, δημιουργείται το ζήτημα της επιλογής της χαμηλής στάθμης των καναλιών δεδομένων. Ερωτήματα προκύπτουν όπως στατική ή δυναμική επιλογή, ακριβή τιμή στάθμης κλπ. που πρέπει να επιλυθούν, με κάθε απόφαση να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Αξίζει να σημειώσουμε πως η δυναμική επιλογή που βασίζεται στην συντονισμένη μετάδοση μεταξύ των σταθμών τείνει να ισοδυναμεί με την τεχνολογία CoMP.

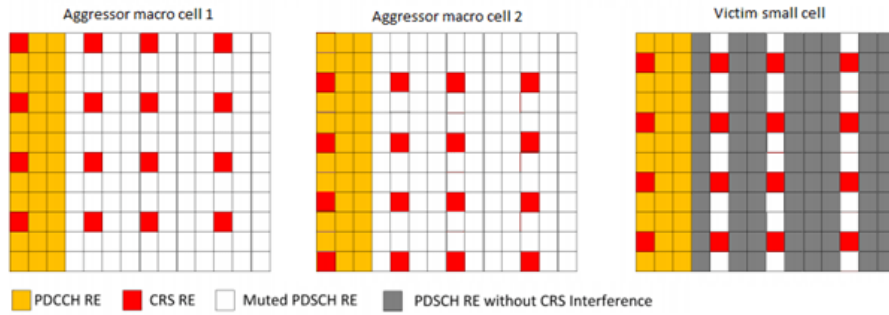


Εικόνα 22. ABS και RP-ABS (frankrayal.com)

Η δεύτερη σημαντική βελτίωση αφορούσε την προστασία των CRS που δεν συμπεριλαμβάνονταν στις τεχνικές του ICIC που στόχευε κυρίως στα κανάλια ελέγχου και δεδομένων. Παρεμβολές στα CRS μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στα παραπάνω κανάλια και δη στην κωδικοποίησή τους, αλλά και μεταξύ CRS γειτονικών κελιών. Οι τεχνικές για αποφυγή των παρεμβολών αυτών μπορούν να γίνουν είτε σε επίπεδο δέκτη, είτε σε επίπεδο πομπού.

Σε επίπεδο δέκτη, τα UEs αναγνωρίζουν τις πιο ισχυρές CRS παρεμβολές και τις ακυρώνουν αφαιρώντας τις από το σήμα. Στην περίπτωση των «colliding CRS» η αναγνώριση γίνεται δυσκολότερη και απαιτείται η συνεισφορά των πομπών προκειμένου να αυξηθεί η πληροφορία σχετικά με το δίκτυο και την ακύρωση των παρεμβολών.

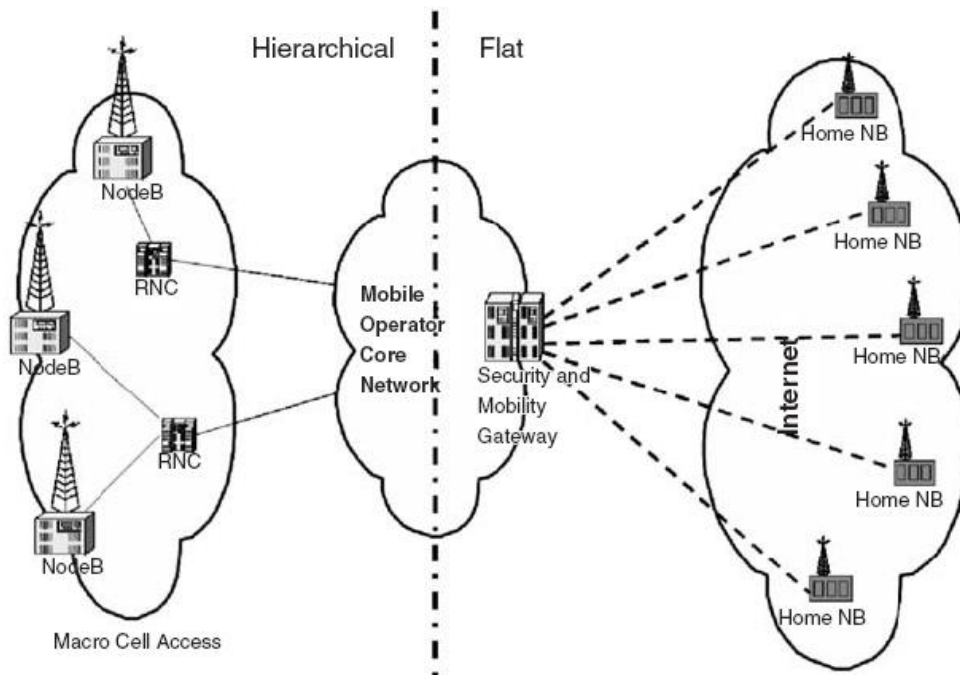
Σε επίπεδο πομπού, τα κανάλια PDSCH σε ένα ABS από small cell που βιώνουν ισχυρές παρεμβολές από macrocell CRS αποσιωπούνται. Φυσικά η τεχνική αυτή, έχει αρνητική συνέπεια την απώλεια πόρων.



Εικόνα 23. FeICIC CRS ακύρωση παρεμβολών σε επίπεδο πομπού με τη χρήση ABS (<http://frankrayal.com>)

4.1. Αρχιτεκτονική

Σε αντίθεση με τα macrocells, τα δίκτυα femtocells απαιτούν από τους παρόχους να ενσωματώσουν εκατοντάδες χιλιάδες χαμηλής δυναμικότητας σταθμούς βάσης για οικιακή ή εταιρική χρήση, που μπορεί να μετακινηθούν, προστεθούν, και να αλλαχθούν από τους τελικούς χρήστες ανά πάσα στιγμή. Αυτό εγείρει μια σειρά από σημαντικά ζητήματα για την ενσωμάτωση των femtocells στην αρχιτεκτονική του υπόλοιπου δικτύου όσο αφορά την επεκτασιμότητα, την ασφάλεια και την τυποποίησή τους.

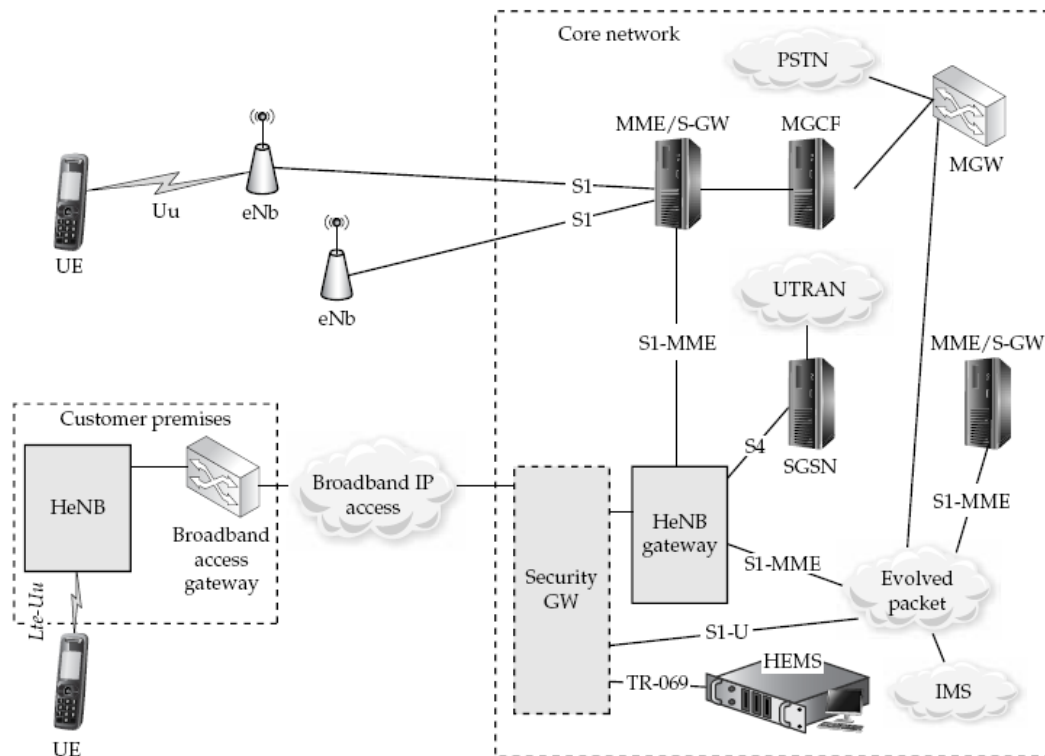


Εικόνα 24. Η ενσωμάτωση των femtocells στην αρχιτεκτονική του δικτύου.

Επειδή η τεχνολογική πρόοδος επιτρέπει ισχυρές δυνατότητες επεξεργασίας ακόμη και σε χαμηλού κόστους σταθμούς βάσης, οι στοίβες πρωτοκόλλου δικτύου μπορεί να διαφοροποιηθούν. Επιπλέον, το πρότυπο IP αντικατέστησε γρήγορα τα ιεραρχικά πρωτόκολλα μετάδοσης τηλεπικοινωνιών. Ο συνδυασμός των παραπάνω καθιστά δυνατή

την χρήση δικτύων όπως το Internet ως μεταφορά backhaul στο δίκτυο του παρόχου κινητής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24.

Για το LTE/LTE-A στο οποίο επικεντρωνόμαστε ως το τελευταίο δίκτυο που έχει προτυποποιηθεί, η τυποποίηση για τα femtocells αποτελεί μέρος του αρχικού προτύπου βάσης [50], το οποίο επιτρέπει στα ζητήματα των LTE femtocells να αντιμετωπιστούν παράλληλα με την ανάπτυξη του LTE. Τα femtocells μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην ανάπτυξη των LTE υπηρεσιών από την άποψη ότι η κατανομή των LTE NodeB σταθμών μπορεί να είναι αρκετά λιγότερο πυκνή. Χρησιμοποιώντας μικρά δίκτυα, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να επεκτείνουν την κάλυψη σε οποιαδήποτε θέση όπου η ευρυζωνική πρόσβαση είναι διαθέσιμη. Αυτό αυξάνει σημαντικά την ικανότητα της εταιρείας να παρέχει LTE κάλυψη σε περιοχές που διαφορετικά δεν θα ήταν εφικτό.



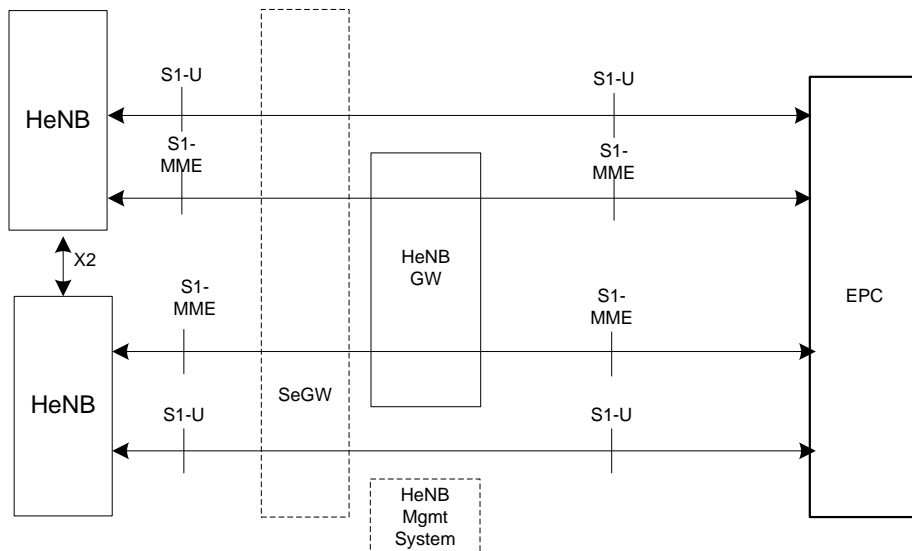
Εικόνα 25. Διάγραμμα ενός LTE δικτύου που περιλαμβάνει ένα δίκτυο femtocell.

Η Εικόνα 25 παρουσιάζει ένα υψηλού επιπέδου διάγραμμα ενός LTE δικτύου που περιλαμβάνει ένα δίκτυο femtocell. Το UE επικοινωνεί ασύρματα με ένα HeNodeB (LTE-A femtocell). Το HeNB αποτελεί μια μικρογραφία του eNodeB παρέχοντας κάλυψη LTE στο σπίτι του πελάτη. Τα HeNB διασυνδέονται με το δίκτυο του παρόχου κινητής μέσω του ευρυζωνικού δικτύου διαμέσου μιας πύλης ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως και σε όλους τους τύπους femtocells. Το δίκτυο κορμού του παρόχου της κινητής τηλεφωνίας αποκτά πρόσβαση στο HeNB που είναι συνδεδεμένο στην συσκευή ευρυζωνικής πρόσβασης μέσω μιας πύλης ασφαλείας. Η πύλη ασφαλείας χρησιμοποιείται για την προστασία του δικτύου κορμού από επιθέσεις. Από την αξιόπιστη πλευρά της πύλης ασφαλείας βρίσκεται η πύλη HeNB GW. Η HeNB GW είναι υπεύθυνη για τη συγκέντρωση της κυκλοφορίας από ένα μεγάλο αριθμό HeNBs και τη διασύνδεσή τους με το κεντρικό δίκτυο EPC. Η διεπαφή S1-

MME μεταφέρει δεδομένα χρησιμοποιώντας την LTE S1-MME διεπαφή. Το HeNB διασυνδέεται με το EPC χρησιμοποιώντας την διεπαφή LTE S1-U διαμέσου της πύλης ασφαλείας.

Η Εικόνα 26 παρουσιάζει τη λογική της αρχιτεκτονικής για τα HeNB. Οι λειτουργικές μονάδες που φαίνονται είναι κοινές με αυτές για το HNB (3G femtocell). Η HeNB GW εμφανίζεται στο MME ως eNB, ενώ η HeNB GW εμφανίζεται στο HeNB ως MME. Η S1 διεπαφή μεταξύ του HeNB και του EPC είναι η ίδια, ανεξάρτητα από το αν το HeNB είναι συνδεδεμένο με το EPC μέσω HeNB GW ή όχι. Η HeNB GW πρέπει να συνδέεται με το EPC με τέτοιο τρόπο ώστε η εισερχόμενη και εξερχόμενη κινητικότητα σε κυψέλες που εξυπηρετούνται από την HeNB GW δεν απαιτούν κατ' ανάγκη μεταπομπή (handover) μεταξύ των MME. Ένα HeNB εξυπηρετεί μόνο ένα κελί.

Οι λειτουργίες που υποστηρίζονται από το HeNB πρέπει να είναι οι ίδιες με εκείνες που υποστηρίζονται από eNodeB (με κάποιες πιθανές εξαιρέσεις) και οι διαδικασίες που τρέχουν μεταξύ HeNB και του EPC θα πρέπει να είναι οι ίδιες με εκείνες μεταξύ eNodeB και του EPC. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι πως βάση των προδιαγραφών επιτρέπεται η επικοινωνία των HeNB μέσω της X2 σηματοδοσίας προκειμένου να συντονίζονται για διαδικασίες κατανομής πόρων, αποφυγής παρεμβολών και μεταπομπών.

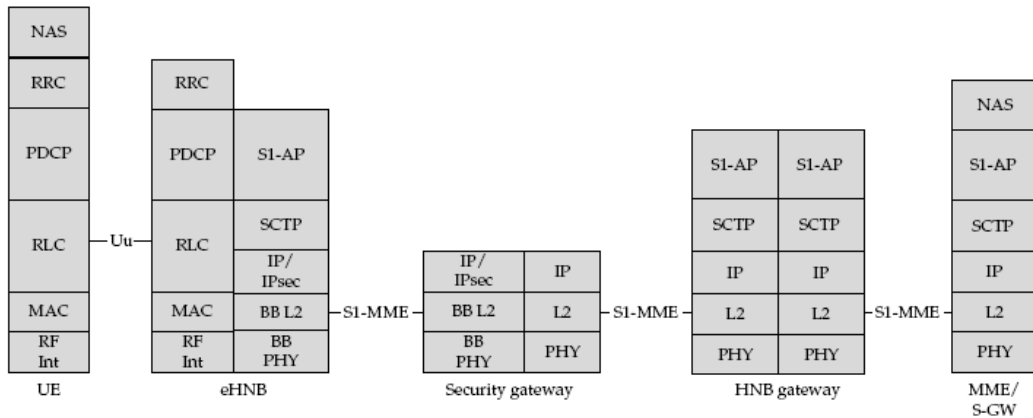


Εικόνα 26. Λογικό μοντέλο αρχιτεκτονικής δικτύου femtocells

Όσο αφορά τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας, η Εικόνα 27 δείχνει την στοίβα πρωτοκόλλου ελέγχου που χρησιμοποιείται από τον εξοπλισμό δικτύωσης των LTE femtocell. Η στοίβα πρωτοκόλλου χρήστη είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται για την σύνδεση με το eNodeB αφού το UE βλέπει το HeNB σαν eNodeB. Στο φυσικό επίπεδο υπάρχει διεπαφή RF.

Πάνω από το στρώμα MAC, τα υψηλότερα στρώματα των πρωτοκόλλων ελέγχου του UE χρησιμοποιούν το Radio Link Control (RLC) υπόστρωμα για να αποκτήσουν πρόσβαση στα διάφορα κανάλια πάνω από τα οποία θα επικοινωνεί με το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Το RLC παρέχει παράδοση των μηνυμάτων χωρίς λάθη μέσω μηχανισμών εντοπισμού σφαλμάτων, ταυτοποίησης των μηνυμάτων και αναμετάδοσής τους. Το

πρωτόκολλο Packet Data Convergence Protocol (PDCP) εκτελεί συμπίεση επικεφαλίδας, αυξάνει την αξιοπιστία της παράδοσης του πακέτου και παρέχει κρυπτογράφηση και μεταφορά των δεδομένων του πρωτοκόλλου ελέγχου



Εικόνα 27. Η στοίβα πρωτοκόλλου ελέγχου που χρησιμοποιείται από τον εξοπλισμό δικτύωσης των LTE femtocells.

Το Radio Resource Control (RRC), όπως υποδηλώνει το όνομα, είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των πόρων που ανατίθενται στα UE. Το RRC εγκαθιστά και απελευθερώνει κανάλια, συμπεριλαμβανομένων των καναλιών σηματοδότησης. Οι μετρήσεις των ραδιοσημάτων ενεργοποιούνται και αναφέρονται στο RRC, επιτρέποντάς του να εκτελεί τη διαχείριση της κινητικότητας. Η διαχείριση της κινητικότητας περιλαμβάνει τη διαπίστωση αν μια κλήση πρέπει να μεταβιβάζεται (handover), την επιλογή της κυψέλης και τη δρομολόγηση των ενημερώσεων. Το RRC υποστηρίζει QoS, μέτρηση σημάτων αναφοράς από τα UE και μεταφορά μηνυμάτων NAS. Το πρωτόκολλο ελέγχου NAS είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση φορέων του EPS, την ταυτοποίηση και τον έλεγχο ασφαλείας. Τα EPS κανάλια bearer χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πολυμέσων, φωνής και δεδομένων. Το πρωτόκολλο Εφαρμογής S1 (S1-AP) είναι υπεύθυνο για τις μεταπομπές, την αναφορά τοποθεσίας, την εξισορρόπηση του φόρτου και τον έλεγχο για υπερφόρτωση.

Το S1-AP πρωτόκολλο λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο Stream Control Transmission Protocol (SCTP). Το SCTP, είναι παρόμοιο με το Transmission Control Protocol (TCP), δηλαδή είναι ένα πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς παρέχοντας αξιόπιστη παράδοση των μηνυμάτων μεταξύ του HeNB και της HNB-GW. Στο στρώμα IP, το IPsec χρησιμοποιείται για λόγους ασφαλείας, δεδομένου ότι οι επικοινωνίες μεταξύ της πύλης HNB-GW και της πύλης ασφαλείας γίνονται πάνω από ένα μη αξιόπιστο δίκτυο IP. Τα Broadband Layer2 (BB L2) και το Physical Layer (BB Phy) εξαρτώνται από το είδος της ευρυζωνικής πρόσβασης που χρησιμοποιείται από το συνδρομητή, όπως οπτική ίνα (FTTH), καλωδιακή ή DSL.

4.2. Αυτο-οργανώσιμα δίκτυα

Τα femtocells αναπτύσσονται σε μεγάλους αριθμούς ενώ θεωρητικά, κάθε σπίτι ή εταιρεία θα μπορούσε να έχει εγκαταστήσει από ένα. Ως αποτέλεσμα, τα femtocells

εγκαθίστανται από τον πελάτη με παρόμοιο τρόπο που εγκαθιστούν και WiFi δρομολογητές. Πότε και πού ένας πελάτης εγκαθιστά ένα femtocell είναι ένα εντελώς τυχαίο γεγονός. Για να μειωθούν οι λειτουργικές δαπάνες των femtocells απαιτείται τα δίκτυα femtocells να είναι plug-and-play. Για να καλυφθεί αυτή η ανάγκη τα femtocells μπορούν να υποστηρίζουν λειτουργίες αυτό-οργανώσιμων δικτύων (SON - Self-organizing Networks).

Τα macrocells έχουν αναπτυχθεί μετά από εκτεταμένες μετρήσεις και ρυθμίσεις των παραμέτρων από τον πάροχο. Αντίθετα τα SON femtocells πρέπει να είναι σε θέση να προσαρμόζονται δυναμικά κατά την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους, ακολουθώντας τις αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντός τους, όπως για παράδειγμα την εγκατάσταση ενός γειτονικού femtocell. Παρακάτω περιγράφονται μερικοί από τους πιθανούς μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για να επιτρέπουν στα δίκτυα femtocells δυνατότητες SON:

- Κατά τη διαδικασία έναρξης λειτουργίας, ένα femtocell καταγράφει και πιστοποιεί τον εαυτό του με το δίκτυο femtocell και στέλνει την τοποθεσία του στον Femtocell Application Server (FAS). Το FAS μπορεί να στείλει στο femtocell τις αρχικές παραμέτρους ρύθμισης μετάδοσης με βάση την εγγύτητά του με άλλα femtocells και macrocells.

- Μόλις ταυτοποιηθεί το femtocell μπορεί να κατεβάσει αυτόματα την τελευταία έκδοση λογισμικού, το οποίο περιλαμβάνει ενημερώσεις για τη βέλτιστη λειτουργία του.

- Το femtocell θα πρέπει να είναι σε θέση να τρέχει διαγνωστικά τεστ προκειμένου να διαπιστωθούν τυχόν αστοχίες υλικού που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την απόδοσή του.

- Σε τακτά χρονικά διαστήματα, το femtocell μπορεί να εκτελέσει διάφορες μετρήσεις προκειμένου να ανιχνεύσει μεταβολές στην ισχύ μετάδοσης από γειτονικά femtocells ή/και από macro σταθμούς βάσης. Μετά από τη μέτρηση που συνήθως λαμβάνει χώρα μέσω σάρωσης, το femtocell μπορεί να προσαρμόσει τις παραμέτρους μετάδοσης για την βελτιστοποίηση της απόδοσής του. Αυτές οι αλλαγές θα πρέπει να αναφερθούν πάλι στο FAS.

- Το FAS μπορεί να διατηρήσει μια λίστα των γειτονικών femtocells και macrocells. Σε αυτόν τον κατάλογο περιλαμβάνονται οι ρυθμίσεις της μετάδοσης, όπως η ισχύς εκπομπής και οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται. Όταν συμβούν αλλαγές στο δίκτυο, όπως η εγκατάσταση ενός νέου femtocell, το FAS μπορεί να ζητήσει προσαρμογές σε μία ή περισσότερες παραμέτρους των femtocells, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου.

4.3. Sleep mode

Στα προηγούμενα κεφάλαια, αναφερθήκαμε στον κρίσιμο ρόλο που έχει αποκτήσει η ενεργειακή απόδοση των νέων δικτύων. Τα small cells χαρακτηριζόμενα από την μαζική εγκατάσταση των σταθμών τους, συμμετέχουν σημαντικά στην ενεργειακή κατανάλωση. Αν και η επιβάρυνση οικονομικά απασχολεί τους ιδιοκτήτες τους στην

περίπτωση των femtocells, και όχι τους παρόχους όπως στην περίπτωση των macrocells, η επίτευξη ενεργειακά αποδοτικότερων δικτύων υπέρ του περιβάλλοντος παραμένει κρίσιμη. Μάλιστα, σύμφωνα με το [51], η ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου αυξάνεται γραμμικά με την εγκατάσταση των small cells. Παράλληλα, η χωρητικότητα που προσφέρεται ξεπερνά σημαντικά τις ανάγκες των χρηστών σε χρονικές στιγμές με την αύξηση των σταθμών, οδηγώντας στην αύξηση της πιθανότητας να αξιοποιούνται σε πολύ μικρό ποσοστό.

Συνακόλουθο ήταν η προσπάθεια ανέυρεσης μεθόδων προς καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Καθώς, το πεδίο αυτό έχει απασχολήσει ήδη για πολλά χρόνια την έρευνα σε επίπεδο macrocell, έχουν παραχθεί πλήθος στρατηγικών και τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας. Είναι λογικό λοιπόν, να γίνει προσπάθεια μεταφοράς των τεχνικών αυτών στο femto στρώμα, κάνοντας βέβαια τις απαραίτητες προσαρμογές στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του στρώματος αυτού, όπως η ad hoc εγκατάσταση και η κλειστή πρόσβαση.

Μια επιτυχημένη τεχνική στο macrocell στρώμα είναι η υιοθέτηση κατάστασης αναμονής. Στην κατάσταση αναμονής ο σταθμός βάσης έχει απενεργοποιήσει μερικά από τα στοιχεία του, εξοικονομώντας ενέργεια όταν το επιτρέπει η κίνηση του δικτύου. Κατά αυτόν τον τρόπο η ενεργειακή κατανάλωση ακολουθεί το δυναμικό χαρακτήρα της κίνησης δεδομένων κατά τη διάρκεια της ημέρας: ο σταθμός είναι ενεργός όταν η κίνηση είναι υψηλή, και περιέρχεται σε κατάσταση αναμονής όταν η κίνηση μειώνεται και μπορεί να ικανοποιηθεί από γειτονικούς σταθμούς.

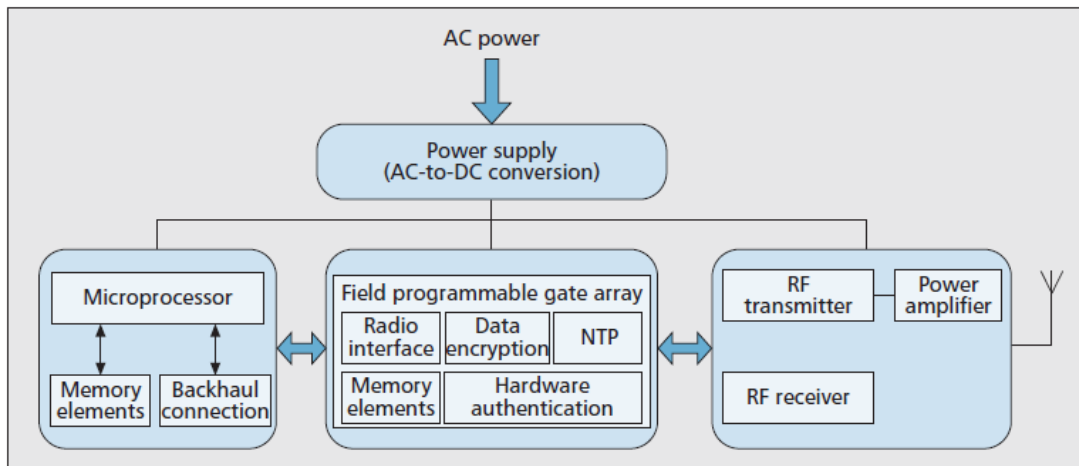
Η κατάσταση αναμονής μπορεί να εφαρμοστεί και στα femtocells, με τις κατάλληλες προσαρμογές. Καταρχήν μια σημαντική διαφορά με τα macrocells είναι πως οι διαδικασίες ελέγχου της κατάστασης αναμονής πρέπει να είναι κατανεμημένες και όχι κεντροκοιμημένες. Δεύτερον, αντίθετα με τα macrocells που προσαρμόζονται στο προφίλ της κίνησης της ημέρας σε μεγάλα χρονικά διαστήματα (π.χ. μέρα-νύχτα), τα femtocells λόγω του μικρού αριθμού χρηστών που εξυπηρετούν και της ευκολότερης ενεργοποίησης-απενεργοποίησής τους, μπορούν να μεταβαίνουν από μια κατάσταση στην άλλη πολλές φορές μέσα σε μια ώρα, όποτε για παράδειγμα διαπιστώνουν προσπάθεια σύνδεσης του χρήστη τους. Τρίτον, ο μηχανισμός της κατάστασης αναμονής διαφοροποιείται ανάλογα με τον μηχανισμό πρόσβασης που λειτουργούν τα femtocells. Για παράδειγμα, στην κλειστή πρόσβαση, πρέπει να γίνει εξακρίβωση του αν ο χρήστης που προσπαθεί να συνδεθεί έχει δικαίωμα πρόσβασης πριν το femtocell ενεργοποιηθεί.

Πέραν της πολιτικής που θα ακολουθηθεί για το πότε ενεργοποιείται-απενεργοποιείται ένα femtocell, δημιουργούνται δύο ερωτήματα: ποια μέρη του femtocell απενεργοποιούνται και σε ποιο επίπεδο θα είναι ο έλεγχος του μηχανισμού αυτού. Το πρώτο ερώτημα είναι σημαντικό γιατί καθορίζει το βαθμό εξοικονόμησης ενέργειας που προσφέρει η κατάσταση αναμονής. Όσα περισσότερα μέρη κλείνουν, τόσο αυξάνουν τα ενεργειακά κέρδη.

Τα κύρια μέρη hardware σε ένα femtocell είναι: ο μικροεπεξεργαστής, που υλοποιεί και διαχειρίζεται το προτυποποιημένο πρωτόκολλο και τις σχετικές επεξεργασίες καθώς και διαχειρίζεται τη σύνδεση με το κυρίως δίκτυο μέσω της backhaul σύνδεσης.

Μνήμες συνδεδεμένες με τον μικροεπεξεργαστή, που εξυπηρετούν λειτουργίες δεδομένων και την εκκίνηση του συστήματος. Μια πύλη field-programmable gate array (FPGA), και άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα για την υλοποίηση λειτουργιών όπως κρυπτογράφηση, αυθεντικοποίηση και συγχρονισμό. Τα στοιχεία RF για την μετάδοση και λήψη δεδομένων. Ο ενισχυτής για τη δημιουργία ισχυρού σήματος που θα περάσει στην κεραία μετάδοσης. Όσο αφορά τον έλεγχο του μηχανισμού, μπορούμε να ορίσουμε τρεις περιπτώσεις: ο έλεγχος γίνεται από το δίκτυο, από το ίδιο το femtocell ή από τους χρήστες.

Στο κεφάλαιο 7 περιγράφουμε αναλυτικά τις δύο προσεγγίσεις υλοποίησης της κατάστασης που υιοθετούμε και περιγράφουμε αναλυτικά το μοντέλο ενεργειακής εξοικονόμησης που χρησιμοποιούμε. Στον αλγόριθμο που προτείνουμε στο κεφάλαιο 9, εκμεταλλευόμαστε την κατάσταση αναμονής ορίζοντας πολιτικές χρήσης της, σε υβριδικής πρόσβασης femtocells επιδιώκοντας ενεργειακά κέρδη και αύξηση στη συνολική χωρητικότητα.



Εικόνα 28. Μέρη υλικού ενός τυπικού femtocell

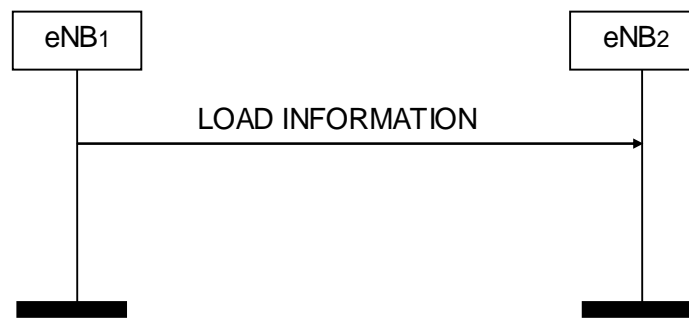
4.4. Πρωτόκολλο Επικοινωνίας X2

Όπως θα φανεί σε επόμενα κεφάλαια, οι μηχανισμοί τους οποίους προτείνουμε βασίζονται στο συντονισμό μεταξύ των femtocells, απαιτώντας σηματοδότηση μεταξύ τους. Αυτό είναι λογικό αν σκεφτούμε πως το femto στρώμα θα υιοθετήσει στρατηγικές που χρησιμοποιούνται από το macro στρώμα για συντονισμό μεταξύ των σταθμών του με στόχο τη μείωση των παρεμβολών και την κατανομή φόρτου. Δεν κάνει εντύπωση λοιπόν ότι το LTE-A περιέλαβε στις προδιαγραφές του την υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας μεταξύ femtocells μέσω του X2 πρωτοκόλλου [52], καθιστώντας εφικτό το συντονισμό τους.

Το X2 πρωτόκολλο περιλαμβάνει μια σειρά από διαδικασίες που επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφορίας ανάμεσα στους σταθμούς σχετικά με την κίνηση, τους πόρους που χρησιμοποιούν, τις παρεμβολές που υφίστανται, πληροφορίες για μεταπομπές, scheduling κλπ [53]. Κατά τις διαδικασίες αυτές οι σταθμοί ανταλλάσσουν μηνύματα που περιέχουν Information Elements, δηλαδή κομμάτια πληροφορίας που θέλουν να στείλουν.

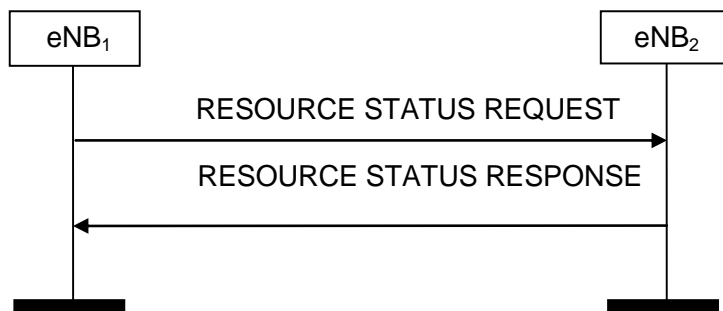
Κατά την αποστολή μηνύματος μπορεί να υπάρχει απάντηση ή όχι, ενώ ο δέκτης του μηνύματος μπορεί να λάβει υπόψη του τα μηνύματα αλλά μπορεί και να τα αγνοήσει (π.χ. αν δεν υποστηρίζει κατάλληλες λειτουργίες ή αν δε θέλει). Οι δύο διαδικασίες που αξίζει να αναφέρουμε καθώς σχετίζονται με την παρούσα διατριβή είναι η Load Indication και η Resource Status Reporting διαδικασία.

Load Indication διαδικασία. Ο σκοπός της είναι να μεταφέρει πληροφορία φόρτου και παρεμβολών μεταξύ γειτονικών σταθμών μέσω μηνύματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 29. Στο μήνυμα LOAD INFORMATION μπορεί να περιλαμβάνονται IEs, όπως UL Interference Overload Indication IE, που δείχνει τα επίπεδα παρεμβολής που δέχεται ο σταθμός σε κάθε resource block., ή το UL High Interference Indication IE που δείχνει ότι ο αποστολέας δέχεται μεγάλη παρεμβολή. Βάσει του πρωτοκόλλου ο σταθμός-δέκτης μπορεί να συνηπολογίσει τα μηνύματα αυτά στις παραμέτρους μετάδοσής του αλλά μπορεί και να αποφασίσει να τα αγνοήσει. Άλλα IEs που μπορεί να περιέχει το LOAD INFORMATION και αξίζει να σημειώσουμε είναι το μοτίβο σε ABS (ABS pattern info IE) που χρησιμοποιεί ώστε οι γείτονες να προσαρμόσουν κατάλληλα το scheduling και το CoMP Information IE που περιέχει πληροφορίες για την εφαρμογή CoMP μεταξύ των κελιών.



Εικόνα 29. Ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ eNBs μέσω X2 κατά την Load Indication διαδικασία

Resource Status Reporting Initiation διαδικασία. Η διαδικασία αυτή ενεργοποιεί την μεταφορά πληροφορίας σχετικά με τους πόρους που χρησιμοποιεί κάθε κελί στους γείτονές του. Περιέχει IEs που υποδεικνύουν τον τύπο της πληροφορίας που ζητά ένα κελί από έναν γειτονικό σταθμό, όπως Radio Resource Status IE, Composite Available Capacity Group IE, RSRP Measurement Report List IE, CSI Report IE κλπ.



Εικόνα 30. Ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ eNBs μέσω X2 κατά την Resource Status Reporting Initiation διαδικασία

Ο δέκτης του μηνύματος απαντά αν επιθυμεί εκκινώντας την Resource Status Reporting διαδικασία. Ο σταθμός απαντά στα αιτούμενα αιτήματα μέσα από το RESOURCE STATUS UPDATE μήνυμα που περιέχει τις αντίστοιχες μετρήσεις.

