ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ: Τομέας Τηλεπικοινωνιών και Τεχνολογίας Πληροφορίας ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

ΜΗΛΙΩΝΗ ΑΛΕΞΙΟΥ ΤΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Αριθμός Μητρώου: 1019909

Θέμα

«Αλγόριθμοι διαχείρισης συχνοτήτων στα σύγχρονα κυψελωτά ασύρματα δίκτυα»

Επιβλέπων

Σταύρος Κωτσόπουλος, Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:

Πάτρα, Ιούλιος 2020

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα

«Αλγόριθμοι διαχείρισης συχνοτήτων στα σύγχρονα κυψελωτά ασύρματα δίκτυα»

Του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΜΗΛΙΩΝΗ ΑΛΕΞΙΟΥ ΤΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Αριθμός Μητρώου: 1019909

Ο Επιβλέπων

Ο Διευθυντής του τομέα

Σταύρος Κωτσόπουλος *Καθηγητής* Ιωάννης Μουρτζόπουλος *Καθηγητής*

Περίληψη

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε σε γλώσσα Matlab προσομοιωτής δικτύου LTE, με σκοπό τη μελέτη αλγορίθμων διαχείρισης συχνοτήτων στα δίκτυα LTE τέταρτης γενιάς (4G). Για τη δημιουργία του δικτύου θεωρήθηκε 2x4 SU-MIMO, ασύρματο Rayleigh κανάλι και δέκτη MMSE. Μελετήθηκαν δύο διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης, το ημιαστικό περιβάλλον του δήμου Νάξου και το αστικό περιβάλλον του δήμου Αθηνών. Λόγω του μεγάλου αριθμού συνδρομητών στο αστικό περιβάλλον, προτείνεται η τριχοτόμηση των υπαρχόντων κυψελών. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο Round Robin, ο Best CQI, ο Proportional Fair και μια βελτιωμένη έκδοση του Proportional Fair που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής. Η προσομοίωση γίνεται για 1000 TTI (όπου 1 TTI = 1 ms στο LTE), δηλαδή για 1 δευτερόλεπτο πραγματικού χρόνου, καθώς θεωρείται ότι οι συνδρομητές είναι ακίνητοι καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Πριν την έναρξη της διαδικασίας, επιλέγεται το περιβάλλον διάδοσης και στο τέλος, ο προσομοιωτής παραθέτει τα αποτελέσματα που προκύπτουν για κάθε έναν από τους τέσσερις αλγορίθμους που μελετούνται. Τα αποτελέσματα είναι η μέση ταχύτητα ανά συνδρομητή, η συνολική ταχύτητα της κυψέλης και ο δείκτης δικαιοσύνης, που αφορά τον τρόπο που διαμοίρασε κάθε αλγόριθμος τους πόρους του δικτύου στους χρήστες. Μελετάται η σχέση που υφίσταται ανάμεσα στον σκοπό που επιτελεί κάθε αλγόριθμος και τα παραπάνω αποτελέσματα. Τέλος, βάσει των μετρήσεων, εξάγονται συμπεράσματα για το μέλλον των δικτύων τέταρτης γενιάς και των ασύρματων δικτύων γενικότερα.

Abstract

As part of this thesis, a LTE network simulator was developed in Matlab, with the purpose of studying frequency allocation algorithms in fourth generation (4G) LTE networks. To set up the network, 2x4 SU-MIMO, wireless Rayleigh channel and MMSE receiver were considered. Moreover, two different propagation environments were considered, the suburban environment of the municipality of Naxos and the urban environment of the municipality of Athens. Due to the large number of subscribers in the urban environment, it is recommended to sectorize the existing cells. The algorithms used are Round Robin, Best CQI, Proportional Fair and an improved version of Proportional Fair developed for the needs of this thesis. The simulation is executed for 1000 TTI's (where 1 TTI = 1 ms in LTE), ie for 1 second of real time, as it is considered that the subscribers are stationary throughout the simulation. Before starting the process, the propagation environment is selected and in the end, the simulator displays the results obtained for each of the four algorithms studied. The results are the average throughput per subscriber, the cell throughput, and the fairness index, which relates to the way each algorithm distributed network resources to users. The relation between the goal of each algorithm and the above results is studied. Finally, based on the measurements, conclusions are drawn about the future of fourth generation networks and wireless networks in general.

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη οικονομική και μη, στήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, κύριο Σταύρο Κωτσόπουλο, για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα από τα αγαπημένα μου αντικείμενα σε ό,τι αφορά τη σχολή, καθώς και τον διδακτορικό Παναγιώτη Γεωργακόπουλο, για την υπερπολύτιμη βοήθειά του, ώστε να γίνει δυνατή η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
Εισαγωγή	12
1. Αρχιτεκτονική και χαρακτηριστικά δικτύου LTE	13
1.1. Δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G)	13
1.2. Ορισμός LTE	13
1.3. LTE downlink	14
1.4 Εύρος ζώνης και Resource Blocks	14
1.5. OFDMA	15
1.6. Single User MIMO	16
1.7. Χωρική πολυπλεξία	18
1.8. Προκωδικοποίηση	19
1.9. Δέκτης MMSE	20
1.10. Εξασθένιση σήματος	21
1.10.1. Εξασθένιση μεγάλης κλίμακας	23
1.10.2. Εξασθένιση μικρής κλίμακας	23
1.11. SINR και CQI	24
2. Ανάλυση μοντέλου συστήματος προσομοίωσης	26
2.1. Εισαγωγή	26
2.2. Κανάλι Rayleigh	27
2.3. Channel matrix	28
2.4. Προκωδικοποίηση	29
2.5. Δέκτης MMSE	29
2.6. Συμπεράσματα	31
3. Ανάλυση του προβλήματος υλοποίησης του δικτύου LTE	32

	3.1. Εισαγωγή	32
	3.2. Ισολογισμός ισχύος	33
	3.3. Ημιαστικό περιβάλλον διάδοσης	34
	3.4. Αστικό περιβάλλον διάδοσης	38
	3.5. Αστικό περιβάλλον διάδοσης με τριχοτόμηση	41
	3.6. Συμπεράσματα	43
4.	Ανάλυση αλγορίθμων κατανομής πόρων δικτύου	44
	4.1. Εισαγωγή	44
	4.2. Αλγόριθμος Round Robin	45
	4.2.1. Διαμοιρασμός πόρων με round robin	45
	4.2.2. Τρόπος λειτουργίας του round robin	45
	4.3. Αλγόριθμος Best CQI	46
	4.3.1. Διαμοιρασμός πόρων με Best CQI	46
	4.3.2. Τρόπος λειτουργίας του Best CQI	46
	4.4. Αλγόριθμος Proportional Fair	47
	4.4.1. Διαμοιρασμός πόρων με Proportional Fair	47
	4.4.2. Τρόπος λειτουργίας του Proportional Fair	47
	4.5. Βελτιωμένος αλγόριθμος Proportional Fair	48
	4.5.1. Διαμοιρασμός πόρων με βελτιωμένο αλγόριθμο Proportional Fair	48
	4.5.2. Τρόπος λειτουργίας του βελτιωμένου Proportional Fair	48
	4.6. Σύγκριση των αλγορίθμων	49
	4.7. Συμπεράσματα	50
5.	Ανάλυση απόδοσης του δικτύου	51
	5.1. Εισαγωγή	51
	5.2. Μεταβλητές προσομοίωσης	51
	5.2. Αποτελέσματα	53
	5.2.1. Αποτελέσματα για ημιαστικό περιβάλλον	54

	5.2.2. Αποτελέσματα για αστικό περιβάλλον	60
	5.2.3. Αποτελέσματα για αστικό περιβάλλον με τριχοτόμηση	66
Ę	5.3. Συμπεράσματα	72
6. I	Γενικά Συμπεράσματα	74
Βιβ	βλιογραφία	76
Πα	ράρτημα	78

