



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

& ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ

ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ

ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ DECOUPLING ΣΕ 5G
AND BEYOND NETWORKS**

ΓΙΩΡΓΟΣ ΚΟΛΟΒΟΣ

A.M: 236308

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΜΠΟΥΡΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	I
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	III
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΓΕΝΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΜΗ-ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΟΥ 5G	9
2.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ	9
2.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	10
2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ 5G	11
2.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ 5G	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: DECOUPLING	18
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ DOWNLINK AND UPLINK DECOUPLING	18

3.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	19
3.3 ΛΟΓΟΙ ΝΑ ΚΑΝΟΥΜΕ DOWNLINK AND UPLINK DECOUPLING	20
3.4 DECOUPLING ΣΤΑ ΗΔΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LTE.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: DECOUPLING ΣΕ 5G ΔΙΚΤΥΑ	25
4.1 ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ	25
4.2 TDD ΚΑΙ FDD DECOUPLING.....	26
4.3 DECOUPLING ΜΕ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΚΥΜΑΤΩΝ	27
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	28
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	29

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

downlink	DL
uplink	UL
user equipment	UE
machine to machine	M2M
συζευξη/σύνδεση	coupling
αποσυζευξη/αποσύνδεση	decoupling
Downlink / Uplink Decoupling	DUDe
Διαδικτύου των Πραγμάτων	IoT
διακίνηση των πακέτων	throughput
milli-meter waves	mmWaves
Network MIMO	Δικτυο MIMO
Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας	OFDM
κυκλικό πρόθεμα	CP
Universal filtered multicarrier	UFMC
Network Functions Virtualization	NFV
εικονικοποιημένη λειτουργία δικτύου	VNF
δίκτυα ραδιοπρόσβασης	RAN
υποδομή εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου	NFVI

Πλαίσιο διαχείρισης εικονικοποίησης λειτουργίας δικτύου	NFV-MANO Architectural Framework
Software-defined networking	SDN
Cloud Radio Access Network	C-RAN
δικτυο κεντρικών μονάδων βάσης	BBU
Κοινής Δημόσιας Διεπαφής Ραδιοφώνου	CPRI
εικονικά δίκτυα ραδιοπρόσβασης	vRANs
ετερογενή δίκτυα πολλαπλών επιπέδων	HetNets
επικοινωνιών τύπου μηχανής	MTC
σταθμός βάσης	BS
καθυστερήση	latency
χωρητικότητα	capacity
απομακρυσμένος έλεγχος	remote control
signal to noise ratio	SNR
Device-2-Device	D2D
αναγνωριστικό	ID
τρόποι σηματοδότησης	NAS – AS
Time Division Duplex	TDD
Frequency Division Duplex	FDD



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις τηλεπικοινωνίες, το 5G είναι το πρότυπο τεχνολογίας πέμπτης γενιάς για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το οποίο οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας άρχισαν να αναπτύσσουν παγκοσμίως το 2019. Θεωρείται δηλαδή ο διάδοχος των δικτύων 4G που παρέχουν συνδεσιμότητα στα περισσότερα τρέχοντα κινητά τηλέφωνα. Όπως και οι προκάτοχοί του, τα δίκτυα 5G είναι κυψελοειδή δίκτυα, στα οποία η περιοχή εξυπηρέτησης χωρίζεται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές που ονομάζονται κελιά. Όλες οι ασύρματες συσκευές 5G σε ένα κελί συνδέονται στο Διαδίκτυο και το τηλεφωνικό δίκτυο μέσω ραδιοκυμάτων μέσω μιας τοπικής κεραιάς στο κελί. Το κύριο πλεονέκτημα των νέων δικτύων είναι ότι θα έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, δίνοντας γρηγορότερες ταχύτητες λήψης, [1] τελικά έως και 10 gigabits ανά δευτερόλεπτο (Gbit / s)[2]. Λόγω του αυξημένου εύρους ζώνης, αναμένεται ότι τα νέα δίκτυα δεν θα εξυπηρετούν μόνο κινητά τηλέφωνα όπως τα υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, αλλά και θα χρησιμοποιηθούν ως γενικοί πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου για φορητούς υπολογιστές. Θα ανταγωνίζονται τα υπάρχοντα ISP όπως το καλωδιακό internet και επίσης θα καταστήσουν δυνατές νέες εφαρμογές σε περιοχές IoT και M2M. Τα τρέχοντα κινητά τηλέφωνα 4G δεν θα μπορούν να χρησιμοποιούν τα νέα δίκτυα, τα οποία θα απαιτούν νέες ασύρματες συσκευές με δυνατότητα 5G. Η πρώτη πόλη στην Ελλάδα με δίκτυο 5G είναι τα Τρίκαλα από τις 16 Μαρτίου 2018 ενώ η επόμενη θα είναι η Πάτρα. [3]

1.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΓΕΝΙΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ

Στα περίπου 175 χρόνια που μεσολάβησαν από το τεχνολογικό επιτευγμα του Morse, οι εξελίξεις στις τηλεπικοινωνίες ήταν ραγδαίες. Από τις εφευρέσεις που ακολούθησαν ξεχωρίζει το τηλέφωνο που κατασκεύασε ο Alexander Graham Bell το 1876. Η σημαντικότερη μετεξέλιξη όλων των εφευρέσεων ήταν το Διαδίκτυο που βασίστηκε στα πρώτα δίκτυα υπολογιστών για να πάρει την αρχική του μορφή στα μέσα της δεκαετία του '70. Η χρήση του βέβαια δεν έγινε μαζική παρά τα τελευταία είκοσι χρόνια, όταν και αναπτύχθηκαν υπερσύγχρονες υποδομές σταθερών και κινητών δικτύων. Η εφεύρεση αυτή άλλαξε τον τρόπο που ενημερωνόμαστε,

επικοινωνούμε, εργαζόμαστε και διασκεδάζουμε. Σήμερα, ζούμε σε μια εποχή υψηλών ταχυτήτων και σταθερής πρόσβασης στο internet, με τα δίκτυα να βελτιώνονται και να εξελίσσονται διαρκώς. Οπτικές ίνες, δίκτυα κινητής επόμενης γενιάς, διασυνδεδεμένα αντικείμενα και μια σειρά καινοτομιών μας φέρνουν ακόμη πιο κοντά στο μέλλον. Από την πρώτη έως την τέταρτη γενιά (4G) δικτύων κινητής τηλεφωνίας, το downlink (DL) και uplink (UL) μιας περιόδου συνδεσης έχουν συζευχθεί. Επίσης, ο εξοπλισμός ενός χρήστη κινητής τηλεφωνίας (UE) πρέπει να συσχετιστεί και στο DL και UL ταυτόχρονα. Ιστορικά, αυτή ήταν μια σχεδόν βέλτιστη προσέγγιση. Ωστόσο, αυτή η συμβατική προσέγγιση πρόσφατα [4] βρίσκεται υπό εξέταση, δεδομένου των πιθανών κερδών που μπορούν να επιτευχθούν από το decoupling μιας σύνδεσης στο πλαίσιο ενός κυψελοειδούς δικτύου.

Τα επιχειρήματα υπέρ του decoupling είναι αρκετά. Από σκοπιά σχεδιασμού δικτύου, τα κανάλια μεταφοράς είναι ευκολότερα στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του συγχρονισμού των αναγνωρίσεων (ACK / NAK), τη διαχείριση πόρων DL / UL και τον έλεγχο ισχύος. Το decoupling απαιτεί επίσης ισχυρό συγχρονισμό και συνδεδεσιμότητα δεδομένων (π.χ. μέσω ινών). Από την προοπτική ανάπτυξης και τοπολογίας τα κυψελοειδή συστήματα έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί υπό την προϋπόθεση ενός ομοιογενούς δικτύου με μακροκυψελίδες που μεταδίδουν όλα με την ίδια ισχύ. Από την άποψη της κυκλοφορίας, το φορτίο και στις δύο κατευθύνσεις (UL, DL) ήταν περίπου το ίδιο στα συστήματα 2G και 3G. Επιπλέον, τα συστήματα 3.5G (π.χ. HSPA) και 4G κυριαρχούνται από την downlink κίνηση. Επομένως, μια συζευγμένη (coupled) ένωση έχει περιορισμούς. Ως εκ τούτου, είναι σαφές ότι μια καλά σχεδιασμένη στρατηγική που βασίζεται στο Downlink / Uplink Decoupling (DUDe) μπορεί να αποδειχθεί καλύτερη.

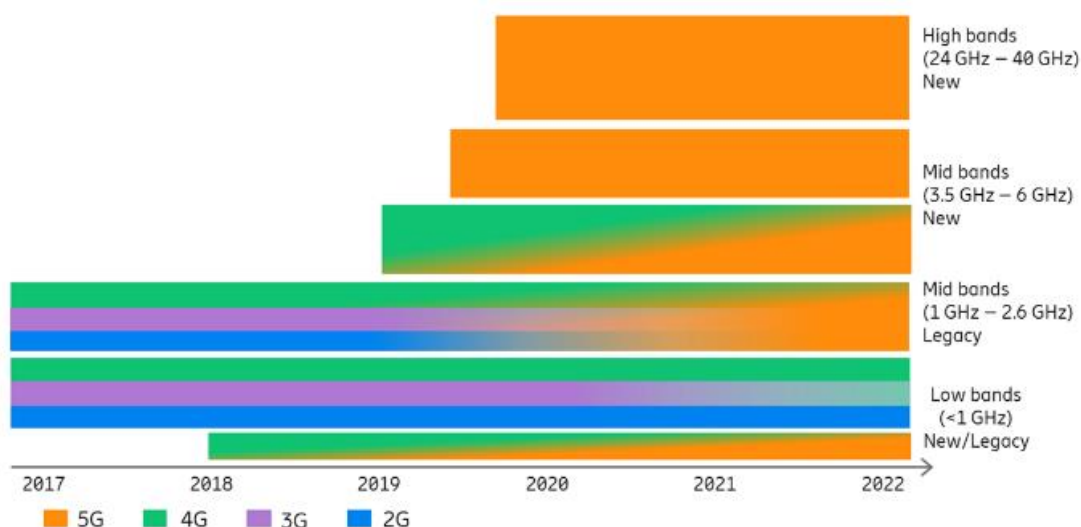
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΟΜΗ- ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ 5G