4.5. Άλλα τεχνικά ζητήματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια αυτού του βιβλίου, αναφέρθηκαν κατά καιρούς διάφορα τεχνικά θέματα που σχετίζονται με femtocells, όπως για παράδειγμα το πρόβλημα των παρεμβολών, η αυτό-οργάνωση κλπ. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλα τεχνικά ζητήματα που αφορούν την ανάπτυξη των femtocells και για τα οποία πρέπει να βρεθούν λύσεις. Τα θέματα που παρουσιάζονται παρακάτω περιλαμβάνουν τόσο τεχνικές όσο και εμπορικές προκλήσεις:

- Χαμηλού κόστος ακριβής συγχρονισμός. Ο συγχρονισμός είναι αναγκαίος για να μειωθούν οι παρεμβολές. Αν ο χρονισμός δεν είναι αρκετά ακριβής, θα προκύψουν λάθη κατά τη δημιουργία του πλαισίου στο πεδίο του φάσματος, και έτσι θα μπορούσε να παρατηρηθεί μετατόπιση της συχνότητας των υπο-φορέων, καθιστώντας αδύνατο τις μεταπομπές από κυψέλη σε κυψέλη. Επιπλέον, καλή ακρίβεια χρονισμού απαιτείται για την αντιμετώπιση φαινομένων Doppler λόγω της κινητικότητας των χρηστών. Ως εκ τούτου, μια μεγάλη πρόκληση για τα femtocells, και προϋπόθεση για την επιτυχία τους, είναι η αντιμετώπιση των απαιτήσεων χρονισμού. Πολλές λύσεις έχουν προταθεί για το συγχρονισμό όπως διαμέσου του Internet, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο συγχρονισμός με μικρό κόστος.

- Ασφάλεια και σωστή ταυτοποίηση. Οι περισσότεροι υποψήφιοι πελάτες femtocell είναι ιδιαίτερα ανήσυχοι για την προστασία της ιδιωτικότητάς τους. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι η χρήση κλειδιών κρυπτογράφησης Wired Equivalent Privacy (WEP) για το Wi-Fi είναι εύκολο να σπάσει. Στα femtocells, ειδικά εάν χρησιμοποιούνται με δημόσια πρόσβαση, οποιοδήποτε κινητό χρήστη έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με αυτά, καθιστώντας σημαντική την προστασία των ιδιωτικών πληροφοριών του συνδρομητή του femtocell, και την αποφυγή παράνομης χρήσης του femtocell από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες. Στα δίκτυα femtocell, υπάρχουν τρεις κύριες ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια:

α) Η διαθεσιμότητα του δικτύου και της παροχής υπηρεσιών: εφόσον η σύνδεση μεταξύ του femtocell και του δικτύου κορμού βασίζεται σε IP, υπάρχει κίνδυνος επίθεσης Denial of Service (DoS). Αυτό συμβαίνει όταν για παράδειγμα, ένας κακόβουλος χρήστης συνδέεται με το σύνδεσμο μεταξύ του femtocell και του CN, επιβαρύνοντας την ικανότητα επεξεργασίας του δικτύου, και εμποδίζοντας τη νόμιμη σύνδεση των συνδρομητών με το femtocell τους. Μερικά άλλα παραδείγματα θα μπορούσαν να είναι η υποβάθμιση της ποιότητας του δικτύου με την αποστολή μη εξουσιοδοτημένων μηνυμάτων στο CN. Τέτοιες επιθέσεις πρέπει να εμποδίζονται, ώστε να εξασφαλιστεί η διαθεσιμότητα του δικτύου προς συνδρομητές.

β) Η πρόληψη της απάτης και της κλοπής των υπηρεσιών: ορισμένες από τις επιθέσεις συμβαίνουν όταν συνδέονται μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες σε femtocell και κάνουν παράνομη χρήση των υπηρεσιών του. Για παράδειγμα, σε CSG λειτουργία, είναι

σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι μη-συνδρομητές δε θα έχουν πρόσβαση στο femtocell. Ένα άλλο παράδειγμα θα ήταν ένας χρήστης που ταυτοποιείται ως άλλος συνδρομητής femtocell ώστε να αποφύγει τη χρέωση. Σε αυτήν την περίπτωση, όλες οι κλήσεις θα πρέπει να καταβληθούν λανθασμένα από τον νόμιμο συνδρομητή του femtocell. Για την ασφαλή ταυτοποίηση, δύο αποδοτικές μέθοδοι έχουν προταθεί, έκαστη με διαφορετικά πλεονεκτήματα [54].

γ) Ιδιωτικότητα και εμπιστευτικότητα: εφόσον στα femtocells, τα δεδομένα του χρήστη μεταδίδονται πάνω από το Internet, υπόκεινται στα ίδια ζητήματα ασφάλειας των IP επικοινωνιών. Επιπλέον, τα femtocells αναμένεται να συνδεθούν στο δίκτυο του σπιτιού και να λειτουργήσουν ως πύλες σύνδεσης με διαφορετικές συσκευές. Ως εκ τούτου, καθίσταται εξαιρετικά σημαντική η προστασία όλων των δεδομένων που είναι προσβάσιμα από το femtocell.

- Η γνώση της γεωγραφικής θέσης των femtocell. Μια άλλη σημαντική πρόκληση σε σχέση με τα femtocells είναι η δυνατότητα να εκτιμήσουν τη γεωγραφική θέση τους. Η γνώση είναι αναγκαία για διάφορους λόγους όπως για παράδειγμα υπηρεσίες κλήσεων έκτακτης ανάγκης, το προσεκτικότερο σχεδιασμό του δικτύου και καλύτερο έλεγχο πρόσβασης. Σύμφωνα με έρευνες [55], το 80% των ερωτηθέντων δήλωσε ότι ήταν σημαντικό ή πολύ σημαντικό η θέση της κυψέλης τους να μπορεί να εντοπιστεί σε έναν χάρτη. Όσον αφορά τις λύσεις για την εξασφάλιση της θέσης των femtocells, είναι πιθανό ότι η υλοποίηση και η διαδικασία να πρέπει να ευθυγραμμίζονται με τους κανονισμούς της χώρας όπου τα femtocells έχουν αναπτυχθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Ο κυρίαρχος ρόλος των small cells στα ανερχόμενα ετερογενή δίκτυα των σύγχρονων και μελλοντικών κινητών δικτύων έχουν προσελκύσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον πάνω στη βέλτιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους και την υπέρβαση των προκλήσεων που θέτουν. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής και κυρίως εντός των ζητημάτων που τέθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια σχετικά με τη διαχείριση των πόρων και τις λειτουργικές δυνατότητες των femtocells ως προς τις παραμέτρους μετάδοσης παρουσιάζουμε παρακάτω τα βασικότερα σημεία των ερευνητικών εργασιών που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τόσο βοηθητικά όσο και συγκριτικά για την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Χωρίζουμε την ανασκόπηση σε δύο μέρη ακολουθώντας τη διπλή ερευνητική περιοχή που καλύπτει η προσφορά της εργασίας όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια. Αρχικά επικεντρωνόμαστε στον ερευνητικό περίγυρο του ελέγχου μετάδοσης των femtocells και την κατανομή πόρων με χρήση της υβριδικής πρόσβασης και πως χρησιμοποιείται ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές και να αυξηθεί η απόδοση του δικτύου. Παράλληλα παρουσιάζουμε και εργασίες που επικεντρώνονται σε μηχανισμούς ανταμοιβής προκειμένου να υιοθετηθούν πολιτικές υβριδικής πρόσβασης από τους χρήστες. Στο πεδίο αυτό ανήκει και το πρώτο μέρος της συνεισφοράς της παρούσης εργασίας που αφορά τον κατανομημένο συντονισμό των παραμέτρων μετάδοσης των femtocells μέσω της προτεινόμενης πολιτικής υβριδικής πρόσβασης και ελέγχου ισχύος.

Στο δεύτερο μέρος της ανασκόπησης παρουσιάζουμε τις κυριότερες εργασίες που αφορούν την ενεργοποίηση τεχνικών και υιοθέτηση στρατηγικών κατάστασης αναμονής (sleep mode). Στις εργασίες αυτές βασιστήκαμε για το δεύτερο μέρος της συνεισφοράς μας που είναι η πρόταση αλγορίθμου που αξιοποιεί την κατάσταση αυτή με στόχο τη βελτίωση στην απόδοση των χρηστών και στην ενεργειακή κατανάλωση του δικτύου.

5.1. Πολιτικές υβριδικής πρόσβασης για δίκτυα femtocells

Στην εργασία που παρουσιάζεται στο [56] οι συγγραφείς προτείνουν έναν αλγόριθμο ελέγχου ισχύος που μπορεί να παρέχει QoS σε χαμηλά SINRs για όλους τους χρήστες αξιοποιώντας διαφοροποιημένες συνθήκες καναλιού ώστε να βελτιωθεί η ρυθμαπόδοση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν μη συνεργατική θεωρία παιγνίων και δημιουργούν επαρκείς συνθήκες για τη σύγκλισή της. Στη συνέχεια, την εφαρμόζουν για ετερογενή δίκτυα macrocell-femtocell που χρησιμοποιούν υβριδική πρόσβαση. Αυτό που προκύπτει είναι ένας κατανομημένος μηχανισμός που βασίζεται στην ανταμοιβή μέσω της προσφερόμενης υπηρεσίας και επιτρέπει στους macro χρήστες να συνδεθούν στους σταθμούς βάσης και των δύο βαθμίδων. Η διαφορά με προηγούμενες εργασίες βασίζεται στη εξέταση σεναρίων όπου υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις απαιτούμενες QoS και στην εκμετάλλευση των διαφορετικών συνθηκών μετάδοσης για κάθε χρήστη. Το σύστημα

που προκύπτει όπως αξιολογείται από τους συγγραφείς καλύπτει το ελάχιστο SINR για όλους τους χρήστες (όποτε είναι αυτό δυνατό) και καλύτερη ρυθμαπόδοση σε χρήστες μέσω της καλύτερης κατανομής καναλιών.

Οι συγγραφείς στο [57] χρησιμοποιούν υβριδική πρόσβαση και προτείνουν η κατανομή πόρων στους macro χρήστες να ορίζεται από ένα όριο διαχωρισμού (κατώφλι) με τρόπο που να αυξάνει την επίδοση ολόκληρου του δικτύου. Για τον ορισμό του κατωφλίου, λαμβάνεται υπόψη το SINR των κοντινών χρηστών και το χρησιμοποιούν ώστε να μειώσουν τις παρεμβολές μεταξύ των δύο στρωμάτων (macro και femto). Για να πετύχει βέβαια κάτι τέτοιο χρειάζεται η συγκέντρωση από τα femtocells της απαραίτητης πληροφορίας από τους κοντινούς χρήστες και τη σωστή διαχείριση της πληροφορίας αυτής. Οι συγγραφείς περιγράφουν λεπτομερώς τις διαδικασίες με τις οποίες μπορούν να υποστηρίξουν τα femtocells αυτές τις λειτουργίες για τη συγκέντρωση της πληροφορίας και τον υπολογισμό των παραμέτρων μετάδοσης (κατωφλίου). Η αξιολόγηση των συγγραφέων έδειξε πως αυξάνεται η μέση ρυθμαπόδοση των χρηστών.

Και η εργασία στο [58] εξετάζει femtocell δίκτυα ικανά να εφαρμόσουν υβριδική λειτουργία πρόσβασης. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής δημιουργείται το προφίλ των femto χρηστών, ώστε να υπολογιστεί η μέγιστη δυνατή απόδοση και η ενέργεια που καταναλώνεται ανά μεταδιδόμενο bit από τους macro χρήστες, σε σχέση με το πόσα κανάλια λειτουργούν σε κατάσταση υβριδικής λειτουργίας. Δηλαδή, ποια κανάλια μπορούν να δοθούν για χρήση σε macro χρήστες. Με βάση το προφίλ των χρηστών, το σύστημα χωρίζει το φάσμα ώστε να προσαρμόζεται στις ανάγκες των femto χρηστών, και ταυτόχρονα το μη διαθέσιμο φάσμα να το διανέμει στους υπόλοιπους χρήστες. Το σύστημα προκειμένου να αποφύγει μηχανισμούς αποζημίωσης, δίνει απόλυτη προτεραιότητα στους femto χρήστες. Δηλαδή, αν κάποιος macro χρήστης είναι συνδεδεμένος σε ένα femtocell και ένας femto χρήστης χρειαστεί τους πόρους αυτούς, τότε η σύνδεση του macro με το femtocell τερματίζει και οι πόροι απελευθερώνονται. Οι συγγραφείς εξετάζουν διαφορετικά προφίλ και μεγέθη πακέτου ώστε να εντοπίσουν τις καταλληλότερες συνθήκες για μειωμένες παρεμβολές ανάλογα με την κάθε περίπτωση.

Και στο [59] κύριο μέλημα είναι η ικανοποίηση των συνδρομητών. Συγκεκριμένα προτείνεται ένας αλγόριθμος δυναμικής κατανομής των πόρων για υβριδικά femtocells με στόχο τη μείωση των παρεμβολών και τη βελτίωση στο QoS. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος διαθέτει ένα σύστημα κατανομής των πόρων που λειτουργεί και κεντρικά και τοπικά. Καταρχήν ο αλγόριθμος επικεντρώνεται στην ικανοποίηση των συνδρομητών και επιτρέπει την αξιοποίηση των υπόλοιπων διαθέσιμων πόρων με βάση τη συμφόρηση στο δίκτυο. Η καλύτερη γνώση στον έλεγχο του συστήματος που γίνεται και κεντρικά και καταναμεμένα, προσφέρει σημαντικό πλεονέκτημα όσο αφορά τις καλύτερες αποφάσεις και συντονισμό του δικτύου. Ως αποτέλεσμα, περισσότεροι macro χρήστες συνδέονται υβριδικά. Παρόλα αυτά ο παράλληλος αυτό έλεγχος έχει και ορισμένα πρακτικά προβλήματα όπως υψηλός φόρτος λόγω αυξημένης σηματοδοσίας και αυξημένων υπολογιστικών αναγκών.

Οι συγγραφείς στο [60] βασίζονται και αυτοί στο OFDMA και αναπτύσσουν ένα μηχανισμό για παροχή QoS σε δίκτυα με υβριδικές μικροκυψέλες. Ο μηχανισμός βασίζεται στην προσαρμογή στην κίνηση του δικτύου και σε μια βελτιστοποιημένη στρατηγική

αποδοχής των χρηστών. Καταρχήν δημιουργούν μια συνάρτηση βελτιστοποίησης του QoS των χρηστών σε σχέση με τις προτεραιότητές τους, των συνθηκών των καναλιών και των χαρακτηριστικών της κίνησης. Προτείνουν μια ευριστική μέθοδο ώστε να λύσουν την κατανομή πόρων και προσαρμόζουν την πολιτική αποδοχής (admission) των χρηστών πάνω στις βελτιστοποιήσεις αυτές. Στην αξιολόγηση των συγγραφέων ο μηχανισμός τους επίτευξε βέλτιστο QoS όσο αφορά τις μετρικές ρυθμαπόδοσης και καθυστέρησης.

Από την άλλη η εργασία που έγινε στο [61] εξετάζει και αυτή υβριδικούς μηχανισμούς πρόσβασης για femtocells σε συστήματα πρόσβασης ορθογώνιων φορέων (OFDMA) αλλά χρησιμοποιεί τυχαίες κατανομές φάσματος και αναλύει την απόδοση των χρηστών στο downlink. Ο στόχος των συγγραφέων δεν είναι ένας νέος μηχανισμός κατανομής πόρων αλλά να παρέχουν μια γεωμετρική ανάλυση των ετερογενών δικτύων macrocell-femtocell, χρησιμοποιώντας στοχαστική γεωμετρία και τεχνικά εργαλεία. Από την ανάλυση προκύπτουν μοντέλα υπολογισμού για τη μέση ρυθμαπόδοση και την κατανομή του SINR των χρηστών για τους femto και macro χρήστες που τελικά συνδέονται στα femtocells, ενώ αποκαλύπτονται και τα trade-offs και συμβιβασμούς που χαρακτηρίζουν τέτοιες τοπολογίες. Η εργασία προσφέρει αρκετά εργαλεία ανάλυσης και βοηθάει στην κατανόηση μεταξύ των παραμέτρων μετάδοσης και της τελικής απόδοσης του δικτύου. Για την επιβεβαίωση του μοντέλου, τα αποτελέσματα εξακριβώθηκαν μέσω εξομοίωσης.

Ως τώρα οι εργασίες που αναφέραμε βασίζονταν στην κατανομή πόρων σε macro χρήστες χωρίς να επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στην απόδοση των συνδρομητών (femto χρήστες). Αυτό το κατάφεραν χρησιμοποιώντας κυρίως μη διαθέσιμο φάσμα, δίνοντας αυστηρή προτεραιότητα στους συνδρομητές, ανακατανέμοντας τα κανάλια ή βασιζόμενοι στα χαρακτηριστικά της κίνησης στο δίκτυο. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι πάντα εφικτό. Κάποιες φορές η αποδοχή ενός μη συνδρομητή και η κατανομή μέρους του φάσματος θα επηρεάσει πτωτικά την απόδοση των συνδρομητών. Επίσης, είναι κατανοητό οι ιδιοκτήτες να μη θέλουν να μοιραστούν τους πόρους με άγνωστους χρήστες. Οι παρακάτω εργασίες στοχεύουν ακριβώς σε αυτό. Στην παροχή κατάλληλων κινήτρων στους femto χρήστες να μοιραστούν τη χρήση του femtocell.

Η εργασία [62] για να αντιμετωπίσει τη διστακτικότητα των συνδρομητών προτείνουν ένα πλαίσιο συναλλαγών βάσει των αποδοχών από τα femtocells, κατά το οποίο οι πάροχοι του macro στρώματος αγοράζουν άδειες χρήσης από τα femtocells και τα femtocells που καλύπτουν την περιοχή που βρίσκεται ο macro χρήστης ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την πώλησή τους στον πάροχο. Φυσικά είναι δύσκολο να γίνει τιμολόγηση επιτόπου γιατί δεν είναι γνωστό πως ακριβώς θα ενεργήσει ο macro χρήστης. Αυτό εμποδίζει τα femtocells να αποφασίσουν για την αποδοχή ή όχι του χρήστη. Για τη λύση του προβλήματος αυτού, οι συγγραφείς προτείνουν ένα προσαρμοζόμενο αλγόριθμο που βασίζεται σε online learning και δίνει τη δυνατότητα εγγυημένης πληρωμής στα femtocells. Η ανάλυση από τους συγγραφείς γίνεται σε συνθήκες συνεχούς και πιθανολογικής ζήτησης για αποδοχή macro χρηστών.

Αντίστοιχα στην [63] για την υπέρβαση της «εγωιστικής» φύσης των femtocells και την παροχή κινήτρων για διαμοίραση των πόρων, οι συγγραφείς κατασκευάζουν ένα

οικονομικό πλαίσιο για τους παρόχους και τους femtocell χρήστες μέσω ανάλυσης θεωρίας παιγνίων και προτείνουν τη συμμετοχή στα κέρδη στα εμπλεκόμενα μέρη. Από τη μία ο πάροχος θα αγοράζει πόρους όποτε αυτό τον συμφέρει οικονομικά, από την άλλη οι ιδιοκτήτες θα παρέχουν πόρους όποτε αυτό είναι προς το συμφέρον τους οικονομικά σε σχέση με τις ανάγκες τους ως προς την υπηρεσία. Στο παίγνιο αυτό, οι femtocell ιδιοκτήτες καθορίζουν το ποσοστό των πόρων που θα μοιραστούν με τους μη συνδρομητές, ενώ ο πάροχος μεγιστοποιεί το όφελός του ελέγχοντας την αναλογία της κατανομής κέρδους στους ιδιοκτήτες femtocells.

Θεωρία παιγνίων χρησιμοποιούν και οι συγγραφείς του [63] ώστε να αποφύγουν την τάση των ιδιοκτητών femtocells προς λειτουργία αποκλειστικής πρόσβασης. Συγκεκριμένα, παρέχουν κίνητρα στους χρήστες να μοιραστούν τους διαθέσιμους πόρους και στη συνέχεια βελτιστοποιούν την κατανομή χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους. Ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της προσφερόμενης ρυθμαπόδοσης του δικτύου στους χρήστες. Οι συγγραφείς συγκρίνουν τα αποτελέσματα με τον Weighted Water Filling (WWF) αλγόριθμο με θετικά αποτελέσματα.

Η παροχή κινήτρων μέσω αποζημίωσης είναι και στο επίκεντρο του [65], προκειμένου τα femtocells να παρέχουν υπηρεσίες μέσω υβριδικής πρόσβασης σε μη συνδρομητικούς χρήστες που αντιμετωπίζουν μεγάλα προβλήματα παρεμβολών και ως εκ τούτου χαμηλό SINR. Ο στόχος των συγγραφέων είναι να εγγυηθούν την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας μέσω femtocells και στους δύο τύπους χρηστών, femto και macro. Για να το επιτύχουν αυτό, προσαρμόζουν τον χρονοπρογραμματισμό και τον έλεγχο ισχύος στους χρήστες βάσει των αναφορών για τις παραμέτρους του καναλιού από το channel quality indicator (CQI). Βασισμένοι στα στοιχεία αυτά, διαχωρίζουν τον χρονοπρογραμματισμό και τον έλεγχο ισχύος μεταξύ τους αρχικά και σε υποπροβλήματα στη συνέχεια οδηγώντας μέσω τεχνικών μείωσης της πολυπλοκότητας σε γνωστά προβλήματα. Η εφαρμογή των λύσεων βάσει θεωρίας σε αυτά τα προβλήματα αποδεικνύεται μέσω παραμέτρων ότι καταφέρνει να βελτιώσει τη συνολική απόδοση του δικτύου απέναντι στους δύο τύπους χρηστών.

Πλαίσιο ανταμοιβής υιοθετούν και οι συγγραφείς του [65] οι οποίοι εισάγουν τεχνικές θεωρίας συμβολαίου (contract theory) προκειμένου να άρουν τις επιφυλάξεις των ιδιοκτητών femtocells στον διαμοιρασμό πόρων σε μη συνδρομητικούς χρήστες. Συγκεκριμένα ο πάροχος δικτύου στο οποίο ανήκουν οι μη συνδρομητικοί χρήστες ανταμείβει τους εν λόγω ιδιοκτήτες ανάλογα με τη συμβολή τους στη ρυθμαπόδοση των χρηστών αυτών. Οι συγγραφείς αναζητούν τόσο τις ικανές και αναγκαίες συνθήκες για εφικτό «συμβόλαιο» με θετικά αποτελέσματα για τους macro χρήστες, όσο και το βέλτιστο συμβόλαιο. Οι συγγραφείς βρίσκουν ότι η προσέγγιση αυτή ωφελεί σημαντικά τους μη συνδρομητικούς χρήστες.

Η βελτίωση της απόδοσης των μη συνδρομητικών χρηστών είναι και στόχος της δουλειάς στο [67]. Συγκεκριμένα οι συγγραφείς προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν τη μέση ρυθμαπόδοση των χρηστών αυτών μέσα από τη σύνδεσή τους σε femtocells με υβριδική πρόσβαση, βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους αυτών. Συγκεκριμένα, υπολογίζουν το βέλτιστο κλάσμα στην κατανομή πόρων μεταξύ των δύο τύπων χρηστών, αλλά και την

περιοχή κάλυψης στην περίπτωση femtocells ανοιχτής πρόσβασης. Στη συνέχεια, επιχειρούν να επεκτείνουν τα ευρήματα αυτά σε υβριδικής πρόσβασης δίκτυα αφιερώνοντας μέρος πόρων αποκλειστικά σε συνδρομητικούς χρήστες. Δεδομένου ότι ο μηχανισμός ξεκινά βάσει των στόχων ανοιχτής πρόσβασης, οι μη συνδρομητικοί χρήστες απολαμβάνουν μεγάλα οφέλη μέσω της μεταφοράς του φορτίου κίνησης στο στρώμα των femtocells, ενώ οι συνδρομητές διατηρούν επίπεδα σύνδεσης εντός των αναγκών τους.

5.2. Στρατηγικές κατάστασης αναμονής στο femtocell στρώμα

Στην υποενότητα αυτή θα περιγράψουμε εργασίες που ερευνούν τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις που επιφέρουν στρατηγικές βασισμένες σε μερική απενεργοποίηση των σταθμών βάσεων στο femtocell στρώμα.

Στην εργασία του [51] οι συγγραφείς προτείνουν ενεργειακά αποδοτικούς αλγορίθμους για μικροκυψέλες με στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των δικτύων. Οι αλγόριθμοι ελέγχουν την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση μερών των σταθμών βάσεων σε καταστάσεις που δεν απαιτούνται, όπως σε χαμηλή κίνηση. Καθ'αυτό τον τρόπο η κατανάλωση ακολουθεί τις απαιτήσεις κίνησης και προσαρμόζονται σε αυτές. Συγκεκριμένα προτείνουν τρεις διαφορετικές στρατηγικές με την κάθε μία να ελέγχεται από διαφορετικά σημεία του δικτύου. Η μία ελέγχεται από το κεντρικό δίκτυο, η δεύτερη από τα femtocells και στην τρίτη ο μηχανισμός ελέγχεται από τους χρήστες. Κάθε στρατηγική επιτρέπει και διαφορετικό ποσοστό των μερών του femtocell που μπορεί να απενεργοποιηθεί, οδηγώντας σε διαφορετικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας. Βασισμένοι σε κίνηση και δεδομένων και φωνής, οι στρατηγικές επέδειξαν εξοικονόμηση ενέργειας από 10% μέχρι και 60 %.

Στην εργασία που παρουσιάζεται στο [68] οι συγγραφείς εφαρμόζουν τεχνικές στοχαστικής γεωμετρίας για τη μελέτη στρατηγικών κατάστασης αναμονής σε πυκνά δίκτυα femtocell. Χρησιμοποιούν το μοντέλο που προκύπτει προκειμένου να συγκρίνουν δύο μηχανισμούς σε σχέση με παραδοσιακές τεχνικές sleep λειτουργίας. Το αποτέλεσμα είναι αύξηση στον αριθμό των femtocells που απενεργοποιούνται μερικώς άρα και σε αύξηση της συνολικής ενεργειακής εξοικονόμησης του δικτύου. Παράλληλα, οι συγγραφείς βρήκαν πως σημαντική επίπτωση στην ενεργειακή απόδοση έχει και η προσεκτική επιλογή των σταθμών που θα ενεργοποιηθούν σε σχέση με τυχαία επιλογή.

Στο [69] προτείνεται μια νέα προσέγγιση για συστοιχίες (cluster) femtocells με στόχο την ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Συγκεκριμένα προτείνεται ένας δυναμικός μηχανισμός που ομαδοποιεί τα femtocells ώστε να συντονιστούν μεταξύ τους και με τεχνικές εξισορρόπησης φορτίου να βελτιώσουν την απόδοση των χρηστών τους. Στην προτεινόμενη προσέγγιση, οι συστοιχίες χρησιμοποιούν έναν ομορτοποιητικό μηχανισμό ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των σταθμών βάσης με στόχο την ισορροπία μεταξύ της καθυστέρησης και της κατανάλωσης ενέργειας. Ο μηχανισμός μεταξύ των συστοιχιών επηρεάζει την απόδοση τους άρα και την επιλογή για την επιλογή των σταθμών για απενεργοποίηση. Λόγω της έλλειψης επικοινωνίας μεταξύ των συστοιχιών, αυτές πρέπει

να ανταγωνίζονται μεταξύ τους για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Αυτός ο ανταγωνισμός εκφράζεται ως μη συνεργατικό παίγνιο μεταξύ των συστοιχιών που επιδιώκουν να ελαχιστοποιήσουν μια συνάρτηση κόστους η οποία καταγράφει τη σχέση μεταξύ κατανάλωσης ενέργειας και φορτίου. Για την επίλυση αυτού του παιγνίου, προτείνεται ένα κατανεμημένος αλγόριθμος μάθησης όπου οι συστοιχίες επιλέγουν αυτόνομα τις βέλτιστες στρατηγικές μετάδοσης που θα ακολουθήσουν. Στην αξιολόγηση του μηχανισμού προέκυψε ότι η προτεινόμενη προσέγγιση αποδίδει σημαντικά οφέλη απόδοσης όσον αφορά τη μείωση των ενεργειακών δαπανών της τάξης του 40% και μείωση του φορτίου έως και 23% σε σύγκριση με συμβατικές προσεγγίσεις.

Στο [70] προτείνεται ένας μηχανισμός που χρησιμοποιεί λειτουργία μερικής απενεργοποίησης για την καταστολή των παρεμβολών σε δίκτυα femtocell. Σε αυτό το μηχανισμό κύριο ρόλο παίζουν οι macro χρήστες και η απόδοσή τους. Η επιλογή ενεργοποίησης ή όχι των femtocells εξαρτάται από τις παρεμβολές που αυτά έχουν σε αυτή την κατηγορία χρηστών. Για αυτό και τα αποτελέσματα του μηχανισμού έδειξαν ότι βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα σήματος για macro χρήστες αλλά και τον αριθμό των μπλοκαρισμένων αυτών χρηστών έως και 60% σε σύγκριση με σενάρια χωρίς τη χρήση sleep λειτουργίας. Επιπλέον, λόγω της απενεργοποίησης ο αλγόριθμος παρουσιάζει και εξοικονόμηση στην κατανάλωση ενέργειας της τάξης του 55% σε σχέση με συμβατικές προσεγγίσεις.

Με απώτερο στόχο τις παρεμβολές είναι και ο μηχανισμός κατάστασης αναμονής σε femtocells και στο [71]. Ο προτεινόμενος μηχανισμός παρέχει ένα συστηματικό τρόπο για την σωστότερη επιλογή των υποψήφιων για κατάσταση αναμονής σταθμών, ως προς την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων. Η επιλογή γίνεται μέσω συγκεκριμένων ελέγχων που δεν απαιτούν εξαντλητική έρευνα. Οι εξομοιώσεις του παραπάνω μηχανισμού έδειξαν ότι με σωστή επιλογή του σταθμού βάσης για απενεργοποίηση, η απόδοση του δικτύου μπορεί να ξεπεράσει την απόδοση εάν όλα τα femtocells ήταν ενεργοποιημένα και μπορεί να προσεγγίσει τη βέλτιστη απόδοση χωρίς μεγάλη αύξηση της πολυπλοκότητας.

Τέλος, στο [72] αναζητούνται μηχανισμοί αδρανοποίησης που στοχεύουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του δικτύου, χωρίς όμως να διακυβεύεται η Ποιότητα της Υπηρεσίας που απολαμβάνουν οι χρήστες. Για να το επιτύχουν αυτό, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν Markov Decision Processes (MDPs) για να εξάγουν τις βέλτιστες ρυθμίσεις βάσει πληροφοριών του δικτύου για την κίνηση και τη θέση των χρηστών. Για την καλύτερη προσαρμογή, ο μηχανισμός αφορά περιπτώσεις που η πληροφορία αυτή μπορεί να είναι ημιτελής ή να φτάσει και με καθυστέρηση, ενώ εξερευνούνται και διαφορετικά μοντέλα κίνησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε το περιβάλλον προσομοίωσης που δημιουργήσαμε για την αξιολόγηση των αλγορίθμων που προτείνουμε στα πλαίσια της διατριβής και τα μοντέλα στα οποία βασίστηκε η υλοποίησή του. Πρώτα περιγράφουμε το μοντέλο ανάλυσης παρεμβολών για την εκτίμηση της απόδοσης των χρηστών και στη συνέχεια το μοντέλο κατάστασης αναμονής των femtocells για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης του femto στρώματος. Τέλος, παρουσιάζουμε τη διασύνδεση με το χρήστη του τελικού εργαλείου. Ο εξομοιωτής είναι διαθέσιμος στο [73] για ελεύθερη χρήση και τροποποίηση.

6.1. Μοντέλο ανάλυσης παρεμβολών

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει την ανάλυση που υπολογίζει τις παρεμβολές και την απόδοση σε κάθε σημείο του LTE-A ετερογενούς δικτύου. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη μοντέλα απωλειών διαδρομής και διείσδυσης προκειμένου να εκτιμηθεί το SINR και παρεμβολές από τις γειτονικές κυψέλες.

Θεωρούμε καταρχήν, macrocells ακτίνας 250 m, στα οποία γίνεται εναπόθεση αριθμού femtocells. Για τους παρακάτω υπολογισμούς, λαμβάνουμε υπόψη πως κάθε κυψέλη δέχεται παρεμβολές από όλα τα γειτονικά macrocells. Επιπλέον, υιοθετούμε μοντέλα που αντικατοπτρίζουν σενάρια εφαρμόσιμα σε αστικό περιβάλλον, για την επιλογή των κατάλληλων μοντέλων, όπως για τον υπολογισμό των απωλειών.

Πιο συγκεκριμένα, η εκτίμηση των παρεμβολών σε ένα σήμα από ενδεχόμενους κοντινούς σταθμούς βάσης, γίνεται μετρώντας την επίδραση που έχουν στο SINR ενός χρήστη. Πριν τον υπολογισμό του SINR, πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε τις απώλειες διαδρομής μεταξύ του σταθμού βάσης του macrocell και του UE, αλλά και μεταξύ του femto σταθμού βάσης και των χρηστών. Για την πρώτη περίπτωση και για έναν macro εξωτερικό χρήστη σε αστική περιοχή, οι απώλειες μπορεί να προσδιοριστούν ως [74]:

$$PL(db) = 15,3 + 37,6 \log_{10} R \quad (7.1)$$

Ενώ για την περίπτωση ενός εσωτερικού macro UE, αντίστοιχα δίνεται από:

$$PL(db) = 15,3 + 37,6 \log_{10} R + L_{ow} \quad (7.2)$$

Όπου το R είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη σε μέτρα και L_{ow} είναι οι απώλειες διείσδυσης ενός εξωτερικού τοίχου. Τιμές 7 και 15dB για εσωτερικό και εξωτερικό τοίχο θεωρούνται ικανοποιητικές προσεγγίσεις [75]. Οι απώλειες μεταξύ ενός femto BS και ενός UE υπολογίζονται από την ακόλουθη εξίσωση [74]:

$$PL(db) = 38,46 + 20 \log_{10} R \quad (7.3)$$

Όπου R είναι η απόσταση μεταξύ του femto BS και του χρήστη. Τέλος, θεωρούμε την περίπτωση ενός εξωτερικού femto χρήστη συνδεδεμένου σε ένα εσωτερικά τοποθετημένο femtocell. Για το σενάριο αυτό, πρέπει να λάβουμε υπόψη και τις απώλειες λόγω του εξωτερικού ενδιάμεσου τοιχώματος [74]:

$$PL(db) = 38,46 + 20 \log_{10} R + L_{ow} \quad (7.4)$$

Για την εκτίμηση του SINR ενός macro χρήστη m στον υπο-φορέα k , όταν ο χρήστης δέχεται παρεμβολές από γειτονικά macrocells και κοντινά femtocells, ακολουθούμε την ανάλυση όπως εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση [75]:

$$SINR_{m,k} = \frac{P_{M,k} G_{m,M,k}}{N_0 \Delta_f + \sum_{M'} P_{M',k} G_{m,M',k} + \sum_F P_{F,k} G_{m,F,k}} \quad (7.5)$$

Όπου $P_{M,k}$ και $P_{M',k}$ είναι η ισχύς μετάδοσης του macrocell M που εξυπηρετεί τον χρήστη, και του γειτονικού macrocell M' αντίστοιχα, στον υπο-φορέα k . Το $G_{m,M,k}$ δηλώνει το κέρδος καναλιού μεταξύ του macro χρήστη και του macrocell M στον υπο-φορέα k . Το αντίστοιχο κέρδος από τα γειτονικά macrocells εκφράζονται με $G_{m,M',k}$. Παρομοίως, $P_{F,k}$ είναι η ισχύς μετάδοσης του κοντινού femtocell F στον υπο-φορέα k , και $G_{m,F,k}$ είναι το κέρδος μεταξύ του macro UE και του femtocell. Το N_0 αντιπροσωπεύει τον λευκό θόρυβο και το Δ_f την απόσταση μεταξύ των υπο-φορέων. Στην περίπτωση ενός femto χρήστη f στον υπο-φορέα k που υφίσταται παρεμβολές από όλα τα macrocells και τα γειτονικά femtocells, το SINR του μπορεί να βρεθεί αντιστοίχως με τη βοήθεια της:

$$SINR_{f,k} = \frac{P_{f,k} G_{f,F,k}}{N_0 \Delta_f + \sum_{F'} P_{F',k} G_{f,F',k} + \sum_M P_{M,k} G_{f,M,k}} \quad (7.6)$$

Για τον υπολογισμό του κέρδους καναλιού G , το οποίο κυρίως καθορίζεται από τις απώλειες, που είναι όπως είδαμε διαφορετικές για εξωτερικά και εσωτερικά σενάρια, μπορούμε να βασιστούμε στην:

$$G = 10^{-PL/10} \quad (7.7)$$

Έχοντας υπολογίσει το SINR, μπορούμε να εκτιμήσουμε τον συνεπακόλουθο ρυθμό μετάδοσης των χρηστών. Καταρχήν, η χωρητικότητα ενός χρήστη macrocell m σε έναν υπο-φορέα k μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη εξίσωση [76]:

$$C_{m,k} = \Delta f \cdot \log_2(1 + aSINR_{m,k}) \quad (7.8)$$

Όπου a είναι σταθερά για το ζητούμενο Bit Error Rate (BER), και ορίζεται ως $a = -1.5/\ln(5BER)$. Για την ανάλυσή μας το BER τίθεται ίσο με 10^{-6} .