Εισαγωγή

Στο πρώτο κεφάλαιο εξηγούνται οι θεωρητικές έννοιες των ασύρματων δικτύων και της τεχνολογίας του LTE, που θα χρησιμοποιηθούν και στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύουμε το μοντέλο συστήματος που χρησιμοποιούμε στον προσομοιωτή, δηλαδή τις εξισώσεις που χρησιμοποιούμε για να χτίσουμε το δίκτυο, που αποτελούν τον "σκελετό" του. Στο τρίτο κεφάλαιο, έχουμε την τοπολογία του δικτύου, όπου αναλύουμε τα διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης που θα τρέξουμε στις προσομοιώσεις. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζουμε τους αλγορίθμους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό των χρηστών. Οι αλγόριθμοι αυτοί κάνουν το διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου στους συνδρομητές, αναλόγως με το σκοπό που επιτελούν. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζουμε την προσομοίωση. Αρχικά παραθέτουμε τις μεταβλητές που χρησιμοποιούνται σε καθεμία από τις τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις, και έπειτα, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα μέσω γραφημάτων. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, προβαίνουμε σε ορισμένα γενικά συμπεράσματα σχετικά με τα δίκτυα τέταρτης γενιάς, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας. Τέλος παραθέτουμε τη βιβλιογραφία, καθώς και το παράρτημα με τους κώδικες τον αλγορίθμων που χρησιμοποιήσαμε, που είναι και το ζητούμενο της διπλωματικής εργασίας.

1. Αρχιτεκτονική και χαρακτηριστικά δικτύου LTE

1.1. Δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G)

Το 4G είναι η τέταρτη γενιά τεχνολογίας κινητών επικοινωνιών. Ακολουθεί χρονικά την τρίτη γενιά (3G). Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς παρέχουν τη δυνατότητα ψηφιακών τηλεφωνικών κλήσεων, αποστολής μηνυμάτων, καθώς και πλοήγηση στο διαδίκτυο, βιντεοκλήσεις, κατέβασμα μουσικής και βίντεο εν κινήσει.



Εικόνα 1.1: Δίκτυα τέταρτης γενιάς, [3]

1.2. Ορισμός LTE

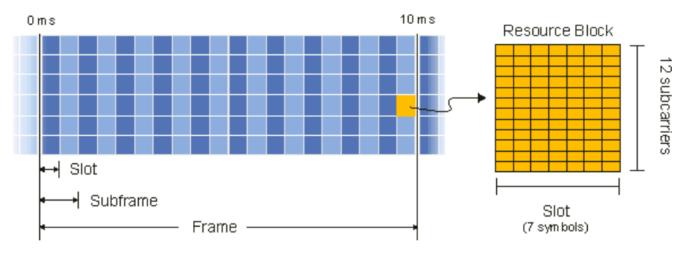
LTE ή Long Term Evaluation ονομάζεται η τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιείται για την ασύρματη επικοινωνία και δικτύωση των κινητών συσκευών, με υψηλές ταχύτητες. Βασίζεται στα προϋπάρχοντα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA, αυξάνοντας τη χωρητικότητα και τη ταχύτητα του δικτύου χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές διαμόρφωσης. Το πρότυπο αυτό αναπτύσσεται από τον οργανισμό 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Το πρώτο δημόσιο δίκτυο LTE που εγκαταστάθηκε στο κόσμο, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη στις 14 Δεκεμβρίου 2009. Οι δημιουργοί του LTE φιλοδοξούν να αποτελέσει το πρώτο πραγματικά παγκόσμιο πρότυπο κινητής τηλεφωνίας. Παρ' όλο που αναφέρεται ως σύστημα 4ης γενιάς κινητής τηλεφωνίας (4G) αυτό δεν ισχύει για την αρχική έκδοση του LTE, καθώς δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που έχει ορίσει ο διεθνής οργανισμός ITU-R. Γι' αυτό το λόγο, το LTE αναβαθμίστηκε σε LTE Advanced (LTE-A) για να πληροί τις προϋποθέσεις έτσι ώστε να θεωρείται σύστημα 4G.

1.3. LTE downlink

Το LTE δουλεύει αμφίδρομα, χρησιμοποιώντας άνω ζεύξη (uplink) και κάτω ζεύξη (downlink). Το uplink αφορά τη μετάδοση δεδομένων από τον εξοπλισμό του συνδρομητή (UE ή User Equipment) προς το σταθμό βάσης (eNB ή eNodeB). Το downlink αφορά τη μετάδοση δεδομένων από το σταθμό βάσης προς τον εξοπλισμό του συνδρομητή. Στη διπλωματική, θα ασχοληθούμε μόνο με το downlink.

1.4 Εύρος ζώνης και Resource Blocks

Το Resource Block είναι η μικρότερη μονάδα πόρων του ασύρματου δικτύου που μπορεί να αποδοθεί σε ένα συνδρομητή. Είναι 180 kHz στο πεδίο της συχνότητας καθώς αποτελείται από 12 subcarriers των 15 kHz ο καθένας. Έχει διάρκεια 1 slot = 0.5 ms στο πεδίο του χρόνου.



Εικόνα 1.2: LTE Frame and Resource Block, [6]

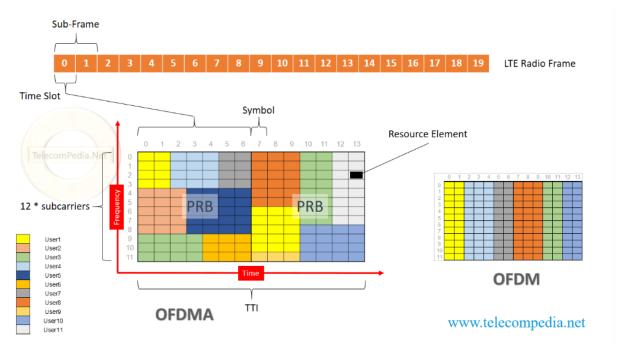
Για διαφορετικό εύρος ζώνης, ορίζεται διαφορετικός αριθμός Resource Block. Τα εύρη ζώνης που ορίζονται στο πρότυπο του LTE είναι τα εξής:

Εύρος ζώνης	Αριθμός Resource Blocks
1.4 MHz	6
3 MHz	15
5 MHz	25
10 MHz	50
15 MHz	75
20 MHz	100

Πίνακας 1.1: Αντιστοίχιση εύρους ζώνης με αριθμό Resource Blocks

1.5. OFDMA

Στην κάτω ζεύξη του LTE χρησιμοποιείται διαμόρφωση OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access. Το σήμα στην OFDMA χωρίζεται σε πολλαπλές συχνότητα φορέα (subcarriers). Αποτελεί μια διαφοροποίηση της OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) για πολλαπλούς χρήστες, καθώς επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να εκπέμπουν ταυτόχρονα σε διαφορετικούς subcarriers ανά σύμβολο OFDM. Στην OFDMA, οι subcarriers είναι μεταξύ τους ορθογώνιοι.



Εικόνα 1.3: Τα resource blocks στην OFDMA, [7]

Τα πλεονεκτήματα της OFDMA είναι τα εξής:

- Μεγαλύτερο diversity, δηλαδή μεγαλύτερη αξιοπιστία που οφείλεται στη χρήση δύο ή περισσότερων καναλιών με διαφορετικά χαρακτηριστικά για τη μετάδοση δεδομένων.
- Χαμηλότερη παρεμβολή μεταξύ των κυψελών
- Μεγαλύτερη ευελιξία, λόγω της ταυτόχρονης μετάδοσης πολλών δεδομένων.
- Καλύτερη ευρυζωνική κάλυψη του δικτύου.