2.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Κύρια απαίτηση για το 5G και τα επόμενης γενιάς δίκτυα είναι η αποσυμφόρηση της κατανάλωσης των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Οι χρήστες θέτουν ως κύρια προτεραιότητα υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων. Όλα αυτά σε μία εποχή που ο όγκος των δεδομένων μοιάζει απροσπέλαστος. Επομένως, η επόμενη γενιά δικτύου θα πρέπει να παρέχει βασικές ταχύτητες της τάξεως των 100 Mbit/s και μέγιστες ταχύτητες έως 10 Gbit/s. Το πρόβλημα δεν μένει εκεί αλλά επεκτείνεται στη τεράστια συγκέντρωση μετάδοσης δεδομένων σε συγκεκριμένες περιοχές, όπως κόμβοι των πόλεων. Επιπλέον, υπολογίζεται ότι θα υπάρχει αύξηση του αριθμού των συσκευών που θα πρέπει να υποστηριχθούν. Ενώ ο όγκος των δεδομένων που εμπλέκονται σε κάθε επικοινωνία μεταξύ των χρηστών μπορεί να μην είναι μεγάλος, ο μεγάλος αριθμός συσκευών θα δυσκολέψει την αξιόπιστη και αποτελεσματική επικοινωνία. Τα υπάρχοντα δίκτυα με τεχνολογία LTE-Advanced μπορούν να επιτύχουν πολύ χαμηλότερη καθυστέρηση (latency) αλλά η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών όπως ο απομακρυσμένος έλεγχος (remote control) είναι πιθανό να απαιτεί ακόμα χαμηλότερες καθυστερήσεις. Επομένως, η διακίνηση των πακέτων (throughput), η χωρητικότητά του δικτύου (capacity) και η πιθανή καθυστέρηση (latency) πρέπει να ερευνηθούν περαιτέρω. Μια ακόμη πρόκληση αποτελεί η ανάγκη να ικανοποιηθούν αποτελεσματικά όλα αυτά, με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μεγαλύτερη ασφάλεια. Ορισμένες συσκευές απαιτούν γρήγορη μετάδοση των δεδομένων ενώ κάποιες άλλες συσκευές, απαιτούν πολύ χαμηλά επίπεδα μετάδοσης. Εκτός από τις διαφορετικές απαιτήσεις αναγκαία είναι και η ευρεία κάλυψη του 5G δικτύου. Θα χρειαστεί να αναπτυχθούν νέες αρχιτεκτονικές και να γίνει αναβάθμιση του παλιού εξοπλισμού. Το σύστημα 5G πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκρίνεται στις συνολικές απαιτήσεις συσκευών και εφαρμογών μοιράζοντας τους πόρους με άλλα δίκτυα, όπου χρειάζεται. Αυτό είναι πιθανό να έχει συνέπειες τόσο στο σχεδιασμό του 5G δικτύου όσο και στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παροχή των υπηρεσιών

2.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

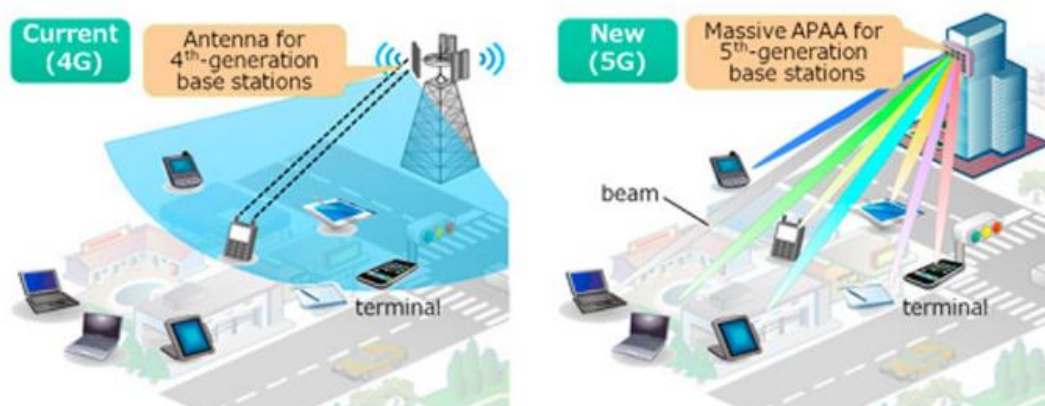
Κύριο χαρακτηριστικό στην κινητή τηλεφωνία είναι η ραδιοσυχνότητες. Χωρίζονται σε μπάντες και κάθε μία έχει τα δικά της, μοναδικά για την καθεμία, χαρακτηριστικά. Στο 4G δίκτυο χρησιμοποιούνται ραδιοσυχνότητες μικρότερες των 6 GHz , ενώ στο 5G υπολογίζεται πως θα χρησιμοποιηθούν αρκετά υψηλότερες συχνότητες (30-90 GHz). Αυτές οι ραδιοσυχνότητες έχουν μήκη κύματος που ονομάζονται milli-meter waves (mmWaves) και βρίσκονται μεταξύ 1 και 10 milli-meters (χιλιοστά)



Εικόνα 2.1 : Συχνότητα φάσματος για τις γενιές δικτύων με την πάροδο των χρόνων [31]

Μεταβάλλοντας την συχνότητα επηρεάζουμε και το μήκος κύματος, αφού οι δύο αυτές μεταβλητές είναι αντιστρόφως ανάλογες. Μικρένοντας το μήκος κύματος επιτυγχάνουμε μετάδοση περισσότερων πληροφοριών, γι' αυτό και το 5G αναμένεται να είναι πολύ πιο γρήγορα από το 4G. Η λήψη εφαρμογών απο το διαδίκτυο θα γίνεται πλέον με τρομερά γρήγορες ταχύτητες. Αυτό είναι δυνατό διότι κάθε σταθμός μετάδοσης θα περιέχει περισσότερες κεραίες, μεταδίδοντας έτσι παραπάνω πληροφορία. Εδώ όμως προκύπτει πρόβλημα. Υπάρχει θορύβου. Μικρένοντας το μήκος κύματος το σήμα θα είναι ευαίσθητο σε θόρυβο. Οι πληροφορίες δηλαδή δεν μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλες και είναι επίσης πιθανό να μεταβάλλονται. Τα millimeter waves του 5G έχουν πολύ μικρότερο εύρος σε σύγκριση με το 4G ενώ επίσης είναι ευάλωτα σε φυσικά εμπόδια που μπορούν να μειώσου την αποτελεσματικότητά τους. Η λύση είναι η εγκατάσταση σταθμών σε πολλά σημεία, ώστε το σήμα να μεταδίδεται από τον έναν στον άλλο προσπερνώντας τα εμπόδια. Οι νεοί σταθμοί θα διαφέρουν απο τις τωρινές κεραίες και θα έχουν

μικρότερο μέγεθος. Επίσης, είναι πιο εύκολο να εγκατασταθούν σε διάφορα σημεία της πόλης. Η ύπαρξη πολλών μικρών σταθμών βάσης ονομάζεται beamforming. Πλέον, θα υπάρχουν πολλοί μικροί τέτοιοι σταθμοί που θα εκπέμπουν σήμα. Και έτσι θα μειωθούν οι παρεμβολές, ενώ ακόμη θα έχουμε πιο γρήγορες ταχύτητες.



Εικόνα 2.2 : Σύγκριση τρόπου μετάδοσης κεραίων για δίκτυα 4^{ης} και 5^{ης} γενιάς [32]

2.3 ΤΕΧΝΙΟΛΟΓΙΕΣ 5G

Οι βασικότερες τεχνολογίες στα δίκτυα 5G είναι οι εξής:

- Network MIMO (Δικτυακό MIMO) :

Η τεχνολογία Massive MIMO είναι έτοιμο να αποτελέσει βασικό συστατικό της νέας γενιάς γρήγορων δικτύων 5G που θα ξεκινήσουν να κυκλοφορούν από το τέλος του 2019. Το MIMO σημαίνει πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εισόδων. Το MIMO μπορεί ουσιαστικά να λειτουργεί ως ένα ασύρματο δίκτυο που επιτρέπει τη μετάδοση και τη λήψη περισσότερων από ένα σημάτων δεδομένων ταυτόχρονα μέσω του ίδιου ραδιοφωνικού καναλιού. Τα τυπικά δίκτυα MIMO τείνουν να χρησιμοποιούν δύο ή τέσσερις κεραίες. Το Massive MIMO, από την άλλη, χρησιμοποιεί ιδιαίτερα μεγάλο αριθμό κεραιών και γιαυτό τείνει να εφαρμόζεται σε συστήματα με δεκάδες ή και εκατοντάδες κεραίες. Για παράδειγμα, τα Huawei, ZTE και Facebook έχουν δείξει συστήματα Massive MIMO με κεραίες 96 έως 128. Το AIR 6468 της Ericsson, το οποίο η εταιρεία ισχυρίζεται ότι είναι "το πρώτο ραδιόφωνο 5G NR στον κόσμο", χρησιμοποιεί 64 κεραίες μετάδοσης και 64 λήψης. Ενώ οι τυπικές αρχές MIMO χρησιμοποιούνται ήδη σε πολλά πρότυπα Wi-Fi και 4G, το Massive MIMO θα τεθεί πραγματικά σε λειτουργία μόλις φτάσει το 5G. Αναμένεται ότι το Massive MIMO θα είναι το βασικό συστατικό του 5G.

Υπενθυμίζουμε ότι ο βασικός ρόλος οποιουδήποτε δικτύου 5G είναι η διαχείριση της τεράστιας αύξηση και χρήσης δεδομένων. Η Cisco εκτιμά ότι όταν το 5G πρόκειται να κυκλοφορήσει στο ευρύ κοινό θα υπάρχουν 5,5 δισεκατομμύρια χρήστες κινητής τηλεφωνίας σε όλο τον κόσμο, και πως ο καθένας θα καταναλώνει 20 GB δεδομένων ανά μήνα. Επομένως, η τεράστια ικανότητα του MIMO να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες - και πολλές συσκευές - ταυτόχρονα το καθιστά την τέλεια τεχνολογία για την κάλυψη των αναγκών της προσεχούς εποχής 5G.