Τέλος, έχοντας υπολογίσει το $C_{m,k}$ ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης του macrocell M μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της [77]:

$$T_M = \sum_m \sum_k \beta_{m,k} C_{m,k} \quad (7.9)$$

όπου το $\beta_{m,k}$ αντιπροσωπεύει την ανάθεση του υπο-φορέα σε macro χρήστες. Όταν $\beta_{m,k} = 1$ σημαίνει ότι ο υποφορέας k ανατέθηκε στον χρήστη m . Διαφορετικά, $\beta_{m,k} = 0$. Όπως έχουμε ήδη πει, κάθε στιγμή στο macrocell, ένας υπο-φορέας ανατίθεται μόνο σε έναν macro χρήστη, προκειμένου να διατηρηθεί η ορθογωνιότητα. Η εξίσωση για το femtocell είναι ακριβώς ανάλογη.

6.2. Μοντέλο sleep λειτουργίας femtocell

Το μοντέλο μερικής λειτουργίας που χρησιμοποιούμε για τις ανάγκες της διατριβής βασίζεται στα [51] και [78]. Βάσει του μοντέλου αυτού κατά τη διάρκεια της λειτουργίας sleep, τα περισσότερα συστατικά του femtocell απενεργοποιούνται, και με αυτό τον τρόπο συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Κάποια μέρη του femtocell πρέπει να μένουν ενεργά, όπως αυτά που χειρίζονται τη σύνδεση με το δίκτυο κορμού και όσα χρειάζονται για την ανίχνευση μετάδοσης κοντινών συνδρομητών. Σε αυτήν την περίπτωση όταν υπάρχει σχετική ανίχνευση έχουμε και μετάβαση του femtocell σε πλήρη λειτουργία.

Το μέρος της συσκευής που είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση ονομάζεται sniffer. Η λειτουργία του είναι να ανιχνεύει αύξηση στην λαμβανόμενη ισχύ στις ζώνες που χρησιμοποιούνται για το uplink. Αυτή η αύξηση ερμηνεύεται από το sniffer σαν μια προσπάθεια μετάδοσης από το χρήστη στο macrocell. Ο ορισμός του κατωφλίου για το sniffer, δηλαδή σε ποια τιμή θα οριστεί η λαμβανόμενη ισχύς ώστε να μπορεί να ξυπνάει το femtocell καθορίζεται από την επιθυμητή ακτίνα κάλυψης του femtocell. Φυσικά κάτι τέτοιο θα μπορεί να γίνει μόνο αν η πηγή αυτής της ισχύς είναι χρήστης με δικαίωμα πρόσβασης στο femtocell. Αν τηρούνται οι παραπάνω προδιαγραφές τότε ο sniffer ξυπνάει τα υπόλοιπα μέρη του femtocell, αυτό μπαίνει σε πλήρη λειτουργία και ξεκινά η διαδικασία μεταπομπής από το macrocell σε αυτό.

Ένα μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι η ανάγκη macrocell κάλυψης στην περιοχή αυτή, καθώς ο sniffer ανιχνεύει τη σύνδεση μεταξύ χρήστη και macrocell. Καθώς σε αυτή τη διατριβή επικεντρωθήκαμε σε πυκνές συστοιχίες femtocell οι οποίες εμφανίζονται σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, αυτός ο περιορισμός δεν επηρεάζει τη διατριβή αυτή. Ένα δεύτερο μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής, είναι ότι η απόφαση ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης πέφτει στο σταθμό βάσης. Αυτό όπως είπαμε απαιτεί τη διατήρηση του sniffer σε ενεργή κατάσταση όταν το υπόλοιπο femtocell «κοιμάται». Σε περιπτώσεις που η διαδικασία ελέγχεται από το κεντρικό δίκτυο ή τη συσκευή του χρήστη, αυτό δε συμβαίνει. Ως εκ τούτου, η προσέγγιση αυτή δεν φτάνει την ενεργειακή εξοικονόμηση των άλλων προσεγγίσεων λόγω της κατανάλωσης του sniffer.

Τρίτο μειονέκτημα είναι η πρόσθετη σηματοδότηση εξαιτίας της sleep λειτουργίας και της διαδικασίας μεταπομπής. Παρόλα αυτά, η μειωμένη λειτουργία λόγω sleep mode, έχει αποτέλεσμα τη συνολική μείωση της σηματοδότησης ακόμα και αν συνυπολογιστούν οι παραπάνω παρενέργειες [78].

Με βάση τα παραπάνω, η προσέγγιση που περιγράφηκε και την οποία ακολουθούμε σε αυτή τη διατριβή επιτρέπει αρκετά από τα μέρη του femtocell να απενεργοποιηθούν. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τα μέρη αυτά καθώς και την ενεργειακή εξοικονόμηση από την απενεργοποίησή τους. Τα μέρη αυτά περιλαμβάνουν μέρη της μνήμης του μικροεπεξεργαστή και του field programmable gate array (FPGA), τον radio frequency (RF) πομπό και δέκτη, και τον ενισχυτή. Η κατανάλωση του sniffer εκτιμάται στα 0.3W. Βάσει των παραπάνω, εύκολα προκύπτει ο υπολογισμός της ενεργειακής εξοικονόμησης:

$$P_{savings} = P_{micro} + P_{FPGA} + P_{receiver} + P_{transmitter} + P_{amplifier} - P_{sniffer} = 4.2W \quad (7.10)$$

Το παραπάνω μεταφράζεται σε εξοικονόμηση της τάξεως του 40%.

Πίνακας 5. Κατανάλωση ενέργειας των μερών του femtocell. Με αστερίσκο τα μέρη που απενεργοποιούνται

Μέρος υλικού	Ενεργειακή κατανάλωση (Watts)
Microprocessor-associated memory	1.7 0.5*
FPGA-associated memory	2.0 0.5*
Other circuitry	2.0
RF transmitter	1.0*
RF receiver	0.5*
RF power amplifier	2.0*

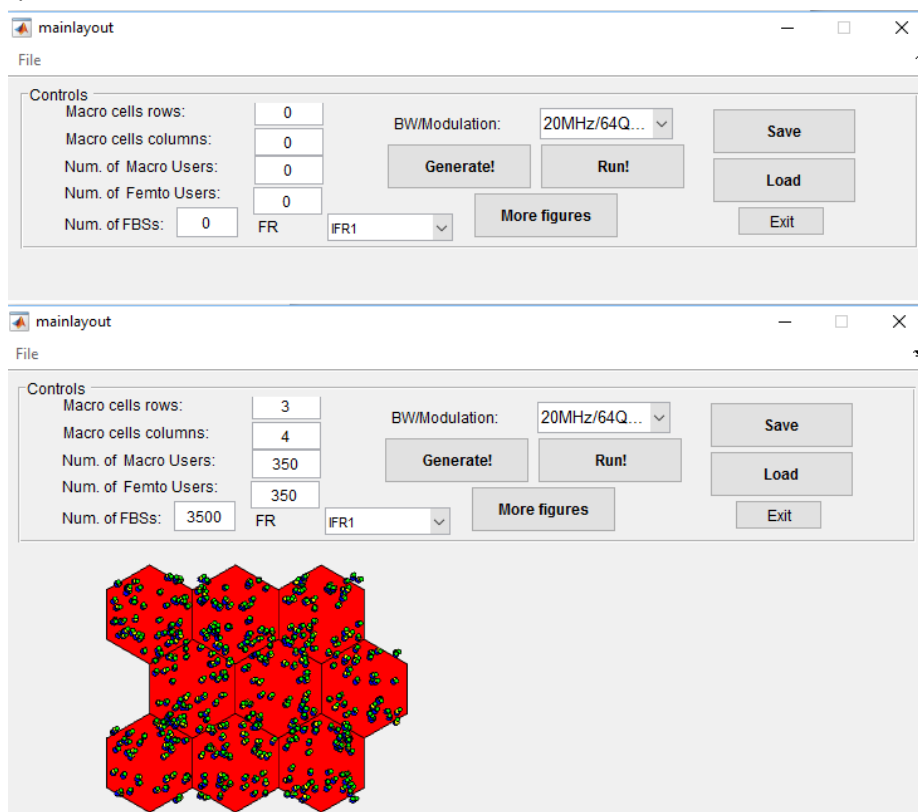
Η δεύτερη προσέγγιση με την οποία θα εξετάσουμε την εξοικονόμηση ενέργειας των αλγορίθμων που προτείνουμε βασίζεται στο κύριο δίκτυο. Αυτό αποφασίζει αν ένα femtocell μπορεί να απενεργοποιηθεί ή όχι με το να αναγνωρίζει συνδέσεις μεταξύ χρηστών και macrocell, και μέσα από τη μονάδα MME που χρησιμοποιείται στο LTE, να ελέγχει αν υπάρχει κοντινό femtocell στο οποίο ο χρήστης έχει δικαίωμα πρόσβασης. Αν υπάρχει, τότε στέλνει σήμα στο femtocell να ξυπνήσει. Μετατίθοντας τον έλεγχο στο κυρίως δίκτυο, αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα πως περισσότερα μέρη του femtocell απενεργοποιούνται εκτός του μικροεπεξεργαστή και των κυκλωμάτων του backhaul, αυξάνοντας την εξοικονόμηση στο 70%.

6.3. Εξομοιωτής

Για τις ανάγκες της διατριβής και συγκεκριμένα για την αξιολόγηση των προτεινόμενων αλγορίθμων σχεδιάσαμε εργαλείο στο MATLAB ικανό να εξομοιώνει LTE δίκτυα με εναποθέσεις femtocells. Ο εξομοιωτής χωρίζεται σε δύο μέρη. Τη διασύνδεση με το χρήστη μέσω ενός γραφικού μενού, και τις εσωτερικές διεργασίες ικανές να παράγουν μετρικές βάσει της εισόδου του χρήστη.

Για τη διασύνδεση με το χρήστη, υιοθετήθηκε μια φιλική προς το χρήστη προσέγγιση, σχεδιάζοντας το γραφικό περιβάλλον, με το οποίο ο χρήστης θα επιδρά όπως θα επιδρούσε με οποιαδήποτε εφαρμογή. Ο χρήστης αποκλειστικά εισάγει τις παραμέτρους που θα καθορίσουν το δίκτυο και τα χαρακτηριστικά του μέσα από τη συμπλήρωση πεδίων. Το γραφικό περιβάλλον διασύνδεσης, επιλέχθηκε για διευκόλυνση των εξομοιώσεων λόγω του πολύ μεγάλου αριθμού πειραμάτων.

Στην Εικόνα 31 απεικονίζεται η εναρκτήρια μορφή της διασύνδεσης, στην οποία ο χρήστης εισάγει βασικά στοιχεία του δικτύου, όπως το μέγεθος, τον τύπο διαμόρφωσης κλπ. Μετά την εισαγωγή των παραμέτρων, ο εξομοιωτής δείχνει στο χρήστη την τοπολογία του παραγόμενου δικτύου.



Εικόνα 31. Γραφικό περιβάλλον εξομοιωτή

Όταν ο χρήστης επιλέξει Run, τότε οι εσωτερικές διεργασίες του εξομοιωτή που σχεδιάστηκαν βάσει του μοντέλου ανάλυσης που περιγράφηκαν παραπάνω, αναλαμβάνουν τους υπολογισμούς των παραμέτρων και μετρικών, όπως τις απώλειες σήματος μεταξύ σταθμών και χρηστών, την ισχύ κάθε σταθμού βάσης, το SINR και τη

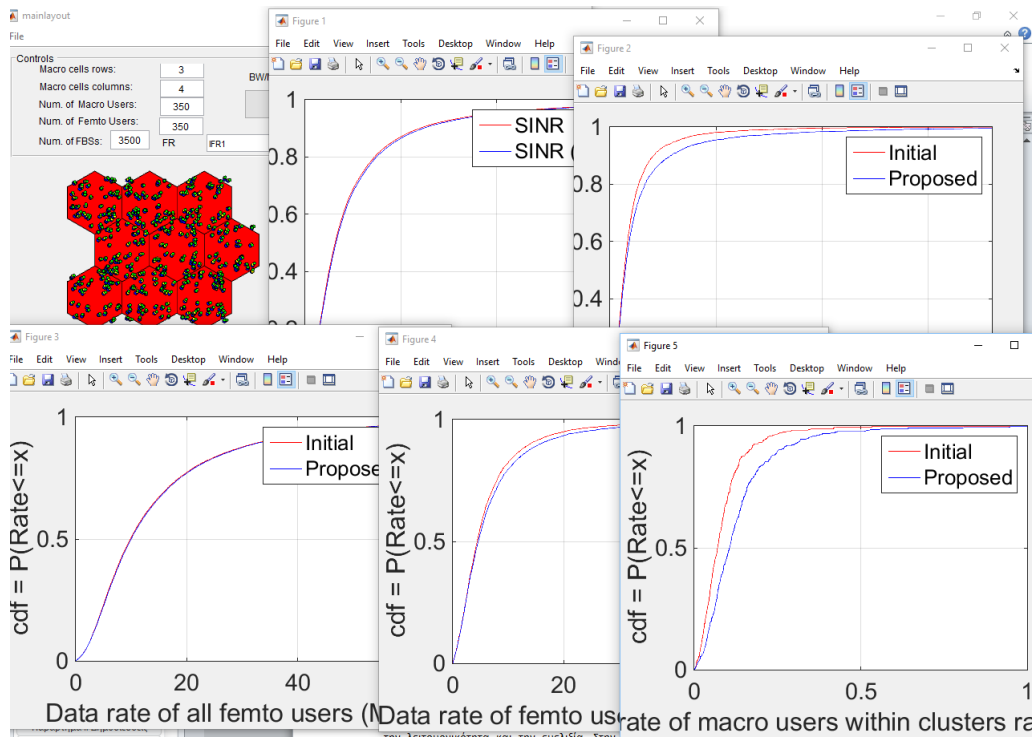
ρυθμαπόδοση κάθε χρήστη, τη συνολική χωρητικότητα κλπ. Ένα δείγμα των αποτελεσμάτων ενός πειράματος του εξομοιωτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 32.

Η παραμετροποίηση ήταν ιδιαίτερα σημαντική προκειμένου να εξεταστούν πλήθος διαφορετικών σεναρίων και να εξαχθούν συνολικά συμπεράσματα. Όπως αποδεικνύεται άλλωστε και από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσης διατριβής, η εξάρτηση των μετρικών από στοιχεία όπως η πυκνότητα εγκατάστασης των femtocells, ο αριθμός των χρηστών κλπ. επηρεάζουν σημαντικά τα εξαγόμενα αποτελέσματα και συμπεράσματα. Ως εκ τούτου, ο εξομοιωτής επέτρεπε την παραμετροποίηση του σεναρίου εξομοίωσης σε μεγάλο βαθμό, είτε μέσω επιλογής τους στο γραφικό μενού διασύνδεσης που φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, είτε μέσω της τροποποίησης ενός αρχείου στον κώδικα που συγκεντρώνει τις πιο εξειδικευμένες παραμέτρους.

Πιο συγκεκριμένα, μέσω της γραφικής διασύνδεσης, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον αριθμό του δικτύου στο οποίοι εναποτίθενται τα femtocells, δηλαδή τον αριθμό των macrocells, το πλήθος των εγκατεστημένων femtocells καθώς και τον αριθμό των συνδρομητικών και μη συνδρομητικών χρηστών. Επιπλέον, ο χρήστης δύναται να επιλέξει το διαθέσιμο εύρος ζώνης και την κωδικοποίηση. Σε αυτά, ο χρήστης δεν έχει απόλυτη ελευθερία, αντίθετα του δίνεται η επιλογή να διαλέξει μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών που επιτρέπουν οι προδιαγραφές του συστήματος. Παραδείγματος χάριν, οι διαθέσιμες επιλογές στο εύρος ζώνης περιορίζονται στις δυνατότητες του LTE-A που επιτρέπει τις παρακάτω επιλογές: 1.4, 3, 5, 10, 15 και 20MHz.

Οι πιο εξειδικευμένοι παράμετροι που δύναται να τροποποιηθούν μέσω του κώδικα, περιλαμβάνουν την ακτίνα των macrocells, την ισχύ που εκπέμπουν οι σταθμοί βάσης τους, η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής των femtocells, ο μέγιστος αριθμός ταυτόχρονα συνδεδεμένων συσκευών σε ένα femtocell, τα επίπεδα θορύβου, το βαθμό απωλειών που επιφέρουν στη διάδοση οι εσωτερικοί και εξωτερικοί τοίχοι κλπ.

Αν και πολλά από τα στοιχεία ήταν κοινά, για κάθε προτεινόμενο αλγόριθμο ο εξομοιωτής χρειάστηκε αλλαγές με κάθε έκδοσή του να προσαρμόζεται στο μηχανισμό και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε αλγορίθμου, όπως η κατηγοριοποίηση χρηστών, οι κανόνες ανταλλαγής τους μεταξύ σταθμών, η ενεργειακή απόδοση κλπ. Η τελευταία έκδοση του εξομοιωτή είναι διαθέσιμη στο [73] για ελεύθερη χρήση και τροποποίηση.



Εικόνα 32. Παράδειγμα παραγόμενων αποτελεσμάτων από τον εξομοιωτή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε το πρώτο μέρος της κύριας συνεισφοράς της διατριβής μας. Θα περιγράψουμε αναλυτικά τους προτεινόμενους αλγόριθμους που βασίζονται στην καλύτερη διαχείριση πόρων σε συστοιχίες femtocells και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της αξιολόγησής τους μέσα από σενάρια εξομίωσης.

7.1. Αλγόριθμος αποζημίωσης και έλεγχος ισχύος

Στα προηγούμενα κεφάλαια συζητήσαμε αναλυτικά τις προκλήσεις που δημιουργούν οι πυκνές συστοιχίες femtocells σε συνδρομητές και μη, λόγω συσσωρευτικών παρεμβολών και πως η υβριδική πρόσβαση μπορεί να παρέχει ένα συμβιβασμό απέναντι στις επιδόσεις των δύο αυτών κατηγοριών χρηστών. Αναφερθήκαμε στη συνέχεια στα ζητήματα που προκύπτουν αν η υβριδική πρόσβαση υιοθετηθεί. Ποια πολιτική ακριβώς θα υιοθετηθεί, πόσους από τους πόρους θα δίνονται σε μη συνδρομητές και πότε, πως θα αποζημιωθούν οι ιδιοκτήτες για τη δημόσια χρήση ιδιωτικών πόρων κλπ. Προσπαθώντας να συγκεράσουμε αυτά τα ζητήματα και να βρούμε μια ισορροπία στα δημιουργούμενα trade offs, αναπτύξαμε ένα μηχανισμό που προσπαθεί να προσεγγίσει τα παραπάνω ζητήματα εξισορροπητικά.

Βασίσαμε τα χαρακτηριστικά του μηχανισμού πάνω στην αρχή των κινητών δικτύων κατά την οποία ένας νέο-εγκαταστημένος σταθμό βάσης πρέπει να έχει κατά το δυνατό ελάχιστη αρνητική επίπτωση σε υπάρχοντες υποδομές και χρήστες. Παρακάτω περιγράφουμε τα χαρακτηριστικά και στόχους του σχεδιασμού του μηχανισμού, από όπου αποκαλύπτονται ταυτόχρονα τα trade offs και οι κυκλικές αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων οντοτήτων.

- Οι συνδρομητές των femtocell πρέπει να λαμβάνουν σημαντικά οφέλη από την αγορά και χρήση τους.
- Η επίδοση των macro χρηστών δεν πρέπει να υφίσταται δραματικές μειώσεις από κοντινά femtocell, αλλά να συγκλίνει σε αυτή που είχε πριν τη εγκατάσταση των femtocells (αν είναι εφικτό) μέσω υβριδικής πρόσβασης.
- Η υβριδική πρόσβαση πρέπει να υλοποιείται με τρόπο που να έχει το μικρότερο αντίκτυπο στην εμπειρία των συνδρομητών.

Πάνω σε αυτά τα χαρακτηριστικά λοιπόν, εκμεταλλευτήκαμε τις πυκνές δομές femtocell που αναμένονται στα μελλοντικά δίκτυα, για την επίτευξη αυτών των στόχων. Επικεντρωθήκαμε στις πυκνές αυτές δομές (συστοιχίες) καθώς υπό τέτοιες συνθήκες τα προαναφερόμενα προβλήματα διογκώνονται: οι μη συνδρομητές υποφέρουν από συσσωρευτικές παρεμβολές, οι συνδρομητές το ίδιο από γειτονικά femtocells κλπ. Την ίδια στιγμή, η συνύπαρξη πολλών σταθμών σε μικρές περιοχές προσφέρει ευκαιρίες συντονισμού μεταξύ τους για καλύτερη διαχείριση της κατάστασης, όπως θα δούμε παρακάτω. Ο μηχανισμός μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: την απόφαση κατωφλίου φάσματος και τον έλεγχο ισχύος επί των μελών της συστοιχίας.

7.1.1. Απόφαση κατωφλίου φάσματος

Καταρχήν καθορίζουμε την πολιτική υβριδικής πρόσβασης που θα ακολουθήσουμε. Το ζητούμενο είναι να βρούμε το σωστό συμβιβασμό ανάμεσα σε απεριόριστη και μηδενική πρόσβαση. Βασισμένοι στην αρχή για ελάχιστη επίπτωση του femtocell που αναφέραμε παραπάνω, επιτρέπουμε στο femtocell να εξυπηρετήσει κοντινούς μη συνδρομητές χρήστες και να αναθέσει σε αυτούς τους απαραίτητους πόρους προκειμένου να μηδενίσουν την επίπτωση αυτή. Δηλαδή, ο μηχανισμός λαμβάνει υπόψη τη ρυθμαπόδοση του χρήστη πριν την εκκίνηση μετάδοσης του τελευταίου (και τις αντίστοιχες παρεμβολές) και προσπαθεί να την αναπαράγει.

Σε αυτό το σημείο τονίζουμε πως το femtocell αποζημιώνει τους χρήστες για τη δική του επίπτωση και όχι για κάθε άλλη πηγή παρεμβολών, όπως π.χ. ένα άλλο κοντινό femtocell. Αυτό μειώνει το βάρος το οποίο αναλογεί στο femtocell. Επιπλέον, η μελέτη επικεντρώνεται σε υπερ-πυκνά αστικά περιβάλλοντα, με τους χρήστες να βρίσκονται κάτω από ισχυρό σήμα femtocell. Καθώς αυτό συμβαίνει στην συντριπτική πλειοψηφία σε εσωτερικούς χώρους, η δυνατότητα του femtocell για πλήρη αναπαραγωγή της επίδοσης αυξάνεται, δεδομένης της απώλειας λόγω διείσδυσης στη σύνδεση του macro χρήστη με το macrocell. Μάλιστα είναι ακριβώς οι συνθήκες αυτές, δηλαδή έλλειψη ισχυρού macrocell σήματος που αυξάνουν την ανάγκη χρήσης femtocell, γεγονός που κάνει το παραπάνω σενάριο εξαιρετικά πιθανό.

Άρα αν THR_{BEF} είναι η ρυθμαπόδοση του μη συνδρομητή πριν την εγκατάσταση του femtocell και THR_{AFT} η επίδοση που θα έχει όταν συνδεθεί σε αυτό, επιθυμούμε $THR_{BEF} = THR_{AFT}$. Εφαρμόζοντας τον στόχο αυτό στο μοντέλο που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 7, παίρνουμε:

$$SP_{C,F} = SP_{C,M} \frac{(\log(1+SINR_{C,M}))}{(\log(1+SINR_{C,F}))} \quad (8.1)$$

Το $SP_{C,F}$ υποδηλώνει το φάσμα που πρέπει να διατεθεί από το femtocell στον χρήστη ή διαφορετικά τον απαιτούμενο αριθμό subcarriers (με τη μορφή των resource block). $SP_{C,M}$ είναι αντίστοιχα οι πόροι φάσματος που χρησιμοποιούσε ο χρήστης κατά τη σύνδεσή του με το macrocell. $SINR_{C,M}$ και $SINR_{C,F}$ είναι το επιτεύξιμο SINR του χρήστη όταν είναι συνδεδεμένος στο macrocell και το femtocell αντίστοιχα (με το πρώτο να μην περιλαμβάνει τις παρεμβολές από το εν λόγω femtocell).

Ήδη πρέπει να είναι εμφανής η δυναμική του femtocell για παροχή υψηλών υπηρεσιών, καθώς λόγω της μικρότερης απόστασης (και υψηλότερου SINR), η ανάγκη για χρήση φάσματος είναι πολύ μικρότερη για την ίδια ρυθμαπόδοση. Αυτό επίσης σημαίνει μικρή επίδραση στην επίδοση των συνδρομητών λόγω λιγότερου διαθέσιμου φάσματος. Παρόλα αυτά και όπως θα δούμε στις εξομοιώσεις, αυτή μπορεί να γίνει ιδιαίτερα αισθητή δημιουργώντας αρνητική εμπειρία στο χρήστη. Για το λόγο αυτό στις περιπτώσεις αυτές, ενεργοποιείται το δεύτερο μέρος του μηχανισμού.

7.1.2. Έλεγχος ισχύος

Αφότου η ανάθεση των πόρων φάσματος στους μη συνδρομητές από τα femtocells έχει καθοριστεί, λαμβάνει χώρα ο έλεγχος ισχύος μεταξύ των femtocell που ανήκουν σε συστοιχίες. Σε κάθε συστοιχία, θεωρητικά κάθε femtocell μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση υβριδικής πρόσβασης. Όμως, στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, σε κάθε χρονική στιγμή οι πόροι που διαθέτουν στους χρήστες θα είναι διαφορετικοί σε κάθε περίπτωση, ενώ το χάσμα μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο, μεταξύ σταθμού που έχει αναθέσει μεγάλο μέρος φάσματος σε σχέση με άλλον που έχει κανέναν μη συνδρομητή πλησίον του.

Ο στόχος του ελέγχου ισχύος είναι να αποζημιώσει τους συνδρομητές για την πτώση ρυθμαπόδοσης λόγω μεγάλης χρήσης υβριδικής πρόσβασης. Αντί όμως να το πετύχει αυτό αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής του εν λόγω femtocell, ζητά τη μείωση των γειτονικών που δεν έχουν υποστεί αντίστοιχη πτώση. Ως εκ τούτου, η επίδοσή του αυξάνει ως αποτέλεσμα της μείωσης των παρεμβολών που υφίσταται.

Η επιλογή των ποιών σταθμών βάσης θα υφίστανται την πτώση αυτή στις παραμέτρους μετάδοσης, βασίζεται στο βαθμό που υιοθετούν υβριδική πρόσβαση. Με αρχή τη δίκαιη διανομή του βάρους της υβριδικής πρόσβασης σε ολόκληρη τη συστοιχία, τα femtocells με καθόλου ή λίγη ανάθεση πόρων για μη συνδρομητές, θα υποστούν μεγαλύτερη πτώση ισχύος αν κάτι τέτοιο αποδειχθεί ωφέλιμο για τους συνδρομητές των femtocells με μεγαλύτερη παραχώρηση πόρων για υβριδική πρόσβαση.

Η ωφέλιμη αυτή εξάρτηση όμως, μπορεί να μην είναι πάντα παρούσα και ενδεχόμενη πτώση να μην προκαλεί ανάλογο όφελος εξαιτίας μεγάλης απόστασης, παρεμβολές από πολλαπλές πηγές ή υψηλά επίπεδα θορύβου. Ως αποτέλεσμα, προσαρμόζοντας προς τα κάτω την ισχύ μετάδοσης θα προκαλέσει πτώση στους συνδρομητές χωρίς σημαντικό όφελος στα γειτονικά femtocells προκαλώντας αναίτια πτώση στη συνολική χωρητικότητα. Για να προστατέψουμε τα μέλη της συστοιχίας από τέτοιες περιπτώσεις, θέτουμε την πτώση να είναι ανάλογη του ενδεχόμενου κέρδους. Ή θέτοντάς το διαφορετικά, να εξαρτάται από την επίδραση του σταθμού βάσης στους γειτονικούς του. Ονομάζουμε την επίδραση αυτή παράγοντα επίδρασης και τον υπολογίζουμε ως εξής:

$$IMP_{j,i} = \frac{P_{i,k}G_{x,i,k}}{N_0\Delta_f + \sum_M P_{M,k}G_{x,M,k} + \sum_f P_{f,k}G_{x,f,k}} \quad (8.2)$$

Η παραπάνω έκφραση αντιπροσωπεύει το μέρος της πτώσης στο SINR ενός χρήστη που συνδέεται στο femtocell i από το femtocell j προς τη μείωση που προέρχεται από τη συνολική παρεμβολή που δέχεται ο χρήστης. Έτσι η προσαρμογή στην ισχύ μετάδοσης σχετίζεται και με τη διαφορά στη μείωση ρυθμαπόδοσης μεταξύ των femtocells λόγω υβριδικής πρόσβασης και στην επίδραση της οποιασδήποτε ρύθμισης της ισχύς στους γειτονικούς σταθμούς βάσης:

$$PC_i = \sum (SINR_{d,i} - SINR_{d,j}) \cdot a \cdot IMP_{j,i}, f \neq j \quad (8.3)$$

με το α να εγγυάται πως κάθε προσαρμογή ισχύος θα γίνεται μόνο σε σταθμούς που προσφέρουν περισσότερους πόρους:

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{if } SINR_{d,i} - SINR_{d,j} < 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8.4)$$

Κάνοντας την παραδοχή πως σε συστοιχίες πυκνών femtocells, το μεγαλύτερο μέρος των παρεμβολών προέρχεται από γειτονικούς σταθμούς και συνυπολογίζοντας το γεγονός πως τα πιθανότερα σενάρια που εξετάζουμε αφορούν εσωτερικούς χώρους, θεωρούμε την παρεμβολή από το macrocell μηδαμινή. Ως εκ τούτου, μπορούμε να υπολογίσουμε την απαραίτητη μείωση της ισχύος των μελών femtocells της συστοιχίας ως εξής:

$$P_{new_i} = (1 + PC_i) \cdot P_{curr_i} \quad (8.5)$$

Όπου P_{new_i} και P_{curr_i} είναι τα νέα και τα τρέχοντα επίπεδα ισχύος μετάδοσης των femtocells αντίστοιχα. Φυσικά, όποιες αλλαγές στην ανάθεση πόρων για υβριδική πρόσβαση συμβούν θα συνοδεύονται και με αναπροσαρμογή του μηχανισμού ελέγχου ισχύος όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Algorithm 1 Power control

- 1: **for** non-subs user u near a femtocell i **do**
 - 2: {calculate required spectrum for hybrid access}
 - 3: $REQ_{subc} = \frac{TOT_{sub} * (\log(1 + SINR_{u,m}))}{(\log(1 + SINR_{u,f}))}$
 - 4: **end for**
 - 5: **for** femtocells $i, u \in$ cluster and j u 's user **do**
 - 6: {calculate effect of FBSs to neighboring FBSs' users}
 - 7: $IMP(i, j) = (Impact\ on\ j\ by\ i) / (Impact\ by\ all)$
 - 8: {calculate power adjustment}
 - 9: $P_{adj}(j) = \sum IMP(i, j) * a * (SINR_{d,j} - SINR_{d,i})$
 - 10: where $a = \begin{cases} 1, & \text{if } SINR_{d,i} - SINR_{d,j} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
 - 11: {calculate power transmission}
 - 12: $P_{new(j)} = (1 + PC(j)) * P_{curr}(j)$
 - 13: **end for**
-

Εικόνα 33. Περίληψη των βασικών σημείων του αλγόριθμου

7.2. Αξιολόγηση επίδοσης αλγορίθμου

7.2.1. Παράμετροι εξομοίωσης

Για την αξιολόγηση του ανωτέρω αλγορίθμου, εξομοιώσαμε ένα κυψελωτό δίκτυο αποτελούμενο από εννέα macrocells ακτίνας 250m. Στην περιοχή εναποθέσαμε ομοιόμορφα 100 femtocells στην περιοχές που ορίζονται από την ακτίνα των macrocells και σε απόσταση μισή της ακτίνας από την macro κεραία που βρίσκεται στο κέντρο κάθε κυψέλης. Υιοθετούμε αυτό το σενάριο ως πιο ρεαλιστικό, καθώς τα απομακρυσμένα μέρη, είναι πιο πιθανό να έχουν femtocells λόγω του ασθενέστερου σήματος. Σε κοντινή τυχαία απόσταση από τα femtocells τοποθετούμε 100 συνδρομητικούς χρήστες, θεωρώντας για απλοποίηση πως κάθε femtocell έχει μόνο έναν συνδρομητή στην λίστα CSG. Επιπλέον 100 μη συνδρομητές τοποθετούνται στην περιοχή ως υποψήφιοι για υβριδικοί χρήστες. Θέτουμε τον περιορισμό κάθε femtocell να επιτρέπει την πρόσβαση σε έναν μόνο μη συνδρομητή κάθε στιγμή.

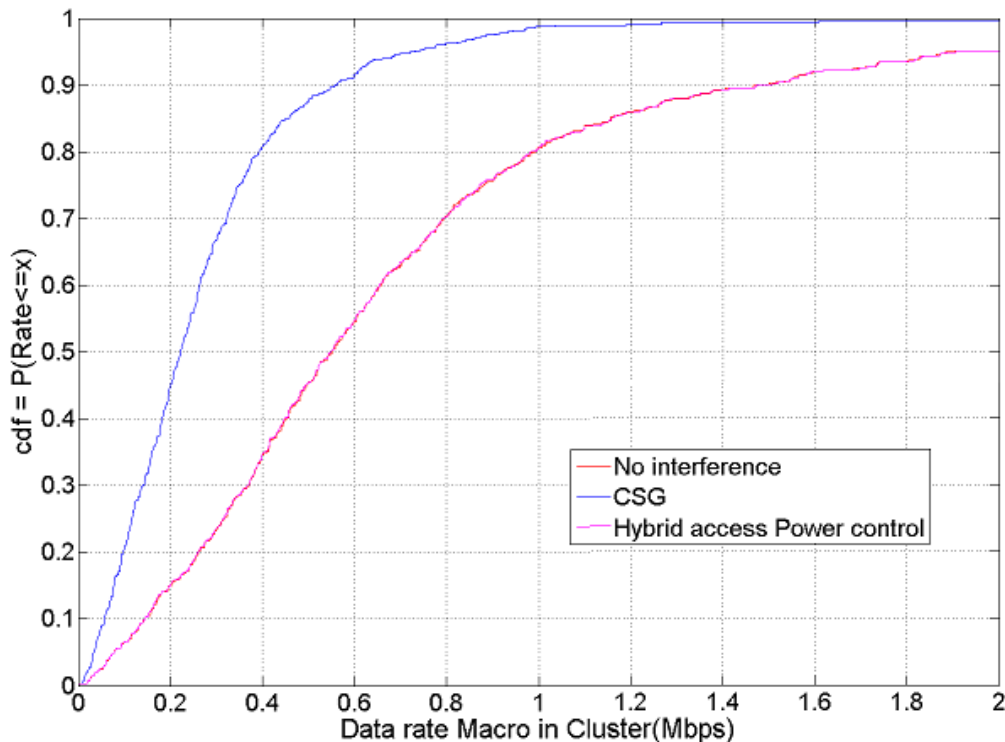
Οι χρήστες θεωρούνται στατικοί και θεωρούμε full-buffer κίνηση στο δίκτυο για να αναπαραστήσουμε το χειρότερο δυνατό σενάριο ως προς τις παρεμβολές. Ακολουθούμε τις παραμέτρους που προτείνει η 3GPP για αστικά περιβάλλοντα για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης και διείσδυσης. Στον πίνακα αναφέρουμε αναλυτικά τις παραμέτρους του δικτύου που χρησιμοποιήσαμε βασισμένοι στην LTE-A τεχνολογία και στον εξομοιωτή LTE του [79].