Ωστόσο, η OFDMA έχει και ορισμένα μειονεκτήματα, τα σημαντικότερα των οποίων, είναι τα εξής:

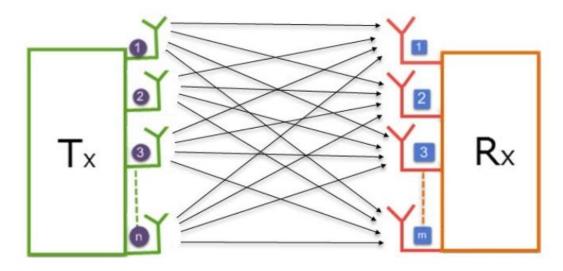
- Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, που οφείλεται στους πολλούς συνδυασμούς που μπορούν να γίνουν στους subcarriers για τη μετάδοση της πληροφορίας.
- Μεγαλύτερες ανάγκες σε ισχύ, που είναι απόρροια της αυξημένης πολυπλοκότητας του συστήματος.
- Υψηλή ευαισθησία σε μετατοπίσεις συχνότητας, που οφείλονται στο φαινόμενο Doppler,
 το οποίο λαμβάνει χώρα όταν συνδρομητές κινούνται με υψηλές ταχύτητες (συνήθως εντός μέσων μεταφοράς).

1.6. Single User MIMO

ΜΙΜΟ ή Multiple Input Multiple Output είναι μια ασύρματη τεχνολογία που αυξάνει τη χωρητικότητα δεδομένων σε ένα ασύρματο δίκτυο, χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες για εκπομπή και λήψη δεδομένων. Σε ένα ΜΙΜΟ κεραιοσύστημα, τα ίδια δεδομένα μεταδίδονται μέσω πολλαπλών κεραιών και μέσω της ίδιας διαδρομής με το ίδιο εύρος ζώνης. Εξ' αιτίας αυτού, φτάνει την κεραία του δέκτη μέσω διαφορετικής διαδρομής, με αποτέλεσμα να έχουμε πιο αξιόπιστα δεδομένα. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αυξάνεται κατά έναν παράγοντα που καθορίζεται από τον αριθμό κεραιών λήψης και εκπομπής.

MIMO ή Multiple Input Multiple Output είναι μια ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες εκπομπής και λήψης με την μετάδοση περισσότερων δεδομένων ταυτόχρονα. Η τεχνολογία αυτή ένα φυσικό φαινόμενο των ραδιοκυμάτων που ονομάζεται πολυόδευση. Η πολόδευση συνιστά ότι το σήμα από την κεραία εκπομπής δεν ακολουθεί πορεία ευθείας γραμμής από τον πομπό στο δέκτη, αλλά ανακλάται σε τοίχους, κτίρια και άλλα αντικείμενα του περιβάλλοντος διάδοσης, φτάνοντας στην κεραία λήψης πολλές φορές υπό διαφορετικές γωνίες,

και ελαφρώς διαφορετικούς χρόνους. Στο παρελθόν το φαινόμενο αυτό, προκαλούσε παρεμβολές και επιβράδυνε τη μετάδοση της πληροφορίας. Η τεχνολογία ΜΙΜΟ αυξάνει την ισχύ λήψης σήματος δέκτη, επιτρέποντας στις κεραίες να συνδυάζουν ροές δεδομένων (streams) που φθάνουν από διαφορετικές διαδρομές και σε διαφορετικούς χρόνους. Συνήθως, όσο περισσότερες κεραίες χρησιμοποιούνται, τόσο υψηλότερες είναι οι ταχύτητες μετάδοσης.



Εικόνα 1.4: ΜΧΝ ΜΙΜΟ σύστημα, [9]

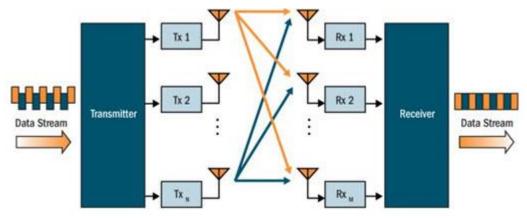
Στα πλαίσια της διπλωματικής, θα χρησιμοποιήσουμε 4 κεραίες στην εκπομπή και 2 κεραίες στη λήψη, δηλαδή 2x4 Single user MIMO.

Single user MIMO ή SU-MIMO είναι το ΜΙΜΟ κεραιοσύστημα στο οποίο όλες οι ροές δεδομένων (streams) κατευθύνονται σε μία χρονική στιγμή από τον πομπό σε ένα και μοναδικό δέκτη. Με αυτό τον τρόπο μειώνουμε την παρεμβολή μεταξύ των συνδρομητών και μειώνουμε την πολυπλοκότητα του συστήματος μετάδοσης.

1.7. Χωρική πολυπλεξία

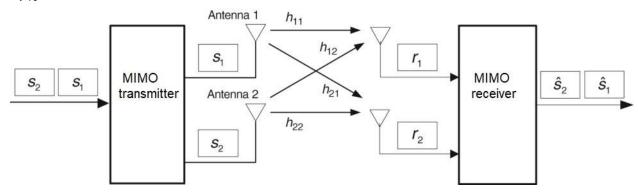
Χωρική πολυπλεξία ή spatial multiplexing είναι η τεχνική πολύπλεξης της πληροφορίας που επιτρέπουν τη συγκέντρωση των ροών πληροφορίας αποκλειστικά σε μία ενεργή ζεύξη κάθε χρονική στιγμή. Αυτό επιτρέπει την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων, χωρίς αλλαγή στη συχνότητα ή στην ισχύ μετάδοσης.

Με τη χωρική πολυπλεξία, πολλές ροές δεδομένων μεταδίδονται ταυτόχρονα, στο ίδιο κανάλι, αλλά με διαφορετική κεραία. Ανασυνδέονται στον δέκτη χρησιμοποιώντας επεξεργασία σήματος. Αυτό απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα με δύο χωρικά streams - ένα πορτοκαλί και ένα μπλε.



Εικόνα 1.5: Χωρικά streams σε ΜΙΜΟ σύστημα, [10]

Για να αποδώσουμε μαθηματικά τη χωρική πολυπλεξία, θεωρούμε ένα ΜΙΜΟ σύστημα 2x2, ως εξής:



Εικόνα 1.6: 2x2 ΜΙΜΟ σύστημα, [12]

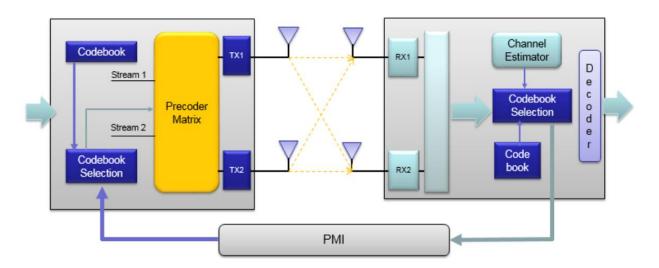
Τα λαμβανόμενα σήματα r_1, r_2 εκφράζονται σαν πίνακες:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$$
 (1.1)

Ή εναλλακτικά: $\underline{r} = \overline{H} \cdot \underline{s} + \underline{n}$ (1.2), όπου H είναι ο πίνακας του καναλιού και n είναι ο λευκός προσθετικός θόρυβος, που εισάγεται στο κανάλι κατά τη μετάδοση.