- OFDM για 5G:

Στις τηλεπικοινωνίες, η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) είναι ένας τύπος ψηφιακής μετάδοσης και μια μέθοδος κωδικοποίησης ψηφιακών δεδομένων σε πολλαπλές συχνότητες φορέα. Το OFDM έχει εξελιχθεί σε ένα δημοφιλές σχήμα για ψηφιακή επικοινωνία ευρείας ζώνης, που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως ψηφιακή τηλεόραση και μετάδοση ήχου, πρόσβαση στο Διαδίκτυο DSL, ασύρματα δίκτυα, δίκτυα γραμμών ισχύος και κινητές επικοινωνίες 4G / 5G . Αυτή η τεχνική αντιμετωπίζει τα προβλήματα επιλογής συχνότητας και βελτιώνει την απόδοση του φάσματος [5]. Μετά την έναρξη των συστημάτων 5G, πολλά νέα συστήματα πολλαπλών μεταφορέων έχουν αναγνωριστεί ως πιθανές υποψήφιες τεχνολογίες. Το φιλτραρισμένο OFDM (f-OFDM) μοιάζει ως ένας επιπλέον σημαντικός διεκδικητής. Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα φιλτραρίσματος ολόκληρου του φάσματος. Η Ευρωπαϊκής Ένωσης στοχεύει στη κατασκευή ενός δικτύου με βασική αρχή τη μείωση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο στο δίκτυο κατά πέντε φορές εντός της ίδιας περιόδου. Όλες αυτές οι αλλαγές θα είναι δυνατές μόνο εάν ληφθούν υπόψη οι σχετικοί παράγοντες. Πρώτον, θα πρέπει να υπάρχει καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος. Δηλαδή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα νέο φάσμα άνω των 6 GHz, ενώ θα πρέπει επίσης να μειωθούν οι αποστάσεις στα κυψελωτά δίκτυα με την εισαγωγή του MIMO. Τα δίκτυα 4G βασίζονται σε διαμόρφωση OFDM. Για την ικανοποίηση των προδιαγραφών 5G, είναι απαραίτητος ένας εναλλακτικός τρόπος λειτουργίας που μπορεί να βελτιώσει τα συστήματα 4G. Πρέπει να μειώσουμε τις ζώνες των συσκευών που ελέγχουν την επικοινωνία μεταξύ των υπολογιστικών δικτύων σε συχνότητα καθώς και να αφαιρέσουμε το κυκλικό πρόθεμα(CP). Οι κύριες αδυναμίες που σχετίζονται με το CP-OFDM είναι ο φτωχός περιορισμός του φάσματος και μπορεί να επηρεάσει σοβαρά τα μελλοντικά δίκτυα που επιδιώκουν να προσφέρουν τα συστήματα 5G. Για να διασφαλιστεί η βέλτιστη χρήση των παρόντων εύρους ζώνης, τα οποία είναι μικρότερα από GHz [6], η δυναμική συγκέντρωση φάσματος είναι απαραίτητη. Μία ακόμα τεχνική διαμόρφωσης είναι η Universal filtered multicarrier (UFMC), η οποία χρησιμοποιεί διάσπαση της διαθέσιμης ζώνης συχνοτήτων σε μικρότερα κομμάτια, όπως και η f-OFDM.

2.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ 5G

SDN και NFV αρχιτεκτονική

NFV (Network Functions Virtualization)

Η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (ή NFV) είναι μια ιδέα αρχιτεκτονικής δικτύου που χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες της IT εικονικοποίησης για την εικονικοποίηση ολόκληρων κατηγοριών λειτουργιών κόμβου δικτύου σε δομικά στοιχεία που μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους, για τη δημιουργία υπηρεσιών επικοινωνίας.[7]

Το NFV βασίζεται, αλλά διαφέρει από τις παραδοσιακές τεχνικές εικονικοποίησης διακομιστή, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στην πληροφορική. Μια εικονικοποιημένη λειτουργία δικτύου, ή VNF, μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες εικονικές μηχανές που εκτελούν διαφορετικό λογισμικό και διαδικασίες, πάνω από τυπικούς διακομιστές μεγάλου όγκου, συσκευές αποθήκευσης ή ακόμη και υποδομή υπολογιστικού νέφους, αντί να έχουν προσαρμοσμένες συσκευές υλικού για κάθε λειτουργία δικτύου. Για παράδειγμα, ένας εικονικός ελεγκτής περιγράμματος συνεδρίας θα μπορούσε να αναπτυχθεί για την προστασία ενός δικτύου χωρίς το τυπικό κόστος και την πολυπλοκότητα της απόκτησης και εγκατάστασης φυσικών μονάδων προστασίας δικτύου. Άλλα παραδείγματα NFV περιλαμβάνουν εικονικοποιητές εξισορρόπησης φορτίου, τείχη προστασίας, συσκευές ανίχνευσης εισβολής και επιταχυντές WAN.

Αν και εξακολουθεί να είναι μια εκκολαπτόμενη τεχνολογία, η βασική ιδέα πίσω από το NFV είναι ότι οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να αναπτύξουν διάφορες λειτουργίες δικτύου, όπως τείχος προστασίας ή κρυπτογράφηση, σε εικονικές μηχανές (VM). Κάθε φορά που ένας πελάτης ζητά μια νέα λειτουργία δικτύου, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να ανοίξουν αυτόματα ένα VM για αυτήν τη λειτουργία. Αξιοποιώντας αυτήν την τεχνολογία, οι χρήστες του δικτύου δεν χρειάζεται να επενδύσουν σε υψηλούς κόστους συσκευές για να συνδεθούν στο δίκτυο και να καλύψουν τις ανάγκες τους. Και επιπλέον, αυτές οι λειτουργίες δικτύου μπορούν να εγκατασταθούν σε εβδομάδες αντί για μήνες. Όσον αφορά το 5G, το NFV θα βοηθήσει στην εικονικοποίηση πολλαπλών συσκευών στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, το NFV θα επιτρέψει τον τεμαχισμό δικτύου 5G, επιτρέποντας σε διάφορα εικονικά δίκτυα να λειτουργούν πάνω από μια μοναδική, φυσική υποδομή. Επιπλέον, το 5G NFV θα επιτρέψει σε ένα φυσικό δίκτυο να χωριστεί σε διάφορα εικονικά δίκτυα ικανά να υποστηρίξουν πολλαπλά δίκτυα ραδιοπρόσβασης (RAN). Το NFV μπορεί επίσης να αντιμετωπίσει εμπόδια στο 5G βελτιστοποιώντας την παροχή πόρων των λειτουργιών εικονικού δικτύου (VNFs) σε τιμή και ενέργεια διασφαλίζοντας ότι τα VNF λειτουργούν με συνέπεια[8].

Το πλαίσιο NFV αποτελείται από τρία κύρια συστατικά: [9]

A) Οι εικονικοποιημένες λειτουργίες δικτύου (VNF) είναι εφαρμογές λογισμικού λειτουργιών δικτύου που μπορούν να αναπτυχθούν σε υποδομή εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (NFVI). [10]

B) Η υποδομή εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (NFVI) είναι το σύνολο όλων των στοιχείων υλικού και λογισμικού που δημιουργούν το περιβάλλον όπου αναπτύσσονται τα NFV. Η υποδομή NFV μπορεί να εκτείνεται σε διάφορες τοποθεσίες. Το δίκτυο που παρέχει συνδεσιμότητα μεταξύ αυτών των τοποθεσιών θεωρείται μέρος της υποδομής NFV.

Γ) Το αρχιτεκτονικό πλαίσιο διαχείρισης εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου και εντοπισμού (NFV-MANO Architectural Framework) είναι η συλλογή όλων των λειτουργικών μπλοκ, των δεδομένων που χρησιμοποιούνται από αυτά τα μπλοκ, και σημείων αναφοράς και διεπαφών μέσω των οποίων αυτά τα λειτουργικά μπλοκ ανταλλάσσουν πληροφορίες με σκοπό τη διαχείριση και εντοπισμό του NFVI και VNF.

Το δομικό στοιχείο τόσο για το NFVI όσο και για το NFV-MANO είναι η πλατφόρμα NFV.

SDN (Software-defined networking)

Το SDN, ή η δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό, είναι μια έννοια που σχετίζεται με το NFV, αλλά αναφέρονται σε διαφορετικούς τομείς. [11] Ουσιαστικά, η τεχνολογία (SDN) είναι μια προσέγγιση στη διαχείριση δικτύου που επιτρέπει δυναμική, αποτελεσματικά προγραμματισμένη διαμόρφωση δικτύου, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου και η παρακολούθηση, καθιστώντας το περισσότερο σαν cloud computing από την παραδοσιακή διαχείριση δικτύου. [12] Το SDN προορίζεται να αντιμετωπίσει το γεγονός ότι η στατική αρχιτεκτονική των παραδοσιακών δικτύων είναι αποκεντρωμένη και πολύπλοκη, ενώ τα τρέχοντα δίκτυα απαιτούν μεγαλύτερη ευελιξία και εύκολη αντιμετώπιση προβλημάτων. Το SDN επιχειρεί να συγκεντρώσει τη νοημοσύνη δικτύου σε ένα στοιχείο δικτύου αποσυνδέοντας τη διαδικασία προώθησης πακέτων δικτύου (επίπεδο δεδομένων) από τη διαδικασία δρομολόγησης (επίπεδο ελέγχου). Το επίπεδο ελέγχου αποτελείται από έναν ή περισσότερους ελεγκτές που θεωρούνται ως ο εγκέφαλος του δικτύου SDN όπου ενσωματώνεται ολόκληρη η νοημοσύνη. Ωστόσο, η έξυπνη συγκεντρωση έχει τα δικά της μειονεκτήματα όσον αφορά την ασφάλεια, επεκτασιμότητα και ελαστικότητα και αυτό είναι το κύριο ζήτημα του SDN. Το SDN συσχετίστηκε συνήθως με το πρωτόκολλο OpenFlow (για απομακρυσμένη