Πίνακας 6. Παράμετροι εξομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Ακτίνα macrocell	250m
Διαθέσιμο φάσμα	20MHz
Κωδικοποίηση	64QAM
Φορέας (subcarrier)	15KHz
Συχνότητα λειτουργίας	2GHz
Απώλειες διείσδυσης	20dB
Ισχύς macro BS	46dBm
Λευκός θόρυβος	-174dBm/Hz

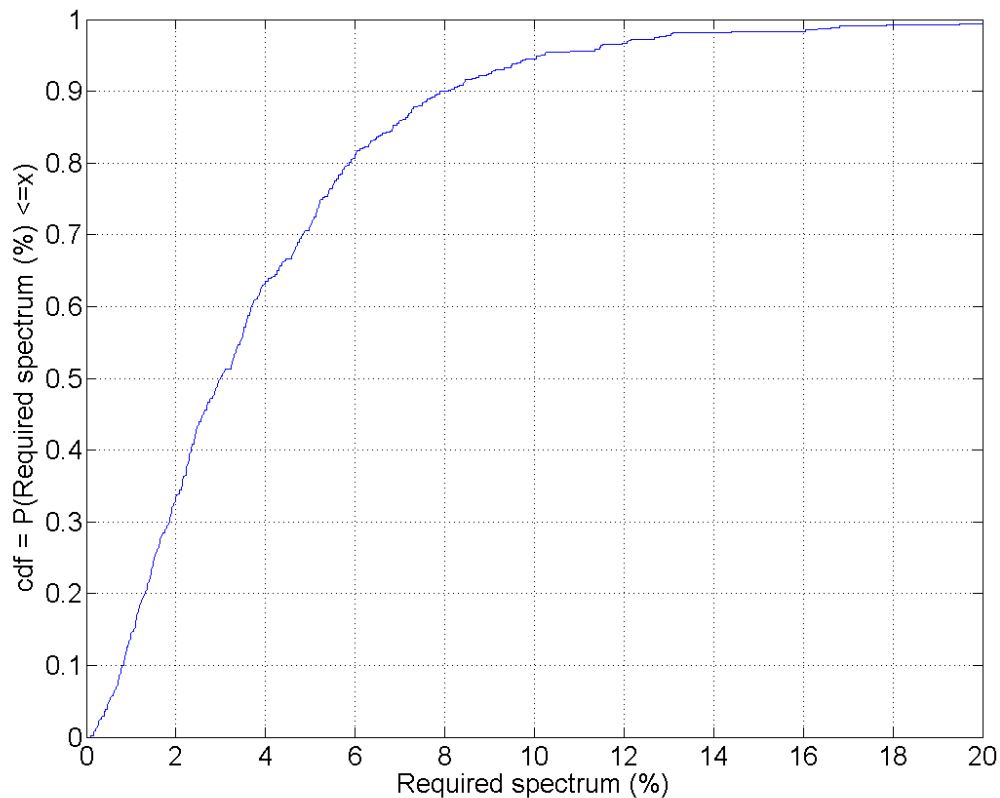
7.2.2. Πειραματικά αποτελέσματα

Πρώτα εξετάζουμε την επιτυχία του αλγορίθμου στην αποκατάσταση των επιδόσεων των macrocell χρηστών, όταν συνδέονται στο femtocell. Στην Εικόνα 34 απεικονίζεται η ρυθμαπόδοση των χρηστών αυτών πριν την εγκατάσταση του femtocell (no interference), μετά την εγκατάσταση και σε λειτουργία κλειστή πρόσβασης (CSG) και τέλος όταν οι χρήστες συνδέονται στο femtocell με υβριδική πρόσβαση. Όπως είναι εύκολο να παρατηρήσουμε, η πρώτη με την τρίτη γραμμή ταυτίζονται, γεγονός που δείχνει ότι η αποκατάσταση της πρότερης ρυθμαπόδοσης ήταν πλήρης. Από την εικόνα είναι ακόμα εμφανής η ισχυρή επίδραση των παρεμβολών ενός μόνο κοντινού femtocell σε ένα macro χρήστη όταν λειτουργεί βάσει CSG και η ανάγκη λύσης του προβλήματος.



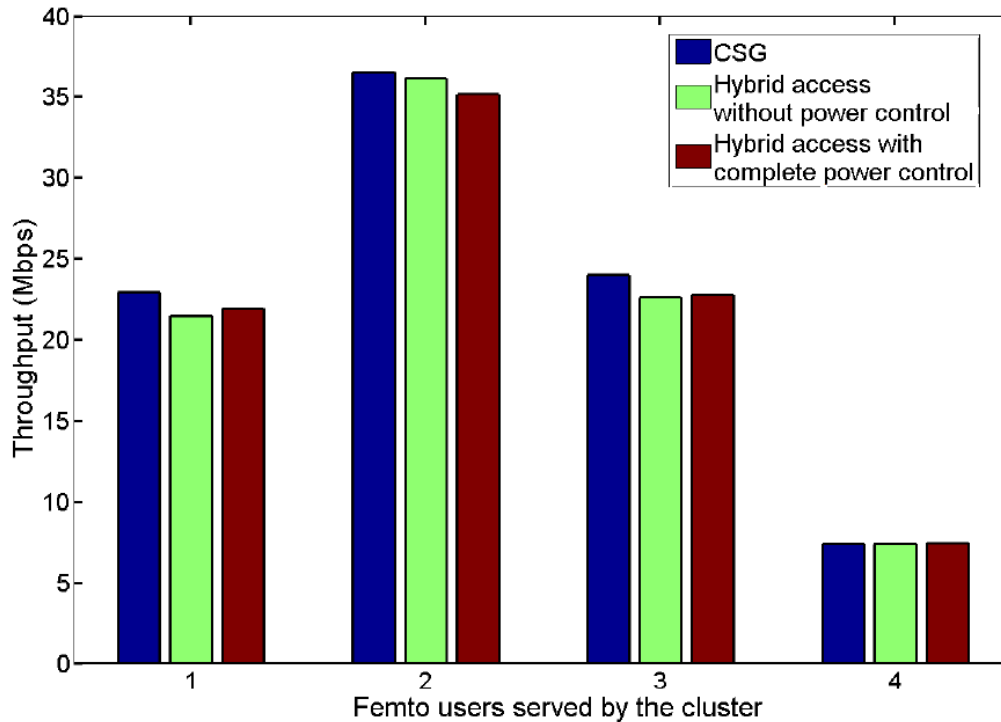
Εικόνα 34. Χωρητικότητα των macro χρηστών χωρίς παρεμβολές από το femtocell, με παρεμβολές και υπό καθεστώς υβριδικής πρόσβασης

Η επιτυχία του αλγορίθμου στην πλήρη αποκατάσταση οφείλεται στους λίγους πόρους που απαιτούνται συνήθως από το femtocell, για μεγάλες επιδόσεις τοπικά. Στην Εικόνα 35 απεικονίζεται το ποσοστό φάσματος που ανατίθεται για υβριδικούς σκοπούς κατά μήκος όλου του δικτύου. Αν και το ποσοστό ποικίλει, παρατηρούμε ότι ο συντριπτικό ποσοστό απαιτεί λιγότερο από 10% του διαθέσιμου φάσματος για να αναπαράγει την αρχική επίδοση και οι χειρότερες περιπτώσεις δεν ξεπερνούν το 20%. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό δεδομένου ότι η υβριδική λειτουργία θεωρείται παρασιτική εκ μέρους των συνδρομητών και αποτελεί παραχώρηση ιδιωτικών πόρων.



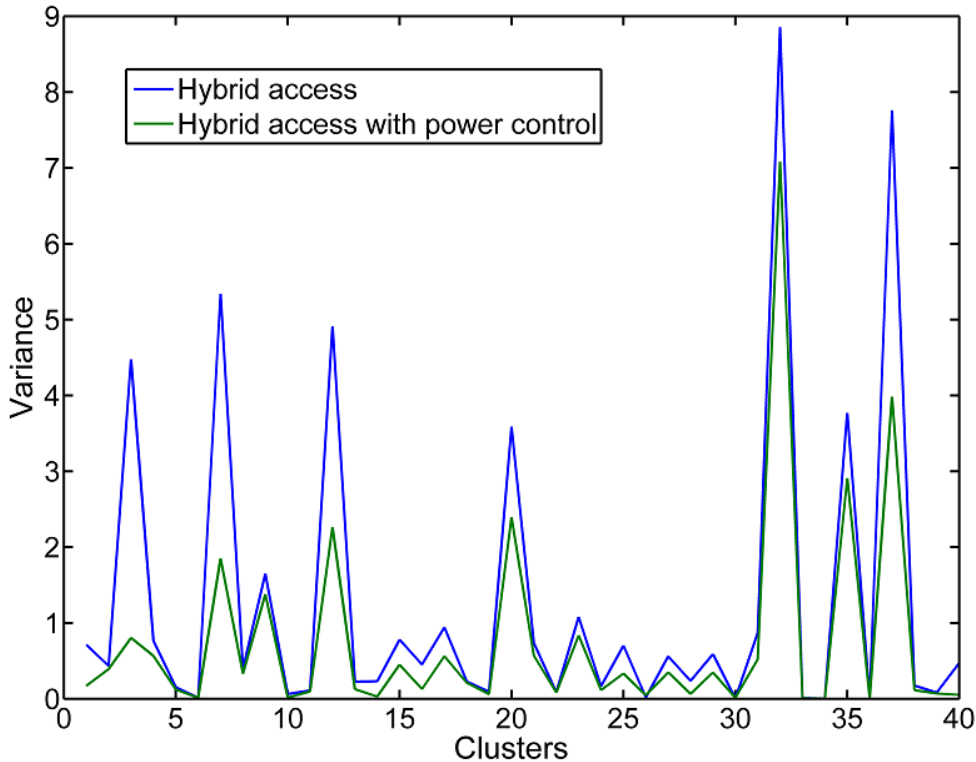
Εικόνα 35. Απαιτούμενη διάθεση πόρων από femtocells για αναπαραγωγή της απόδοσης των macrocell χρηστών

Όπως περιγράψαμε παραπάνω μετά την υιοθέτηση υβριδικής πρόσβασης, τίθεται σε λειτουργία ο έλεγχος ισχύος προκειμένου να εξισορροπήσει την επίδρασή της στα femtocells αφού όπως είδαμε στην εικόνα κάποια femtocell διαθέτουν λίγο και κάποια αρκετά περισσότερο φάσμα. Με βάση τη μείωση σε κάθε femtocell συγκριτικά με τη μέση μείωση της συστοιχίας, ο αλγόριθμος προσπαθεί να συγκλίνει τη μείωση κάθε femtocell στο μέσο όρο. Αυτό φυσικά δεν επιτυγχάνεται πάντα, αφού ενδεχόμενη μείωση της ισχύος μπορεί να μην έχει αντίστοιχο όφελος σε γειτονικά μέλη. Τα παραπάνω είναι εμφανή στην Εικόνα 36 όπου απεικονίζει σε γκρουπ στηλών τη ρυθμαπόδοση των συνδρομητών σε τρία femtocells μέλη μιας συστοιχίας. Σε κάθε γκρουπ η πρώτη στήλη δείχνει την αρχική ρυθμαπόδοση των συνδρομητών (σε κλειστή λειτουργία), τη ρυθμαπόδοση σε υβριδική λειτουργία (μείωση απόδοσης) και τέλος τη ρυθμαπόδοση μετά την εφαρμογή του ελέγχου ισχύος. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τα τρία πρώτα femtocells παραχώρησαν φάσμα σε μη συνδρομητές με αποτέλεσμα τη μείωση επίδοσης (δεύτερη στήλη). Καθώς το πρώτο femtocell ποσοστιαία υπέστη τη μεγαλύτερη μείωση, το δεύτερο μείωσε την ισχύ του προκειμένου να προσεγγίσει το μέσο όρο μείωσης στη συστοιχία. Το αποτέλεσμα είναι το πρώτο femtocell να εμφανίσει μερική αποκατάσταση της ρυθμαπόδοσης που προσφέρει στους χρήστες του. Το τρίτο femtocell ήταν ήδη κοντά στο μέσο όρο μείωσης, ενώ το τέταρτο βρέθηκε ότι δε συμμετείχε ενεργά στην απόδοση των υπολοίπων με αποτέλεσμα να μην επηρεαστεί από τον έλεγχο ισχύος.



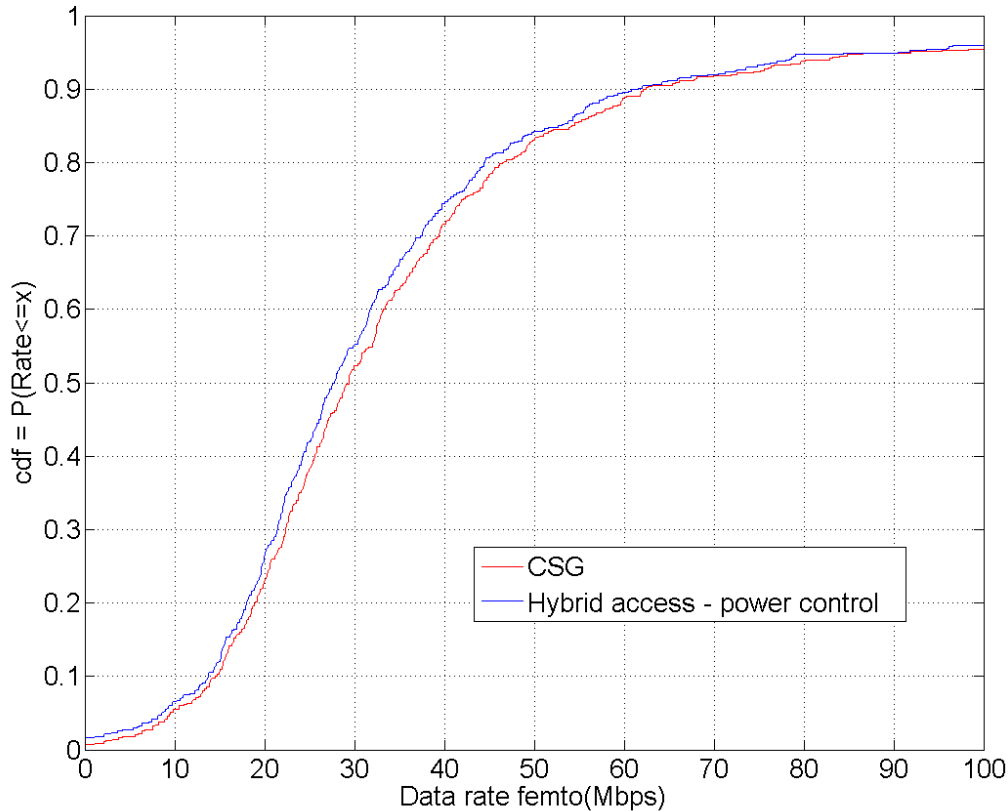
Εικόνα 36. Χωρητικότητα συνδρομητικών χρηστών ανα femtocell σε CSG, απλή υβριδική και προτεινόμενη πρόσβαση

Καθώς ο στόχος είναι η εξισορρόπηση του βάρους της υβριδικής πρόσβασης, σε περιπτώσεις όπως η παραπάνω όπου τα περισσότερα μέλη της συστοιχίας προσφέρουν υβριδική πρόσβαση με παρόμοια ποσοστά, ο έλεγχος ισχύος έχει μικρή επίδραση. Αντίθετα παρουσιάζει τα εντονότερα αποτελέσματα όταν ο καταμερισμός είναι έντονα άνισος. Η επίδρασή του σε ολόκληρο το δίκτυο φαίνεται στην εικόνα όπου απεικονίζεται η σχετική αλλαγή στη συνολική ρυθμαπόδοση των συνδρομητών κάθε femtocell εντός συστοιχίας. Μικρότερη αλλαγή δείχνει ότι η μείωση της επίδοσης λόγω ανακατανομής φάσματος κατά μήκος των μελών της συστοιχίας είναι περισσότερο ομογενής, δείχνοντας δικαιότερη κατανομή των αρνητικών συνεπειών της υβριδικής πρόσβασης στους συνδρομητές. Στην πράξη αυτό σημαίνει πιο ανεπαίσθητες μεταβάσεις στην απόδοση όταν ένας υβριδικός χρήστης γίνεται δεκτός από ένα femtocell.



Εικόνα 37. Διαφορά στη ρυθμαπόδοση των συνδρομητών femtocells σε συστοιχίες

Φυσικά αν και ο έλεγχος ισχύος προστατεύει τις χειρότερες περιπτώσεις, η συνολική χωρητικότητα υφίσταται μικρή μείωση καθώς η μείωση ισχύος έχει συχνά μικρότερο συνολικό όφελος λόγω της μείωσης των παρεμβολών από τη μείωση της απόδοσης των συνδρομητών του εν λόγω σταθμού βάσης. Αν και ο παράγοντας επίδρασης προστατεύει από μεγάλες μειώσεις, μικρή μείωση της συνολικής χωρητικότητας δεν μπορεί να αποφευχθεί. Το παραπάνω σε συνδυασμό με τη παραχώρηση φάσματος σε μη συνδρομητές έχει αρνητικό αντίκτυπο στους συνδρομητές, κάτι που απεικονίζεται στην Εικόνα 38. Σε αυτή απεικονίζεται η συνολική χωρητικότητα που προσφέρεται από τα femtocells στους συνδρομητικούς χρήστες τους αρχικά (CSG) και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου. Φυσικά στην αρχική κατάσταση, η κλειστή πρόσβαση με την αξιοποίηση του συνολικού φάσματος επιδεικνύει ανώτερη επίδοση. Παρόλα αυτά η μείωση παραμένει σε μικρά επίπεδα, δεδομένου ότι 100 παραπάνω χρήστες έχουν ενσωματωθεί στο δίκτυο. Σε συνδυασμό με το ότι η εφαρμογή υβριδικής πρόσβασης γίνεται με δίκαιο τρόπο, ο εκατέρωθεν συμβιβασμός είναι ελκυστικός αν συνυπολογίσουμε και τη βελτίωση στην απόδοση των macro χρηστών που δεν συνδέονται ποτέ σε femtocell λόγω της γενικής μείωσης των παρεμβολών στην περιοχή εξαιτίας την μείωσης ισχύος των κοντινών σταθμών.



Εικόνα 38. Σύγκριση της συνολικής χωρητικότητας femtocells μεταξύ CSG προσέγγισης και του προτεινόμενου αλγορίθμου

7.3. Αλγόριθμος ανακατανομής χρηστών

Όπως είδαμε νωρίτερα, η υβριδική πρόσβαση έχει αρνητική επίπτωση στους συνδρομητές των femtocells. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά κύριο λόγο η υβριδική πρόσβαση δημιουργήθηκε αρχικά και υιοθετείται για την παραχώρηση φάσματος σε χρήστες που βρίσκονται στην εμβέλεια του femtocell και υπο κανονικές συνθήκες θα συνδέονταν στο macrocell της περιοχής. Καθώς όμως οι δομές femtocell πυκνώνουν όπως εξηγήσαμε σε προηγούμενα κεφάλαια, θύματα παρεμβολών femtocells πλέον μπορούν να είναι και χρήστες που είναι συνδρομητές σε άλλα femtocells. Πάνω στη διαπίστωση αυτή, επεκτείναμε την έννοια της υβριδικής πρόσβασης ώστε να διαχωρίσουμε τις πολιτικές κατανομής φάσματος. Πλέον διαφορετική πολιτική υιοθετείται για συνδρομητές γειτονικών femtocells και διαφορετική για macrocell χρήστες. Η διαφοροποίηση αυτή αντανακλά τα ανώτερα δικαιώματα των συνδρομητών στους κοντινούς σταθμούς, κάτι που είναι συχνά επιθυμητό (εταιρίες σε μεγάλα κτίρια με κινούμενους υπαλλήλους, πολυκατοικίες με μικρά διαμερίσματα κλπ.).

Αυτό επιτρέπει τον καλύτερο συντονισμό μεταξύ των κοντινών femtocells σε μια συστοιχία καθώς επιτρέπει ανακατανομή των χρηστών αν αυτό είναι προς το συμφέρον των συνδρομητών. Η καλύτερη διαχείριση πόρων έχει αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής χωρητικότητας στη συστοιχία. Φυσικά, και σε αυτή την περίπτωση θέτουμε

αυστηρούς όρους στη χρήση του φάσματος για κάθε κατηγορία χρηστών όπως θα εξηγήσουμε αναλυτικά παρακάτω.

7.3.1. Συστοιχίες femtocells

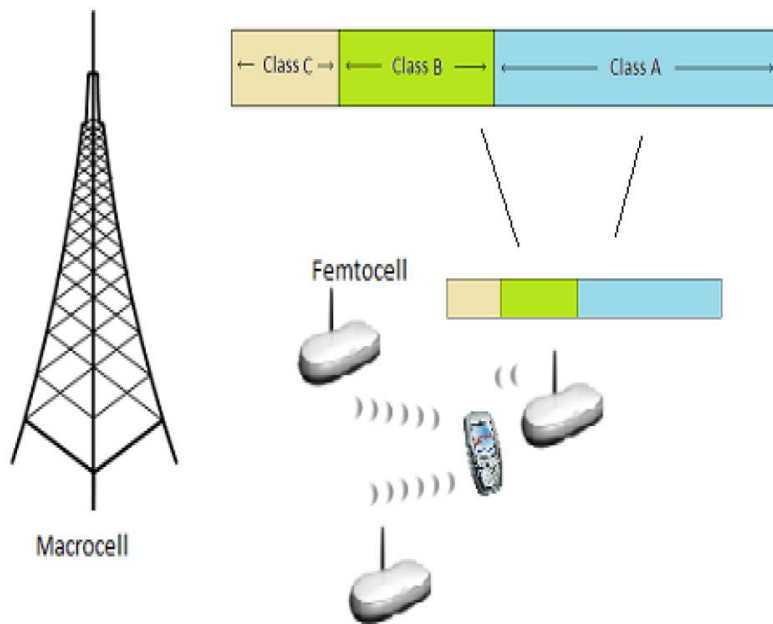
Όπως και στον προηγούμενο αλγόριθμο εκμεταλλευόμαστε τις πυκνές δομές femtocells (συστοιχία) ώστε να αξιοποιήσουμε τις δυνατότητες συντονισμού μεταξύ των σταθμών βάσεων που προσφέρονται. Ορίζουμε μέλος της συστοιχίας ένα femtocell που βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 25 m από δύο άλλα μέλη της συστοιχίας. Στην περιοχή που ορίζεται από την εμβέλεια κάθε femtocell-μέλους της συστοιχίας υπάρχουν χρήστες που είναι συνδρομητές ή όχι. Οι δεύτεροι είναι υποψήφιοι υβριδικοί χρήστες αν τελικά συνδεθούν σε κάποιο femtocell. Σε κάθε χρονική στιγμή, η επιλογή για το ποιους χρήστες γίνονται δεκτοί εξαρτάται από τις πολιτικές απόφασης όπως περιγράφονται παρακάτω.

7.3.2. Κατηγορίες χρηστών

Κάθε femtocell της συστοιχίας διαχωρίζει τους χρήστες σε τρεις κατηγορίες και καθορίζει την πολιτική σύνδεσης (admission) και την κατανομή φάσματος σε κάθε χρήση βάσει της κατηγορίας στην οποία ανήκει. Η πρώτη κατηγορία (Α) είναι οι συνδρομητές του femtocell, δηλαδή όσοι περιλαμβάνονται στην λίστα CSG. Οι χρήστες αυτοί είναι συνήθως οι ιδιοκτήτες του σταθμού, ως εκ τούτου έχουν τα περισσότερα δικαιώματα πάνω στους πόρους του femtocell και η υιοθετούμενη πολιτική οφείλει αυτό να το σεβαστεί.

Στη συνέχεια εισάγουμε μια νέα κατηγορία χρηστών (Β), στην οποία ανήκουν οι χρήστες που δεν ανήκουν στο CSG του εν λόγω femtocell, αλλά είναι συνδρομητές σε femtocell που είναι μέλος στην ίδια συστοιχία με το αρχικό. Η σειρά των κατηγοριών αντανakλά και την ιεράρχησή τους, δηλαδή και την προτεραιότητα απέναντι στους διαθέσιμους πόρους του femtocell. Άρα, η κατηγορία αυτή ιεραρχικά τοποθετείται παρακάτω από την πρώτη κατηγορία έχοντας λιγότερα δικαιώματα, αλλά παραπάνω από την τρίτη κατηγορία χρηστών.

Η τρίτη κατηγορία (Γ) είναι κάθε χρήστης εντός της εμβέλειας των femtocells που δεν ανήκει σε κάποια από τις προηγούμενες δύο. Οι χρήστες αυτοί είτε είναι συνδρομητές σε femtocell που δεν ανήκει στην συστοιχία, είτε πιθανότερα μη συνδρομητές που εξυπηρετούνται από το macrocell. Η κατηγορία αυτή θεωρείται η λιγότερο κρίσιμη για τα femtocell, αφού δεν υπάρχει απευθείας συσχέτιση με κάποιο από αυτά στην περιοχή. Παρόλα αυτά είναι και στη χειρότερη θέση, καθώς δέχονται συσσωρευμένες παρεμβολές από όλα τα μέλη της συστοιχίας. Για αυτό το λόγο, για αυτούς τους χρήστες ακολουθούμε την πολιτική φάσματος του προηγούμενου αλγόριθμου προστατεύοντάς τους από ισχυρές παρεμβολές χωρίς μεγάλη επιβάρυνση σε πόρους από το femtocell.



Εικόνα 39. Κατανομή διαθέσιμου φάσματος femtocells βάσεις της κατηγορίας χρήστη

7.3.3. Πολιτική κατανομής φάσματος

Η κατανομή φάσματος λαμβάνει υπόψη την κατηγορία των χρηστών που επιθυμούν σύνδεση με το femtocell και ορίζει άνω και κάτω όρια για τους πόρους που θα τους διατεθούν. Για την τρίτη κατηγορία υιοθετούμε την πολιτική της αποζημίωσης που περιγράψαμε στον προηγούμενο αλγόριθμο. Δηλαδή ανατίθεται το απαραίτητο φάσμα ώστε ο χρήστης να αναπαράγει τη ρυθμαπόδοση που ο χρήστης απολάμβανε πριν την εγκατάσταση του εν λόγω femtocell. Όπως είδαμε παραπάνω αυτή η προσέγγιση θεωρείται αρκετά δίκαια και μπορεί να επιτευχθεί με λίγους πόρους από τη μεριά του femtocell. Άρα, όπως έχουμε δει στην ενότητα 7.1.1:

$$SP_{C,F} = SP_{C,M} \frac{(\log(1+SINR_{C,M}))}{(\log(1+SINR_{C,F}))} \quad (8.6)$$

Το $SP_{C,F}$ υποδηλώνει το φάσμα που πρέπει να διατεθεί από το femtocell στον χρήστη ή διαφορετικά τον απαιτούμενο αριθμό subcarriers (με τη μορφή των resource block). $SP_{C,M}$ είναι αντίστοιχα οι πόροι φάσματος που χρησιμοποιούσε ο χρήστης κατά τη σύνδεσή του με το macrocell. $SINR_{C,M}$ και $SINR_{C,F}$ είναι το επιτεύξιμο SINR του χρήστη όταν είναι συνδεδεμένος στο macrocell και το femtocell αντίστοιχα (με το πρώτο να μην περιλαμβάνει τις παρεμβολές από το εν λόγω femtocell).

Βασίζουμε την απόφαση της πολιτικής στους συνδρομητές (κατηγορία A και B) πάνω σε μια σειρά κανόνων. Οι κανόνες αυτοί αφενός αντανακλούν την προτεραιότητα

των ιδιοκτητών, αφετέρου οδηγούν τον αλγόριθμο σε αύξηση της συνολικής χωρητικότητας. Οι κανόνες αυτοί ορίζονται ως εξής:

I. Το μέγιστο φάσμα που θα διατεθεί σε χρήστες κατηγορίας B δεν μπορεί να ξεπερνάει το αντίστοιχο της κατηγορίας A. Αφού εξετάζουμε σενάρια full buffer κίνησης, το παραπάνω εξασφαλίζει ότι ο συνδρομητής πάντα θα έχει προτεραιότητα.

II. Το φάσμα στον χρήστη της B περιορίζεται και από το γεγονός ότι ο χρήστης A πρέπει να απολαμβάνει σημαντικό κέρδος από την ιδιοκτησία του femtocell, σε σύγκριση με την επίδοση που θα είχε χωρίς αυτό. Άρα:

$$THR_{A,F} = THR_{A,M} \quad (8.7)$$

όπου $THR_{A,F}$ είναι η ρυθμαπόδοση του χρήστη κατηγορίας A συνδεδεμένος στο femtocell, και $THR_{A,M}$ είναι η ρυθμαπόδοση που θα είχε συνδεδεμένος στο macrocell.

III. Ο χρήστης κατηγορίας B συνδέεται στο femtocell αν και μόνο αν η ρυθμαπόδοσή του βελτιώνεται σε σχέση με την περίπτωση όπου εξυπηρετείται από το femtocell στο οποίο είναι συνδρομητής. Ταυτόχρονα η συνολική χωρητικότητα που προσφέρεται από τα εμπλεκόμενα femtocells (αρχικό και γειτονικό) αυξάνεται σε σχέση με την πρότερη κατάσταση. Άρα, αντίστοιχα:

$$THR_{B,A} = THR_{B,B} \quad (8.8)$$

όπου $THR_{B,A}$ και $THR_{B,B}$ είναι η ρυθμαπόδοση του χρήστη κατηγορίας B όταν συνδέεται στο γειτονικό και στο αρχικό femtocell, αντίστοιχα.

Τα άνω και κάτω όρια που ορίζονται από τους παραπάνω περιορισμούς και βασισμένοι στο μοντέλο ανάλυσης που έχουμε περιγράψει καταλήγουμε στην παρακάτω πολιτική φάσματος για τους χρήστες κατηγορίας B:

$$\min: SP_{B,B} \frac{\log(1+SINR_{B,B})}{\log(1+SINR_{B,A})} \quad (8.9)$$

$$\max: \min\left(\frac{SP_{TOT}}{\#users}, SP_{TOT} - \frac{SP_{A,M} \cdot \log(1+SINR_{A,M})}{\log(1+SINR_{A,F})}\right) \quad (8.10)$$

Όπου $SP_{B,B}$ είναι το φάσμα που αξιοποιεί ο χρήστης στο αρχικό του femtocell, $SINR_{B,A}$ και $SINR_{B,B}$ είναι του ίδιου χρήστη το SINR συνδεδεμένος στο γειτονικό ή στο δικό του femtocell αντίστοιχα, $SINR_{A,M}$ και $SINR_{A,F}$ είναι το SINR των συνδρομητών του femtocell στο οποίο ο χρήστης κατηγορίας B θέλει να συνδεθεί και SP_{TOT} είναι το συνολικό διαθέσιμο φάσμα του εν λόγω femtocell. Η κατανομή φάσματος γίνεται με βάση τα παραπάνω κριτήρια και τελικά υιοθετείται αν και μόνο αν η συνολική χωρητικότητα των δύο αυτών femtocell αυξάνεται, δηλαδή:

$$CAP_{BEF} = CAP_{AFT} \quad (8.11)$$

Algorithm 1 Resource allocation

-
- 1: Categorize users
 - 2: -Class A: Subscribers
 - 3: -Class B: Same cluster's femtocells' subscribers
 - 4: -Class C: Others
 - 5: **if** Class C **then**
 - 6: {calculate required spectrum for Class C}
 - 7: $SP_{C,F} = \frac{SP_{C,M} * (\log(1 + SINR_{C,M}))}{(\log(1 + SINR_{C,F}))}$
 - 8: **end if**
 - 9: **if** Class A OR Class B **then**
 - 10: allocate all available spectrum
 - 11: **end if**
 - 12: **if** Class A AND Class B **then**
 - 13: calculate min, max spectrum for Class B user as long
as below rules apply
 - 14: $min : \frac{SP_{B,B} * \log(1 + SINR_{B,B})}{\log(1 + SINR_{B,A})}$
 - 15: $max : \min(\frac{SP_{TOT}}{\#users}, SP_{TOT} - \frac{SP_{A,M} * \log(1 + SINR_{A,M})}{\log(1 + SINR_{A,F})})$
 - 16: $CAP_{BEF} < CAP_{AFT}$
 - 17: **end if**
-

Εικόνα 40. Περίληψη των βασικών σημείων του αλγορίθμου

7.4. Αξιολόγηση επίδοσης αλγορίθμου

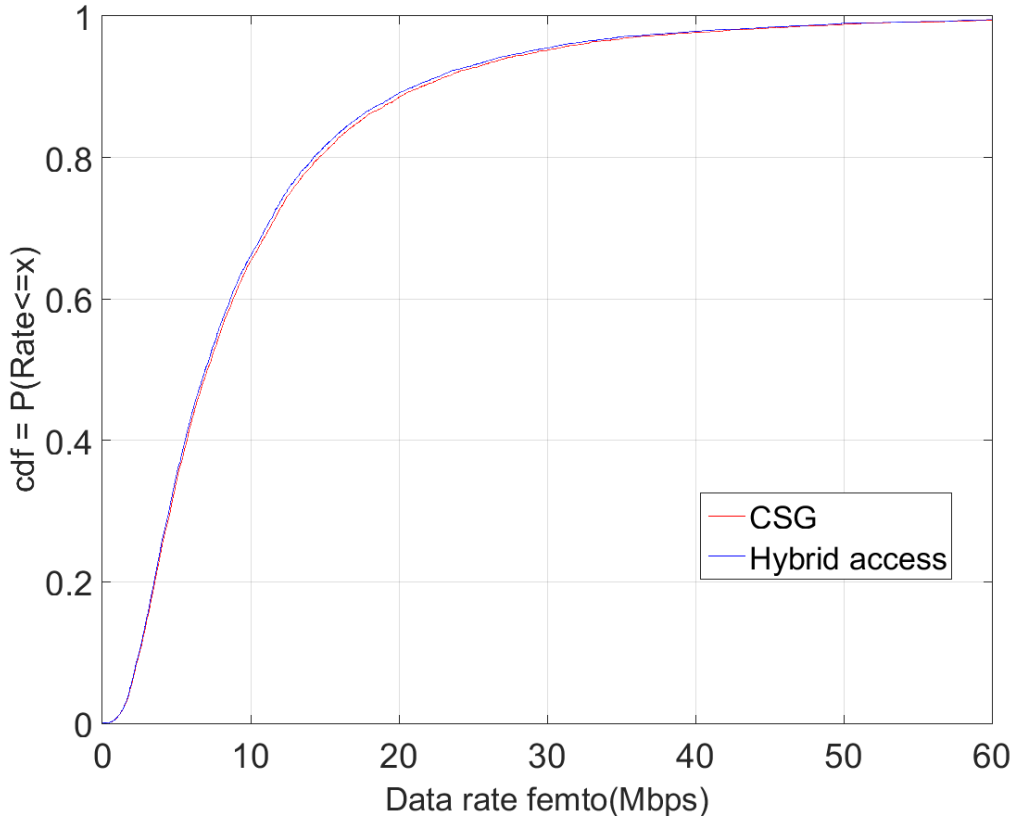
7.4.1. Παράμετροι εξομοίωσης

Για την εξομοίωση του παραπάνω αλγορίθμου, εξομοιώσαμε ένα δίκτυο αποτελούμενο από 9 macrocells ακτίνας 250 m. Στο δίκτυο εναποθέσαμε τυχαία femtocells, έκαστο να εξυπηρετεί έως 3 χρήστες ταυτόχρονα. Η ισχύς των σταθμών βάσης τέθηκε στα 46 dBm και 20 dBm για το macrocell και μέγιστο για τα femtocell αντίστοιχα. Όπως και στον προηγούμενο αλγόριθμο, για την προσομοίωση και υπολογισμό της απόδοσης ακολουθήσαμε το μοντέλο ανάλυσης του υποκεφαλαίου 6.1 και τις οδηγίες της 3GPP για αστικά περιβάλλοντα. Κάθε πείραμα αναπαράχθηκε 30 φορές και στις γραφικές αναπαρίσταται ο μέσος όρος για μεγαλύτερη αξιοπιστία. Οι παράμετροι του Πίνακα 6 ακολουθήθηκαν και για τις ανάγκες της παρούσης εξομοίωσης.