1.8. Προκωδικοποίηση

Σε ένα ΜΙΜΟ σύστημα, η προκωδικοποίηση είναι μια απαραίτητη διαδικασία, κατά την οποία, τα δεδομένα που έρχονται στην κεραία αποστολής, οδηγούνται προς τις θύρες της. Τον τρόπο που γίνεται ο διαμοιρασμός των δεδομένων στις θύρες, ορίζει ο προκωδικοποιητής (precoder). Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται τα data streams, που προωθούνται στην κεραία του παραλήπτη. Επομένως για N_r x N_t ΜΙΜΟ, που έχουμε N_t κεραίες στο σταθμό βάσης, υπάρχουν $N_r^{N_t}$ πιθανοί πίνακες προκωδικοποίησης και η κεραία καλείται κάθε φορά που γίνεται μετάδοση δεδομένων, να επιλέξει τον προκωδικοποιητή που θα μεγιστοποιήσει το data throughput του δέκτη.

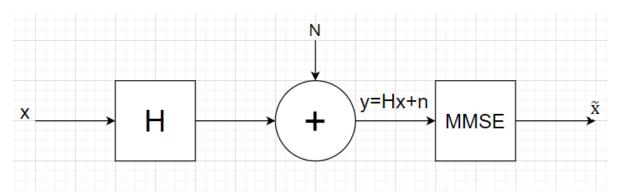


Εικόνα 1.7: Διαδικασία προκωδικοποίησης, [13]

Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε ένα 2x2 MIMO κεραιοσύστημα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Το precoding είναι η διαδικασία, κατά την οποία τα δεδομένα στον πομπό διανέμονται στις θύρες των κεραιών εκπομπής. Το LTE codebook είναι μία βάση δεδομένων που περιέχει $N_r^{\ N_t}=2^2=4$ διαφορετικούς πίνακες, που ονομάζονται προκωδικοποιητές. Κατά την πρώτη χρονική στιγμή επικοινωνίας του σταθμού βάσης με τον εξοπλισμό του συνδρομητή, η κεραία εκπομπής, ελέγχει ποιος από τους τέσσερις προκωδικοποιητές, διαμοιράζει τα προς μετάδοση δεδομένα, με βέλτιστο τρόπο προς τις θύρες και ανάλογα επιλέγει. Όταν τα δεδομένα φτάσουν στον δέκτη, ακολουθείται η ίδια διαδικασία από την κεραία λήψης, ώστε τα δεδομένα να ανασυνδυαστούν και να γίνει η αποκωδικοποίηση. Για τις επόμενες χρονικές στιγμές, ο UE ενημερώνει κατά το uplink την κεραία του σταθμού βάσης, ποιος πίνακας precoding πρέπει να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση δεδομένων κατά το downlink, χρησιμοποιώντας το δείκτη PMI ή Precoding Matrix Indicator.

1.9. Δέκτης MMSE

Ο MMSE (Minimum Mean Square Error) είναι ένας αλγόριθμος post-processing που χρησιμοποιείται στο δέκτη. Αποτελεί έναν γραμμικό ισοσταθμιστή (linear equalizer) με σκοπό να διαχωρίσει στο δέκτη τον θόρυβο από το ωφέλιμο σήμα με όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση. Χρησιμοποιείται σε πολλά κεραιοσυστήματα, λόγω της χαμηλής του περιπλοκότητας. Προτιμάται σε περιπτώσεις που, εκτός από AWGN (Additive White Gaussian Noise = λευκός προσθετικός θόρυβος) υπάρχουν και άλλου είδους παρεμβολές, όπως στην περίπτωση μας, παρεμβολή μεταξύ των δύο streams στο δέκτη (inter-stream interference).



Σχήμα 1.1: Φιλτράρισμα του σήματος από το δέκτη MMSE

Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός 2x2 ΜΙΜΟ κεραιοσύστημα, ισχύουν τα εξής: Θεωρώντας ότι εισάγεται λευκός προσθετικός θόρυβος (AWGN), το λαμβανόμενο σήμα είναι:

$$\bar{y} = \bar{r} + \bar{n} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$$
 (1.3)

Το σφάλμα e ορίζεται ως εξής:

$$e = \tilde{x} - \bar{x} = \mathbb{Z}_{MMSE} \cdot \bar{y} - \bar{x} \tag{1.4}$$

όπου \widetilde{x} η εκτίμηση του σφάλματος και \overline{x} το ιδανικό σφάλμα. Για να ελαχιστοποιηθεί η αναμενόμενη τιμή του σφάλματος e, ο ισοσταθμιστής MMSE υπολογίζεται ως εξής:

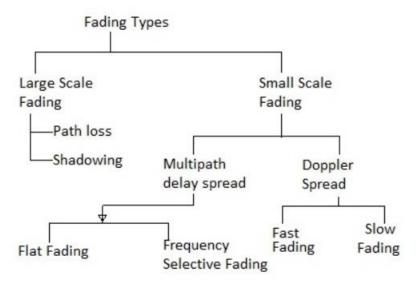
$$\mathbb{Z}_{MMSE} = \frac{H^H}{(\|H\| + \sigma_n^2 I_2)}$$
 (1.5)

Όπου Η είναι ο πίνακας του καναλιού, ()^H είναι η ερμησιανή του πίνακα Η ή αλλιώς ο ανάστροφος συζυγής πίνακας, σ_n^2 είναι η ισχύς του θορύβου και I_2 είναι 2x2 μοναδιαίος διαγώνιος πίνακας.

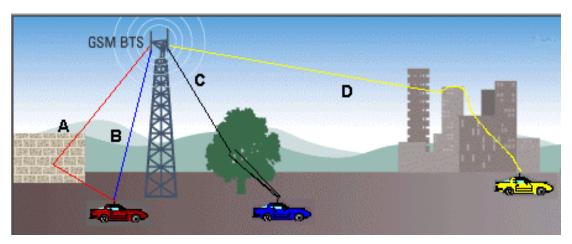
1.10. Εξασθένιση σήματος

Ένα μεταδιδόμενο σήμα υφίσταται αλλαγές ενώ ταξιδεύει μέσω της διαδρομής διάδοσης προς τον δέκτη. Το αποτέλεσμα αυτών των αλλαγών ονομάζεται εξασθένιση. Στον ελεύθερο χώρο, ένα σήμα ακολουθεί μία διαδρομή και φτάνει στον δέκτη με μικρή εξασθένηση. Αυτό δεν ισχύει για ένα σήμα που αντιμετωπίζει εμπόδια στη διαδρομή διάδοσης. Αντ 'αυτού, το σήμα αντανακλάται, διαθλάται και διασκορπίζεται από αντικείμενα που υπάρχουν στη διαδρομή. Κάθε διαδρομή μπορεί να έχει διαφορετικό τύπο εξασθένησης και καθυστέρησης. Ο συνδυασμός αυτών των διαφορετικών διαδρομών ονομάζεται εξασθένιση λόγω πολυόδευσης ή multipath fading ή multipath spread. Στον δέκτη, τα σήματα μπορούν να προσθέσουν εποικοδομητικά ή καταστρεπτικά, προκαλώντας τυχαίες και γρήγορες διακυμάνσεις στο λαμβανόμενο πλάτος όταν ο δέκτης ή ο πομπός κινείται. Λόγω του φαινομένου Doppler, αυτή η κατάσταση προκαλεί επίσης τη διάδοση του σήματος στον τομέα συχνότητας.

Τα φαινόμενα εξασθένισης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες γνωστές ως εξασθένιση μεγάλης κλίμακας και εξασθένιση μικρής κλίμακας.



Εικόνα 1.8: Κατηγορίες φαινομένων εξασθένισης, [17]



Εικόνα 1.9: Σενάρια εξασθένισης του σήματος

διαδρομή A: NFLOS (non Line of Sight)

διαδρομή B: LOS (Line of Sight) διαδρομή C: Small scale fading

διαδρομή D: Shadowing

1.10.1. Εξασθένιση μεγάλης κλίμακας

Η εξασθένιση μεγάλης κλίμακας ή large scale fading είναι το αποτέλεσμα της εξασθένησης του σήματος λόγω της διάδοσης του σε μεγάλες αποστάσεις και της περίθλασης γύρω από μεγάλα αντικείμενα στη διαδρομή διάδοσης. Η εξασθένιση αυτή προκαλείται σε απόσταση εκατοντάδων μηκών κύματος λ από τον πομπό. Περιλαμβάνει τα φαινόμενα της απώλειας όδευσης ή Path Loss και της σκίασης ή shadowing.