επικοινωνία με στοιχεία αεροπλάνου δικτύου με σκοπό τον προσδιορισμό της διαδρομής των πακέτων δικτύου μεταξύ διακοπών δικτύου) από την εμφάνιση του τελευταίου το 2011. Το SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ένα συνολικό πλαίσιο που επιτρέπει στο 5G να λειτουργεί σε επίπεδο ελέγχου. Μπορεί να παρέχει καλύτερες ροές δεδομένων καθώς τα δεδομένα μετακινούνται στο δίκτυο 5G. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική SDN μπορεί να ελαχιστοποιήσει το εύρος ζώνης του δικτύου και να αυξήσει τον λανθάνοντα χρόνο. Τέλος, δεδομένου ότι το SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα 5G, παρέχει έναν τρόπο διαχείρισης και αυτοματοποίησης του δικτύου από ένα κεντρικό επίπεδο ελέγχου, περιορίζοντας σημαντικές διακοπές λειτουργίας καθορίζοντας τις βέλτιστες ροές δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. [13]

mmWave 5G

Το mmWave προφέρεται ως "κύμα χιλιοστών" είναι μια τεχνολογία δικτύου μικρής εμβέλειας και υψηλής συχνότητας. Το mmWave προσφέρει πολύ περισσότερο εύρος ζώνης επομένως συνισφέρει στην επίτευξη δυναμικού 5G με εξαιρετικά γρήγορες ταχύτητες και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Το όνομά του προήλθε από τον τύπο της συχνότητας που χρησιμοποιείται από τα κινητά τηλέφωνα για να πραγματοποιούν κλήσεις. Οι προηγούμενες γενιές κάλυψης από κινητές συσκευές λειτουργούσαν συχνά σε πολλές διαφορετικές συχνότητες, και όλα συνεργάζονται άψογα για να διασφαλίσουν μεγάλη κάλυψη και ταχύτητα. Το 5G είναι πολύ παρόμοιο στο γεγονός ότι θα τοποθετήσουμε πολλές διαφορετικές τεχνολογίες συχνότητας μαζί για να προσφέρουμε τις δυνατότητές του για μεγάλη ταχύτητα, χαμηλό λανθάνοντα χρόνο και υψηλή χωρητικότητα για όλους τους πελάτες. Το mmWave, το οποίο λειτουργεί σε υψηλότερες συχνότητες βρίσκεται ήδη για δοκιμές.

Πώς λειτουργεί το mmWave;

Το mmWave μπορεί να προσφέρει μεγάλη χωρητικότητα και εύρος ζώνης σε μικρότερο εύρος. Τα κελιά mmWave εκπέμπουν σήμα έως μερικές εκατοντάδες μέτρα από το σταθμό βάσης, πράγμα που σημαίνει ότι ταιριάζει καλύτερα σε περιοχές όπου συγκεντρώνεται μεγάλος αριθμός χρηστών δηλαδή μέρη όπως εμπορικά κέντρα. Οι πολυσύχναστοι σιδηροδρομικοί σταθμοί της πόλης και ακόμη και τα στάδια μπορούν να επωφεληθούν από τις δυνατότητες του mmWave.

FRONTHAUL

Το fronthaul της αρχιτεκτονικής τηλεπικοινωνιών C-RAN (Cloud Radio Access Network), ενός νέου τύπου αρχιτεκτονικής κυψελοειδούς δικτύου κεντρικών μονάδων βάσης (BBU), περιλαμβάνει τους ενδιάμεσους συνδέσμους μεταξύ των κεντρικών ελεγκτών ραδιοφώνου και των κεφαλών ραδιοφώνου (ή ιστών) σε ένα κυψελοειδούς δικτύου. [14]. Σε γενικές γραμμές, συμπίπτει με το δίκτυο backhaul, αλλά είναι διαφορετικό. Τεχνικά σε ένα C-RAN τα δεδομένα backhaul αποκωδικοποιούνται μόνο από το δίκτυο fronthaul στους κεντρικούς ελεγκτές, από όπου μεταφέρονται στη συνέχεια στο κεντρικό δίκτυο. Περιλαμβάνει ειδικές ίνες που μεταφέρουν δεδομένα σε μορφή CPRI(Κοινής Δημόσιας Διεπαφής Ραδιοφώνου) ή OBSAI. [15] Υπάρχουν προτάσεις για τροποποίηση του Ethernet ώστε να είναι πιο κατάλληλο για το δίκτυο Fronthaul. [16] Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για εφαρμογές C-RAN (συχνά διατυπώνονται είτε ως δίκτυο πρόσβασης ραδιοεπικοινωνίας cloud είτε ως κεντρικό δίκτυο πρόσβασης ραδιοεπικοινωνίας), η χρήση του fronthaul ως μέθοδο για την υποστήριξη όλων των γενεών ασύρματης επικοινωνίας έχει κερδίσει την προσοχή. Η τελευταία προδιαγραφή CPRI προσθέτει χωρητικότητα σε απομακρυσμένες κεφαλές ραδιοφώνου, επιτυγχάνει MIMO υψηλότερης τάξης και επιτρέπει διαμόρφωση πολλαπλών φορέων. Αυτός ο τύπος διεπαφής υποστηρίζει κοινόχρηστη υποδομή και δυναμική κατανομή χωρητικότητας, η οποία επιτρέπει την πραγματικότητα ενός εντελώς ανοικτού RAN που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελλοντικές εφαρμογές 5G και σενάρια ανάπτυξης. Το Fronthaul είναι ένας από τους πολλούς παράγοντες που μπορούν να επιτρέψουν στα LTE-Advanced δίκτυα να κάνουν τη μεταφορά δεδομένων πιο γρήγορα στο μέλλον. Οι χειριστές που χρησιμοποιούν την αρχιτεκτονική 5G με ένα εικονικό επίπεδο πρόσβασης, θα μπορούσαν να λάβουν βελτιωμένη απόδοση στο επίπεδο πρόσβασης του δικτύου. Επιπλέον, τα εικονικά δίκτυα ραδιοπρόσβασης (vRANs) ενδέχεται να απαιτούν fronthaul για μεγιστοποίηση της εξοικονόμησης κόστους και της αποδοτικότητας, η οποία είναι μια λύση την οποία οι χειριστές δικτύου επιδιώκουν για να επωφεληθούν από τις δυνατότητες δικτύωσης (SDN). Παρόλο που το fronthaul ενισχύει σημαντικά την απόδοση του δικτύου καθιστώντας το πιο ευέλικτο και αποδοτικό, πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση και πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν από την υιοθέτησή τους ως στάνταρ. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν την τοπολογία του δικτύου, την ποσότητα των ινών στο έδαφος, τον τύπο του φάσματος και την τρέχουσα έλλειψη μιας πλήρως ανοιχτής διεπαφής.

Fronthaul και Backhaul

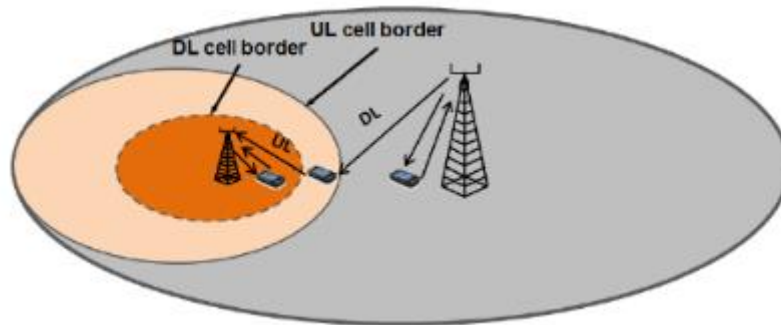
Ενώ το backhaul είναι ένας γνωστός όρος ασύρματης δικτύωσης, το fronthaul είναι παρόμοιο στην έννοια αλλά λιγότερο οικείο. Wireless backhaul είναι η χρήση ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας για τη λήψη δεδομένων από έναν τελικό χρήστη σε έναν κόμβο σε ένα μεγάλο δίκτυο όπως το Διαδίκτυο ή ένα ιδιόκτητο δίκτυο. Με το fronthaul, έχουμε ως αποτέλεσμα ευκολότερη ανάπτυξη ραδιοφώνου σε ένα κυψελοειδές δίκτυο και αυξημένο εύρος κάλυψης σήματος.[17]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: DECOUPLING

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ UPLINK ΚΑΙ ΤΟ DOWNLINK DECOUPLING