7.4.2. Πειραματικά αποτελέσματα

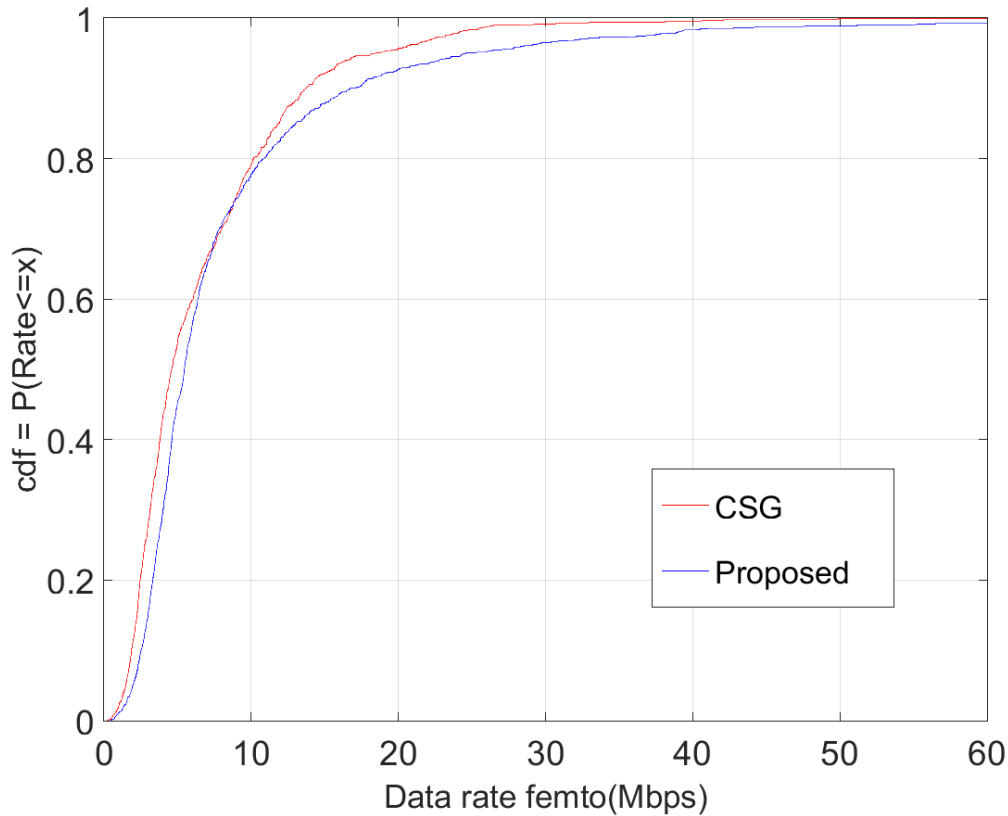
Δε θα επαναλάβουμε τα αποτελέσματα για τους χρήστες της κατηγορίας Γ γιατί ταυτίζονται με τα αποτελέσματα των macro χρηστών στον προηγούμενο αλγόριθμο. Η

αποκατάσταση της ρυθμαπόδοσής τους είναι πλήρης και οι απαιτούμενοι πόροι φάσματος παραμένουν περιορισμένοι. Η μικρή επίπτωση από την είσοδο των χρηστών αυτών στο femto στρώμα φαίνονται στην Εικόνα 41 όπου απεικονίζεται η CDF των χρηστών κατηγορίας A μετά την αποδοχή των χρηστών αυτών.



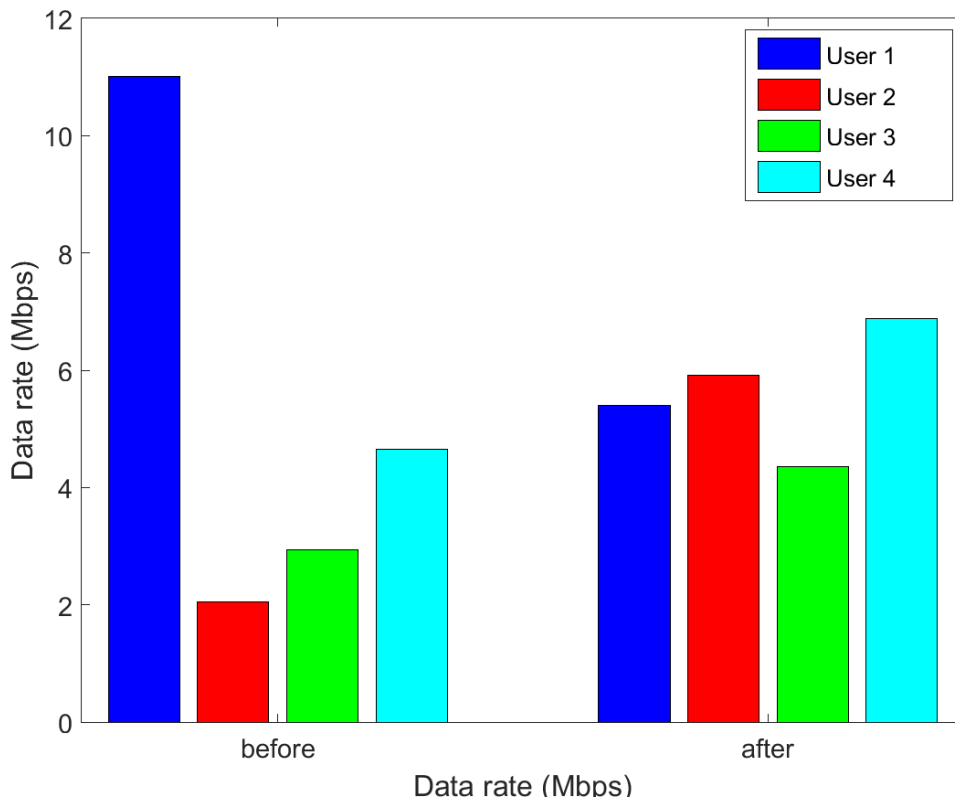
Εικόνα 41. CDF των χρηστών κατηγορίας A πριν και μετά την είσοδο των χρηστών κατηγορίας Γ στο femto στρώμα

Η Εικόνα 42 από την άλλη δείχνει την διαφορά στη χωρητικότητα που προσφέρεται στους συνδρομητές (A και B κατηγορίας) πριν και μετά το μηχανισμό. Αρχικά, οι χρήστες συνδέονται βάσει της CSG λίστας τους. Στη συνέχεια όμως και βάση των περιορισμών που τέθηκαν, οι συνδρομητές χωρίζονται σε χρήστες κατηγορίας A και B. Κάθε στιγμή ένας χρήστης της μιας κατηγορίας μπορεί να μεταπηδήσει στην άλλη αν αυτό είναι προς όφελος των εμπλεκόμενων σταθμών. Μέσω αυτής της λογικής επιτυγχάνεται ανακατανομή των χρηστών που με τη σειρά της οδηγεί σε αύξηση της χωρητικότητας, όπως φαίνεται και στην εικόνα. Δεδομένου ότι η σύγκριση γίνεται μεταξύ της κλειστής πρόσβασης και της περίπτωσης όπου οι συνδρομητές που απεικονίζονται έχουν υποστεί απώλειες λόγω της σύνδεσης των χρηστών κατηγορίας Γ, η απεικονιζόμενη βελτίωση θεωρείται ιδιαίτερως σημαντική. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε πως όσο πυκνότερο είναι το femto στρώμα, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα των χρηστών να καλύπτουν τους περιορισμούς για σύνδεση σε γειτονικό femtocell με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η βελτίωση στη συνολική χωρητικότητα.



Εικόνα 42. CDF των συνδρομητών (A και B κατηγορίας) πριν και μετά την ανακατανομή τους

Τέλος, η Εικόνα 43 απεικονίζει ένα ενδεικτικό παράδειγμα της εφαρμογής της ανακατανομής χρηστών σε μια συστοιχία δύο femtocells. Στην εικόνα φαίνεται η ρυθμαπόδοση των τεσσάρων χρηστών συνδεδεμένων πριν και μετά το μηχανισμό. Συγκεκριμένα, η πρώτη στήλη κάθε σετ (χρήστης 1) δείχνει τον χρήστη που εξυπηρετείται από το femtocell που δέχεται το χρήστη 2. Ο χρήστης αυτός αρχικά είναι κατηγορίας A αλλά μεταβαίνει σε κατηγορία B καθώς όπως φαίνεται κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνει τη ρυθμαπόδοσή του. Η μετάβαση απελευθερώνει φάσμα για τους χρήστες 3 και 4 βελτιώνοντας έτσι το ρυθμό μετάδοσής τους. Η βελτίωση αυτή συμβαίνει φυσικά εις βάρος του χρήστη 1 λόγω του διαμοιρασμού πλέον του διαθέσιμου φάσματος σε δύο χρήστες. Η συνολική χωρητικότητα που προσφέρεται από τα δύο femtocell αυξάνει βάσει των απαιτούμενων προδιαγραφών του μηχανισμού.



Εικόνα 43. Επίπτωση της ανακατανομής χρηστών δύο femtocells στη ρυθμαπόδοσή τους

7.5. Συνδυασμός αλγορίθμων

Αν και αναπτυγμένοι ξεχωριστά, οι δύο αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε παρόμοια σενάρια, χωρίς να επικαλύπτονται αντιφατικά. Καταρχήν και οι δύο αφορούν συντονιστικές ενέργειες από femtocells που ανήκουν στην ίδια συστοιχία, ενώ και οι δύο υιοθετούν υβριδική πρόσβαση για τους macrocell χρήστες με σκοπό την αναπαραγωγή της πρότερης επίδοσής τους. Ο μεν πρώτος αλγόριθμος στη συνέχεια εφαρμόζει έλεγχο ισχύος ώστε να διαμοιράσει τις απώλειες από την υβριδική πρόσβαση στα υπόλοιπα μέλη της συστοιχίας για την αποφυγή ισχυρών επιπτώσεων στους συνδρομητές του υβριδικού femtocell. Ο έτερος αλγόριθμος, από την άλλη, υιοθετεί διαφορετική πολιτική για συνδρομητές γειτονικών femtocells, με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων μέσω της ανακατανομής των συνδρομητικών χρηστών στα femtocells-μέλη της συστοιχίας.

Αυτό μας επιτρέπει τη συνένωσή τους σε έναν ενιαίο συνολικό μηχανισμό, ο οποίος περιλαμβάνει πολιτικές κατανομής φάσματος μέσω υβριδικής πρόσβασης, έλεγχο ισχύος και ανακατανομή χρηστών. Χωρίς ιδιαίτερες αλλαγές και με τους ίδιους ορισμούς σχηματισμού συστοιχιών και κατηγοριοποίησης των χρηστών, τα βήματα του μηχανισμού είναι:

I. Αποκατάσταση της ρυθμαπόδοσης των macrocell χρηστών μέσω ανάθεσης του απαραίτητου φάσματος από τα femtocells

II. Εφαρμογή του ελέγχου ισχύος για κατανομή της επίδρασης της υβριδικής πρόσβασης στους συνδρομητές σε όλα τα μέλη της συστοιχίας.

III. Ανακατανομή των συνδρομητικών χρηστών στα femtocell της συστοιχίας βάσει της πολιτικής φάσματος που αναλύθηκε παραπάνω.

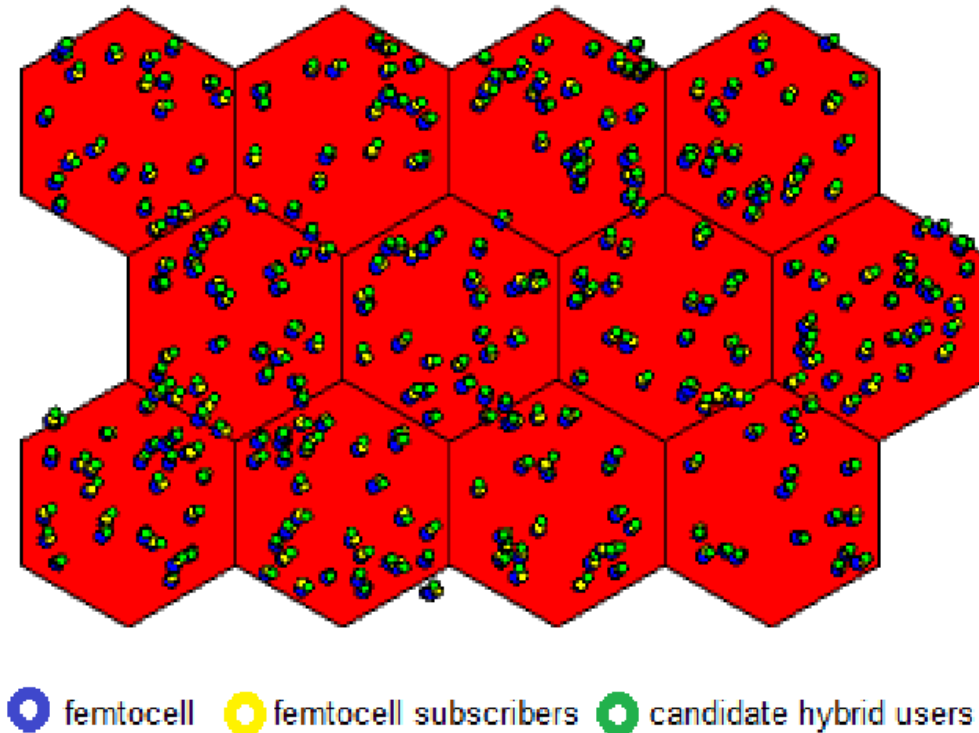
Ο συνολικός μηχανισμός απεικονίζεται στην Εικόνα 44.

Algorithm 1 Resource allocation

- 1: Define clusters and categorize users
 - 2: -Class A: Subscribers
 - 3: -Class B: Same cluster's femtocells' subscribers
 - 4: -Class C: Others
 - 5: **if** Class C **then**
 - 6: {calculate required spectrum for Class C}
 - 7: $SP_{C,F} = \frac{SP_{C,M} \cdot (\log(1 + SINR_{C,M}))}{(\log(1 + SINR_{C,F}))}$
 - 8: **end if**
 - 9: Power control for all femtocells in the cluster to compensate for distribute hybrid access impact
 - 10: **for** femtocells $i, u \in$ cluster and j u's user **do**
 - 11: {Poweradjustment = (SINRnegativereductiondifference)* (Impact on j by i)/(Impact by all)}
 - 12: $P_{adj}(i) = \frac{\sum (SINR_{d,i} - SINR_{d,j}) \cdot a \cdot \frac{P_{i,k} G_{x,i,k}}{N_0 \Delta f + \sum_M P_{M,k} G_{x,M,k} + \sum_F P_{f,k} G_{x,f,k}}}{}, f \neq j$
 - 13: where $a = \begin{cases} 1, & \text{if } SINR_{d,j} - SINR_{d,i} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
 - 14: {calculate power transmission}
 - 15: $P_{new}(i) = (1 + PC(i)) * P_{curr}(i)$
 - 16: **end for**
 - 17: **if** Class A OR Class B **then**
 - 18: allocate all available spectrum
 - 19: **end if**
 - 20: **if** Class A AND Class B **then**
 - 21: calculate min/max spectrum for Class B user while below rules apply
 - 22: $min : \frac{SP_{B,B} \cdot \log(1 + SINR_{B,B})}{\log(1 + SINR_{B,A})}$
 - 23: $max : \min(\frac{SP_{TOT}}{\#users}, SP_{TOT} - \frac{SP_{A,M} \cdot \log(1 + SINR_{A,M})}{\log(1 + SINR_{A,F})})$
 - 24: $CAP_{BEF} < CAP_{AFT}$
 - 25: **end if**
-

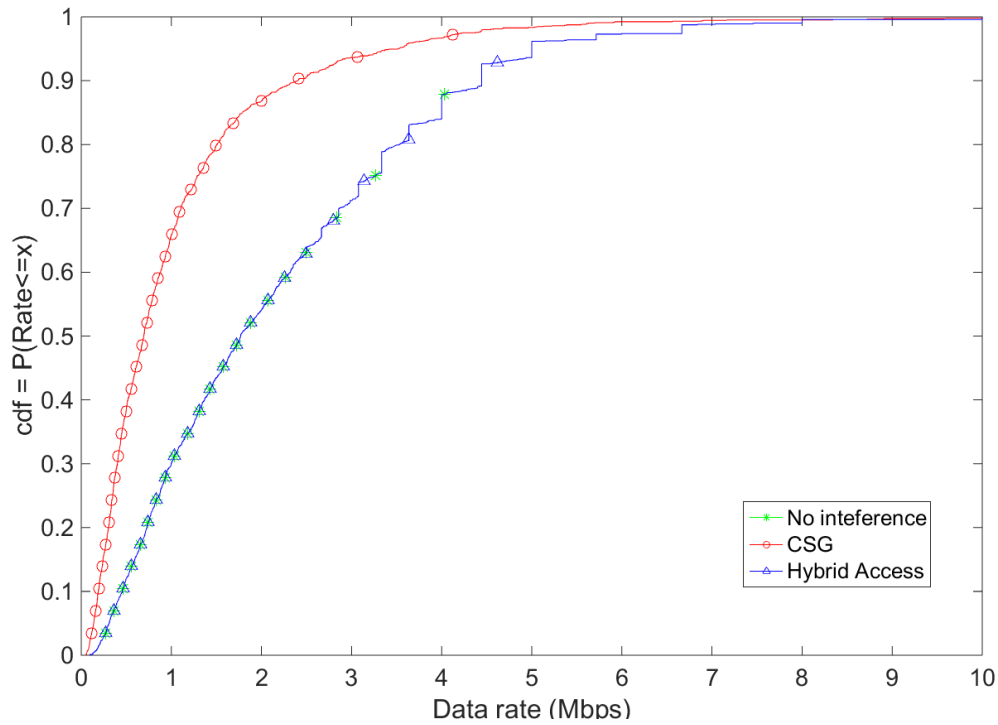
Εικόνα 44. Ψευδοκώδικας συνολικού μηχανισμού

Η αξιολόγηση του μηχανισμού έγινε εξομοιώνοντας δίκτυο με 12 macrocells ακτίνας 250 m όπως φαίνεται στην Εικόνα 45. Στο δίκτυο εναποθέσαμε τυχαία 250 femtocells και τους συνδρομητές τους σε τυχαία απόσταση έως και 15 m από τους σταθμούς βάσης. Ακόμη, 250 μη συνδρομητές χρήστες δημιουργήθηκαν για να αντιπροσωπεύσουν υποψήφιους χρήστες για υβριδική πρόσβαση. Οι υπόλοιπες παράμετροι ήταν ταυτόσημες με τις παραμέτρους εξομοίωσης που περιγράφηκαν στα προηγούμενα πειράματα.

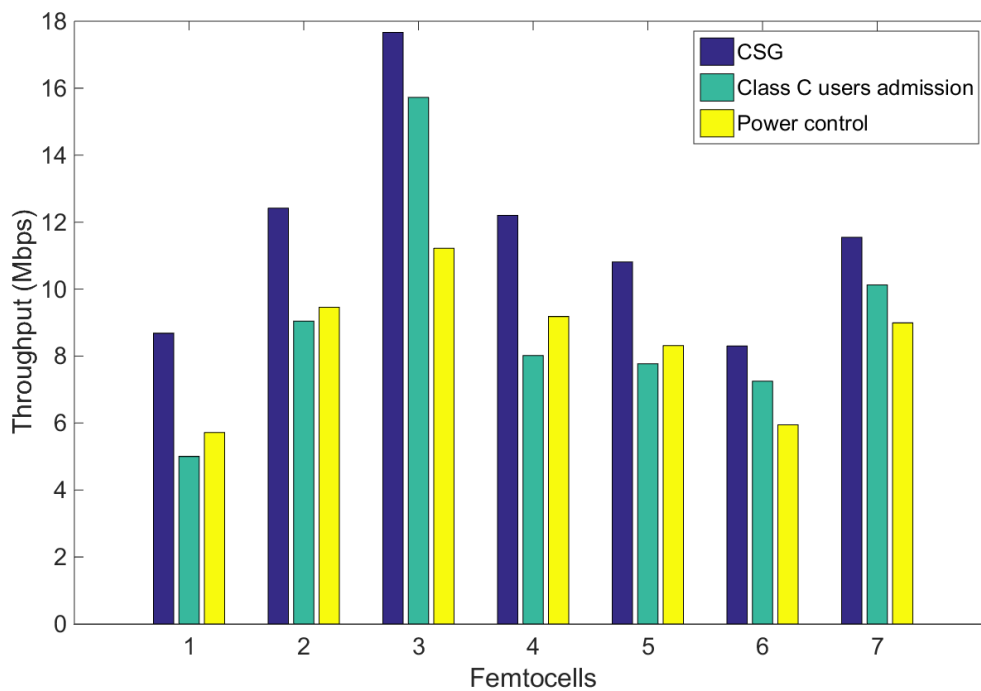


Εικόνα 45. Στιγμιότυπο της τοπολογίας του δικτύου κατά την εξομοίωση

Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης του συνολικού μηχανισμού, όπως αναμενόταν, ακολουθούσαν τα πειράματα των επιμέρους αλγορίθμων. Χωρίς να μπούμε σε λεπτομέρειες αφού η φυσική σημασία των αποτελεσμάτων περιγράφηκε στα αντίστοιχα σημεία παραπάνω, παρουσιάζουμε συνοπτικά τα αποτελέσματα. Στην Εικόνα 46 απεικονίζεται η επιτυχημένη αναπαραγωγή της ρυθμαπόδοσης των macrocell χρηστών (ή των χρηστών κατηγορίας Γ) μέσω υβριδικής πρόσβασης. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται η εφαρμογή του ελέγχου ισχύος σε μια συστοιχία 7 femtocells και πως συγκλίνει σε μια ισορροπημένη επίδραση της υβριδικής πρόσβασης κατά μήκος της συστοιχίας βελτιώνοντας την απόδοση των συνδρομητών όταν υφίστανται μεγάλη μείωση (femtocells 1,2,4,5) και μειώνοντας της απόδοσή τους όταν η επίδραση της υβριδικής πρόσβασης ποσοστιαία είναι μικρή (femtocells 3,6,7).



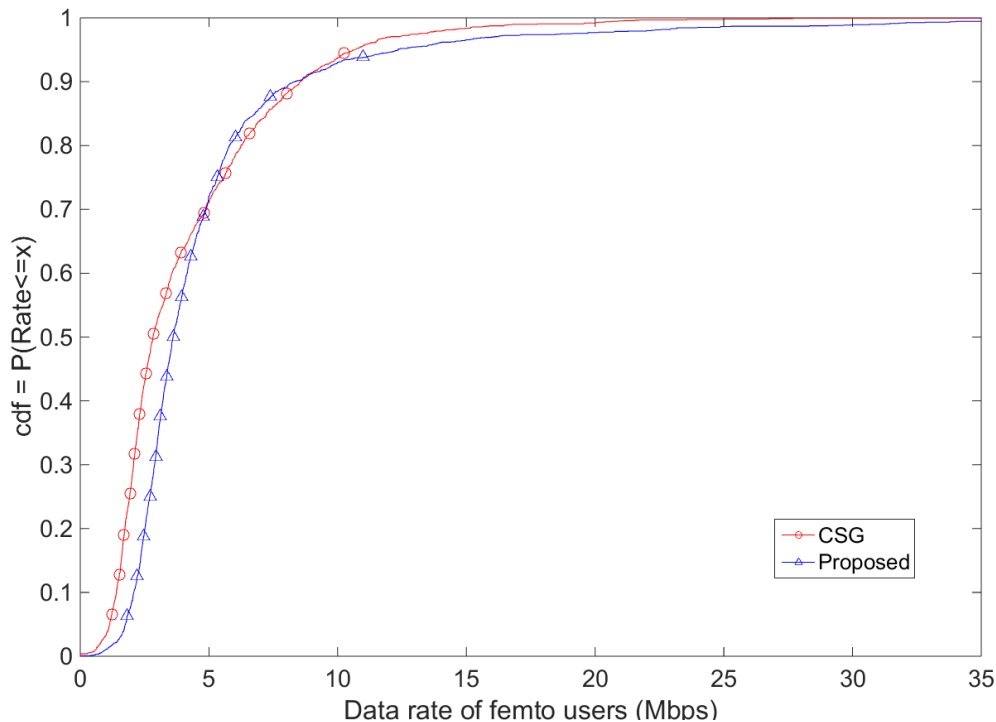
Εικόνα 46. CDF του ρυθμού μετάδοσης των macrocell χρηστών και αναπαραγωγή της μέσω της σύνδεσής τους στα femtocells



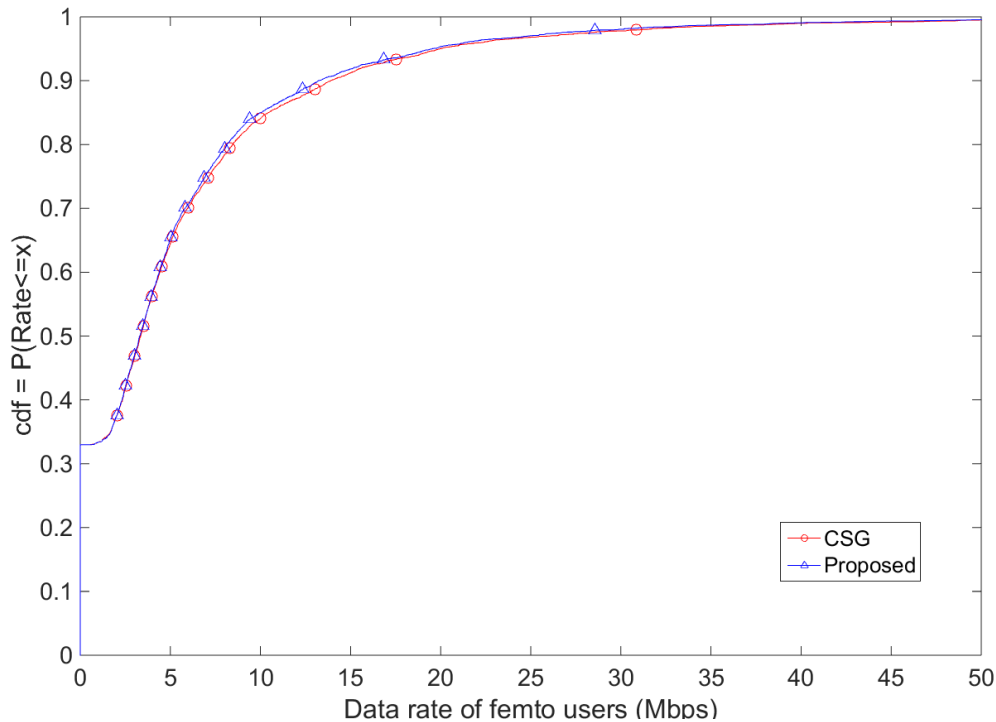
Εικόνα 47. Ρυθμαπόδοση των συνδρομητών 7 femtocells στα διαδοχικά βήματα του μηχανισμού: Λειτουργία κλειστής πρόσβασης, λειτουργία υβριδικής πρόσβασης και έλεγχος ισχύος

Στην Εικόνα 48 απεικονίζεται η χωρητικότητα πριν και μετά την ανακατανομή των συνδρομητικών χρηστών στα μέλη της συστοιχίας. Στην εικόνα φαίνεται μόνο η χωρητικότητα των χρηστών που συνδέονται σε femtocells που εμπλέκονται στην ανακατανομή. Καθώς αυτό συμβαίνει υπό τον όρο η συνολική προσφερόμενη χωρητικότητα να αυξάνει, παρατηρούμε τη βελτίωση που επιφέρει η εφαρμογή του μηχανισμού στα εν λόγω femtocell.

Τέλος, η Εικόνα 49 δείχνει τη χωρητικότητα του συνόλου των συνδρομητικών χρηστών κατά μήκος του δικτύου, συγκρίνοντας την απόδοσή τους σε κλειστή πρόσβαση και μετά την εφαρμογή όλων των σταδίων του αλγορίθμου. Παρατηρούμε ότι η μείωση στην απόδοση είναι σχετικά ασήμαντη αν συνυπολογίσουμε πως ενδιάμεσα του μηχανισμού εκατοντάδες μη συνδρομητές εξυπηρετούνται από τους ίδιους σταθμούς βάσης. Είναι η ανακατανομή των χρηστών που καθιστούν το μηχανισμό ικανό να αποζημιώνει τους χρήστες για την απώλεια πόρων λόγω της υβριδικής πρόσβασης και ο έλεγχος ισχύος που κάνει την επιμέρους εμπειρία της απώλειας αυτής λιγότερο εμφανή στους χρήστες.



Εικόνα 48. CDF της χωρητικότητας των femtocells οι χρήστες των οποίων παίρνουν μέρος στην ανακατανομή χρηστών. Η συνολική χωρητικότητα βελτιώνεται



Εικόνα 49. CDF της χωρητικότητας του συνόλου των συνδρομητικών χρηστών πριν και μετά την εφαρμογή του μηχανισμού. Ο έλεγχος ισχύος και η ανακατανομή των χρηστών καθιστούν την επίδραση της υβριδικής πρόσβασης ασήμαντη

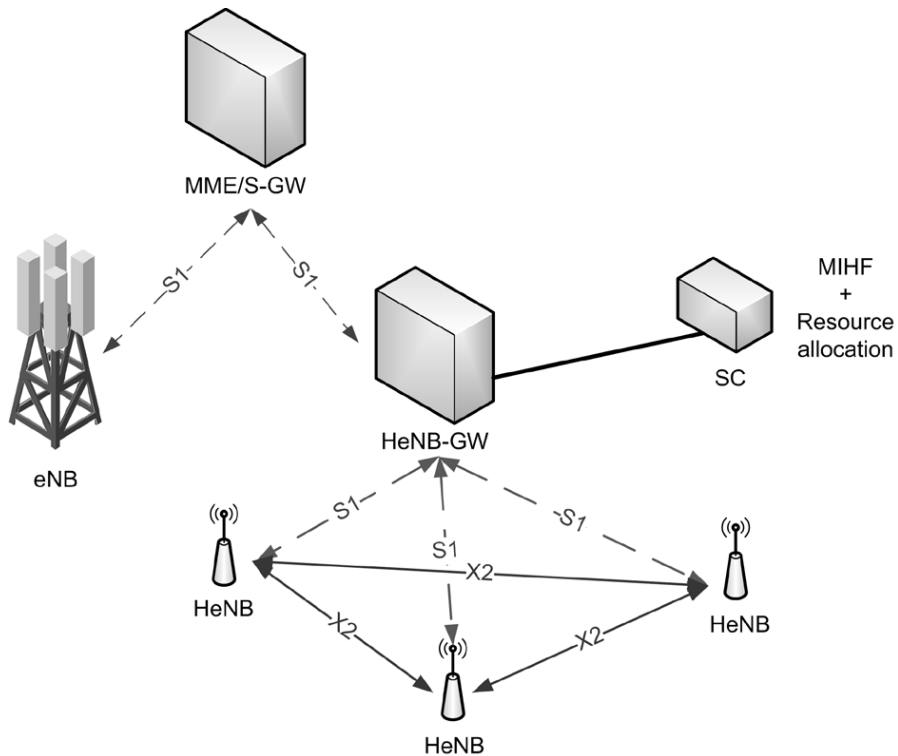
7.6. Περιορισμοί

Παρότι οι παράμετροι των εξομοιώσεων ήταν αρκετά γενικές ώστε να δείξουν το οφέλη των προτεινόμενων αλγορίθμων, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά την εφαρμογή τους και το βαθμό της χρησιμότητάς τους. Δεδομένου ότι οι ανωτέρω μηχανισμοί βασίζονται στο συντονισμό μεταξύ κοντινών femtocells, είναι προφανές ότι η πρακτικότητά τους εξαρτάται από την πυκνότητα εγκατάστασης στο femto στρώμα. Σε σενάρια αραιούς παρουσίας femtocells, ο προτεινόμενος έλεγχος ισχύος και η ανακατανομή των συνδρομητών μεταξύ των femtocells φυσικά δεν έχει εφαρμογή. Παρόλα αυτά ο ορισμός του κατωφλίου φάσματος για υβριδική πρόσβαση σε μη συνδρομητές έχει ακόμη εφαρμογή. Οι υπερ-πυκνές δομές small cells που αναμένονται στα μελλοντικά δίκτυα εξασφαλίζει ότι οι συστοιχίες αυτών θα είναι η συνήθης προσέγγιση, ειδικά δεδομένου ότι η εγκατάστασή τους δεν ακολουθεί τυχαία μοτίβα όπως υιοθετήσαμε συντηρητικά παραπάνω, αντίθετα τείνουν να σχηματίζουν συστοιχίες, ακολουθώντας το μοτίβο παρουσίας του πληθυσμού (π.χ. πολυκατοικίες ή εταιρικά κτίρια). Ως εκ τούτου, θεωρούμε τα παραπάνω αποτελέσματα συντηρητικά.

Ο έλεγχος ισχύος εξαρτάται επίσης και από την αρχική ανισορροπία στο διατιθέμενο φάσμα για υβριδική πρόσβαση από τα femtocells. Αν αυτά έχουν αφιερώσει παρόμοιο μερίδιο των πόρων τους σε μη συνδρομητές, ο έλεγχος ισχύος δεν έχει κάποια επίδραση στη μετάδοση των femtocells και οδηγεί μόνο σε αχρείαστο υπολογιστικό

βάρος. Αντίθετα, αναδεικνύεται περισσότερο σε σενάρια όπου κάποια femtocells έχουν αναθέσει μεγάλο μερίδιο φάσματος και κάποια λίγο ή καθόλου.

Τέλος, ίσως δύο από τα σημαντικότερα εμπόδια σε καταναμημένους μηχανισμούς στο femto στρώμα, είναι οι περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες αυτών και οι δυσκολίες στον μεταξύ τους συντονισμό. Πλέον, όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 5 η επικοινωνία μεταξύ των femtocells υποστηρίζεται επίσημα σε LTE-A δίκτυα μέσω του πρωτοκόλλου X2, καθιστώντας εφικτό τον καταναμημένο συντονισμό χωρίς την παρεμβολή του κεντρικού δικτύου. Παραμένει βέβαια ο περιορισμός στις υπολογιστικές δυνατότητές τους και στην αύξηση της σηματοδοσίας στους μηχανισμούς αυτούς. Νέες προσεγγίσεις που στόχο έχουν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά αυτά τα ζητήματα μελετώνται όπως για παράδειγμα το [80] που προτείνει την ύπαρξη ξεχωριστής οντότητας ονόματι Spectrum Coordinator, που συνδέεται στην HeNB-GW και είναι υπεύθυνη για την εφαρμογή της πολιτικής μετάδοσης που θα εφαρμόζουν τα συνδεδεμένα σε αυτή femtocells, όπως φαίνεται στην Εικόνα 50.



Εικόνα 50. Προσθήκη του spectrum coordinator (SC) στην αρχιτεκτονική των femtocells ([80])

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΑΜΟΝΗΣ

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε και αξιολογούμε τον κατανεμημένο μηχανισμό που προτείνουμε για μέλη συστοιχιών femtocells και βασίζεται στην επιλεκτική αξιοποίηση της κατάστασης αναμονής με στόχο ενεργειακά κέρδη και βελτίωση στους ρυθμούς μετάδοσης των χρηστών.

8.1. Αλγόριθμος κατάστασης αναμονής

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η κατάσταση αναμονής στους σταθμούς βάσης είναι ένα γνωστό εργαλείο εξοικονόμησης στο macro στρώμα. Καθώς σημαντικό κόστος για τους παρόχους προέρχεται από την παροχή ισχύος στους σταθμούς βάσης, αποφασίζεται οι σταθμοί βάσης να απενεργοποιούνται εν μέρει όταν οι συνθήκες κίνησης το επιτρέπουν, όπως συμβαίνει τις νυχτερινές ώρες. Η απόφαση στο macro στρώμα είναι κεντρική και εξαρτάται από τα στοιχεία όλων των εμπλεκόμενων περιοχών. Με την ανάδειξη του femto στρώματος σε κρίσιμο παράγοντα, πολλές τεχνολογίες από το macro στρώμα ψάχνουν μηχανισμούς προσαρμογής τους σε αυτό. Το πλήθος των femtocells τα καθιστά σημαντικό παράγοντα ενεργειακής επιβάρυνσης σε ένα δίκτυο. Οι μηχανισμοί κατάστασης αναμονής όμως δεν μπορούν να μεταφραστούν απευθείας από το macro στρώμα, για δύο κυρίως λόγους:

Πρώτον, η κεντρική διαχείριση είναι ιδιαίτερα δύσκολη σε femtocells. Αφενός η αύξηση της σηματοδοσίας λόγω του μεγάλου αριθμού τους θα απαιτούσε μεγάλο όγκο πληροφορίας να συγκεντρωθεί κεντρικά. Αφετέρου η τυχαία εγκατάστασή τους δυσχεραίνει τον συντονισμό, ενώ η διαδικασία ενεργοποίησης – απενεργοποίησης είναι δραματικά γρηγορότερη σε σχέση με τη διαδικασία σε macro σταθμούς. Τα παραπάνω καθιστούν τις κατανεμημένες δυναμικές λύσεις τις πλέον ελκυστικές και εφικτές. Δεύτερον, ο εξωτερικός έλεγχος των ιδιωτικών σταθμών βάσης που είναι τα femtocells δημιουργεί αίσθηση παρεμβολής στους χρήστες. Επιπλέον ενδεχόμενος μηχανισμός θα πρέπει να εγγυάται σε κάθε συνδρομητικό χρήστη μηδενική μείωση στους ρυθμούς μετάδοσης. Αυτό με τη χρήση macro σύνδεσης είναι ιδιαίτερα δύσκολο και γειτονικά femtocells πρέπει να ενεργοποιηθούν τα οποία πιθανόν να λειτουργούν σε λειτουργία κλειστής πρόσβασης και να απαιτούνται κίνητρα (συνήθως χρηματικά) προκειμένου να επιτρέψουν υβριδική πρόσβαση.

Συνοψίσαμε τα αναδυόμενα ζητήματα στην εφαρμογή της κατάστασης αναμονής (αναλυτικότερα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5) ώστε να γίνουν κατανοητοί οι άξονες στους οποίους βασίσαμε τον μηχανισμό μας. Οι άξονες αυτοί είναι:

1. Ο μηχανισμός είναι κατανεμημένος. Πρακτικά η εγκατάσταση femtocells ακολουθεί τα μοτίβα της πυκνότητας του πληθυσμού, ήτοι συγκέντρωση κοινοτήτων σε συγκεκριμένες περιοχές. Καθώς όπως αναφέραμε η κατάσταση αναμονής εκμεταλλεύεται την ύπαρξη γειτονικών σταθμών, ο μηχανισμός εφαρμόζεται σε αυτές τις συστοιχίες femtocells όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο.