Απώλειες όδευσης (Path Loss) είναι οι απώλειες που οφείλονται στην απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Στον ελεύθερο χώρο, η εξασθένιση ενός σήματος λόγω απόστασης ακολουθεί τον νόμο του $\frac{1}{d^2}$, όπου d είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αυτό ισχύει για τα σήματα που έχουν LOS ή Line of Sight (διαδρομή B), δηλαδή δεν υπάρχουν εμπόδια στη διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη. Στην περίπτωση σημάτων που δεν υπάρχει LOS (διαδρομή A), η εξασθένηση είναι πιο πιθανό να είναι οπουδήποτε από $\frac{1}{d^3}$ έως $\frac{1}{d^6}$. Αυτή η πρόσθετη απώλεια ισχύος στα κανάλια διάδοσης συμβαίνει όταν χαθεί μέρος του ανακλώμενου σήματος.

Η <u>σκίαση</u> ή shadowing σαν φαινόμενο, είναι το αποτέλεσμα του αποκλεισμού του σήματος από μεγάλα αντικείμενα στη διαδρομή διάδοσης (διαδρομή D). Αυτά είναι συνήθως μακρινά αντικείμενα στο περιβάλλον, όπως βουνά, λόφοι ή μεγάλα κτίρια. Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένας κινούμενος δέκτης να περάσει από τη "σκιά" αυτών των εμποδίων φέρνει τον όρο "αργή εξασθένιση". Το στατιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη σκίαση είναι η λογαριθμική κατανομή της μέσης ισχύος σήματος.

1.10.2. Εξασθένιση μικρής κλίμακας

Η εξασθένιση μικρής κλίμακας ή small scale fading, και συγκεκριμένα η εξασθένιση Rayleigh χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των ταχέων διακυμάνσεων πλάτους όπου δεν υπάρχει LOS. Επειδή δεν υπάρχει στοιχείο άμεσης ακτίνας, η εξασθένιση Rayleigh συχνά κατατάσσεται ως το χειρότερο είδος εξασθένισης. Χρησιμοποιώντας μοντέλο μιας ακτίνας, αυτή η μικρής κλίμακας κατανομή προσομοιώνει τα αποτελέσματα των ταχέων διακυμάνσεων πλάτους όταν ο δέκτης ταξιδεύει σε απόσταση μερικών μηκών κύματος. Η ακτίνα αυτή διασκορπίζεται κοντά στο δέκτη με αποτέλεσμα να φθάνει ένας μεγάλος αριθμός ακτίνων στον δέκτη από όλες τις κατευθύνσεις (διαδρομή C). Τα σήματα προστίθενται εντός και εκτός φάσης προκαλώντας διακυμάνσεις πλάτους που ποικίλλουν με ρυθμό που εξαρτάται από την ταχύτητα του δέκτη. Το

στατιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις διακυμάνσεις πλάτους είναι η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Rayleigh. Η κίνηση του δέκτη παράγει επίσης διάδοση του σήματος στον τομέα συχνοτήτων λόγω του φαινομένου Doppler.

1.11. SINR Kai CQI

Το SINR ή Signal to Interference plus Noise Ratio είναι μια αναλογία που χρησιμοποιείται πολύ συχνά στις ασύρματες επικοινωνίες για τη μέτρηση της ποιότητας μιας ασύρματης σύνδεσης. Η σχέση ορίζεται ως εξής: $SINR = \frac{Signal}{Interference + Noise}$ (1.6). Στα πλαίσια της διπλωματικής, θεωρούμε ότι υπάρχει μόνο παρεμβολή μεταξύ των δύο διαφορετικών ροών δεδομένων στο δέκτη (inter-stream interference). Θόρυβο θεωρούμε λευκό προσθετικό γκαουσσιανό θόρυβο (AWGN). Σαν ποσότητα το SINR μπορεί να μετρηθεί είτε σε dBm, είτε ως αδιάστατο μέγεθος. Η μετατροπή από dBm σε αδιάστατο μέγεθος και αντίστροφα γίνεται ως εξής:

$$SINR_{(dBm)} = 10 \times \log_{10} \left(SINR_{(\alpha\delta\iota\dot{\alpha}\sigma\tau\alpha\tau o)} \right)$$
 (1.7)
 $SINR_{(\alpha\delta\iota\dot{\alpha}\sigma\tau\alpha\tau o)} = 10^{\frac{SINR_{(dBm)}}{10}}$ (1.8)

Το CQI ή Channel Quality Index είναι ένας δείκτης με διακριτό σύνολο τιμών, που δηλώνει πόσο καλή ή κακή είναι η ποιότητα του καναλιού επικοινωνίας. Είναι άμεσο παράγωγο του SINR, με τη διαφορά ότι οι τιμές του για το LTE είναι διακριτές στο διάστημα [1,15], ενώ το SINR έχει συνεχείς τιμές στο διάστημα $(-\infty, +\infty)$. Η αντιστοιχία τιμών μεταξύ SINR και CQI είναι η εξής:

CQI	SINR
1	(-∞, -5.147)
2	[-5.147, -3.18)
3	[-3.18, -1.254)
4	[-1.254, 0.761)
5	[0.761, 2.7)
6	[2.7, 4.697)
7	[4.697, 6.528)
8	[6.528, 8.576)
9	[8.576, 10.37)
10	[10.37, 12.3)
11	[12.3, 14.18)
12	[14.18, 15.89)
13	[15.89, 17.82)
14	[17.82, 19.83)
15	[19.83, +∞)

Πίνακας 1.1: Αντιστοίχιση SINR με CQI

CQI=1 σημαίνει ότι το κανάλι επικοινωνίας βρίσκεται στη χειρότερη δυνατή κατάσταση, ενώ CQI=15 σημαίνει ότι το κανάλι βρίσκεται σε άριστη κατάσταση.

Οι συνδρομητές κατά το uplink, ενημερώνουν το σταθμό βάσης για το CQI του καναλιού τους τη δεδομένη χρονική στιγμή, και έπειτα ο σταθμός βάσης διανέμει τους ραδιοπόρους στους συνδρομητές, αναλόγως τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού που χρησιμοποιεί.

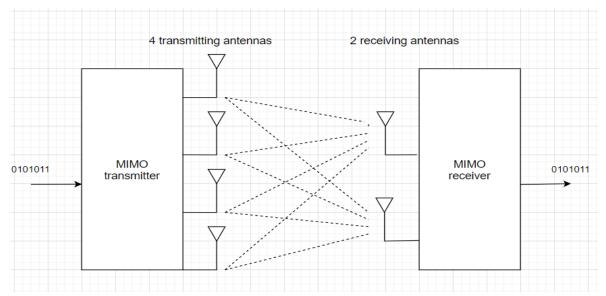
2. Ανάλυση μοντέλου συστήματος προσομοίωσης

2.1. Εισαγωγή

Για τα δεδομένα της διπλωματικής εξετάζουμε μόνο την κάτω ζεύξη (downlink) του μέρους της μετάδοσης, δηλαδή την μετάδοση δεδομένων από τους σταθμούς βάσης προς τους χρήστες. Θεωρούμε ότι κάθε σταθμός βάσης εκπέμπει με σταθερή ισχύ 1 Watt ή 30 dBm και η ισχύς του θορύβου (noise power/variance) σε κάθε UE είναι σταθερά ίση με -174 dBm. Επιπλέον, κάθε σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με 4 κεραίες εκπομπής, ενώ κάθε user equipment (UE) είναι εξοπλισμένος με 2 κεραίες για λήψη.