Προκειμένου να συμβαδίζουν με την ολοένα αυξανόμενη κίνηση του δικτύου, τα κυψελοειδή δίκτυα μετατοπίζονται από την προσέγγιση ενός επιπέδου σε ετερογενή δίκτυα πολλαπλών επιπέδων (HetNets). Τα HetNets, τα οποία αποτελούνται από διαφορετικούς τύπους μικρών κυψελών (micro, pico και femto) και μακροκυττάρων, αποτελούσε μια προσέγγιση τα τελευταία χρόνια ως ένας αποτελεσματικός τρόπος βελτίωσης της χωρητικότητας του δικτύου σε hotspots. Οι τεχνολογίες δικτύου 3G και 4G σχεδιάστηκαν με γνώμονα τα κύτταρα μακροεντολών. Αυτή η αλλαγή στα κυψελοειδή δίκτυα είναι μια νέα ματιά στο πώς αναπτύσσονται τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα και ποιες αλλαγές και βελτιώσεις πρέπει να γίνουν για να λειτουργούν αποτελεσματικά τα μελλοντικά δίκτυα. Τα κυψελοειδή δίκτυα έχουν σχεδιαστεί δίνοντας μεγάλη βαρύτητα στο downlink (DL). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κυκλοφορία δικτύου είναι ως επί το πλείστον ασύμμετρη καθώς η απαιτούμενη απόδοση στο downlink να είναι υψηλότερη από εκείνη που απαιτείται στο uplink. Ωστόσο, το uplink καθίσταται όλο και πιο σημαντικό με την ανάπτυξη δικτύων αισθητήρων και επικοινωνιών τύπου μηχανής (MTC). Ακόμη εφαρμογές όπως κοινωνική δικτύωση, βιντεοκλήσεις και πραγματικού χρόνου βιντεοπαιχνίδια κατακλύζουν το διαδίκτυο και αυξάνουν τις απαιτήσεις. Κατά συνέπεια, η βελτιστοποίηση του uplink έχει γίνει όλο και πιο σημαντική. Τα κυψελοειδή δίκτυα βασίζοντε μέχρι και σήμερα συνήθως στην ισχύ σήματος που λαμβάνει το downlink [18]. Αυτή η προσέγγιση ήταν επαρκής σε ένα δίκτυο όπου όλοι οι σταθμοί μετάδιδαν με την ίδια ή παρόμοια ισχύ. Ωστόσο, στο HetNets όπου έχουμε μεγάλη διαφορά στην ισχύ μετάδοσης των διαφόρων επιπέδων, αυτή η προσέγγιση είναι εξαιρετικά αναποτελεσματική. Καθώς τα HetNets γίνονται πυκνότερα και τα μικρά κελιά μικρότερα, η διαφορά ισχύος μετάδοσης μεταξύ κυψελίδων αυξάνεται και, κατά συνέπεια, αυξάνεται το χάσμα μεταξύ των βέλτιστων ορίων DL και UL. Προκειμένου να επιτύχουμε βέλτιστη λειτουργία δικτύου, απαιτείται μια νέα προσέγγιση σχεδιασμού που είναι το Downlink και Uplink Decoupling (DUDe) όπου τα UL και DL αντιμετωπίζονται βασικά ως ξεχωριστές οντότητες δικτύου και ένα UE μπορεί να συνδεθεί σε διαφορετικούς κόμβους εξυπηρέτησης στο UL και DL. Η έννοια του DUDe έχει συζητηθεί ως σημαντικό συστατικό στα μελλοντικά κυψελοειδή δίκτυα στο [19], [20]. Στο DUDe έχει ως

επίκεντρο τη συσκευή και το σύνολο των κόμβων δικτύου που παρέχουν συνδεσιμότητα καθώς και οι λειτουργίες αυτών των κόμβων προσαρμόζονται σε αυτήν τη συγκεκριμένη συσκευή.



Εικόνα 3.1 : Παρουσιάζει την βασική ιδέα του UL/DL decoupling [33]

3.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

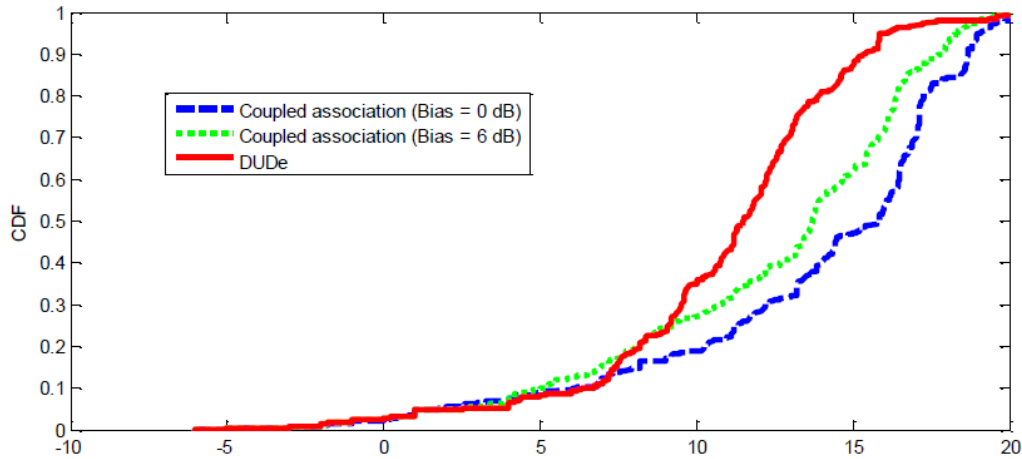
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα κυψελοειδή δίκτυα έχουν συχνά σχεδιαστεί με βάση το downlink (DL) και έχουν επικεντρωθεί περισσότερο σε αυτό καθώς το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης στο δίκτυο είναι DL (π.χ. ροή βίντεο). Ωστόσο, το uplink (UL) καθίσταται όλο και πιο σημαντικό πλέον. Ένας παράγοντας βελτίωσης του UL είναι η αποσύνδεση της συσχέτισης UL και DL. Η βασική ιδέα είναι να αντιμετωπίσουμε το UL και το DL ως δύο ξεχωριστά δίκτυα στα οποία συνδέονται οι χρήστες με βάση διαφορετικά κριτήρια. Αυτή η προσέγγιση έχει δείξει πολύ υψηλά κέρδη απόδοσης σε πυκνά ετερογενή δίκτυα της τάξης του 200-300%. Αυτό οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο εξισορρόπησης φορτίου στο UL, το οποίο οδηγεί σε πιο αποτελεσματική χρήση των πόρων. Επίσης, το γεγονός ότι οι χρήστες συσχετίζονται με τον πλησιέστερο κόμβο στο UL θα έχει ως αποτέλεσμα μια πιο αποδοτική χρήση της ισχύος της μπαταρίας των χρηστών. Η βελτίωση του UL από την άποψη της χωρητικότητας, της ενέργειας και της αποδοτικότητας των πόρων θα μεταφράζεται άμεσα σε ένα τεράστιο επίτευγμα Παράλληλα, Το UL/DL decoupling βελτιώνει την κάλυψη C-band και την εμπειρία του χρήστη χρησιμοποιώντας ζώνες LTE / 4G για μεταφορά δεδομένων 5G uplink. Στις αναπτύξεις 5G C-Band, η κάλυψη uplink μπορεί να είναι σημαντικά περιορισμένη σε σύγκριση με την κάλυψη downlink λόγω υψηλότερων ζωνών και μεγαλύτερων κενών ισχύος μεταξύ ισότοπων και τερματικών. Αυτό μπορεί να προκαλέσει την κάλυψη ανερχόμενης ζεύξης C-Band και να επηρεάσει την εμπειρία του χρήστη. Επίσης, το decoupling επιτρέπει να

μεγιστοποιήθει η εμβέλεια των 5G στο C-band για να βελτιωθεί η εμπειρία των πελατών και παράλληλα θα μπορούσε να μειώσει τις επενδύσεις σε επιπλέον ιστότοπους. [21] Πολύ σημαντικά οφέλη του decoupling στα 5G δίκτυα φαίνεται επίσης να είναι ο περιορισμένος θόρυβος και η περιορισμένη παρεμβολή

3.3 ΛΟΓΟΙ ΝΑ ΚΑΝΟΥΜΕ UPLINK ΚΑΙ DOWNLINK DECOUPLING

1) Αυξανόμενο uplink SNR και μειωμένη ισχύ μετάδοσης

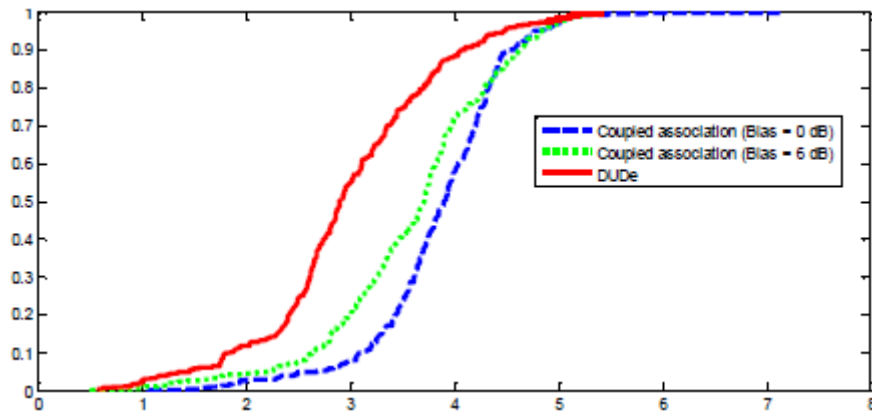
Σε ένα τυπικό HetNet, η περιοχή κάλυψης του downlink ενός κελιού μακροεντολών εμφανίζει συνήθως ποικιλία στις τιμές. Η ανισότητα στην περιοχή κάλυψης οφείλεται κυρίως στις διαφορές στη μετάδοση του downlink, αλλά επίσης και στη κεραία. Αντιθέτως, στο uplink όλοι οι πομποί έχουν περίπου την ίδια μέγιστη ισχύ μετάδοσης. Επομένως, μια συσκευή που σχετίζεται με ένα κελί μακροεντολής στο downlink θα μπορούσε αντ' αυτού να επιθυμεί να συσχετιστεί με ένα μικρό κελί στο uplink, για να επωφεληθεί από τη μειωμένη απώλεια.[22]. Τα θετικά αποτελέσματα είναι διπλά. Για UE που μεταδίδουν στη μέγιστη ισχύ, μια τέτοια σύνδεση θα παρέχει υψηλότερο SNR. Επιπλέον, για σταθερό SNR, η μειωμένη απώλεια διαδρομής επιτρέπει τη μείωση ισχύος μετάδοσης μέσω ελέγχου ισχύος. Στο Σχήμα , παρατηρούμε τη μείωση της ισχύος μετάδοσης μέσω DUDe συγκρίνοντας τρεις περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι η βασική γραμμή με έναν συζευγμένο σύνδεσμο DL/UL. Η δεύτερη περίπτωση είναι ακόμα σε σύζευξη, αλλά τα μικρά κελιά έχουν BIAS 6 dB Η τρίτη περίπτωση αφορά το DUDe.