II. Ο κύριος στόχος είναι η μείωση των ενεργών femtocells όταν αυτό δεν απαιτείται και παρόμοια κάλυψη ή και καλύτερη μπορεί να επιτευχθεί με έξυπνη αξιοποίηση μικρότερου αριθμού σταθμών βάσεων. Πέραν της απλής μείωσης κίνησης που χαρακτηρίζει τα macrocells, η κλειστή πρόσβαση των femtocells δυσχεραίνει την κατάσταση, καθώς οδηγεί σε υπερβολική και μη απαραίτητη εγκατάστασή τους οδηγώντας σε αντίθετα αποτελέσματα από τα επιδιωκόμενα. Εξαιτίας αυτού, ενώ ο αριθμός macro σταθμών ακολουθεί τις ανάγκες των χρηστών σε κάλυψη και χωρητικότητα, η εγκατάσταση των femtocells αντανακλά την αποκλειστικότητα των χρηστών. Για παράδειγμα αν μια περιοχή στην οποία ζουν 10 χρήστες καλυπτόταν επαρκώς με 3 femtocells, ο αριθμός τους θα ανέβαινε αχρείαστα αν αυτοί οι χρήστες είναι 5 ζευγάρια που ζουν σε ξεχωριστά διαμερίσματα, με το καθένα να κατέχει το δικό του femtocell.

Ενώ κάθε επιμέρους εγκατάσταση θα ωφελήσει τους συνδρομητές τους, υπάρχει ένα σημείο στην πυκνότητα εγκατάστασης των femtocells, που όταν ξεπεραστεί, οι συνολικές παρεμβολές από τα υπόλοιπα ίσως καταστήσουν τη συνολική χρήση αυτών αρνητική. Ένα ακραίο παράδειγμα αυτού θα ήταν ένας χρήστης κάτοχος femtocell να δέχεται τόσες παρεμβολές από τα γειτονικά που θα απολάμβανε καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης αν κανένας στην περιοχή δεν είχε femtocell. Ο πρώτος στόχος λοιπόν, είναι να βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός ενεργών femtocells με τη σωστή ισορροπία των κερδών και των προβλημάτων που προκύπτουν από τη χρήση αυτών.

III. Εφόσον γίνεται χρήση των πόρων γειτονικών σταθμών, υιοθετούμε υβριδική πρόσβαση. Ορίζουμε όπως και στον προηγούμενο αλγόριθμο τη δική μας τροποποιημένη πολιτική υβριδικής πρόσβασης κατά την οποία το femtocell λειτουργεί ακόμα με βάση τη CSG λίστα του, την οποία όμως επεκτείνει ώστε να περιλαμβάνει χρήστες που ανήκουν στην CSG των femtocells της ίδιας συστοιχίας. Η πολιτική αυτή είναι αρκετά συντηρητική με την προσθήκη πεπερασμένου αριθμού χρηστών που μπορούν να συνδεθούν σε κάθε femtocell.

IV. Τέλος, εφόσον γίνεται χρήση υβριδικής πρόσβασης, δηλαδή η εκμετάλλευση ιδιωτικών πόρων από εξωτερικές οντότητες και απενεργοποίηση ιδιωτικών σταθμών, απαιτείται η εισαγωγή κινήτρων στους χρήστες στους οποίους ανήκουν οι πόροι αυτοί. Και στους χρήστες οι οποίοι θα πρέπει να ανακατανομηθούν αν ο σταθμός τους επέλθει σε κατάσταση αναμονής και στους συνδρομητές οι οποίοι δέχονται μη συνδρομητικούς χρήστες. Σε αντίθεση με τη συνήθη περίπτωση που είναι η χρηματική αποζημίωση των χρηστών αυτών ανάλογα με τους πόρους που διαθέτουν, η προσέγγισή μας βασίζεται στην παροχή κινήτρων επίδοσης. Δηλαδή, η εφαρμογή του μηχανισμού απενεργοποίησης ορισμένων σταθμών θα γίνεται μόνο αν τα εμπλεκόμενα μέρη υποστούν βελτίωση στις υπηρεσίες που απολαμβάνουν.

Όπως γίνεται ξεκάθαρο από τα παραπάνω, ο μηχανισμός βασίζεται στη συνδιαλλαγή μεταξύ της κατάστασης αναμονής και της υβριδικής πρόσβασης των femtocells. Με βάση τους προαναφερόμενους άξονες, και οι χρήστες που αλλάζουν σταθμό βάσης και οι χρήστες του femtocell που τους δέχεται πρέπει να δουν αύξηση στους ρυθμούς μετάδοσής τους. Οι μεν πρώτοι δέχονται την απενεργοποίηση των

σταθμών τους αν η σύνδεση στους γειτονικούς τους προσφέρει καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Οι δε δεύτεροι δέχονται μη συνδρομητές να συνδεθούν στο σταθμό βάσης τους αν η απενεργοποίηση του σταθμού τους αποφέρει επαρκή μείωση παρεμβολών που οδηγεί σε αύξηση της δική τους απόδοσης.

Στις δημιουργούμενες συστοιχίες λοιπόν, ο μηχανισμός ελέγχει αν υπάρχουν femtocells για τα οποία η κατάσταση αναμονής θα ήταν ωφέλιμη. Όταν αυτό συμβεί, οι ενεργοί χρήστες του διανέμονται στους γειτονικούς σταθμούς βάσης τα οποία εξετάζονται αρχίζοντας από το κοντινότερο. Εκφράζοντάς το αυτό με βάση το μοντέλο της ενότητας 6.1, παίρνουμε:

$$THR_{NEW} \geq THR_{OLD} \quad (9.1)$$

ή

$$SINR_{NEW} \geq \frac{(1+aSINR_{OLD})^{(N_2+1)/N_1-1}}{a} \quad (9.2)$$

όπου $SINR_{NEW}$ και $SINR_{OLD}$ είναι το SINR που ο χρήστης θα είχε αν συνδεόταν στο γειτονικό ή στο δικό του femtocell, αντίστοιχα. N_2 είναι ο αριθμός των συνδρομητών του γειτονικού femtocell και N_1 του δικού του. Είναι εμφανές πως η ανίσωση είναι αρκετά πιθανή όταν $N_1 \sim N_2$, και δεδομένου ότι στον υπολογισμό του $SINR_{NEW}$ υπάρχει μια λιγότερη πηγή παρεμβολών (το femtocell που μπαίνει στην κατάσταση αναμονής).

Αντίστοιχα εκφράζουμε τη διαφορά στην απόδοση για τους συνδρομητές που δέχονται νέους χρήστες. Η συνθήκη που προκύπτει είναι ίδια με την προηγούμενη με τη διαφορά ότι $N_1 = N_2$, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$SINR_{NEW} \geq \frac{(1+aSINR_{OLD})^{(N_2+1)/N_2-1}}{a} \quad (9.3)$$

Για να αυξήσουμε την πιθανότητα των παραπάνω ανισοτήτων, επιτρέπουμε μόνο μία σύνδεση εξωτερικού χρήστη σε κάθε γειτονικό femtocell, ήτοι ένα femtocell υποψήφιο για κατάσταση αναμονής με 3 χρήστες πρέπει να αναδιανείμει τους χρήστες τους σε τρία διαφορετικά γειτονικά femtocells. Για τον ίδιο λόγο (την αύξηση της πιθανότητας οι περιορισμοί του μηχανισμού να καλύπτονται) και για να επιτύχουμε το μέγιστο όφελος, ο αρχικός έλεγχος για την εύρεση femtocell για απενεργοποίηση ξεκινά από το femtocell που οι χρήστες του δέχονται τις μεγαλύτερες παρεμβολές ανά συνδρομητή. Ο έλεγχος μετά εξετάζει το σταθμό με τις δεύτερες μεγαλύτερες παρεμβολές κ.ο.κ. Οι εντονότερες παρεμβολές υποδηλώνουν αυξημένη πιθανότητα να υπάρχουν πολύ κοντινοί σταθμοί βάσης, άρα και μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθεί γείτονας για αποτελεσματική αναδιανομή χρηστών όπως και η μείωση της παρεμβολής από ενδεχόμενη απενεργοποίηση να ξεπεράσει την επίπτωση του παραπάνω χρήστη για το υβριδικό femtocell. Η Εικόνα 51 συνοψίζει τα κυριότερα σημεία του μηχανισμού.

Algorithm 1 Proposed scheme

```

1: Define the members of each cluster
2: if femtocell  $i \in$  cluster and distance  $u - i < 20m$  then
3:   femtocell  $u \in$  cluster
4: end if
5: for each cluster do
6:   Go through the femtocells in cluster to find candidates for
   sleep mode starting from the one with the greatest received
   interference per user, then the second one and so on
7:   for each femtocell  $\in$  cluster do
8:     Go through the other femtocells in cluster starting from
     the closest to find candidates for hybrid mode to reallocate
     sleeping femtocell users
9:     for each femtocell  $\in$  same cluster do
10:      Constraint 1: Reallocated users retain or improve perfor-
      mance  $SINR_{New} \geq \frac{(1+aSINR_{Old})^{(N_2+1)/N_1-1}}{a}$ 
11:      Constraint 2: Users of hybrid mode femtocell
      retain or improve performance  $SINR_{New} \geq$ 
       $\frac{(1+aSINR_{Old})^{(N_2+1)/N_2-1}}{a}$ 
12:      if Constraint 1 & 2 stand then
13:        Appointed femtocells go to sleep and hybrid mode
14:        break;
15:      end if
16:    end for
17:  end for
18: end for
19: exit

```

Εικόνα 51. Ψευδοκώδικας μηχανισμού

8.2. Ενεργειακή απόδοση

Ομολογουμένως, οι ορισμοί που τίθενται στον παραπάνω μηχανισμό είναι αρκετά αυστηροί ώστε να εξασφαλίσουν για κάθε εμπλεκόμενο χρήστη ξεχωριστά, την αύξηση του ρυθμού μετάδοσής τους ή τουλάχιστον τη διατήρησή του. Η αυστηρότητα των περιορισμών οδηγεί σε μικρότερο αριθμό femtocells να μπαίνουν σε κατάσταση αναμονής, άρα και σε μικρότερα ενεργειακά κέρδη από το μηχανισμό. Παρόλα αυτά υπάρχουν σενάρια στα οποία η ενεργειακή απόδοση έχει μεγαλύτερη βαρύτητα και παραχωρήσεις μπορούν να γίνουν από μέρους των χρηστών. Προς αυτήν την κατεύθυνση εξετάζουμε δύο παραλλαγές του παραπάνω μηχανισμού όπου χαλαρώνουμε τους περιορισμούς προς όφελος των ενεργειακών κερδών.

Στην πρώτη παραλλαγή, αντί να απαιτούμε την αύξηση της επίδοσης κάθε επιμέρους χρήστη, απαιτούμε να αυξάνεται το σύνολο της χωρητικότητας που

προσφέρεται από τα femtocells που εμπλέκονται. Στην δεύτερη παραλλαγή, χαλαρώνουμε τους περιορισμούς περισσότερο, απαιτώντας η συνολική χωρητικότητα της συστοιχίας να αυξάνεται. Στις παραλλαγές αυτές, περιπτώσεις που η εφαρμογή του μηχανισμού θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη αύξηση κάποιων χρηστών σε σχέση με τη μείωση που επιφέρει σε άλλους χρήστες, γίνονται δεκτές αντίθετα με τον αρχικό μηχανισμό. Ως εκ τούτου αυξάνεται η πιθανότητα οι σταθμοί βάσης να περιέλθουν σε κατάσταση αναμονής άρα και τα συνολικά ενεργειακά κέρδη.

8.3. Παράμετροι εξομοίωσης

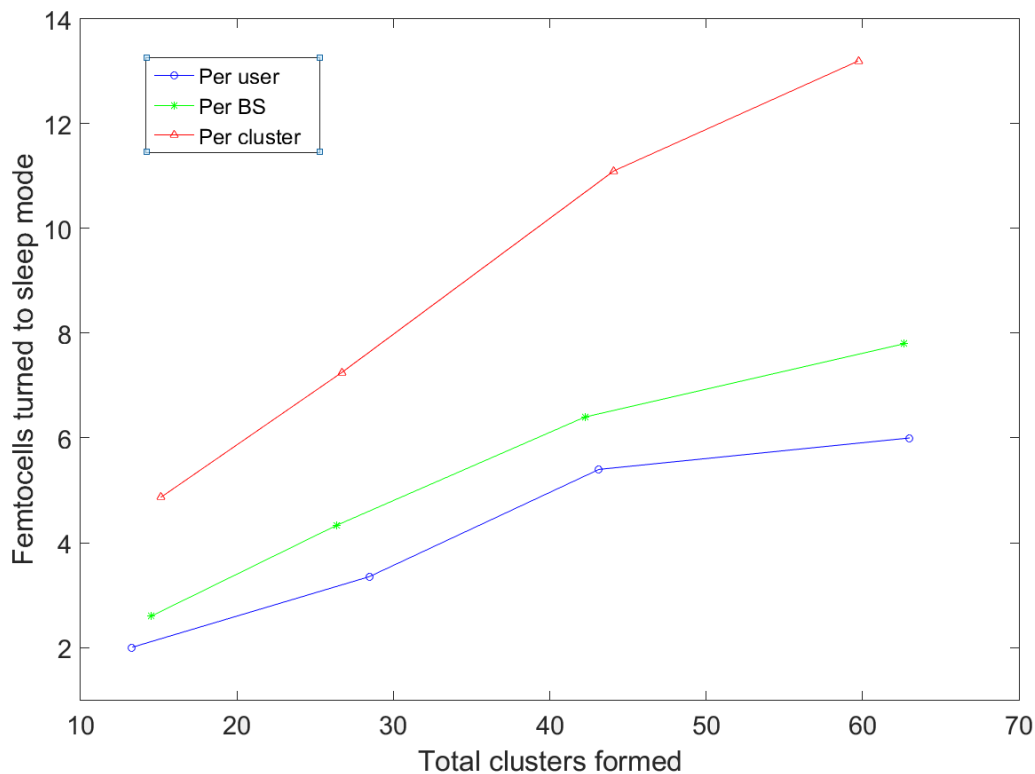
Για της ανάγκες της αξιολόγησης του μηχανισμού, εξομοιώσαμε ένα δίκτυο αποτελούμενο από 9 macrocells ακτίνας 250m. Στην περιοχή εγκαταστήσαμε τυχαία femtocells, καθένα εκ των οποίων είχε έως τρεις συνδρομητές, ενώ εξομοιώσαμε και macrocell χρήστες. Για την καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων, εξετάσαμε 4 διαφορετικές περιπτώσεις πυκνότητας χρηστών. Οι πυκνότητες που εξομοιώθηκαν καθώς και άλλες παράμετροι εξομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Η εξομοίωση βασίστηκε στην LTE-A τεχνολογία και στον εξομοιωτή LTE του [79]. Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται με CDF εξάχθηκαν από 20 επαναλήψεις των πειραμάτων.

Πίνακας 7. Παράμετροι εξομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή			
Macrocells	9			
Ακτίνα macrocell	250m			
Femtocells	250	350	450	550
Μη συνδρομητές	100	140	180	220
Συνδρομητές ανά femtocell	1-3			
Διαθέσιμο φάσμα	20MHz			
Συχνότητα λειτουργίας	2GHz			
Ισχύς macro BS	46dBm			
Ισχύς femto BS (max)	21 dBm			

8.4. Πειραματικά αποτελέσματα

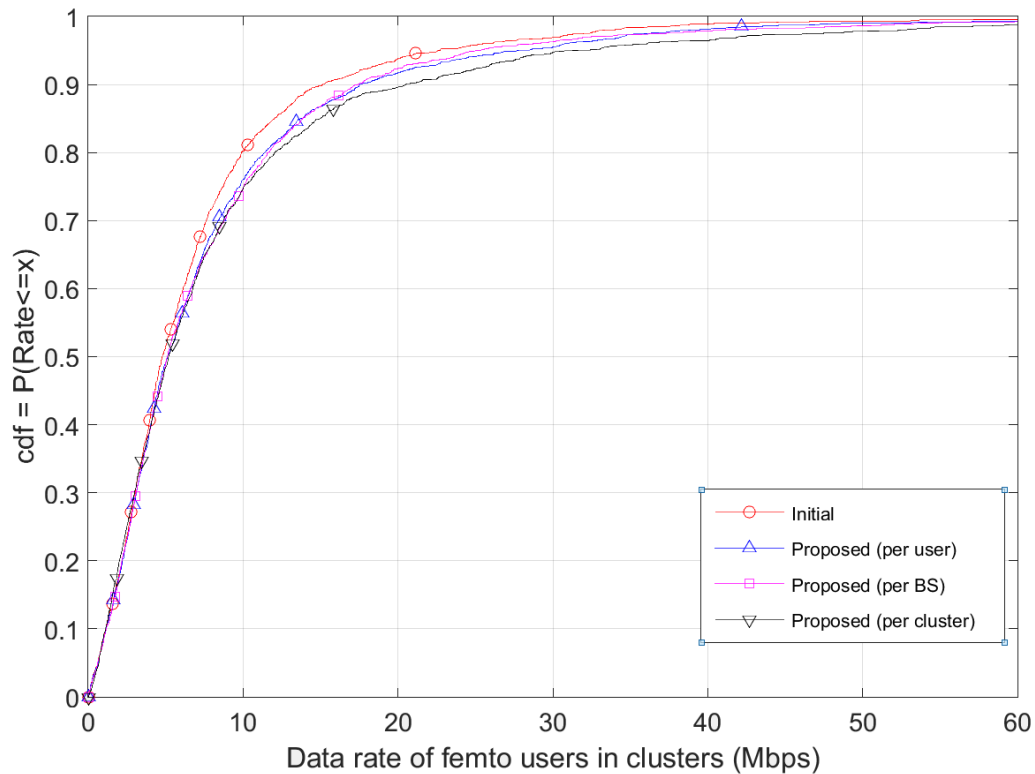
Η πυκνότητα των femtocells στην περιοχή επιδρά στον αριθμό αυτών που επιλέγονται να μουν σε κατάσταση αναμονής. Όσο η πυκνότητα αυξάνεται, μεγαλώνει και ο αριθμός των σχηματιζόμενων συστοιχιών. Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 52, για την αυστηρότερη περίπτωση όπου ο μηχανισμός εφαρμόζεται όταν αποφέρει κέρδος σε κάθε χρήστη, υπάρχει 10% πιθανότητα η συστοιχία να έχει femtocell σε κατάσταση αναμονής. Για την περίπτωση του χαλαρωμένου κριτηρίου που απαιτεί συνολικό κέρδος στην χωρητικότητα της συστοιχίας, η πιθανότητα φθάνει το 25%. Όπως θα δούμε παρακάτω, αυτό έχει μεγάλη επίδραση στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου και τη ρυθμαπόδοση των χρηστών.



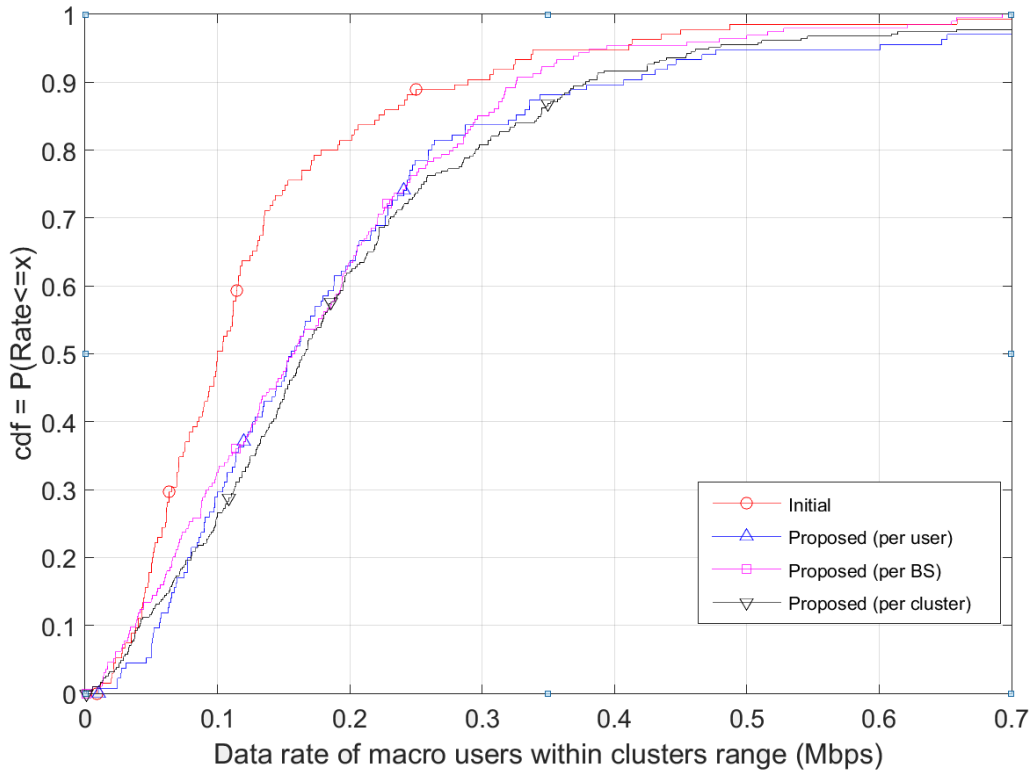
Εικόνα 52. Συνολικά σχηματιζόμενες συστοιχίες

Η Εικόνα 53 απεικονίζει τη CDF της ρυθμαπόδοσης των χρηστών που είναι συνδρομητές σε κάθε femtocell που ανήκει σε συστοιχία. Η αύξηση της απόδοσης είναι προφανής και είναι αποτέλεσμα δύο παραγόντων. Πρώτον, βάσει του μηχανισμού, οι συνδρομητές που εμπλέκονται επιτρέπουν την αναδιανομή όταν από αυτήν προκύπτει βελτίωση στη ρυθμαπόδοση για κάθε χρήστη, για το σύνολο των χρηστών που προσφέρουν τα femtocells και στη συνολική χωρητικότητα των συστοιχιών ανάλογα με την αυστηρότητα των κριτηρίων που υιοθετούμε. Ως εκ τούτου, όταν ο μηχανισμός εφαρμόζεται και βάσει της προηγούμενης εικόνας προκύπτουν απενεργοποιημένα femtocells άρα και αναδιανομή χρηστών, θα επιφέρει και βελτίωση στην εν λόγω απόδοση.

Δεύτερον, όταν κάποια femtocells απενεργοποιούνται παύουν να αποτελούν πηγές παρεμβολής για τους κοντινούς συνδρομητικούς χρήστες. Η μείωση των παρεμβολών επιδρά θετικά σε αυτούς βελτιώνοντας ακόμα περισσότερο τη συνολική χωρητικότητα. Αυτό φυσικά επηρεάζει και τυχόν μη συνδρομητικούς χρήστες στην περιοχή, οι οποίοι και αυτοί υφίστανται βελτίωση στη απόδοσή τους. Η Εικόνα 54 δείχνει την βελτίωση αυτή σε αρχικές συνθήκες και σε κάθε μία από τις προσεγγίσεις του μηχανισμού.



Εικόνα 53. Ρυθμαπόδοση των συνδρομητικών χρηστών σε femtocells συστοιχιών

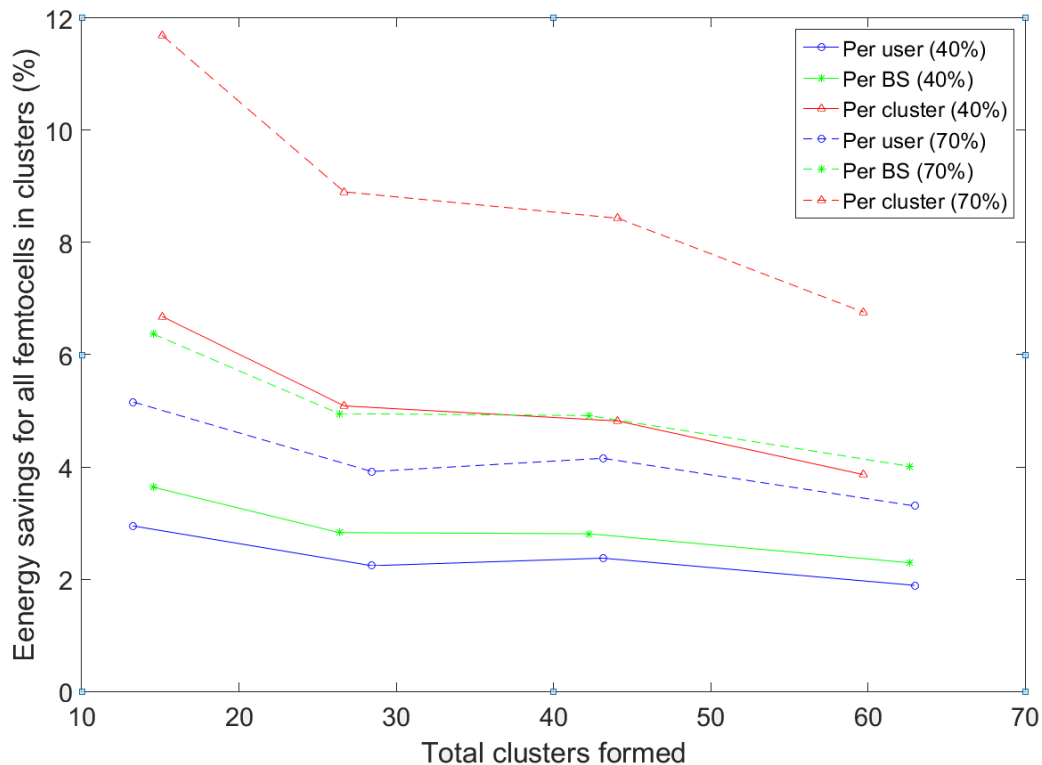


Εικόνα 54. Ρυθμαπόδοση μη συνδρομητικών χρηστών στην εμβέλεια συστοιχιών femtocells

Τέλος, υπολογίζουμε τα ενεργειακά κέρδη για τις τρεις προσεγγίσεις του αλγορίθμου και για διαφορετικές πυκνότητες εγκατάστασης femtocells. Εκτιμούμε τα κέρδη για τις δύο προσεγγίσεις της μερικής απενεργοποίησης που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 6.2, με το ένα να οδηγεί σε 40% ενεργειακά κέρδη ανά femtocell και το άλλο σε 70%. Είναι προφανές από την Εικόνα 55 ότι η βελτιστοποίηση βάσει συστοιχίας οδηγεί στα μεγαλύτερα οφέλη, αφού οι πιο χαλαρωμένοι περιορισμοί οδηγούν σε αυξημένο αριθμό σταθμών σε κατάσταση αναμονής. Κάθε συστοιχία περιλαμβάνει κατά μέσο όρο 2.5 femtocells και η πιθανότητα για το femtocell να μπει σε κατάσταση αναμονής ανά συστοιχία είναι 10% και 25% για την αυστηρότερη και χαλαρότερη προσέγγιση, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, τα ενεργειακά κέρδη είναι 3% και 6% σε όλες τις συστοιχίες, αντίστοιχα για την πρώτη προσέγγιση της κατάστασης αναμονής (40% κέρδος). Παρόμοια, αναμένουμε και τα ενεργειακά κέρδη κατά 5% και 9% για τη δεύτερη έκδοση της κατάστασης αναμονής (70%).

Ενώ το συνολικό ποσοστό μπορεί να φαίνεται μικρό, τα ενεργειακά κέρδη ανά cluster όταν περιέχουν femtocell σε κατάσταση αναμονής, είναι κατά μέσο όρο 15% και 25% για τις δύο εκδόσεις της αναμονής. Αν συνυπολογίσουμε τη βελτίωση στη χωρητικότητα για την πλειοψηφία των εμπλεκόμενων χρηστών, τα κίνητρα των χρηστών ή των ιδιοκτητών femtocells για υιοθέτηση της παραπάνω πολιτικής είναι σημαντικά. Επί προσθέτως, τα παραπάνω αντιπροσωπεύουν τη χειρότερη περίπτωση κατά την οποία όλοι οι συνδρομητές κάθε femtocell είναι συνεχώς ενεργοί. Τις χρονικές στιγμές που ένα femtocell εξυπηρετεί μόνο ένα μέρος των συνδρομητών ή και κανέναν, η πιθανότητα να

περάσει σε κατάσταση αναμονής αυξάνεται δραματικά. Ως εκ τούτου, οι παραπάνω εκτιμήσεις αντιπροσωπεύουν το κάτω όριο των επιτεύξιμων ενεργειακών κερδών.



Εικόνα 55. Ποσοστιαία (%) ενεργειακά κέρδη για όλα τα femtocells που ανήκουν σε συστοιχίες

8.5. Έλεγχος ισχύος

Τα παραπάνω αποτελέσματα υπήρξαν αρκετά ενθαρρυντικά και έδειξαν ότι υπάρχει σημαντικό περιθώριο βελτίωσης ενός δικτύου μέσω του σωστού συντονισμού μεταξύ των σταθμών βάσεων. Αυτό μας επέτρεψε να αναζητούμε μεθόδους να εκμεταλλευτούμε στο έπακρο το περιθώριο αυτό προκειμένου να αυξήσουμε τον θετικό αντίκτυπο της καλύτερης αξιοποίησης των υποδομών του δικτύου. Είτε αυτό σημαίνει μικρότερος αριθμός ενεργών σταθμών άρα και αυξημένη ενεργειακή απόδοση, είτε σημαίνει αύξηση στην παρεχόμενη ρυθμιστική ρυθμική των συνδρομητών του εν λόγω δικτύου.

Σε αυτήν την κατεύθυνση λοιπόν, εισάγουμε στον παραπάνω αλγόριθμο έλεγχο ισχύος προκειμένου να αυξήσουμε τον αριθμό των απενεργοποιημένων femtocells. Σημαντικό στοιχείο του παραπάνω αλγόριθμου ήταν οι περιορισμοί που έπρεπε να καλύπτονται προκειμένου ένας σταθμός που ελέγχεται αν μπορεί να τεθεί σε κατάσταση αναμονής, να απενεργοποιηθεί. Στην προσπάθειά μας να αυξήσουμε τις πιθανότητες αυτό να συμβεί, επιτρέπουμε στους γειτονικούς σταθμούς που θα αναπληρώσουν τις ανάγκες σε κίνηση του σταθμού που θα αδρανοποιηθεί, να αναζητήσουν εφικτά επίπεδα ισχύος μετάδοσης, ώστε αυτό να συμβεί και οι περιορισμοί να καλυφθούν. Φυσικά, η αλλαγή στα επίπεδα ισχύος ενός ή και παραπάνω σταθμών, αν κάτι τέτοιο απαιτείται, θα είναι

πάντοτε ανοδική. Κάτι τέτοιο αλλάζει την ακτίνα επίδρασης του αλγόριθμου σε όλη τη συστοιχία, αφού τα αυξημένα επίπεδα ισχύος θα αυξήσουν τις παρεμβολές. Αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στα κριτήρια που πρέπει να καλύπτονται προκειμένου ο αλγόριθμος να έχει συνολικά θετική επίδραση στο δίκτυο.

Ας τυποποιήσουμε λοιπόν την αλλαγή στον αλγόριθμο και ας περιγράψουμε τα βήματα στην παραλλαγή αυτή. Διατηρούμε τα κριτήρια του αλγόριθμου όπως ορίστηκαν και αν αυτά καλύπτονται, τότε δεν υπεισέρχεται αλλαγή και ο αλγόριθμος προχωρά κανονικά στην απενεργοποίηση του σταθμού και την ανταλλαγή χρηστών. Αν όμως αυτά δεν καλύπτονται, και σε ενδεχόμενη απενεργοποίηση οι υπόλοιποι σταθμοί δεν μπορούν να αντισταθμίσουν τις πρότερες υπηρεσίες, αναζητούμε αν υπάρχει εφικτό επίπεδο ισχύος των υπόλοιπων σταθμών που θα είχαν αποτέλεσμα την κάλυψη των κριτηρίων. Αν υπάρχει και είναι εντός των νόμιμων ορίων, τότε για τους χρήστες που μετατίθενται σε γειτονικό σταθμό, αυτό θα υπολογίζεται βάσει του μοντέλου του κεφαλαίου 6 ως:

$$P_{Inc1} \geq \frac{R * (\Delta f + \sum_{B'} P_{B'} G_{u,B'}) - P_{Old} G_{u,N}}{G_{u,N}}$$

Όπου $\Delta f + \sum_{B'} P_{B'} G_{u,B'}$ δηλώνει τις παρεμβολές που υφίσταται ο χρήστης όταν συνδέεται στο νέο femtocell, $G_{u,N}$ το νέο του κέρδος, P_{Old} η ισχύς του αρχικού του σταθμού βάσης και R :

$$R = \frac{(1 + aSINR_{OLD})^{(N_2+1)/N_1} - 1}{a}$$

με $SINR_{OLD}$ το αρχικό SINR του χρήστη και N_2, N_1 ο αριθμός των χρηστών που εξυπηρετούν ο νέος και ο αρχικός σταθμός αντίστοιχα.

Παρόμοια, για τους συνδρομητικούς χρήστες των σταθμών που δέχονται εξωτερικούς χρήστες μέσω υβριδικής πρόσβασης, η αναπαραγωγή της πρότερης απόδοσής τους θα προέρχεται αφενός από τη μείωση της παρεμβολής λόγω του σταθμού που θα απενεργοποιηθεί, αφενός (αν απαιτείται) από την αύξηση της ισχύς του σταθμού σε:

$$P_{Inc2} \geq \frac{R * (\Delta f + \sum_{B'} P_{B'} G_{u,B'}) - P_{Old} G_{u,N}}{G_{u,N}}$$

Όπου $\Delta f + \sum_{B'} P_{B'} G_{u,B'}$ δηλώνει τις παρεμβολές που υφίσταται ο συνδρομητής, $G_{u,N}$ το νέο του κέρδος, P_{Old} η αρχική ισχύς του σταθμού βάσης και το R αυτή τη φορά ίσο με:

$$R = \frac{(1 + aSINR_{OLD})^{(N_2+1)/N_2} - 1}{a}$$

Φυσικά, αφού επιθυμούμε τα κριτήρια να τηρούνται ταυτόχρονα, η απαραίτητη ισχύς θα είναι:

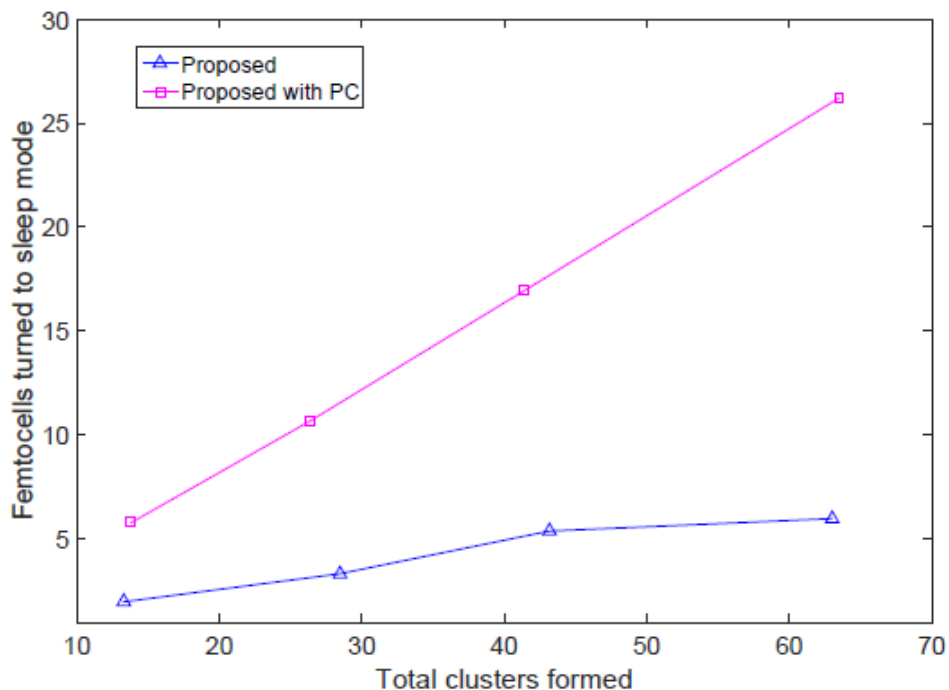
$$P_{Inc} = \max(P_{Inc1}, P_{Inc2})$$

Τέλος, όπως αναφέραμε παραπάνω, προσθέτουμε ένα κριτήριο επιπλέον το οποίο θα προστατεύει χρήστες γειτονικών femtocells που δε συμμετέχουν στην παραπάνω ανταλλαγή. Τα femtocells αυτά δεν μπαίνουν ούτε σε κατάσταση αναμονής ούτε σε

υβριδική πρόσβαση, αλλά οι χρήστες τους μπορεί να επηρεαστούν από την ενδεχόμενη αύξηση στην ισχύ που υπολογίσαμε παραπάνω για τα γειτονικά τους femtocells. Ως εκ τούτου, ένας τελικός έλεγχος γίνεται προκειμένου να βεβαιωθούμε στο σύνολό του ο αλγόριθμος μειώνει τις συνολικές παρεμβολές και δεν προκαλεί πτώσεις στη ρυθμαπόδοση των χρηστών αυτών. Αυτό εύκολα συμβαίνει, δεδομένου πως οι τελικές παρεμβολές αφενός αυξάνονται από την αύξηση της ισχύς μέσω της παραπάνω διαδικασίας, αφετέρου τελικώς οδηγούμαστε σε μείωση των συνολικά ενεργών σταθμών άρα και των πηγών παρεμβολών.