Λόγω πολλαπλών κεραιών σε πομπό και δέκτη, το κεραιοσύστημα μας είναι MIMO (Multiple Input Multiple Output). Για την κωδικοποίηση της πληροφορίας, χρησιμοποιούμε την τεχνική spatial multiplexing (χωρική πολυπλεξία), δημιουργώντας δύο λαμβανόμενα stream (ροές) πληροφορίας σε κάθε UE, τα οποία ο χρήστης αποκωδικοποιεί και αυξάνει το συνολικό του throughput. Θεωρούμε ότι κάθε stream πληροφορίας ξεκινά από τον σταθμό βάσης και καταλήγει σε ένα μοναδικό UE, οπότε το σύστημα μας είναι SU-MIMO (Single User MIMO). Αυτό συμβαίνει διότι ο κάθε ραδιοπόρος (Resource Block ή RB) κάθε σταθμού βάσης διανέμεται σε έναν εξυπηρετούμενο χρήστη του.

Επίσης, χρησιμοποιούμε για τη μετάδοση δεδομένων, τεχνική πολλαπλής πρόσβασης OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Σύμφωνα με την OFDMA, για το εύρος ζώνης των 20 MHz που διαθέτει το δίκτυο μας, θα μπορούν να εξυπηρετούνται έως και 100 χρήστες παράλληλα σε κάθε κυψέλη κάθε χρονική στιγμή.



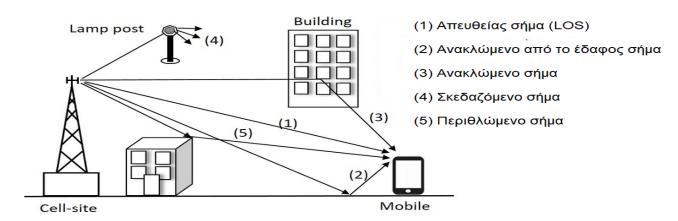
Σχήμα 2.1: Σύστημα κεραιών ΜΙΜΟ 2x4

Οι δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν στους παρακάτω τύπους είναι οι εξής:

- k είναι ο δείκτης του χρόνου.
- i και j είναι οι δείκτες του σταθμού βάσης ή της κυψέλης.
- q και p είναι οι δείκτες του UE.
- Ι και m είναι οι δείκτες των streams.

2.2. Κανάλι Rayleigh

Για τη μοντελοποίηση του καναλιού, θα χρησιμοποιήσουμε Rayleigh Fading channel, που είναι ιδανικό σε περιβάλλοντα που υπάρχουν πολλές ανακλάσεις του σήματος, λόγω εμποδίων όπως κτίρια. Το μοντέλο Rayleigh χρησιμοποιεί μια στατιστική προσέγγιση για να αναλύσει τη διάδοση του σήματος και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε αστικά και ημιαστικά περιβάλλοντα. Το μοντέλο Rayleigh fading θεωρεί ότι η ισχύς του σήματος που έχει περάσει μέσα από ένα μέσο διάδοσης/τηλεπικοινωνιακό κανάλι θα ποικίλει με τυχαίο τρόπο, με βάση την κατανομή Rayleigh. Το μοντέλο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε σενάρια που το σήμα διασκορπίζεται μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει απευθείας δρόμος LOS (Line Of Sight) για το σήμα από τον πομπό στο δέκτη, και απαιτείται μια στατιστική προσέγγιση για τη ακριβή φύση TOU τηλεπικοινωνιακού καναλιού. Όταν το σήμα φτάνει στο δέκτη, το συνολικό σήμα είναι ο συνδυασμός όλων των σημάτων που έχουν φτάσει στο δέκτη από διάφορα μονοπάτια. Το τελικό σήμα θα ποικίλει σε ισχύ, ανάλογα τις φάσεις των επιμέρους σημάτων. Εάν όλα τα σήματα είναι συμφασικά, θα αθροιστούν στο τελικό σήμα. Η συνήθης περίπτωση, ωστόσο, είναι να υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των επιμέρους σημάτων, επομένως το τελικό σήμα δεν θα είναι το μέγιστο δυνατό.



Εικόνα 2.1: Πολυόδευση του σήματος, [30]

2.3. Channel matrix

Το ασύρματο κανάλι Rayleigh δημιουργείται σύμφωνα με τον τύπο:

$$H(t) = \overline{H}(t) \cdot R^{\frac{1}{2}} \tag{2.1}$$

Όπου ο πρώτος όρος του γινομένου \overline{H} , αντιπροσωπεύει ένα spatially uncorrelated Rayleigh flat fading channel matrix με i.i.d. (independent and identically symmetric) τιμές, με βάση την κατανομή CN(0,1) δηλαδή complex normal distribution με μέση τιμή 0 και διασπορά 1. Δίνεται από τύπο:

$$\overline{H}(t) = \varepsilon \cdot \overline{H}(t-1) + \sqrt{1-\varepsilon^2} \cdot N(t)$$
 (2.2)

ε=0.85 είναι ο συντελεστής χρονικής συσχέτισης (time correlation) των δεδομένων. Μικρές τιμές του ε δηλώνουν μικρή συσχέτιση μεταξύ των καναλιών σε διαδοχικές χρονικές στιγμές. Ιδιαίτερα αν ε=0, τα κανάλια είναι απολύτως ανεξάρτητα. Αν το ε παίρνει μεγάλες τιμές, σημαίνει ότι το κανάλι αλλάζει αργά στο χρόνο.

N(t) είναι η τιμή του θορύβου για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Οι αρχικές τιμές του θορύβου N είναι τυχαίες i.i.d. τιμές (independent and identically symmetric = ανεξάρτητες και πανομοιότυπα συμμετρικές), με βάση την κατανομή CN(0,1), δηλαδή complex normal distribution με μέση τιμή μ =0 και τυπική απόκλιση σ =1.

Ο δεύτερος όρος του γινομένου $R^{\frac{1}{2}}$ αποτελεί τον πίνακα συσχέτισης των δεδομένων (correlation matrix) και είναι ανεξάρτητος του χρόνου της προσομοίωσης:

$$R_{t,q,i} = \begin{bmatrix} 1 & t_{q,i} & t_{q,i}^2 & t_{q,i}^3 \\ t_{q,i}^* & 1 & t_{q,i} & t_{q,i}^2 \\ t_{q,i}^* & t_{q,i}^* & 1 & t_{q,i} \\ t_{a,i}^* & t_{a,i}^* & t_{a,i}^* & 1 \end{bmatrix}$$
(2.3)

Εάν ο q user ανήκει στον i eNodeB τότε $t_{q,i}=t\cdot e^{j\phi_q}$, όπου t είναι ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης των δεδομένων (spatial correlation) και ϕ_q είναι η φάση του συντελεστή t που είναι ξεχωριστή για κάθε χρήστη και τυχαία, μέσα στο εύρος τιμών [0, 2π]. Εάν ο q user δεν ανήκει στον i eNodeB τότε ισχύει $t_{q,i}=0$.

Όταν ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης έχει μικρή τιμή, αναμένουμε για κανάλια που προέρχονται από δύο διαφορετικές κεραίες εκπομπής και καταλήγουν στην ίδια κεραία λήψης ότι το throughput τους θα αυξηθεί. Αντίθετα, για μεγάλες τιμές του t, λόγω της μεγάλης συσχέτισης των δεδομένων των δύο streams, η μετάδοση σε δύο streams μπορεί να ζημιωθεί.