Εικόνα 3.2 : Παρατηρούμε τη μείωση της ισχύος μετάδοσης μέσω DUDe συγκρίνοντας τρεις περιπτώσεις: 1^η περίπτωση coupled συσχέτιση downlink/uplink, 2^η περίπτωση coupled συσχέτιση downlink/uplink έχοντας BIAS 6, 3^η περίπτωση DUDe [34]

2) Βελτιωμένες συνθήκες παρεμβολών uplink

Το DUDe μειώνει επίσης την παρεμβολή uplink, λόγω συμπληρωματικών εφέ. Αρχικά, ως προφανής συνέπεια της μείωσης ισχύος μετάδοσης, η παρεμβολή UL που δημιουργείται σε άλλους σταθμούς μειώνεται αντίστοιχα κατά περίπου 2-3 dB. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό καθώς στο χαμηλό SINR σε ένα πυκνό δίκτυο, η μείωση της παρεμβολής κατά 3dB συνεπάγεται κατά προσέγγιση διπλασιασμό του ρυθμού δεδομένων. Επιπλέον, το DUDe παρέχει τη δυνατότητα ανεξάρτητης επιλογής του συσχετισμού που ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές τόσο στο χρήστη όσο και σε κάποιο σταθμό. Η παρεμβολή στο uplink σε μια φασματική ζώνη είναι ένα σύνολο πολλών διαφορετικών μεταδόσεων σε διαφορετικά κελιά και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η θέση του και ο έλεγχος της ισχύς, καθώς και την απόστασή. Αντίθετα, η παρεμβολή downlink εξαρτάται από την ισχύ μετάδοσης και την απόσταση από τους διαφορετικούς σταθμούς. Για όλους αυτούς τους λόγους, τα μέσα επίπεδα παρεμβολών μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικά στους πόρους downlink και uplink. Επομένως, μια αποσυζευγμένη(decoupled) συσχέτιση που επιτρέπει στο χρήστη (ή το δίκτυο) να αναζητά το καλύτερο περιβάλλον παρεμβολής στους δύο συνδέσμους ανεξάρτητα, αναμένεται να ξεπεράσει μια τυπική σχέση σύζευξης (coupled). Πράλληλα, το DUDe θα αποτελέσει επίσης όφελος για την επικοινωνία Device-2-Device (D2D). Μειώνοντας την ισχύ μετάδοσης UL και παράγοντας λιγότερες παρεμβολές, θα δημιουργήσει ένα πιο ευνοϊκό περιβάλλον για τις μεταδόσεις D2D. Τέλος, εκτός από τη μείωση του μέσου όρου των παρεμβολών, το DUDe επιτρέπει επίσης τη μείωση της διακύμανσης SINR ανερχόμενης ζεύξης, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω[23]



Εικόνα 3.3: CDF της τυπικής απόκλισης UEs SINR με την πάροδο του χρόνου. [35]

3)Βελτιωμένος ρυθμός δεδομένων uplink

Η αύξηση της λαμβανόμενης ισχύος και η μείωση της παρεμβολής οδηγεί σε υψηλότερο SINR, και συνεπώς σε υψηλότερη φασματική απόδοση και ρυθμό δεδομένων. Ωστόσο, υπάρχουν πρόσθετοι παράγοντες που μπορούν να περιπλέξουν την επίδραση του DUDe στο ρυθμό uplink. Κατά μέσο όρο, η βέλτιστη στο downlink βρίσκεται στο περίπου 5-10 dB και με αποφυγή παρεμβολών μπορεί να φτάσει έως και 18-20 dB σε ορισμένα σενάρια [24,25]. Ωστόσο, εξακολουθούμε να παρατηρούμε πολύ σημαντικά κέρδη για το DUDe ακόμη και σε σύγκριση με προκατειλημμένες συζευγμένες (coupled) συσχετίσεις. Τα κέρδη προκύπτουν κυρίως από τη βελτιωμένη ποιότητα καναλιού και είναι πολύ ενθαρρυντικό το γεγονός ότι μοιάζουν πλέον εφικτά

4)Εξισορρόπηση φορτίου στο uplink και downlink

Το φορτίο που υπάρχει στο UL μπορεί να είναι διαφορετικό από το φορτίο που μπορεί να έχει το DL. Το DUDe επιτρέπει μια ώθηση περισσότερων UE σε μικρά κελιά στο UL μόνο εφόσον δεν περιορίζεται από παρεμβολές όπως συμβαίνει στο DL. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη κατανομή των UE μεταξύ μακροεντολών και μικρών κελιών που, με τη σειρά τους, επιτρέπουν μια πιο αποτελεσματική χρήση πόρων και υψηλότερα ποσοστά UL

5) Χαμηλό κόστος ανάπτυξης με συγκέντρωση RAN

Η εφαρμογή μιας decoupled σύνδεσης σε πραγματικό δίκτυο απαιτεί εξαιρετική συνδεσιμότητα και άρτια συνεργασία μεταξύ διαφορετικών σταθμών. Η κύρια απαίτηση που επιβάλλει το DUDe είναι μια σύνδεση χαμηλού λανθάνοντος χρόνου (latency) μεταξύ των σταθμών downlink και uplink ώστε να επιτρέπεται η γρήγορη ανταλλαγή μηνυμάτων ελέγχου. Σημαντικό είναι επίσης το DUDe να επιτρέψει την ταχεία ανταλλαγή δεδομένων. Με άλλα λόγια, το DUDe επιτρέπει κέρδη παρόμοια με την κοινή σύνδεση uplink αλλά με χαμηλότερο κόστος ανάπτυξης. Σε σύγκριση με τη χρήση MIMO η σύγκριση κόστους είναι ακόμη πιο ευνοϊκή για το DUDe. Η συνεχιζόμενη τάση για τη χρήση μερικής ή πλήρους συγκέντρωσης δικτύου πρόσβασης ραδιοφώνου (RAN) σε αναπτύξεις όπου είναι διαθέσιμη μια backhaul υψηλής ταχύτητας, θα επιτρέψει την εφαρμογή decoupled downlink και uplink, καθώς η σηματοδότηση θα δρομολογηθεί σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας με χαμηλό λανθάνοντα χρόνο στις συνδέσεις. Η πλήρης συγκέντρωση, που συχνά αναφέρεται ως Cloud-RAN, επεκτείνει αυτήν την προσέγγιση σε μεγαλύτερες περιοχές, όπου ένας μεγάλος αριθμός μονάδων RF συνδέονται στην ίδια κεντρική μονάδα επεξεργασίας βασικής ζώνης. Δεδομένης αυτής της ήδη συνεχιζόμενης τάσης προς πιο κεντρικές αρχιτεκτονικές RAN, οι οποίες υποστηρίζονται από τη χαμηλή καθυστέρηση σύνδεσης, το αυξητικό κόστος του DUDe φαίνεται αμελητέο σε τέτοια σενάρια.

3.4 DECOUPLING ΣΤΑ ΗΔΗ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LTE

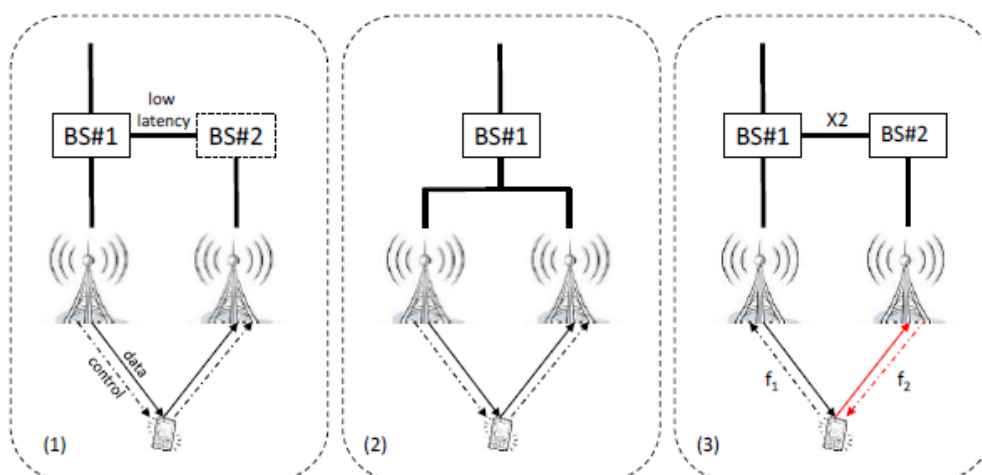
Κοινό αναγνωριστικό κελιού

Μια ενδιαφέρουσα επέκταση αυτής της προσέγγισης είναι η λεγόμενη προσέγγιση κοινού αναγνωριστικού (ID) κελιού [26] όπου όλες οι ραδιοφωνικές μονάδες ανήκουν στο ίδιο κελί (δηλ. Έχουν την ίδια ταυτότητα κυψέλης). Εδώ, οι βελτιώσεις χρησιμοποιούνται για γρήγορη και ανεξάρτητη εναλλαγή σημείων μετάδοσης και λήψης για ένα δεδομένο τερματικό. Αυτό είναι ένα βήμα μακριά από το παραδοσιακό πρότυπο που είναι προσανατολισμένο στα κελιά για την προβολή των σημείων της κεραίας ως πόρων που θα χρησιμοποιηθούν για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Αν και μοιάζει απλή, τόσο η κεντρική επεξεργασία όσο και το κοινό αναγνωριστικό είναι προσεγγίσεις απαιτούν μια αρκετά χαμηλή καθυστέρηση αναμονής για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις χρονισμού του επιπέδου δεδομένων.

Ενώ είναι δυνατόν να υπάρχει προϋπολογισμός χρονισμού σε πολλαπλάσια του 8 ms, το κόστος μιας υποβάθμισης της απόδοσης κυμαίνονται στα 3 ms για αποκωδικοποίηση και προγραμματισμό τυχόν αναμεταδόσεις στο LTE. Σε ένα LTE-A, η ανάπτυξη περιορίζεται επομένως σε απομακρυσμένες ραδιοφωνικές μονάδες συνδεδεμένες σε μια κεντρική επεξεργασία βασικής ζώνης.