8.6. Πειραματικά αποτελέσματα

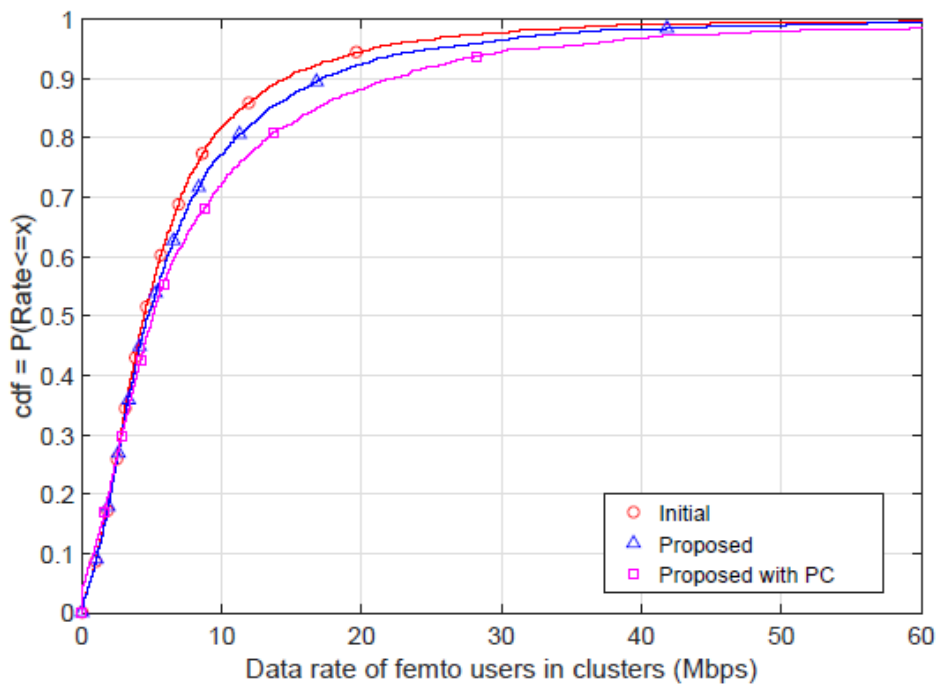
Οι παράμετροι εξομοίωσης και τα σενάρια που εξετάστηκαν είναι πανομοιότυπα με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ της απλής έκδοσης του αλγορίθμου με την έκδοση της προσθήκης του ελέγχου ισχύος. Εξετάζοντας καταρχήν τον αριθμό των femtocells που μπήκαν σε κατάσταση αναμονής στα δύο σενάρια και για διαφορετικές πυκνότητες εγκατάστασης femtocells, λαμβάνουμε την Εικόνα 56. Όπως παρατηρούμε, η εισαγωγή ελέγχου ισχύος προκαλεί δραματική αύξηση του αριθμού των απενεργοποιημένων femtocells, σχεδόν τετραπλασιάζοντας τον αριθμό αυτό. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη αφού αποτελούσε και τον κύριο στόχο της βελτίωσης του αλγορίθμου, ενώ ταυτόχρονα αντανακλά τα υψηλά περιθώρια βελτίωσης ενός δικτύου με την προϋπόθεση του συντονισμού των εμπλεκόμενων σταθμών βάσεων.



Εικόνα 56. Αριθμός μερικώς απενεργοποιημένων femtocells για τις δύο εκδόσεις αλγορίθμου ως προς την πυκνότητα εγκατάστασης femtocells

Ένα ακόμα στοιχείο που προκύπτει, είναι πως ακόμα και αν αγνοήσουμε τα οφέλη στη ρυθμαπόδοση των χρηστών που εξετάζουμε στη συνέχεια, και θεωρήσουμε τη χειρότερη περίπτωση κατά την οποία οι χρήστες δεν απολαμβάνουν αύξηση στις επιδόσεις τους, τα οφέλη στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου εξαιτίας των απενεργοποιημένων σταθμών είναι σημαντικά.

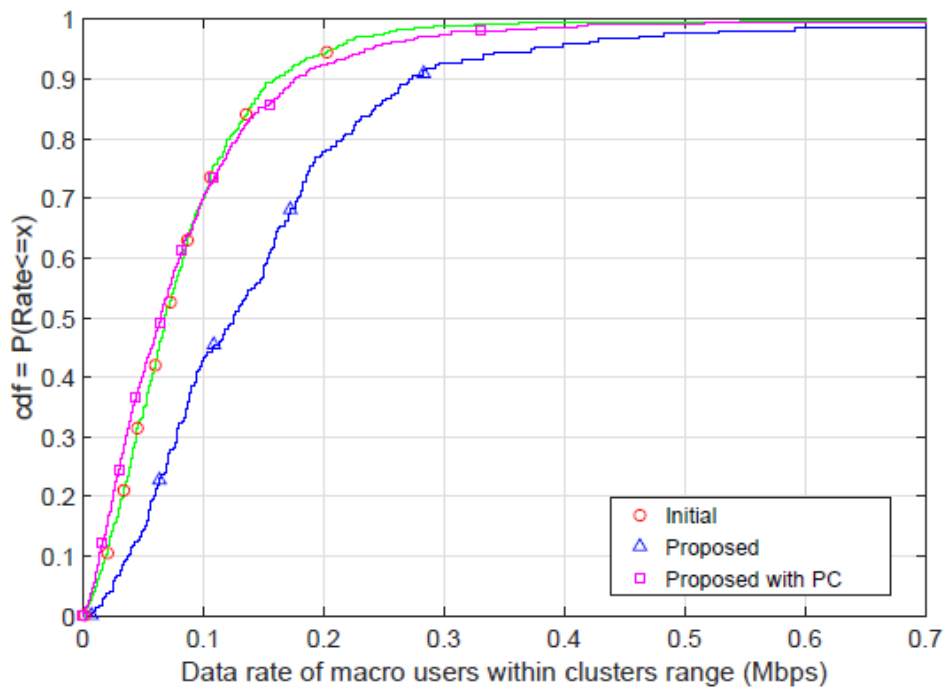
Παρόλα αυτά, η χειρότερη θεωρητικά περίπτωση δε συμβαίνει. Εφόσον ο μηχανισμός απαιτεί κάθε εμπλεκόμενος χρήστης να μη υφίσταται επιδείνωση υπηρεσίας, σημαίνει ότι ο μηχανισμός προσαρμόζεται στο χρήστη που είναι σε μεγαλύτερο κίνδυνο να υποστεί μείωση στη ρυθμαπόδοση. Αυτό παρέχει ένα περιθώριο για βελτίωση για τους υπόλοιπους χρήστες που δεν ήταν στην επικίνδυνη ζώνη, δηλαδή χρήστες που δε θα αντιμετώπιζαν επιδείνωση ακόμα και με τα αρχικά επίπεδα ισχύος. Η βελτίωση αυτή αποτυπώνεται καθαρά στην Εικόνα 57 που απεικονίζει τη CDF της ρυθμαπόδοσης των συνδρομητικών χρηστών που συνδέονται σε femtocells – μέλη συστοιχιών (ανεξάρτητα αν έχουν απενεργοποιημένα femtocells στα μέλη τους ή όχι). Η απλή έκδοση του μηχανισμού παρουσιάζει βελτίωση συγκρινόμενη με την αρχική κατάσταση κατά την οποία κάθε femtocell είναι σε πλήρη λειτουργία και σε λειτουργία κλειστής πρόσβασης, ενώ η εμπλουτισμένη έκδοση αυξάνει την επίδοση σημαντικά.



Εικόνα 57. CDF της ρυθμαπόδοσης των χρηστών που είναι συνδρομητές σε femtocells – μέλη συστοιχιών

Τα σενάρια αυτά βέβαια χαρακτηρίζονται εκ φύσεως από εκατέρωθεν αλληλεξαρτήσεις, υπό την έννοια της αύξησης μιας μετρικής εις βάρος άλλων. Στα πλαίσια αυτής της σχέσης, η Εικόνα 58 παρουσιάζει τη CDF της ρυθμαπόδοσης των μη συνδρομητικών χρηστών που βρίσκονται στην εμβέλεια συστοιχιών femtocells. Η απλή περίπτωση οδηγούσε σε απενεργοποίηση σταθμών με τους εναπομείναντες σταθμούς να διατηρούν τα πρότερα επίπεδα ισχύος μετάδοσης (τουλάχιστον όσο αφορά το μηχανισμό).

Τα παραπάνω είχαν ιδιαίτερα ωφέλιμες συνέπειες στην απόδοση των μη συνδρομητών δεδομένης της σημαντικής μείωσης παρεμβολών στην περιοχή τους. Αντίθετα, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα στην εμπλουτισμένη έκδοση του μηχανισμού κάθε μείωση παρεμβολών λόγω απενεργοποίησης σταθμών εξισορροπείται από μια ισότιμη αύξηση λόγω της αύξησης στην ισχύ των σταθμών που προκαλεί ο έλεγχος ισχύος. Ως εκ τούτου, η ρυθμαπόδοση των χρηστών υπολείπεται σημαντικά αυτή της απλής έκδοσης. Αξίζει να σημειωθεί, όμως, πως συγκρινόμενη με την αρχική κατάσταση, οι μη συνδρομητικοί χρήστες διατηρούν τα επίπεδα υπηρεσίας που απολάμβαναν χωρίς κάποια μείωση.



Εικόνα 58. CDF της ρυθμαπόδοσης μη συνδρομητικών χρηστών σε ακτίνα κάλυψης femtocell συστοιχιών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

A

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτάθηκαν και διερευνήθηκαν τεχνικές μετάδοσης μικροκυψελών σε δίκτυα νέας γενιάς. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε εγκαταστάσεις πυκνών δομών (συστοιχίες) που θα χαρακτηρίζουν τα νέα δίκτυα και επιτρέπουν την κατανεμημένη διαχείριση και συντονισμό των σταθμών που ανήκουν σε αυτές. Οι τεχνικές αξιοποιούν προτεινόμενες πολιτικές κατανομής φάσματος μέσω υβριδικής πρόσβασης, έλεγχο ισχύος, ανακατανομή χρηστών και στρατηγικές για κατάσταση αναμονής των εμπλεκόμενων σταθμών.

Αρχικά, εισάγαμε ένα μηχανισμό υβριδικής πρόσβασης για την εισαγωγή και προστασία μη συνδρομητικών χρηστών που βρίσκονται εντός της εμβέλειας συστοιχιών femtocells, σε συνδυασμό με έλεγχο ισχύος που είχε στόχο την μείωση της επίδρασης του μηχανισμού στους συνδρομητές. Συγκεκριμένα ο μηχανισμός εκτιμούσε τους απαραίτητους πόρους που έπρεπε να δοθούν στους μη συνδρομητές από το κοντινότερο femtocell ως υβριδική πρόσβαση ώστε να αναπαραχθεί ο πρότερος ρυθμός μετάδοσής τους, αυτός δηλαδή που απολάμβαναν χωρίς τις παρεμβολές από το συγκεκριμένο femtocell. Στη συνέχεια υπολογιζόταν ο βαθμός επίδρασης της υβριδικής πρόσβασης στους συνδρομητές της συστοιχίας λόγω των μειωμένων πόρων, και γινόταν κατανομή της σε όλους τους σταθμούς-μέλη της συστοιχίας. Η κατανομή επιτυγχάνονταν μέσω της μείωσης της ισχύς μετάδοσης σε femtocells που χαρακτηρίζονταν από μικρότερη ή καθόλου ανάθεση πόρων για υβριδική πρόσβαση, προς όφελος των σταθμών με μεγάλη συνεισφορά πόρων σε μη συνδρομητικούς χρήστες, λόγω της μείωσης των παρεμβολών. Για τον υπολογισμό της ρύθμισης της ισχύος των σταθμών, υπολογιζόταν και λαμβανόταν υπόψη ο αντίκτυπος κάθε σταθμού στους συνδρομητές των υπόλοιπων σταθμών της συστοιχίας, ώστε να διατηρηθεί η συνολική χωρητικότητα σε παρόμοια επίπεδα.

Ο μηχανισμός εξομοιώθηκε για αξιολόγηση σε εξομοιωτή συστήματος LTE-A που σχεδιάστηκε από μέρος μας για το σκοπό αυτό. Τα αποτελέσματα εξομοίωσης έδειξαν πως ο μηχανισμός βελτιώνει σημαντικά τις χειρότερες περιπτώσεις μείωσης ρυθμαπόδοσης σε συνδρομητικούς χρήστες, ελαττώνοντας την επίδραση της υβριδικής πρόσβασης. Όσο αφορά τους μη συνδρομητικούς χρήστες, όσο συνδέονται στο femto στρώμα βελτιώνουν την απόδοσή τους αφού ο στόχος ρυθμαπόδοσης δεν εμπεριέχει τις παρεμβολές του κοντινότερου femtocell, ενώ και όσοι δε συνδέονται ωφελούνται από τη μείωση παρεμβολών που επιφέρει ο έλεγχος ισχύος στα femtocells της συστοιχίας. Μειονέκτημα του μηχανισμού είναι πως συνολικά οι συνδρομητές υφίστανται μικρή μείωση στη ρυθμαπόδοση, και ο έλεγχος ισχύος ενισχύει τη δικαιοσύνη σε βάρος της συνολικής χωρητικότητας η οποία υφίσταται μια μικρή μείωση.

Στη συνέχεια παρουσιάσαμε ένα μηχανισμό διαχείρισης πόρων που στόχευε στη βελτίωση της ρυθμαπόδοσης των συνδρομητικών χρηστών μέσω της καλύτερης αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων των femtocells και την ανακατανομή των χρηστών τους. Πιο συγκεκριμένα, προτείναμε μια τροποποιημένη πολιτική υβριδικής πρόσβασης στην οποία προτείναμε μια νέα κατηγοριοποίηση χρηστών εισάγοντας μια νέα κλάση. Οι

τρεις κλάσεις χρηστών είναι οι συνδρομητικοί χρήστες σε ένα femtocell, οι συνδρομητικοί χρήστες των γειτονικών femtocells της ίδιας συστοιχίας και τέλος οι μη συνδρομητικοί χρήστες. Για τους τελευταίους υιοθετήσαμε την προσέγγιση του προηγούμενου μηχανισμού, αναπαράγοντας την πρότερή τους ρυθμαπόδοση. Για το εναπομένον φάσμα και τις άλλες δύο κατηγορίες συνδρομητικών χρηστών, προτείναμε την ανακατανομή τους υπό όρους που εγγυώνται την αύξηση της απόδοσής τους. Οι τιθέμενοι όροι ορίζουν τα άνω και κάτω όρια των πόρων που κατανέμονται στους χρήστες σεβόμενοι την προτεραιότητα που χαρακτηρίζει κάθε κατηγορία.

Εξομοιώσεις του παραπάνω μηχανισμού έδειξαν ότι η υβριδική πρόσβαση που υιοθετούμε διατηρεί το όφελος των ιδιοκτητών femtocells, βελτιώνει τη ρυθμαπόδοση των συνδρομητικών χρηστών αυξάνοντας τη συνολική χωρητικότητα που προσφέρεται από τα μέλη της συστοιχίας και προστατεύει τους μη συνδρομητές από τις συσσωρευμένες παρεμβολές. Η προσέγγιση που προτείνουμε αποδεικνύεται ιδιαίτερα ωφέλιμη σε σενάρια κατά τα οποία τα περισσότερα ή όλα τα femtocells-μέλη της συστοιχίας ανήκουν στην ίδια οντότητα (κτίρια εταιριών, πολυκατοικίες), επιτρέποντας εξαιρετικές υπηρεσίες στους συνδρομητικούς χρήστες που κινούνται στην εμβέλεια της συστοιχίας (π.χ. υπάλληλοι, ένοικοι), ενώ προσφέρουν περιορισμένες υπηρεσίες σε μη συνδρομητές (πελάτες ή περαστικοί).

Στη συνέχεια και παραμένοντας στο συντονισμό femtocells εντός συστοιχιών, επικεντρωθήκαμε στην αξιοποίηση της κατάστασης αναμονής με στόχο ενεργειακά κέρδη και κέρδη χωρητικότητας. Η μεταφορά στρατηγικών κατάστασης αναμονής από το στρώμα macrocell στο στρώμα femtocell αν και αναπόφευκτη επιβάλλει προσαρμογή τους στις ιδιαίτερες παραμέτρους που χαρακτηρίζει το στρώμα αυτό, όπως είναι η ανάγκη εύρεσης κινήτρων για ιδιοκτήτες να ξεφύγουν από την κλειστή πρόσβαση, η ad-hoc εγκατάσταση των σταθμών, η αδυναμία κεντρικής διαχείρισης κλπ.

Βασισμένοι στα παραπάνω προτείναμε ένα μηχανισμό που συνδυάζει την υβριδική πρόσβαση μεταξύ συνδρομητών femtocells-μελών ίδιας συστοιχίας με πολιτικές κατάστασης αναμονής. Κύριος στόχος ήταν η μείωση των ενεργών σταθμών βάσεων ώστε ο αριθμός τους να αντανakλά περισσότερο τις ανάγκες των συνδρομητών τους παρά τις ξεχωριστές οντότητες κλειστής πρόσβασης στις οποίες χωρίζονται οι χρήστες της συστοιχίας.

Πιο συγκεκριμένα, ένα femtocell-μέλος μπορεί να αποφασίσει να επεκτείνει τη λίστα συνδεδεμένων χρηστών με συνδρομητές γειτονικού femtocell της ίδιας συστοιχίας. Απαραίτητη προϋπόθεση για αυτό είναι το γειτονικό femtocell να περιέλθει σε κατάσταση αναμονής, προκαλώντας αρκετή μείωση παρεμβολής στο αρχικό femtocell ώστε να αποζημιωθεί για την προσθήκη των παραπάνω χρηστών. Από την άλλη οι χρήστες που μεταπηδούν σε νέο femtocell λόγω της κατάστασης αναμονής του δικού τους πρέπει να διατηρούν ή να βελτιώνουν τη ρυθμαπόδοσή τους. Μελετήθηκαν παραλλαγές του μηχανισμού femtocells κατά τις οποίες οι όροι της βελτίωσης της επίδοσης των χρηστών ορίζονταν ανά συνδρομητή, ανά femtocell και ανά συστοιχία.

Τα διεξαχθέντα πειράματα στον εξομοιωτή έδειξαν ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός αυξάνει τη ρυθμαπόδοση κάθε ενός από τους συνδρομητές που εμπλέκονται

στην ανταλλαγή χρηστών, και των femtocells που υιοθετούν υβριδική πρόσβαση και αυτών που περιέρχονται σε κατάσταση αναμονής. Εξαιτίας της μερικής απενεργοποίησης ορισμένων σταθμών βάσης, οι συνδρομητές και των υπολοίπων μη άμεσα εμπλεκόμενων σταθμών απολαμβάνουν καλύτερη επίδοση λόγω των μειούμενων παρεμβολών στην περιοχή. Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η αύξηση της συνολικής χωρητικότητας που παρέχεται από όλα τα μέλη της συστοιχίας αλλά και από το macrocell σε μη συνδρομητικούς χρήστες. Η αύξηση που υπολογίστηκε αποτελεί και κίνητρο για την υπέρβαση της διστακτικότητας των χρηστών απέναντι στις λειτουργίες υβριδικής πρόσβασης και κατάστασης αναμονής.

Σημαντικό όφελος παρουσιάζει και η ενεργειακή απόδοση του δικτύου εξαιτίας του μειωμένου αριθμού ενεργών σταθμών. Οι εξομοιώσεις που διενεργήθηκαν για διαφορετικές πυκνότητες εγκατάστασης femtocells στο δίκτυο, έδειξαν σημαντικά ενεργειακά κέρδη. Αυτά βρέθηκαν να αυξάνονται ακόμα περισσότερο με τη χαλάρωση των κριτηρίων για την κατάσταση αναμονής και κυρίως στην παραλλαγή όπου επιδιώκεται αύξηση χωρητικότητας ανά συστοιχία, κάτι που όμως μπορεί να οδηγήσει σε προβληματική ρυθμαπόδοση μεμονωμένων χρηστών.

Τα περιθώρια βελτίωσης μέσω του συντονισμού των σταθμών αποδείχθηκαν σημαντικά και αξιοποιήθηκαν περεταίρω με την εισαγωγή του ελέγχου ισχύος στον παραπάνω μηχανισμό. Ο έλεγχος ισχύος επέτρεψε πιο αποδοτική συνεργασία μεταξύ των σταθμών και έδειξε πως με τις κατάλληλες ρυθμίσεις οι απαιτήσεις των χρηστών μπορούν να καλυφθούν με σημαντικά λιγότερους πόρους αν ξεπεραστεί το εμπόδιο της διστακτικότητας των ιδιοκτητών femtocells να συνεργαστούν. Παράλληλα έδειξε πως η αύξηση της απόδοσης μπορεί να αποτελέσει κίνητρο προς αυτήν την κατεύθυνση, μειώνοντας την ανάγκη αποζημιώσεων από τη μεριά των παρόχων.

Οι αλγόριθμοι ανέδειξαν σημαντικά και τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των διαφορετικών τύπων χρηστών που χαρακτηρίζουν συχνά τις περιπτώσεις διαχείρισης πόρων με ανταγωνιστικούς χρήστες. Οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν καλύπτουν μεγάλο εύρος διαφορετικών σεναρίων με κάθε έναν να δίνει προτεραιότητα σε διαφορετικό σύνολο μετρικών έναντι άλλων. Σενάρια όπως συστοιχίες femtocells σε πολυκατοικίες ιδιοκτητών διαμερισμάτων μπορούν να ωφεληθούν από τον αλγόριθμο που προστατεύει την ατομική ρυθμαπόδοση των χρηστών, συνδρομητικών και μη. Σενάρια συστοιχιών σε κτίρια εταιριών όπου όλα τα femtocell ανήκουν στην ίδια εταιρία και δεν εμφανίζουν σημαντική παρουσία μη συνδρομητικών χρηστών μπορούν να ωφεληθούν από τον αλγόριθμο με έμφαση στη συνολική παρεχόμενη χωρητικότητα προς τους συνδρομητές τους χωρίς να ανησυχούν για τους επισκέπτες. Αντίστοιχα, σενάρια με κρίσιμο οικονομικό περιθώριο, μπορούν να ωφεληθούν από τον αλγόριθμο που δίνει προτεραιότητα στην ενεργειακή απόδοση του δικτύου.

Τέλος, σημαντικό στοιχείο είναι πως δεδομένης της κατανεμημένης φύσης των παραπάνω αλγορίθμων και της ευκολίας της επικοινωνίας τους μέσω του πρωτοκόλλου X2, οι παραπάνω αλγόριθμοι είναι δυναμικοί με την έννοια ότι κάθε δίκτυο μπορεί να υιοθετεί αυτόν που εξυπηρετεί τις τρέχουσες ανάγκες καλύτερα, βάσει απαιτήσεων σε κίνηση, καθυστέρηση, απαιτούμενη ρυθμαπόδοση των χρηστών κλπ. και να μεταπηδά σε

άλλον όταν οι συνθήκες αλλάξουν. Υπό αυτό το πρίσμα, δείξαμε ότι τα ζητήματα που εμπλέκονται σε τέτοια σενάρια όπως η αύξηση της σηματοδοσίας καθώς και οι αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ικανότητας των σταθμών είναι ζητήματα που μπορούν να ξεπεραστούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ο τομέας των small cells στα σύγχρονα κινητά δίκτυα χαρακτηρίζεται και θα χαρακτηρίζεται από συνεχή πυρετώδη έρευνα. Ειδικότερα, η μείωση των παρεμβολών μέσω καινοτόμων τεχνικών μετάδοσης έχει οριστεί ως η μεγαλύτερη πρόκληση από την 3GPP για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης. Η ενσωμάτωση των τεχνικών αυτών στην ανάπτυξη στρατηγικών συντονισμού μεταξύ των σταθμών προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες αλλά και προκλήσεις.

Οι τεχνικές συντονισμού και μετάδοσης που παρουσιάστηκαν σε αυτήν τη διατριβή, βασίστηκαν σε μεγάλο βαθμό σε αξιοποίηση της ελευθερίας ανάθεσης πόρων στο πεδίο της συχνότητας. Η τεχνική Carrier Aggregation (CA) που περιγράψαμε στην ενότητα της τέταρτης γενιάς, επεκτείνει σημαντικά τις δυνατότητες αυτές. Συγκεκριμένα διευρύνει το εύρος φάσματος με πολλαπλούς φορείς να συνδυάζονται και να χρησιμοποιούνται μαζί για μετάδοση από ένα τερματικό. Το LTE-A υποστηρίζει τον συνδυασμό μέχρι και 5 φορέων, φτάνοντας έτσι το μέγιστο φάσμα που μπορεί να κατανεμηθεί σε έναν χρήστη στα 100 MHz. , αυξάνοντας σημαντικά το μέγιστο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης. Μαζί με την μεγαλύτερη ευελιξία και απόδοση, η τεχνολογία αυτή εισάγει και προκλήσεις. Προς το παρόν το LTE-A υποστηρίζει τρεις τρόπους συνδυασμού φορέων. Ο πρώτος αφορά το συνδυασμό διαδοχικών φορέων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ο δεύτερος επιτρέπει το συνδυασμό μη διαδοχικών φορέων στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Τέλος, ο τρίτος υποστηρίζει το συνδυασμό φορέων που βρίσκονται σε διαφορετικές ζώνες. Κάθε προσέγγιση παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το φάσμα που συνδυάζεται επεκτείνεται σε διαφορετικές ζώνες.

Τα παραπάνω προσφέρουν δύο κατευθύνσεις επέκτασης της έρευνας της παρούσης διατριβής. Αφενός την προσαρμογή των ανωτέρω στρατηγικών καταμερισμού φάσματος σε συνθήκες CA, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα που αυτές προσθέτουν, ειδικά σε περιπτώσεις συνδυασμού φάσματος από διαφορετικές ζώνες, και τροποποιώντας το μοντέλο παρεμβολών και μετάδοσης για συχνότητες πέραν των 5GHz. Αφετέρου, η υιοθέτηση CA αυξάνει το βαθμό ελευθερίας στην κατανομή φάσματος δημιουργώντας ευελιξία για νέες προσεγγίσεις στις στρατηγικές διαμοιρασμού πόρων μεταξύ των χρηστών.

Μια ακόμη τεχνολογία που μπορεί να ληφθεί υπόψη είναι η τεχνολογία μετάδοσης πολλαπλών κεραιών (MIMO). Τεχνικές μετάδοσης με πολλαπλές κεραιές θεωρούνται το σύνολο των τεχνικών που στηρίζονται στη χρήση ενός αριθμού κεραιών στον δέκτη ή/και στον μεταδότη, σε συνδυασμό με την απαραίτητη επεξεργασία σήματος που κάτι τέτοιο επιφέρει. Η τεχνολογία αυτή εξυπηρετεί τη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος, είτε βελτιώνοντας τη χωρητικότητα, είτε την κάλυψη, είτε το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε έναν χρήστη.

Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση διάφορων παραμέτρων της απόδοσης του συστήματος:

α) Diversity. Πολλαπλές κεραιές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση του diversity. Με τη χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης, μπορεί να συλλεχθεί αυξημένη ενέργεια και να μειωθεί το fading, ενώ οφέλη παρουσιάζονται και σε περιπτώσεις όπου η λήψη περιορίζεται από ισχυρές παρεμβολές.

β) SINR. Το SINR βελτιώνεται μέσω των διάφορων τεχνικών beam-forming, που γίνονται εφικτές μέσω της χρήσης πολλαπλών κεραιών μετάδοσης στο σταθμό βάσης. Η βελτίωση του SINR με τη σειρά του, βελτιώνει τη χωρητικότητα και την κάλυψη του συστήματος.

γ) Ρυθμός μετάδοσης. Η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing), γνωστή και ως MIMO, γίνεται εφικτή με τη χρήση πολλαπλών κεραιών και στο δέκτη και στον πομπό, και επιφέρει αύξηση στους ρυθμούς μετάδοσης, όποτε το επιτρέπουν οι συνθήκες καναλιού. Εναλλακτικά, συνδυάζοντας ιδιότητες του σχήματος με κατάλληλη επεξεργασία παρεμβολών, πολλαπλά τερματικά μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας ίδιους πόρους συχνοτήτων, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική χωρητικότητα της κυψέλης. Αυτό αναφέρεται ως multi-user MIMO.

Γενικά, οι διαφορετικές τεχνικές πολλαπλών κεραιών είναι ωφέλιμες σε διαφορετικά σενάρια η κάθε μία. Για παράδειγμα, σε σχετικά χαμηλό SIR, όπως σε συνθήκες υψηλού φόρτου στα όρια της κυψέλης, η χωρική πολυπλεξία παρέχει σχετικά περιορισμένα οφέλη. Αντίθετα, η χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό μπορεί να αυξήσει το SINR μέσω του beam-forming.

Από την άλλη, σε περιπτώσεις που το SINR είναι υψηλό, ο ρυθμός μετάδοσης περιορίζεται από το διαθέσιμο φάσμα και όχι από τη δύναμη του σήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις η χωρική πολυπλεξία κρίνεται ιδανική για να εκμεταλλευτεί πλήρως τις καλές συνθήκες καναλιού. Η επιλογή της εκάστοτε τεχνικής γίνεται από το σταθμό βάσης, επιλέγοντας κάθε φορά το καταλληλότερο σχήμα μετάδοσης. Με την έκδοση 8 στο LTE-A, υποστηριζόταν χωρική πολυπλεξία μέχρι και 4 στρωμάτων. Οι μετέπειτα εκδόσεις επέτρεψαν περισσότερο πολύπλοκα σχήματα. Αποτελεί μία από τις πρώτες που υιοθετήθηκαν από την τέταρτη κιάλας γενιάς προκειμένου να αποφευχθούν οι παρεμβολές, να ισχυροποιηθεί το σήμα και να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης.

Καθώς προηγμένες υλοποιήσεις έχουν προταθεί για το επίπεδο macro, πολλές από τις προσεγγίσεις αλλά και νέες έχουν προταθεί για το femto στρώμα. Η υιοθέτηση της τεχνολογίας αυτής προσφέρει πολλές δυνατότητες και αυξάνει τα επίπεδα ελευθερίας. Ταυτόχρονα επιτρέπει πολύπλοκες τεχνικές beamforming να υλοποιηθούν ανεβάζοντας την απόδοση του δικτύου, αν και με αυξημένη πολυπλοκότητα. Φυσικά τα σημεία αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο μεμονωμένα, όσο και μέσω του συντονισμού των σταθμών προκειμένου να προσφέρουν στους χρήστες τους ανώτερες υπηρεσίες. Η διερεύνηση των τεχνολογιών MIMO, η προσαρμογή τους για την καλύτερη αξιοποίησή τους σε τεχνικές μετάδοσης small cells, αποτελεί σημαντικό πιθανό πεδίο εξέλιξης της παρούσης διατριβής.

Αν και επικεντρωθήκαμε σε σενάρια full buffer κίνησης, που αποτελούν τη χειρότερη πιθανή κατάσταση σε επίπεδο παρεμβολών, η διερεύνηση χαμηλότερων τύπων κίνησης θα επέτρεπε την επέκταση αναζήτησης και ενσωμάτωσης διαθέσιμων τεχνικών

στο πεδίο του χρόνου, όπως τα ABS που αναφέραμε στις διαθέσιμες τεχνολογίες του eICIC. Ειδικότερα τα RP-ABS που χαρακτηρίζονται από αυξημένη αξιοποίηση πόρων σε σχέση με τα απλά ABS, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για παράδειγμα στην υλοποίηση του πρώτου αλγόριθμου στο πεδίο του χρόνου. Το σημείο που οι γειτονικοί σταθμοί βάσης επιφορτίζονται βάρος της υβριδικής λειτουργίας του γείτονά τους με τη μείωση ισχύος τους, θα μπορούσε να υλοποιηθεί χρονοπρογραμματίζοντας προσεκτικά RP-ABS. Η προσέγγιση με απλά ABS, αντίστοιχα θα μπορούσε να υιοθετηθεί στο συντονισμό των σταθμών στον δεύτερο αλγόριθμο κατά τον οποίο ένα femtocell μεταβαίνει σε κατάσταση αναμονής ώστε να απαλλάξει από παρεμβολές τον γειτονικό σταθμό που θα υποδεχθεί τους χρήστες του. Η χρήση ABS, αν και όχι τόσο ωφέλιμη ενεργειακά θα μπορούσε να αντικαταστήσει την κατάσταση αναμονής, προσφέροντας παράλληλα υπηρεσίες σε μη συγκρουόμενες συχνότητες.

Μια ακόμα τεχνική που θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη και εφάπτεται της παρούσης διατριβής λόγω της αναζήτησης καλύτερων συνθηκών μετάδοσης μέσω του συντονισμού των σταθμών είναι και η τεχνολογία CoMP που περιγράψαμε περιληπτικά ως τεχνολογία που προδιαγράφηκε στην 11^η έκδοση του LTE-A. Αρχικά σχεδιασμένη για το macro στρώμα, ήδη υπάρχουν μελέτες που ερευνούν πιθανά οφέλη υποστήριξης CoMP μεταξύ femto και macro σταθμών αλλά και μεταξύ femto σταθμών. Αρχικά, οι έρευνες προσανατολίζονται περισσότερο στο uplink της πρώτης περίπτωσης (femto-macro), αλλά μπορεί να επεκταθεί σύντομα και για άλλα σενάρια.

Τέλος, στη συγκεκριμένη διατριβή, η σχεδίαση και η αξιολόγηση των προτεινόμενων αλγορίθμων βασίστηκαν κυρίως στο πρότυπο LTE-A και ειδικότερα στη τεχνολογία διασύνδεσης OFDMA. Η τεχνολογία αυτή αναμένεται να συνεχιστεί να υποστηρίζεται και μετά την εγκαθίδρυση και εκμετάλλευση των τεχνολογιών 5^{ης} γενιάς, δίνοντας διάρκεια στα ευρήματα της διατριβής αυτής. Στο κεφάλαιο 4 αναφερθήκαμε στις υποψήφιες τεχνολογίες διασύνδεσης για το 5G, κυρίως για να αναδείξουμε ότι αποτελούν (στην περίπτωση του mobile broadband) παραλλαγές της OFDMA. Οι ομοιότητες όσο αφορούν τον καταμερισμό του φάσματος επιτρέπουν την εφαρμογή των ευρημάτων της διατριβής και στο μέλλον. Παρόλα αυτά, η διερεύνηση και προσαρμογή των αποτελεσμάτων σε όλο και νεότερα μοντέλα που θα προκύπτουν στην πορεία της οριστικοποίησης του προτύπου 5G αποτελεί ενδιαφέρον πεδίο έρευνας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Δημοσιεύσεις που έγιναν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής.

Επιστημονικά περιοδικά:

1. Bouras Christos, Diles Georgios, Kokkinos Vasileios, Papazois Andreas, "Transmission optimizing on dense femtocell deployments in 5G" Special Issue - Key Tech for 5G, International Journal of Communication Systems (Int. J. Commun. Syst.), 1099-1131, 2015, <http://dx.doi.org/10.1002/dac.3049>, DOI 10.1002/dac.3049

Περίληψη: Στην επερχόμενη γενιά κινητών δικτύων, τα femtocells θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο, καθώς προσφέρουν οικονομική και αποτελεσματική βελτίωση στις δυνατότητες κάλυψης του δικτύου και στους ρυθμούς μετάδοσης που παρέχουν. Στα προσεχή υπερ-πυκνά 5G δίκτυα αναμένεται υψηλότερη διείσδυση της εν λόγω τεχνολογίας, αυξάνοντας την πιθανότητα δημιουργίας πυκνών femtocell συστοιχιών. Αυτό, με τη σειρά του, θα απαιτήσει τεχνικές περιορισμού των παρεμβολών για την προστασία κοντινών μη εγγεγραμμένων χρηστών, ειδικά σε περιοχές με ασθενές macrocell σήμα. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζουμε ένα μηχανισμό όπου πολλαπλά femtocells συντονίζουν τις παραμέτρους μετάδοσής τους, ώστε να εξυπηρετήσουν πολλαπλούς μη εγγεγραμμένους χρήστες μέσω υβριδικής πρόσβασης. Καταρχήν, εισάγουμε έναν αλγόριθμο που καθορίζει την κατανομή του φάσματος στα femtocells που υιοθετούν υβριδική πρόσβαση. Έπειτα, ο αλγόριθμος προσπαθεί να αντισταθμίσει τη μείωση των επιδόσεων του εγγεγραμμένου χρήστη, λόγω του μειωμένου φάσματος, μέσω ελέγχου ισχύος που ανακατανέμει τις επιπτώσεις των femtocells υβριδικής πρόσβασης μεταξύ όλων των μελών της συστοιχίας femtocell. Σε πρώτο βαθμό ερευνούμε περιπτώσεις κατά τις οποίες μόνο ένα femtocell λειτουργεί σε υβριδική πρόσβαση, και στη συνέχεια βελτιώνουμε τον αλγόριθμο επιτρέποντας πολλαπλούς σταθμούς βάσης να λειτουργούν σε υβριδική πρόσβαση. Παράλληλα λαμβάνουμε υπόψη την επίδραση οποιασδήποτε αλλαγής στη μετάδοση της ισχύος που θα έχει σε γειτονικά femtocells. Προσομοιώσεις για την αξιολόγηση του αλγορίθμου σε σύγκριση με τα συστήματα κλειστής πρόσβασης δείχνουν βελτίωση στην απόδοση των μη εγγεγραμμένων χρηστών που συνδέονται σε femtocell και βελτίωση στην απόδοση των εγγεγραμμένων χρηστών μέσω δικαιότερης εφαρμογής του μηχανισμού υβριδικής πρόσβασης.