2.4. Προκωδικοποίηση

Σε ένα ΜΙΜΟ σύστημα, η προκωδικοποίηση είναι μια απαραίτητη διαδικασία, κατά την οποία, τα δεδομένα που έρχονται στην κεραία αποστολής, οδηγούνται προς τις θύρες της. Τον τρόπο που γίνεται ο διαμοιρασμός των δεδομένων στις θύρες, ορίζει ο προκωδικοποιητής (precoder). Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται τα data streams, που προωθούνται στην κεραία του παραλήπτη. Επομένως για N_r x N_t ΜΙΜΟ, που έχουμε N_t κεραίες στο σταθμό βάσης, υπάρχουν $N_r^{N_t}$ πιθανοί πίνακες προκωδικοποίησης και η κεραία καλείται κάθε φορά που γίνεται μετάδοση δεδομένων, να επιλέξει τον προκωδικοποιητή που θα μεγιστοποιήσει το data throughput του δέκτη.

2.5. Δέκτης MMSE

Ο MMSE (Minimum Mean Square Error) είναι ένας αλγόριθμος post-processing που χρησιμοποιείται στο δέκτη. Αποτελεί έναν γραμμικό ισοσταθμιστή (linear equalizer) με σκοπό να διαχωρίσει στο δέκτη τον θόρυβο από το ωφέλιμο σήμα με όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση. Χρησιμοποιείται σε πολλά κεραιοσυστήματα, λόγω της χαμηλής του περιπλοκότητας. Προτιμάται σε περιπτώσεις που, εκτός από AWGN (Additive White Gaussian Noise = λευκός προσθετικός θόρυβος) υπάρχουν και άλλου είδους παρεμβολές, όπως στην περίπτωση μας, παρεμβολή μεταξύ των δύο streams στο δέκτη (inter-stream interference).

Ο τύπος του SINR για MMSE receiver είναι:

$$SINR_{q,l} = \Lambda_{q,i}^{-1} \cdot (H_{q,i} \cdot p_{q,i,l})^H \cdot R_{n_i}^{-1} \cdot (H_{q,i} \cdot p_{q,i,l})$$
 (2.4)

Το SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) είναι ένας τρόπος μέτρησης της ποιότητας της ασύρματης σύνδεσης του πομπού με το δέκτη. Ισχύει: $SINR = \frac{S}{I+N}$ (2.5). Μετριέται σε decibel. Υψηλό SINR σημαίνει ότι υπάρχει καλύτερο κανάλι μεταξύ των δύο πλευρών. Οι χρήστες που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης (cell edge users), έχουν συνήθως κακό SINR.

Όπου $SINR_{q,l}$ είναι το SINR του q user για το l stream, $\Lambda_{q,i}$ είναι οι συνολικές απώλειες largescale (path loss + shadowing) του q user στην i κυψέλη, $H_{q,i}$ είναι το κανάλι του q user στην i κυψέλη και R_{n_i} ο covariance matrix του σήματος \mathbf{n}_i που είναι ο συνδυασμός του θορύβου N και της παρεμβολής από τις γειτονικές κυψέλες. Τέλος, $p_{q,i,l}$ είναι η l στήλη του precoding matrix του q user στην i κυψέλη.

Το covariance matrix δίνεται από τον εξής τύπο:

$$R_{n_{i}} = \sum_{m \neq i} \Lambda_{q,i}^{-1} \cdot (H_{q,0} \cdot p_{q,0,m}) \cdot (H_{q,0} \cdot p_{q,0,m})^{H} + \sum_{i=1}^{6} \Lambda_{q,i}^{-1} \cdot (H_{q,i} \cdot P_{i}) \cdot (H_{q,i} \cdot P_{i})^{H} + \sigma_{n,q}^{2} \cdot I_{n_{r}}$$
(2.6)

Όπου ο εκθέτης ()^H δηλώνει τον ανάστροφο συζυγή πίνακα (conjugate transpose) και $\sigma_{n,q}^2$ είναι η ισχύς του θορύβου, που για τα δεδομένα της προσομοίωσης είναι σταθερή στα -174 dBm για όλους τους χρήστες. Τέλος, $p_{a,i,l}$ είναι η Ι στήλη του precoding matrix του q user στην i κυψέλη.

Επομένως, λόγω των δύο κεραιών στη λήψη, έχουμε δύο ανεξάρτητες ροές δεδομένων (data streams), και άρα προκύπτουν δύο διαφορετικά SINR για κάθε χρήστη. Από κάθε SINR προκύπτει μία τιμή throughput. Τα δύο throughput προστίθενται, αφού προκύπτουν από δύο ανεξάρτητες ροές δεδομένων, και δίνουν το συνολικό throughput του χρήστη, το οποίο είναι διπλάσιο από το throughput που θα είχε, αν είχαμε μετάδοση δεδομένων με ένα stream.

Το CQI (Channel Quality Index) είναι ο δείκτης που χρησιμοποιείται συνηθέστερα για να περιγράψει πόσο καλό/κακό είναι το κανάλι επικοινωνίας. Στο LTE, το CQI παίρνει διακριτές τιμές στο διάστημα [1,15] που εξαρτώνται από το SINR. Μέσω του CQI υπολογίζουμε το throughput του κάθε χρήστη, που είναι η μέγιστη ταχύτητα που επιτυγχάνει κάθε χρήστης στη συσκευή του σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

2.6. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε τον τύπο καναλιού που θα χρησιμοποιήσουμε και τις ιδιότητες του, τον τρόπο δημιουργίας του καναλιού, την ανάλυση του σήματος μέχρι να φτάσει στον δέκτη και τον τύπο δέκτη που θα χρησιμοποιήσουμε. Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιούνται κατά τη δημιουργία του προσομοιωτή, ως ο "σκελετός" του δικτύου μας. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα Rayleigh κανάλι και MMSE δέκτης, καθώς είναι τα συνηθέστερα είδη καναλιού και δέκτη αντίστοιχα, στη βιβλιογραφία, και επομένως μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλα papers ή διπλωματικές εργασίες.

3. Ανάλυση του προβλήματος υλοποίησης του δικτύου LTE

3.1. Εισαγωγή

Στόχος της διπλωματικής είναι η προσομοίωση ενός δικτύου LTE τέταρτης γενιάς. Για την επίτευξη του στόχου αναπτύχθηκαν 2 διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης, στα οποία έτρεξε η προσομοίωση του δικτύου, ένα αστικό και ένα ημιαστικό. Για το αστικό περιβάλλον επιπλέον χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της τριχοτόμησης (sectoring). Θεωρούμε ότι το δίκτυο καλύπτει μια γεωγραφική έκταση ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου (1 km²). Για το σκοπό αυτό, οριοθετήθηκε τετράγωνο πλευράς ενός χιλιομέτρου, που θα εμπεριέχει την περιοχή έκτασης του δικτύου.