Διπλή συνδεσιμότητα

Ενώ οι δύο λύσεις που περιγράφηκαν παραπάνω απαιτούν πολύ χαμηλή καθυστέρηση, που συνήθως επιτυγχάνεται μέσω σύνδεσης ραδιοφωνικών μονάδων (με το ίδιο ή διαφορετικό αναγνωριστικό κυψέλης) στην ίδια κεντρική μονάδα, το DUDe μπορεί επίσης να εφαρμοστεί με λιγότερο ιδανικό backhaul. Η Διπλή Συνδεσιμότητα επιτρέπει την ταυτόχρονη σύνδεση ενός τερματικού σε δύο κελιά για τη συγκέντρωση ροών δεδομένων ή για την αποσύνδεση downlink-uplink. Ωστόσο, οι μεταγενέστερες εκδόσεις ενδέχεται να προσθέσουν υποστήριξη για ανάπτυξη ζώνης εντός συχνοτήτων. Τα δύο κελιά λειτουργούν ξεχωριστά, χειρίζοντας το δικό τους σήμα ελέγχου και χαλαρώνοντας έτσι σημαντικά τις απαιτήσεις σε σύγκριση με την κεντρική προσέγγιση της βασικής ζώνης. Αυτή η λύση έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από τη μία πλευρά δεν απαιτείται σύνδεση backhaul χαμηλής καθυστέρησης για τη σηματοδότηση AS, καθώς η σηματοδότηση AS τερματίζεται σε κάθε κόμβο. Από την άλλη πλευρά, το σημείο αγκύρωσης για τη σηματοδότηση NAS είναι το MME, πράγμα που σημαίνει ότι ο συσχετισμός κόμβων και η κινητικότητα πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω τυποποιημένων λύσεων στην πλευρά MME και δεν είναι δυνατή η βελτιστοποίηση



Εικόνα 3.4 : Decoupling στα ήδη υπάρχοντα συστήματα LTE. (1) Central processing (2) κοινόχρηστο αναγνωριστικό κελιού (3) η επιλογή διπλής συνδεσιμότητας. [36]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: DECOUPLING

ΣΕ 5G ΔΙΚΤΥΑ

4.1 ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Τα επόμενα χρόνια θα δούμε έντονη έρευνα και ανάπτυξη στο 5G. Αναμένεται να ξεκινήσει μιας μεγάλης κλίμακας δοκιμή ενώ μέσα στο 2020 αναμένεται να ξεκινήσει εμπορική λειτουργία. Αν και οποιαδήποτε συζήτηση για το 5G είναι εξ ορισμού κερδοσκοπική, υπάρχει ένα τεράστιο ενδιαφέρον σχετικά με τις απαιτήσεις ρυθμού δεδομένων και πιθανά βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του 5G, συμπεριλαμβανομένου του μαζικού MIMO, της εισαγωγής ζωνών κύματος χιλιοστών και μιας αρχιτεκτονικής «χωρίς κυψέλες». Τα πρότυπα 5G (και πέραν) θα πρέπει να περιλαμβάνουν άλλα χαρακτηριστικά για να υποστηρίξουν ολλοκληρωτικά το DUDe. Με άλλα λόγια, θα ήταν καλύτερο ένα σχέδιο που έχει βελτιστοποιηθεί για το DUDe από την αρχή του, ή να τροποποιηθούν τα ήδη υπάρχον σχέδια με τις τωρινές αρχιτεκτονικές;

Σημαντικές Αρχιτεκτονικές Αλλαγές

Ένα σημαντικό ερώτημα είναι εάν μια απλή εξέλιξη του σημερινού σχεδιασμού αρχιτεκτονικής 4G θα μπορούσε να υποστηρίξει αποτελεσματικά το DUDe σε εφαρμογές 5G. Προηγουμένος, αναφέρθηκε πώς η αρχιτεκτονική LTE-A υποστηρίζει ήδη μια εφαρμογή DUDe όταν διαφορετικοί σταθμοί συνδέονται μέσω ινών στην ίδια ραδιοφωνική μονάδα. Για την περίπτωση διαφορετικών σταθμών που δεν είναι συνδεδεμένοι στην ίδια ραδιοφωνική μονάδα, η υποστήριξη για DUDe σε 4G περιορίζεται σε διαφορετικές συχνότητες. Τυχόν μελλοντικές εκδόσεις 5G θα πρέπει επομένως απλά να επιτρέπουν διπλή συνδεσιμότητα ίδιας συχνότητας, η οποία δεν θεωρείται σημαντική αναβάθμιση. Ενώ το LTE-A απολαμβάνει μερικές τεχνολογίες που μπορούν να αναπτυχθούν πιο κοντά στο κινητό, τα μελλοντικά σχέδια 5G θα πρέπει να βελτιώσουν τους μηχανισμούς και τις εφαρμογές ασφαλείας που επιτρέπουν καλύτερη κρυπτογράφηση κυκλοφορίας δεδομένων χωρίς τη συμμετοχή του κεντρικού δικτύου. Ωστόσο, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η

υποστήριξη του DUDe δεν χρειάζεται σημαντικές αλλαγές στο σχεδιασμό 5G από αρχιτεκτονική άποψη.

4.2 TDD, FDD DECOUPLING

Το σημερινό Wi-Fi χρησιμοποιεί Time Division Duplex - TDD, δηλαδή το σημείο πρόσβασης και τα τερματικά μεταδίδουν στην ίδια συχνότητα αλλά σε διαφορετικούς χρόνους. Αυτό παρέχει σημαντική ευελιξία για την κατανομή του διαθέσιμου εύρους ζώνης υπέρ της κατεύθυνσης που απαιτεί περισσότερα δεδομένα, είτε uplink (από τον χρήστη στο δίκτυο) είτε downlink (για τον χρήστη να κατεβάσει δεδομένα από το δίκτυο). Ωστόσο, το TDD έχει επίσης ορισμένους περιορισμούς, όπως:

- Πιθανές συγκρούσεις στο χρόνο.
- Απώλεια στην απόδοση μετάδοσης λόγω του χρόνου διάδοσης για πακέτα στον αέρα.
- Η ισχύς που παρέχεται από το κύκλωμα του πομπού είναι, κατά μέσο όρο, χαμηλότερη από τη μέγιστη ισχύ του - δεδομένου ότι μέρος της χρονοθυρίδας διατίθεται για λήψη.

Η κινητή τηλεφωνία, μέχρι σήμερα, λειτουργούσε ως επί το πλείστον σε αμφίδρομη διαίρεση συχνότητας - FDD. Αυτό υπονοεί ότι οι σταθμοί βάσης έχουν ζώνες συχνοτήτων όπου μόνο μεταδίδουν και λαμβάνουν τερματικά χρήστη και αντίστροφα. Αν και το FDD θεωρείται ως η καλύτερη στρατηγική κατ'αρχήν για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το LTE / 4G έχει ήδη κάποιες ζώνες για TDD και η χρήση του αναμένεται να αυξηθεί στα 5G. Ο λόγος για τη χρήση του TDD σε κυψελοειδή δίκτυα είναι ότι το σύστημα ταιριάζει πολύ καλύτερα με μια άλλη τεχνολογία που θα επιτρέψει πολύ βελτιωμένη χωρητικότητα δικτύου, παρέχοντας όχι μόνο υψηλότερες συγκεκριμένες ταχύτητες αλλά ταυτόχρονα για πολλούς χρήστες. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να μεταδώσει πολλαπλές ροές πληροφοριών ταυτόχρονα και στην ίδια ραδιοσυχνότητα.[27]

Στα περισσότερα μέρη του κόσμου, όλες οι προηγούμενες και τρέχουσες γενιές δικτύου κινητής τηλεφωνίας βασίζονται στο Frequency Division Duplex (FDD), δηλαδή υπάρχει ένα κανάλι για την κατερχόμενη ζεύξη και ένα ξεχωριστό κανάλι για την ανερχόμενη ζεύξη. Ωστόσο, υπάρχουν τεράστιες κατανομές φάσματος για το Time Division Duplex (TDD), ειδικά στις ΗΠΑ και την Κίνα. Γι'αυτό λίγα χρόνια μετά την έναρξη των δικτύων LTE ως δίκτυα FDD, είδαμε επίσης ότι το LTE αναπτύσσεται σε μια παραλλαγή TDD σε αυτές τις γεωγραφικές περιοχές. Για λόγους πληρότητας, υπάρχουν επίσης μερικές αναπτύξεις TDD στην Ευρώπη, π.χ. στη Σουηδία. Στο 5G, θα χρησιμοποιήσουν πρώτα την παραλλαγή TDD. Για εκείνους τους χειριστές δικτύου που αναπτύσσουν 5G σε 3x GHz, θα χρησιμοποιηθεί η ζώνη

3GPP n78, που είναι TDD. Και για εκείνους τους χειριστές δικτύου που πηγαίνουν στο mmWave, το TDD είναι επίσης η μόνη επιλογή. Φυσικά, υπάρχουν επίσης ζώνες 5G που ορίζονται για λειτουργία FDD, κυρίως εκείνες στις οποίες το LTE χρησιμοποιείται ήδη σήμερα.. Όλοι επικεντρώνονται στα 3.x GHz ή στο mmWave για να πάρουν αυτή τη σημαντική αύξηση ταχύτητας από τα 5G [28]

Συνοπτικά, το DUDe μπορεί να λειτουργήσει τόσο με το FDD όσο και με το TDD, με διαφορετικές επιπτώσεις στο επίπεδο συστήματος και στο φάσμα λειτουργίας. Η χρήση του TDD επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία στις συναλλαγές πόρων downlink και uplink σε σύγκριση με το FDD. Το TDD επίσης συμβαδίζει με τη αμφίδρομη βελτιστοποίηση δικτύου που αναφέρθηκε προηγουμένως. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για κανάλια με μεγάλη διάσταση, όπως με το τεράστιο MIMO. Δυστυχώς, όταν χρησιμοποιείται το DUDe, οι μεταδόσεις DL και UL προέρχονται και τερματίζονται σε διαφορετικές τοποθεσίες, καταρύπτοντας την αμοιβαιότητα του καναλιού. Οπότε το τεράστιο MIMO μπορεί να χρειαστεί να υποστηριχτεί χωρίς αμοιβαιότητα καναλιού. Στο DUDe, η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων και η χρήση κεραιών υψηλής κατεύθυνσης, θα μπορούσαν να επιτρέψουν προσεγγίσεις διπλής όψης πάνω στο χωρικό πεδίο. Για παράδειγμα, η ίδια ζώνη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για δύο διαφορετικές συσκευές, μία που λαμβάνει σε κατερχόμενη ζεύξη από σταθμό βάσης και η άλλη που μεταδίδει σε ανερχόμενη ζεύξη σε άλλο σταθμό βάσης.