2. Bouras, C., Diles, G., "Interference Management Strategy for 5G Femtocell Clusters", Wireless Personal Communications, pp. 1-17, 2017, <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-017-4169-4>, DOI 10.1007/s11277-017-4169-4

Περίληψη: Με τη νέα γενιά κινητών δικτύων να πλησιάζει, τα κύρια χαρακτηριστικά έχουν ήδη προταθεί και υιοθετηθεί. Τα υπερ-πυκνά ετερογενή δίκτυα φαίνεται να είναι ένας από τους κύριους οδηγούς στην αντιμετώπιση της ζήτησης για μεγαλύτερη συνδεσιμότητα συσκευών και αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης. Πολλαπλοί σταθμοί βάσης διαφορετικών προδιαγραφών θα εγκαθίστανται για την επίτευξη των στόχων αυτών. Τα femtocells είναι ένας τύπος σταθμούς βάσης που αναμένεται να κυριαρχήσει λόγω του χαμηλού κόστους και της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης. Παρόλα αυτά, προσπαθώντας να αυξήσουμε τη φασματική απόδοση με τη χρήση των femtocells, μέσω πολλαπλών σταθμών βάσης που λειτουργούν στο ίδιο φάσμα θα οδηγήσει σε ισχυρά φαινόμενα παρεμβολών. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με στρατηγικές διαμοιρασμού φάσματος και τεχνικές ελέγχου ισχύος. Σε αυτήν την εργασία, προτείνουμε ένα πλήρες μηχανισμό διαχείρισης πόρων που μπορεί να εφαρμοσθεί σε περιπτώσεις πυκνών δομών femtocells. Ο μηχανισμός βασίζεται στο συντονισμό ανάμεσα των femtocells με στόχο καλύτερη αξιοποίηση φάσματος, στον έλεγχο ισχύος και στην εκμετάλλευση της υβριδικής πρόσβασης, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερο βαθμό δικαιοσύνης στον καταμερισμό πόρων. Εξομοιώσεις έδειξαν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιώνει τη συνολική χωρητικότητα, προστατεύει μη συνδρομητικούς χρήστες και εξισορροπεί την επίδραση που έχει η υιοθέτηση της υβριδικής πρόσβασης στους συνδρομητές.

Συνέδρια:

1. Bouras, C., Diles, G., Kokkinos, V., & Papazois, A. "Femtocells coordination in future hybrid access deployments," *Wireless Communications Systems (ISWCS), 2014 11th International Symposium on*, vol., no., pp.313,317, 26-29 Aug. 2014.

Περίληψη: Τα femtocells αποτελούν μια ελκυστική λύση για την βελτίωση των ρυθμών δεδομένων των χρηστών τοπικά καθώς και για την ευρύτερη κάλυψη στα μελλοντικά κινητά δίκτυα, συμπεριλαμβανομένου και του 5G. Ωστόσο, εξαιτίας της συνήθους συνδρομητικής λειτουργίας τους, κοντινοί μη εγγεγραμμένοι χρήστες μπορεί να αντιμετωπίσουν σοβαρές παρεμβολές. Η υβριδική λειτουργία πρόσβασης επιτρέπει στα femtocells να εξυπηρετούν και χρήστες που δεν είναι συνδρομητές, επιτρέποντάς τους πρόσβαση σε μέρος του φάσματος. Σε αυτή την εργασία, προτείνουμε έναν καταναμημένο αλγόριθμο που επιτρέπει στο υβριδικό femtocell να καθορίζει την ακριβή πολιτική πρόσβασης στο ραδιοφάσμα για τους δύο τύπους χρηστών (συνδρομητές και μη-συνδρομητές). Ο μηχανισμός λαμβάνει υπόψη την προηγούμενη κατάσταση των χρηστών και προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τον αντίκτυπο του femtocell στο υπόλοιπο δίκτυο. Επιπλέον εισάγουμε έναν μηχανισμό ελέγχου ισχύος που μπορεί να εφαρμοστεί σε πυκνές συστοιχίες femtocells. Ο μηχανισμός συντονίζει και ελέγχει την ισχύ των γειτονικών femtocells, προκειμένου να ανακουφίσει το femtocell που προσφέρει υβριδική πρόσβαση και τους εγγεγραμμένους χρήστες του.

2. Bouras, C. **Diles, G.**; Kokkinos, V.; Papazois, A., "Optimizing hybrid access femtocell clusters in 5G networks" Broadband And Wireless Computing, Communication And Applications (BWCCA), 2015 10th International Conference on , 4-6 Nov 2015, DOI 10.1109/BWCCA.2015.21.

Περίληψη: Τα femtocells αποτελούν έναν αποτελεσματικό τρόπο για τη μείωση του κόστους των υποδομών στα κινητά δίκτυα, ενώ παράλληλα παρέχει καλύτερους ρυθμούς δεδομένων και κάλυψη. Η υψηλή διείσδυση femtocells που αναμένεται στην επερχόμενη γενιά των 5G δικτύων, αυξάνει την πιθανότητα της δημιουργίας πυκνών συστοιχιών femtocells. Οι ισχυρές παρεμβολές που θα δημιουργηθούν σε κοντινούς μη εγγεγραμμένους στα femtocells χρήστες θα απαιτήσουν τεχνικές περιορισμού τους. Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζουμε έναν μηχανισμό όπου πολλαπλά femtocells συντονίζουν τις παραμέτρους εκπομπής τους για την εξυπηρέτηση πολλαπλών μη εγγεγραμμένων χρηστών μέσω της υβριδικής πρόσβασης. Πρώτον, προσδιορίζεται η κατανομή του φάσματος στους μη εγγεγραμμένους χρήστες. Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε έναν αλγόριθμο ελέγχου ισχύος που βασίζεται σε δύο παράγοντες. Στην ανάγκη αποζημίωσης των εγγεγραμμένων χρηστών, λόγω του μειωμένου φάσματος, και στην επίδραση που οποιαδήποτε αλλαγή στη μετάδοση της ισχύος θα έχει στα γειτονικά femtocells. Αξιολογώντας την αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου μέσω προσομοιώσεων βρήκαμε βελτίωση των χρηστών με τη χειρότερη απόδοση καθώς και στη συνολική χωρητικότητα του δικτύου.

3. Bouras, C. **Diles,** " Resource management in 5G femtocell networks" Broadband And Wireless Computing, Communication And Applications (BWCCA), 2015 10th International Conference on , 4-6 Nov. 2015,, DOI 10.1109/BWCCA.2015.20.

Περίληψη: Τα small cells αναμένεται να συμβάλλουν στην επίτευξη των στόχων των κινητών δικτύων επόμενης γενιάς. Τα εξαιρετικά πυκνά δίκτυα που θα δημιουργηθούν λόγω των ετερογενών δομών με πολλαπλές RAT Τεχνολογίες και small cells θα αποτελέσουν ένα ευέλικτο, οικονομικό τρόπο για καλύτερη κάλυψη και ρυθμούς δεδομένων. Σε αυτή την εργασία, διερευνούμε πώς τα femtocells μπορούν να εκμεταλλευτούν βέλτιστα τους διαθέσιμους πόρους τους, προκειμένου να αυξηθεί η παρεχόμενη χωρητικότητά τους, όταν γειτονικά femtocells είναι παρόντα. Προτείνουμε μια πολιτική κατανομής φάσματος, σύμφωνα με την οποία τα κοντινά εγκατεστημένα femtocells σχηματίζουν συστοιχίες και υιοθετούν υβριδική πολιτική πρόσβασης αποκλειστικά για τους χρήστες-συνδρομητές σε άλλα femtocells της ίδιας συστοιχίας. Επίσης, ορίζουμε την κατανομή του φάσματος για μη εγγεγραμμένους χρήστες στην εμβέλεια του femtocell. Η αξιολόγηση της απόδοσης του αλγορίθμου μέσω προσομοιώσεων δείχνουν ότι ο μηχανισμός οδηγεί σε καλύτερη επανακατανομή των χρηστών μεταξύ των σταθμών βάσεων και σε καλύτερη συνολική χωρητικότητα.

4. Bouras, C and Diles, G., "Coordination strategy for dense 5G femtocell deployments", in 8th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, NTMS 2016, Larnaca, Cyprus, 2016

Περίληψη: Η απαίτηση των κινητών δικτύων επόμενης γενιάς για υψηλή συνδεσιμότητα πολλαπλών συσκευών με πολλαπλάσιους ρυθμούς δεδομένων απαιτεί την ανάπτυξη πολλαπλών σταθμών βάσης διαφορετικής εμβέλειας και χωρητικότητας καθώς και τη βέλτιστη διαχείρισή τους. Τα femtocells θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα ετερογενή αυτά δίκτυα, όντας χαμηλού κόστους και εύκολης συντήρησης. Στην δημοσίευση αυτή προτείνουμε ένα μηχανισμό για τη διαχείριση των πόρων των femtocells που βασίζεται σε πολιτικές κατανομής του φάσματος, έλεγχο ισχύος και κατηγοριοποίηση των χρηστών. Συνδυάζουμε την υβριδική λειτουργία πρόσβασης με ανακατανομή των χρηστών ώστε να παρέχουμε έναν πλήρη μηχανισμό για την κατανομή των πόρων σε πυκνές συστοιχίες femtocell. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι το προτεινόμενο σύστημα αυξάνει τη χωρητικότητα που παρέχεται από τα femtocells, εγγυάται αξιόπιστη σύνδεση σε μη-συνδρομητές και εξισορροπεί την απόδοση των εγγεγραμμένων χρηστών βελτιώνοντας τις χειρότερες περιπτώσεις.

5. Bouras, C and Diles, G., "Sleep Mode Performance Gains In 5G Femtocell Clusters", in 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems - ICUMT 2016, 2016, pp. 106-111

Περίληψη: Τα femtocells υπόσχονται αποτελεσματική και φθηνή αρωγή προς την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από το 5G σε χωρητικότητα και ρυθμαπόδοση. Όμως, η ad-hoc φύση τους, η αναμενόμενη πυκνή εγκαθίδρυσή τους και η συνδρομητική τους πολιτική που βασίζεται σε αποκλειστικότητα παροχής υπηρεσιών, μπορεί να επιφέρει συνεχείς επικαλύψεις στις ακτίνες εμβέλειας των πολυεπίπεδων σταθμών βάσεων, με αποτέλεσμα κάποιοι χρήστες να υποφέρουν από τις συσσωρευτικές παρεμβολές. Σε αυτή τη δημοσίευση, προτείνεται ένας μηχανισμό που στοχεύει πυκνές ομάδες femtocells (συστοιχίες), μέλη των οποίων μπορούν να στραφούν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας, εάν οι απαιτήσεις των χρηστών τους ικανοποιούνται επαρκώς από τα υπόλοιπα ενεργά femtocells. Προτείνουμε μια ειδική έκδοση της λειτουργίας υβριδικής πρόσβασης, που στοχεύει μόνο χρήστες γειτονικών femtocells, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των ενεργών σταθμών βάσης και να μειωθούν οι παρεμβολές. Επιβάλλουμε περιορισμούς στην κατάσταση αναστολής λειτουργίας ώστε να εξασφαλιστεί η αύξηση της απόδοσης του κάθε εμπλεκόμενου εγγεγραμμένου χρήστη και η αυξημένη χωρητικότητα που παρέχεται από ολόκληρη τη συστοιχία, μαζί με το επιπλέον πλεονέκτημα της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας.

6. Bouras C., Diles G. "Energy efficiency in sleep mode for 5G femtocells," 2017 Wireless Days, Porto, Portugal, 2017, pp. 143-145, doi: 10.1109/WD.2017.7918130

Περίληψη: Η ενεργειακή απόδοση είναι μια κύρια απαίτηση για τη νέα γενιά κινητών δικτύων και ως μέσο μείωσης του λειτουργικού κόστους αλλά και

ως μέσο μείωσης της περιβαλλοντικής επίδρασης. Ένα άλλο κύριο συστατικό των 5G δικτύων είναι η αυξημένη πυκνότητα των σταθμών βάσης μικρής εμβέλειας, όπως τα femtocells. Βασισμένοι στη σχεδιαστική αρχή που απαιτεί ένα σύστημα να είναι ενεργό και να μεταδίδει μόνο όταν και όπου χρειάζεται, σε αυτή τη δημοσίευση αξιολογούμε τα ενεργειακά κέρδη στην κατανάλωση που προκύπτουν όταν η κατάσταση μερικής απενεργοποίησης (sleep mode) συνδυάζεται με στρατηγικές υβριδικής πρόσβασης και εκτιμάμε τα οφέλη σε ενεργειακή απόδοση και χωρητικότητα. Οι εξομοιώσεις μας δείχνουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην επίδοση του δικτύου και των χρηστών.

7. Bouras C., Diles G. " Distributed Sleep Mode Power Control in 5G Ultra Dense Networks" 2017 International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2017), St. Petersburg, Russia, 2017

Περίληψη: Τα επερχόμενα 5G δίκτυα χαρακτηρίζονται από υπερ-πυκνές δομές από μικροκυψέλες. Οι δομές αυτές είναι ικανές να παρέχουν την απαιτούμενη αύξηση σε χωρητικότητα και ρυθμούς μετάδοσης. Παρόλα αυτά, οι περιορισμένοι πόροι παρουσιάζουν προκλήσεις στο πως θα κατανομηθούν ανάμεσα στον μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης. Ο κατανομημένος συντονισμός θα παίξει μεγάλο ρόλο στο διαμοιρασμό πόρων. Σε αυτή τη δημοσίευση παρουσιάζουμε ένα μηχανισμό ελέγχου ισχύος για πυκνές δίκτυα femtocells, ο οποίος αξιοποιεί στρατηγικές κατάστασης αναμονής και διαμοιρασμού φάσματος ανάμεσα στους χρήστες. Ο μηχανισμός οδηγεί σε αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης των συνδρομητών femtocells, διατηρώντας την επίδοση σε μη συνδρομητικούς χρήστες και αυξάνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση του δικτύου.

8. Bouras C., Diles G. Energy savings in power control for 5G dense femtocells" 2017 The 12th International Conference on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA 2017), Barcelona, Spain, 2017 (to appear)

Περίληψη: Η δραματική αύξηση της κίνησης που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια στα κινητά δίκτυα δεν αναμένεται να επιβραδυνθεί. Η αύξηση του αριθμού των εγκατεστημένων σταθμών βάσης διαφορετικής εμβέλειας και δυνατοτήτων που δημιουργώντας υπερβολικά πυκνά δίκτυα είναι μία από τις λύσεις που θα υιοθετηθούν για να καλύψουν τις απαιτήσεις. Στο πλαίσιο αυτό μηχανισμοί ενεργειακής απόδοσης θα χρειαστούν προκειμένου να διατηρηθεί ο ενεργειακός αντίκτυπος μιας τέτοιας προσέγγισης αποδοτικός. Σε αυτή την εργασία εστιάζουμε στα πυκνές συστοιχίες femtocells (clusters) και εκτιμούμε τα ενεργειακά κέρδη που προκύπτουν από το μηχανισμό κατάστασης αναμονής σε femtocells. Ο μηχανισμός προσπαθεί να μειώσει τον αριθμό των ενεργών femtocells κλειστής πρόσβασης παρέχοντας κίνητρα στους συνδρομητές τους να συντονιστούν επιτυγχάνοντας μείωση της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να διακυβεύεται η ρυθμαπόδοσή τους. Οι προσομοιώσεις διερευνούν τα διαφορετικά επίπεδα εξοικονόμησης ενέργειας ανάλογα με τις επιλεγμένες παραμέτρους και την πυκνότητα ανάπτυξης των σταθμών.

Αναφορές

Enhancement of Geometry and Throughput in LTE Femtocells Cognitive Radio Networks, Mohamed Shalaby, Mona Shokair, Yaser S. E. Abdo, Wireless Personal Communication, DOI 10.1007/s11277-013-1527-8, pp 1-11

System Design and Performance Analysis of LTE Cognitive Femtocells, Mohamed Shalaby, Mona Shokair, Nagy Wadie Messiha, DOI: 10.1007/s11277-015-2915-z Wireless Personal Communications, Springer US

Analyzing of power control technique in LTE-advanced Femtocell network, Azita Laily Yusof, Zairul Azren Mohd. Kamarul Zaman, Ainnur Eiza Azhar, Norsuzila Ya'acob, Azlina Idris, Journal of Scientific Research and Development 3 (2): pp. 98-105, 2016

Throughput Calculation according to User Location in LTE-A Network, Kishor Pratap Singh, Pradeep Kumar Chopra, International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE), Volume 3, Issue 11, November 2014, pp. 1611-1617

Analysis of Radar Interference Effects on MIMO LTE Downlink Performance, Rimvydas Aleksiejunas, Jevgenij Krivochiza, Jurgis Aleksandravicius, Kestutis Svirskas, Vytautas Jonkus, Wireless Personal Communications, January 2015, Springer US, pp. 1719-1731

Joint User Association and Resource Partitioning with QoS Support for Heterogeneous Cellular Networks, Tian-Qing Zhou, Yong-Ming Huang, Lu-Xi Yang, Wireless Personal Communications, Springer US, Volume 83, Issue 1, 10 July 2015, pp. 383-397

.LD-IMPSO Based Power Adjustment Algorithm for eICIC in QoS Constrained Hyper Dense HetNets, Huilin Jiang, Zhiwen Pan, Nan Liu, Xiaohu You, Wireless Personal Communications 2015, Volume 88, Issue 2, 1 May 2016, Pages 111-131

Simulating LTE/LTE-Advanced Networks with SimuLTE, Antonio Viridis, Giovanni Stea, Giovanni Nardini, Volume 402 of the series Advances in Intelligent Systems and Computing, pp 83-105

Coexistence Between DVB-T/T2 and LTE Standards in Common Frequency Bands, Ladislav Polak, Ondrej Kaller, Lukas Klozar, Martin Slanina, Jiri Sebesta, Tomas Kratochvil, Wireless Personal Communications, Volume 88, Issue 3, 1 June 2016, Pages 669-684

Joint Resource Allocation Algorithms for Downlink in LTE and 5G Networks, Alaa Ghaith, Rima Hatoum, Abbas Hatoum, European International Journal of Science and Technology, Vol. 5 No. 6, pp. 16-30

Interference Mitigation for Femto Deployment in Next Generation Mobile Networks, Hilary Frank, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016 Vol II, IMECS 2016, March 16 - 18, 2016, Hong Kong

Analysis of downlink power control and cooperation scheme for twotier heterogeneous cellular network, Pragya Swami, Mukesh Kumar Mishra, Aditya Trivedi, International Journal of Comminucations Systems, DOI: 10.1002/dac.3282, 2017

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] The International Telecommunication Union, Statistics, <http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ICTFactsFigures2016.pdf> (June 2016).
- [2] ITU-R, International mobile telecommunications-2000 (IMT-2000), Recommendation ITU-R M.687-2, February 1997.
- [3] M.C. Necker, "Local Interference Coordination in Cellular OFDMA Networks" IEEE 66th Vehicular Technology Conference, 2007. VTC 2007. Fall 2007.
- [4] ITU-R, Principles for the process of development of IMT-advanced, Resolution ITU-R 57, October 2007.
- [5] ITU-R, Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000, Recommendation ITU-R M.1645, June 2003.
- [6] 3GPP TR 36.913. Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 11).
- [7] M. Olsson, S. Sultana, S. Rommer, L. Frid, C. Mulligan, SAE and the Evolved Packet Core – Driving the Mobile Broadband Revolution, Academic Press, 2009.
- [8] 3GPP Technical Specification 29.060, 'General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Tunnelling Protocol (GTP) across the Gn and Gp interface', www.3gpp.org.
- [9] 3GPP TS 36.300 V 12.6.0, June 2015; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2, Release 11
- [10] 3GPP TR 36.872 V 12.1.0, December 2013; Technical Specification Group Radio Access Network; Small Cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN – Physical layer aspects, Release 12
- [11] Ericsson White paper, "LTE release 13, Expanding The Networked Society", Uen 284 23-8267, April 2015

- [12] Eurescom message, «5G technologies and services», Spring 2014
- [13] Ericsson, 5G radio access – capabilities and technologies, Ericsson White paper, April 2016, <https://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-5g.pdf>
- [14] ICT-317669 METIS project, Updated scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system with recommendations for future investigations, Deliverable D1.5, April 2015, available at: https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D1.5_v1.pdf
- [15] Ericsson, Ericsson Mobility Report, November 2015, available at: <http://www.ericsson.com/res/docs/2015/mobility-report/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf>
- [16] Cisco, in Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019 White Paper, February 2015. http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.pdf
- [17] Jose F Monserrat, Genevieve Mange, Volker Braun, Hugo Tullberg, Gerd Zimmermann and Ömer Bulakci ‘METIS research advances towards the 5G mobile and wireless system definition’, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2015, 2015:53, DOI: 10.1186/s13638-015-0302-9
- [18] METIS-II, ‘5G RAN Architecture and Functional Design’, White paper, March 8th, 2016, <https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/5G-PPP-METIS-II-5G-RAN-Architecture-White-Paper.pdf>
- [19] METIS D6.6, “Final Report on the METIS System Concept and Technology Roadmap,” 2015
- [20] METIS Deliverable D3.1 «5G spectrum scenarios, requirements and technical aspects for bands above 6 GHz», 2016-05-31
- [21] X Cheng, Y Koucheryavy, Y Li, F Zhao, T Znati (ed.), Dynamic Spectrum Access for Throughput, Delay, and Fairness Enhancement In Cognitive Radio Networks, EURASIP J Wirel Commun Netw, November 2014

- [22] MR Akdeniz, Y Liu, MK Samimi, S Sun, S Rangan, TS Rappaport, E Erkip, Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation. *IEEE J Sel Area Comm* 32(6), 1164–1179 (2014)
- [23] V Jungnickel, K Manolakis, W Zirwas, B Panzner, V Braun, M Lossow, M Sternad, R Apelfrojd, T Svensson, The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G. *IEEE Commun Mag* 52(5), 44–51 (2014)
- [24] E Larsson, O Edfors, F Tufvesson, T Marzetta, Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Commun Mag* 52(2), 186–195 (2014)
- [25] K. Okino, et al., “Pico Cell Range Expansion with Interference Mitigation toward LTE-Advanced Heterogeneous Networks,” in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011.
- [26] Jose F Monserrat, Genevieve Mange, Volker Braun, Hugo Tullberg, Gerd Zimmermann and Ömer Bulakci, «METIS research advances towards the 5G mobile and wireless system definition», *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 53, 2015, DOI: 10.1186/s13638-015-0302-9
- [27] K. Smiljkovikj, P. Popovski, et al., “Analysis of the Decoupled Access for DL and UL in Wireless Heterogeneous Networks,” *IEEE Wireless Communications Letters*, Jul 2014.
- [28] ‘Femtoforum,’ <http://www.femtoforum.org>.
- [29] J. Cullen, ‘Radioframe presentation’ in *Femtocell Europe 2008*, London, UK, June 2008.
- [30] Small cell forum, “Market status statistics”, *Mobile Experts*, February 2016, version SCF050.07.03.
- [31] WinterGreen Research, *Small Cells and Femtocells Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2013 to 2019*, Code: MRS - 1091, Oct-2013.
- [32] S.-F. Su, *The UMTS Air-Interface in RF Engineering: Design and Operation of UMTS Network*. McGraw- Hill Professional, May 2007.
- [33] 3GPP, ‘3G Home NodeB Study Item Technical Report,’ 3rd Generation Partnership Project – Technical Specification Group Radio Access Networks, Valbonne (France), Tech. Rep. 8.2.0, Sep. 2008.

- [34] Ericsson, 'Simulation results for Home NodeB uplink performance in case of adjacent channel deployment within the block of flats scenario,' 3GPP TSG-RAN Working Group 4 (Radio), Sorrento (Italy), Tech. Rep. R4-080152, Feb. 2008.
- [35] M. Latham, 'Consumer attitudes to femtocell enabled in-home services – insights from a European survey,' in *Femtocells Europe 2008*, London, UK, June 2008
- [36] S. Carlaw, 'Ipr and the potential effect on femtocell markets,' in *FemtoCells Europe*. ABIresearch, 2008.
- [37] M. Beach, et al., 'A Study into the Application of Interference Cancellation Techniques,' Ofcom, Tech. Rep., Apr. 2006, Report No: 72/06/R/038/U.
- [38] 3GPP TR 36.921. 'Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis'. 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., 2012.
- [39] T. Novlan, J. Andrews, I. Sohn, R. Ganti, and A. Ghosh, "Comparison of fractional frequency reuse approaches in the OFDMA cellular downlink in Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE, dec. 2010, pp. 1 –5.
- [40] R1-050738, Siemens, —Interference mitigation – Considerations and Results on Frequency Reuse||, RAN WG1#42, London, UK, Aug./Sept. 2005
- [41] Ericsson, —Downlink inter-cell interference coordination/avoidance evaluation of frequency reuse,|| Tech. Rep. TSG-RAN WG1 R1-061374, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), May 8-12, 2006
- [42] R4-091907, "Frequency Reuse Results with Mixed Traffic", Qualcomm Europe.
- [43] R4-091906, "Frequency reuse results with full buffer", Qualcomm Europe, May 2009.
- [44] R4-094851, "Utility Messages for HeNB ICIC", Qualcomm Europe
- [45] R4-092872, "Downlink interference coordination between HeNBs", CMCC, August 2009.

- [46] R4-093349, Femtocell and Macrocell interference coordination based on SFR, Motorola.
- [47] R4-093556, "HeNB Downlink Interference Avoidance with Adaptive Frequency Selection", NEC.
- [48] R4-094248, "HeNB Adaptive Frequency Selection", NEC.
- [49] H. Claussen, "Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure," in IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2007 (PIMRC'07), 2007.
- [50] 3GPP-TS 36.300 Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; March, 2012
- [51] I. Ashraf, F. Boccardi, and L. Ho, "Sleep mode techniques for small cell deployments," IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 8, pp. 72–79, August 2011.
- [52] 3GPP TS 36.133, "Requirements for support of radio resource management,"Tech. Rep.
- [53] 3GPP TS 36. 423, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP)" Tech. Rep
- [54] 'Challenges in Deployment of UMTS/HSPA Femtocell,' Aricent White Paper, February 2008.
- [55] 'Connecting when it counts: the role of femtocells in emergency calls,' Intrado Technical Report, 2008.
- [56] H. N. Vu and L. B. Le, "Hybrid access design for femtocell networks with dynamic user association and power control," in Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE, 2012, pp. 1–5.
- [57] K.-T. Cho and B. H. Ryu, "Partitioning resource priority regions for hybrid access mode femtocells," 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012, pp. 625–630.

- [58] E. Bernal-Mor, V. Pla, D. Gutierrez-Estevez, J. Martinez-Bauset, "Resource management for macrocell users in hybrid access femtocells," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2012, pp. 1859–1864
- [59] M. I. Afaz Uddin Ahmed, Mohammad Tariqul Islam and M. Ghanbarisabagh, "Dynamic resource allocation in hybrid access femtocell network," The Scientific World Journal, vol. 2014, no. Article ID 539720, p. 7 pages, 2014.
- [60] Y. Zhong and W. Zhang, "Multi-channel hybrid access femtocells: A stochastic geometric analysis," Communications, IEEE Transactions on, vol. 61, no. 7, pp. 3016–3026, 2013.
- [61] R. Balakrishnan and B. Canberk, "Traffic-aware QoS provisioning and admission control in OFDMA hybrid small cells," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 63, no. 2, pp. 802–810, Feb 2014.
- [62] Y. Chen, J. Zhang, and Q. Zhang, "Incentive mechanism for hybrid access in femtocell network with traffic uncertainty," in Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, June 2013, pp. 6333–6337.
- [63] C.-H. Chai, Y.-Y. Shih, and A.-C. Pang, "A spectrum-sharing rewarding framework for co-channel hybrid access femtocell networks," in INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE, April 2013, pp. 565–569.
- [64] H. Marshoud, H. Otrok, H. Barada, Macrocell–femtocells resource allocation with hybrid access motivational model, Physical Communication, Volume 11, June 2014, Pages 3-14, ISSN 1874-4907, <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2013.12.001>
- [65] H. M. Elmaghraby, Z. Ding, "Scheduling and Power Allocation for Hybrid Access Cognitive Femtocells", in Journal of IEEE Transactions on Wireless Communications, Volume 16 Issue 4, April 2017, p. 2520-2533
- [66] J. Xue, J. Yue, «Hybrid access for femtocells based on contract theory», International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol 12, Issue 10, October-06-2016, 10.1177/1550147716669626
- [67] D. Kim, T. Park, S. Kim, H. Kim, S. Choi, "Load Balancing in Two-Tier Cellular Networks With Open and Hybrid Access Femtocells", IEEE/ACM Transactions

- on Networking, Volume 24, Issue 6, December 2016, p. 3397-3411 DOI: <https://doi.org/10.1109/TNET.2016.2527835>
- [68] E. Mugume and D. K. C. So, "Sleep mode mechanisms in dense small cell networks," in 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2015, pp. 192–197.
- [69] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, and M. Latva-aho, "Dynamic clustering and sleep mode strategies for small cell networks," in 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), Aug 2014, pp. 934–938.
- [70] S. Ali, M. Ismail, and R. Nordin, "Femtocell sleep mode activation based interference mitigation in twotier networks," *Procedia Technology*, vol. 11, pp. 1088 – 1095, 2013, 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics, fICEEIg 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313004520>
- [71] A. Ebrahim and E. Alsusa, "Interference minimization through sleep mode based resource allocation for future femtocell networks," 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), London, 2015, pp. 1679-1684, doi: 10.1109/ICC.2015.7248566
- [72] L. Saker, S. E. Elayoubi, R. Combes and T. Chahed, "Optimal Control of Wake Up Mechanisms of Femtocells in Heterogeneous Networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 3, pp. 664-672, April 2012, doi: 10.1109/JSAC.2012.120415
- [73] http://ru6.cti.gr/mobile/uploads/Hybrid_Sim.zip
- [74] 3GPP TR 36.814 V9.0.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)," 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep., 2010.
- [75] L. T. W. Ho and H. Claussen, "Effects of user-deployed, co-channel femtocells on the call drop probability in a residential scenario," in 2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Sept 2007, pp. 1–5. H.

- [76] Lei, L. Zhang, X. Zhang, and D. Yang, "A novel multi-cell ofdma system structure using fractional frequency reuse," in IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2007 (PIMRC'07), 2007.
- [77] P. Lee, T. Lee, J. Jeong, and J. Shin, "Interference management in LTE femtocell systems using fractional frequency reuse," in Advanced Communication Technology (ICACT), 2010 The 12th International Conference on, vol. 2, feb. 2010, pp. 1047–1051.
- [78] H. Claussen, I. Ashraf, and L. T. W. Ho, "Dynamic idle mode procedures for femtocells," Bell Labs Technical Journal, vol. 15, no. 2, pp. 95–116, Sept 2010
- [79] M. Simsek, T. Akbudak, B. Zhao, and A. Czylik, "An LTE-femtocell dynamic system level simulator," in Smart Antennas (WSA), 2010 International ITG Workshop on, Feb 2010, pp. 66–71.
- [80] C. Herranz, V. Osa, J. F. Monserrat, D. Calabuig, N. Cardona and X. Gelabert, "Cognitive Radio enabling opportunistic spectrum access in LTE-Advanced femtocells," Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on, Ottawa, ON, pp. 5593-5597, (2012)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV: ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

TTE	Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνίας
0G	Zero Generation
1G	First Generation
2G	Second Generation
3D	3 dimension
3G	Third Generation
3GPP	Third Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
5G PPP	5G Infrastructure Public Private Partnership
AAS	Active Antenna Systems
ABS	Almost Blank Subframes
ACIR	Adjacent Channel Interference Rejection
ACS	Adjacent Channel Selectivity
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
BB L2	Broadband Layer 2
BB Phy	Broadband Physical Layer
BER	Bit Error Rate
BBU	BaseBand Unit
BS	Base Station
C-RAN	Cloud Radio Access Network
CA	Carrier Aggregation
CCU	Cell-center User
CDF	Cumulative Distribution Function

CDMA	Code Division Multiple Access
CDMA2000 1xEV-DO	CDMA Evolution-Data Optimized
cdmaOne	Code Division Multiple Access One
CEU	Cell-edge User
CRE	Cell Range Expansion
CRP	Cell Reselection Priority
CRS	Cell-specific Reference Signal
CRS	Communication with relaxed synchronism
CN	Core Network
CoMP	Coordinated Multi-Point
CSG	Closed Subscriber Group
CSI	Channel State Information
D2D	device-to-device
D-AMPS	Digital AMPS
DC	Data Centers
DFT-S-OFDM	Discrete Fourier Transform-spread-OFDM
DoS	Denial of Service
DRX	Discontinuous Reception
DSL	Digital Subscriber Line
DVB-C	Digital Video Broadcasting – Cable
DVB-H	Digital Video Broadcasting –Handheld
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
E2E	end-to-end
EDGE	Enhanced Data Rates for Global Evolution
eICIC	enhanced ICIC
eIMTA	Enhanced Interference Mitigation & Traffic Adaption

eNodeB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
eUTRAN	Evolved UTRAN
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
F-OFDM/UF-OFDM	Filtered/Universal Filtered OFDM
FAS	Femtocell Application Server
FBMC	Filterbank Multi-Carrier
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
feICIC	Further enhanced non CA-based ICIC
FFR	Fractional Frequency Reuse
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FTTH	Fiber To The Home
Gbps	Giga bits per second
GCSE	Group Call System Enablers
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GPRS	General Packet Radio Services
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HeNB	Home eNodeB
HNB	Home NodeB
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server

HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IC	Interference Cancellation
ICIC	Inter-Cell Interference Cancellation
IETF	Internet Engineering Task Force
IMT	International Mobile Telecommunications
IMT-2000	International Mobile Telecommunications -2000
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications Advanced
IMS	IP Multimedia System
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU- Radiocommunication Sector
ITU-T	ITU- Telecommunication Standardization Sector
Kbps	Kilo bits per second
kByte	kilobyte
LAA	Licensed Assisted Access for LTE
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
LTE-U	Unlicensed spectrum
M2M	Machine to Machine communication
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast/Multicast Service
Mbits	Mega bits
Mbps	Mega bits per second
MBSFN	Multicast/Broadcast Single Frequency Network
MEC	Mobile Edge Computing
METIS/METIS	Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-

II	twenty Information Society 5G (I και II)
MHz	MegaHertz
MIMO	Multiple Input-Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
mMIMO	massive MIMO
MMS	Multimedia messaging service
mMTC	massive MTC
MS	Mobile Station
MTC	Machine Type Communication
NAS	Non Access Stratum
NB-IoT	Narrowband IoT
NFV	Network function virtualization
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NLM	Network Listen Mode
NMT	Nordic Mobile Telephone
NTT	Nippon Telegraph and Telephone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
ONF	Open Networking Forum
OQAM	Offset Quadrature Amplitude Modulation
P-GW	PDN Gateway
P-OFDM	Pulse shaped OFDM
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PFR	Partial Frequency Reuse

ProSe	Proximity Services
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
REM	Radio Environment Measurement
RF	Radiofrequency
RF	Reuse Factor
RIP	Received Interference Power
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RP-ABS	Reduced Power Almost Blank Subframes
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RSRP	Reference Signal Received Power
S-GW	Serving Gateway
SAE	System Architecture Evolution
SAIC	Single Antenna Interference Cancellation
SC	spectrum coordinator
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SDN	Software Defined Networks
SFFR	Soft Fractional Frequency Reuse
SFR	Soft Frequency Reuse
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SMS	Short Message Service

SON	Self Organizing Networks
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TD-CDMA	Time-division Code Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
UDN	Ultra Dense Networks
UE	User Equipment
uMTC	Ultra-reliable MTC
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
URC	Ultra-reliable Communications
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
UTRAN	UTRA Network
V2X	Vehicle-to-everything
VoIP	Voice over IP
W-CDMA	Wideband CDMA
WEP	Wired Equivalent Privacy
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WRC	World Radio Conference
xMBB	Extreme Mobile Broadband