4.3 DECOUPLING ME ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΚΥΜΑΤΩΝ

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που δείχνουν ότι το DUDe είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το mmW. Για παράδειγμα, ορισμένες μελέτες σχετικά με την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο [29] δείχνουν ότι για να συμμορφώνεται με τα ισχύοντα όρια έκθεσης σε συχνότητες άνω των 6 GHz, η μέγιστη ισχύς μετάδοσης στην ανερχόμενη ζεύξη ενδέχεται να πρέπει να είναι αρκετά dB κάτω από τα επίπεδα ισχύος που χρησιμοποιούνται για τις τρέχουσες κυψελοειδείς τεχνολογίες. Δεδομένου ότι η ισχύς μετάδοσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στην κάλυψη ανερχόμενης ζεύξης πιστεύουμε ότι μια ρεαλιστική προσέγγιση θα ήταν η κατανομή ανερχόμενης ζεύξης σε χαμηλότερη συχνότητα. Για το mmW η στρατηγική αυτή μπορεί να αποδειχθεί καρποφόρα δηλαδή η σύνδεση του UE με το μικρό κελί mmW στο downlink και σε ένα κελί μακροεντολής κάτω των 6 GHz στο uplink. [30]

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το άρθρο, παρουσιάστηκε η έννοια της αποσύζευξης/αποσύνδεσης UL/DL (DUDe). Τα κέρδη είναι πολύ υψηλά αφού αυτή η τεχνική μπορεί να επιτύχει βελτίωση την απόδοση UL. Πιστεύεται ότι η τεχνική DUDe είναι απαραίτητη για την αρχιτεκτονικής του 5G και μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη σε πολλές εφαρμογές όπως το Machine Type Communications (MTC) όπου η βελτιστοποίηση Uplink είναι πολύ κρίσιμη. Στα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα, η σύνδεση uplink (UL) και η σύνδεση downlink (DL) συνδέονται πάντα με τον ίδιο σταθμό βάσης (BS) που έχει επιλεγεί για λήψη. Στο Downlink / Uplink, decoupling (DUDe) δεν περιορίζονται να σχετίζονται με το ίδιο BS. Αυτό το καθίστα ιδιαίτερα σημαντικό μετά την πυκνότητα που αναμένεται στα μελλοντικά κυψελοειδή δίκτυα, όπου κάθε τερματικό έχει πολλά σημεία πρόσβασης κοντά. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά που αποδεικνύουν τη χρησιμότητα του DUDe είναι πώς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά κέρδη στην απόδοση του δικτύου και τη διακοπή και την κατανάλωση ενέργειας με πολύ χαμηλότερο κόστος. Συζητήθηκαν επίσης οι αλλαγές που απαιτούνται στα υπάρχοντα συστήματα LTE-A προκειμένου να καταστεί δυνατή η λειτουργία με βάση το DUDe ενώ επίσης παρουσιάστηκαν επιχειρήματα για τα οποία το DUDe πρέπει να θεωρείται μέρος των μελλοντικών συστημάτων 5G. Είναι σημαντικό ότι δεν απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στην πρόσβαση ραδιοφώνου και τις βασικές τεχνολογίες δικτύωσης. Το DUDe μπορεί να θεωρηθεί ως μια καινοτόμος προσέγγιση που επηρεάζει τα θεμέλια των κυψελοειδών δικτύων και έτσι ανοίγει μια τεράστια ευκαιρία για έρευνα και σχεδιασμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία: Stallings William, Κατσαβούνης Στέφανος (επιμέλεια), Επικοινωνίες υπολογιστών και δεδομένων, 10η Έκδοση , 978-960-418-814-7 , 2018

Δημοσιεύσεις/ URLs:

[1] de Looper, Christian (March 27, 2020). "What is 5G? The next-generation network explained". Digital Trends. Retrieved April 25, 2020

[2] Hoffman, Chris (January 7, 2019). "What is 5G, and how fast will it be?". How-To Geek website. How-To Geek LLC. Archived from the original on January 24, 2019. Retrieved January 23, 2019.

[3] <https://www.kathimerini.gr/954024/article/tecnologia/diadiaktyo/trikala-h-prwth-polh-ths-elladas-me-tecnologia-5g>

[4] H. Elshaer, F. Boccardi, M. Dohler and R. Irmer. "Downlink and Uplink Decoupling:Disruptive Architectural Design for 5G Networks." IEEE GLOBECOM, 2014.

[5] Ramadhan AJ. Overview and implementation of the two most important candidate 5G waveforms. J. Theor. Appl. Inf. Technol., Accepted, 2019.

[6] https://en.wikipedia.org/wiki/Network_function_virtualization

[7] Bogucka H, Kryszkiewicz P, Jiang T, Kliks A. Dynamic Spectrum Aggregation for Future5G Communications. IEEE Commun. Mag. 2015

[8] Nathan Cranford, The role of NFV and SDN in 5G, ,DECEMBER 4, 2017 <https://www.rcrwireless.com/20171204/fundamentals/the-role-of-nfv-and-sdn-in-5g-tag27-tag99>

[9] Network-Functions Virtualization (NFV) Proofs of Concept; Framework, GS NFV-PER 002 v1.1.1 (2013-10)

[10] What is Network Function Virtualization (NFV)". blog.datapath.io. Archived from the original on 2017-02-01. Retrieved 2017-01-20

[11] William, Stalling (2016). "Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud". Pearson Education

[12] Benzekki, Kamal; El Fergougui, Abdeslam; Elbelrhiti Elalaoui, Abdelbaki (2016). "Software-defined networking (SDN): A survey". Security and Communication Networks. 9 (18): 5803–5833

[13] Channa Seneviratne, Telstra Exchange ,mmWave 5G: what you need to know, February 27, 2020 <https://exchange.telstra.com.au/mmwave-5g-what-you-need-to-know/>

[14] <http://www.lightreading.com/what-the--bleep--is-fronthaul/a/d-id/707868>

[15]

http://www.equicom.hu/wpcontent/uploads/EXFO_anote310_Understanding-Basics-CPRI-Fronthaul-Technology_en.pdf

[16]

http://www.ieee1904.org/3/meeting_archive/2015/02/tf3_1502_ashwood_1a.pdf

[17] Margaret Rouse , Corinne Bernstein, Mobile Device Platforms and Technologies, What is Fronthaul, 30 Oct 2018 <https://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/fronthaul>

[18] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold. 4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband. Academic Press, 2013

[19] J. G. Andrews. "Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift. "Communications Magazine, IEEE 51.3 (2013): 136-144.

[20] F. Boccardi et al. "Five Disruptive Technology Directions for 5G". Communications Magazine, IEEE 52.2 (2014): 74-80.

[21] Huawei and EE Showcase 5G Uplink and Downlink Decoupling Proof of Concept in London [December 12, 2017 14:29 ET | Source: Huawei Technologies

[22] SmiPoGa15] K. Smiljkovikj, P. Popovski, and L. Gavrilovska, "Analysis of the Decoupled Access for Downlink and Uplink in Wireless Heterogeneous Networks", IEEE Wireless Communications Letters, early access, January 2015.

[23] N. Abu-Ali, A.-E.M. Taha, M. Salah and H. Hassanein, "Uplink Scheduling in LTE and LTE-Advanced: Tutorial, Survey and Evaluation Framework," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.16, no.3, pp.1239-1265, 2014

[24] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A survey on 3GPP heterogeneous networks," IEEE Wireless Communications, vol.18, no.3, pp.10-21, June 2011

[25] S. Singh and J. G. Andrews, "Joint Resource Partitioning and Offloading in Heterogeneous Cellular Networks", IEEE Trans. Wireless Commun., vol.13, no.2, pp.888-901, Feb. 2014.

[26] S. Parkvall, E. Dahlman, G. Jöngren, S. Landström and L. Lindbom Heterogeneous network deployments in LTE. Ericsson Review, Feb. 2011.

[27] TDD & Massive MIMO for 5G Ricardo Saiz Villoria | 23 January 2020 | Cellular Networks <https://www.teldat.com/blog/en/tdd-fdd-massive-mimo-for-lte-4g-and-5g/>

[28] First 5G Networks Will be TDD, Not FDD MARTIN SAUTER May 28, 2020 <https://blog.wirelessmoves.com/author/martin>

[29] D. Colombi, B. Thors, and C. Tornevik, "Implications of EMF Exposure Limits on Output Power Levels for 5G Devices above 6 GHz.", *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, Feb. 2015.

[30] D. Colombi, B. Thors, and C. Tornevik, "Implications of EMF Exposure Limits on Output Power Levels for 5G Devices above 6 GHz.", *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, Feb. 2015

Εικόνες :

[31] <https://www.ericsson.com/en/networks/offerings/5g/sharing-spectrum-with-ericsson-spectrum-sharing>

[32] <https://fsmedia.imgix.net/00/ae/b0/00/8939/4084/bd11/3b98fdc63c80/how-4g-antennas-broadcast-signals-compared-to-how-5g-antennas-beam-signals-across-a-city.png?auto=format%2Ccompress&dpr=2&w=540>

[33] https://www.researchgate.net/figure/The-concept-of-UL-DL-decoupling-17_fig2_279037429

[34] https://www.researchgate.net/figure/CDF-of-the-UEs-UL-transmit-power-via-the-simulation-model-Cell-edge-users-right-side_fig1_274012214

[35] https://www.researchgate.net/figure/CDF-of-the-UEs-SINR-standard-deviation-over-time-DUDe-reduces-the-variations-and_fig2_274012214

[36] https://www.researchgate.net/figure/The-three-discussed-embodiments-of-DUDe-are-1-centralized-processing-unit-2-shared_fig3_274012214