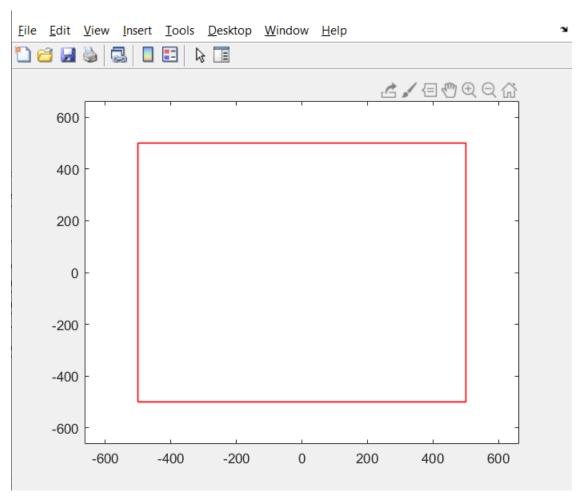


Figure 3.1: Έκταση ενός τετραγωνικού χιλιομέτρου, που εμπεριέχει το δίκτυο

3.2. Ισολογισμός ισχύος

Με τον ισολογισμό ισχύος υπολογίζουμε τις μέγιστες απώλειες που μπορούμε να έχουμε στο RF κανάλι, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του. Οι απώλειες αυτές περιλαμβάνουν τις απώλειες στον αναμεταδότη, τις απώλειες στο μέσο, καθώς και τις απώλειες στον αποδέκτη. Ανεξαρτήτως περιβάλλοντος διάδοσης και μοντέλου που διαλέγουμε, χρειάζεται αρχικά να κάνουμε έναν ισολογισμό ισχύος. Από τα μοντέλα διάδοσης που αναλύουμε στα επόμενα υποκεφάλαια, παίρνουμε ένα τύπο που μας δίνει τις απώλειες όδευσης PL (Path Loss), που αντιστοιχούν στις απώλειες του μέσου διάδοσης σε αναλογία με την απόσταση του χρήστη (αποδέκτη) από το σταθμό βάσης (αποστολέα). Εμάς μας ενδιαφέρουν οι μέγιστες απώλειες που μπορούμε να έχουμε στην κυψέλη. Από τον τύπο του ισολογισμού ισχύος ισχύει $PL = P_t + G_t + G_r - L_{coax} - P_r \quad (dB) \qquad (3.1)$

PL	Απώλειες όδευσης, αφορούν τις απώλειες του μέσου διάδοσης κατά τη	
	μετάδοση δεδομένων.	
Pt	Ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης	
Gt	Κέρδος κεραίας εκπομπής του σταθμού βάσης	
Gr	Κέρδος κεραίας λήψης του χρήστη	
L _{coax}	Ισχύς απωλειών ομοαξονικού καλωδίου	
Pr	Ισχύς λήψης του χρήστη	
P _{threshold}	Κατώφλι ευαισθησίας των χρηστών (ελάχιστη ισχύς που πρέπει να	
	λαμβάνει κάθε χρήστης από το σταθμό βάσης για να υπάρχει	
	επικοινωνία.	

Πίνακας 3.1: Παράμετροι για ισολογισμό ισχύος

Τονίζεται ότι η μετατροπή ισχύος από mW σε dBm και αντίστροφα γίνεται ως εξής:

•
$$P_{(dBm)} = 10 \cdot log_{10} P_{(mW)}$$
 (3.2)
• $P_{(mW)} = 10^{\frac{P_{(dBm)}}{10}}$ (3.3)

Θέτοντας στον τύπο του ισολογισμού ισχύος ότι η ισχύς λήψης είναι ίση με την ισχύ κατωφλίου, $P_r = P_{threshold}$, λαμβάνουμε τις μέγιστες απώλειες όδευσης που μπορούμε να έχουμε διασφαλίζοντας σωστή επικοινωνία. Για τις τιμές που θέσαμε στην προσομοίωση, λαμβάνουμε ότι $PL_{max} = 129.76 \text{ dB}$.

3.3. Ημιαστικό περιβάλλον διάδοσης

Για την προσομοίωση του ημιαστικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιούμε δημογραφικά δεδομένα του δήμου Νάξου. Συγκεκριμένα, έχουμε κατά προσέγγιση 576 χρήστες ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, επομένως και 576 UEs. Χρησιμοποιούμε το μοντέλο διάδοσης SUI (Stanford University Interim) για suburban microcells, σύμφωνα με το οποίο ισχύει:

$$PL = A + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(\frac{d}{d_0}) + x_f + x_h + S$$
 (3.4)

PL	Απώλειες όδευσης, αφορούν τις απώλειες του μέσου διάδοσης κατά τη μετάδοση δεδομένων.
d ₀ = 100m	Κρίσιμη απόσταση
λ	Μήκος κύματος
f _c	Συχνότητα φέρουσας (carrier frequency)
h _r	Απόσταση κεραίας χρήστη από το έδαφος
h _b	Απόσταση κεραίας σταθμού βάσης από
	έδαφος
$A = 20 \cdot log_{10} \frac{4\pi d_0}{\lambda} (3.5)$	Ισχύς ελευθέρου χώρου
$n = a - b \cdot h_b + \frac{c}{h_b} \tag{3.6}$	Για ημιαστικό περιβάλλον ισχύει: α=4, b=0.0065, c=17.1
$x_f = 6 \cdot \log_{10} \frac{f_c}{2000} (3.7)$	Διορθωτικός παράγοντας για συχνότητα μεγαλύτερη των 2 GHz
$x_h = -10.8 \cdot log_{10} \frac{h_r}{2000}$ (3.8)	Διορθωτικός παράγοντας για ύψος κεραίας
2000 (0.0)	δέκτη, εκτός του εύρους [2m, 10m]
S=4	Shadowing: μεταβλητή που καθορίζει πόσα
	''φυσικά εμπόδια'', όπως ψηλά κτίρια, βουνά,
	δέντρα, υπάρχουν στη γεωγραφία του
	δικτύου, τα οποία δυσχεραίνουν την
	επικοινωνία

Πίνακας 3.2: Παράμετροι υπολογισμού απώλειας όδευσης ημιαστικού περιβάλλοντος

Θέτουμε στον τύπο του Path Loss, PL=PL_{max} δηλαδή ότι έχουμε μέγιστες απώλειες όδευσης, και λύνοντας τον τύπο ως προς d, λαμβάνουμε τη μέγιστη απόσταση που αναμεταδίδει ο σταθμός βάσης, δηλαδή την ακτίνα της κυψέλης. Για τα δεδομένα της προσομοίωσης, για το ημιαστικό περιβάλλον διάδοσης η ακτίνα της κυψέλης ισούται με 174.4634 m.

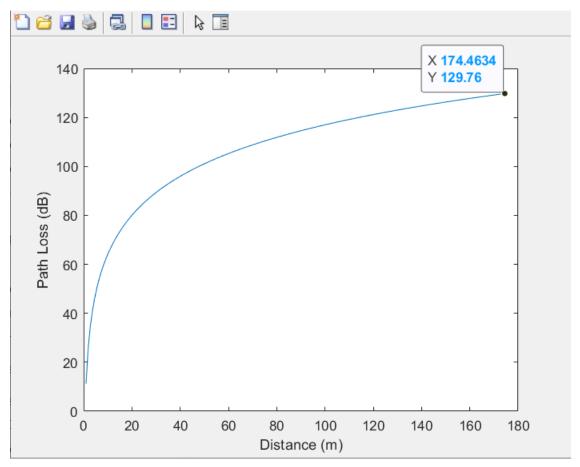
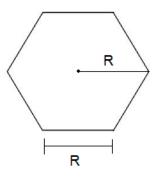


Figure 3.2: Απώλεια όδευσης συναρτήσει της απόστασης για το ημιαστικό περιβάλλον

Παρατηρούμε ότι οι απώλειες όδευσης αυξάνονται λογαριθμικά με την απόσταση από το σταθμό βάσης.

Επόμενο βήμα μετά τον υπολογισμό της ακτίνας κυψέλης, είναι ο υπολογισμός εμβαδού. Θεωρούμε την κυψέλη κανονικό εξάγωνο και άρα το εμβαδόν της υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E_{hex} = rac{3\cdot\sqrt{3}\cdot R^2}{2}$$
 (3.9), όπου R η ακτίνα του κανονικού εξαγώνου, που είναι ίση με την πλευρά του.



Σχήμα 3.1: Η ακτίνα της κυψέλης ισούται με την πλευρά της

Διαιρώντας την συνολική επιφάνεια του δικτύου (1 km²) με την επιφάνεια μιας κυψέλης προκύπτει ότι για τη γεωγραφική κάλυψη του δικτύου θα χρειαστούν 11 σταθμοί βάσης (eNBs), για την εξυπηρέτηση της κίνησης του δικτύου.

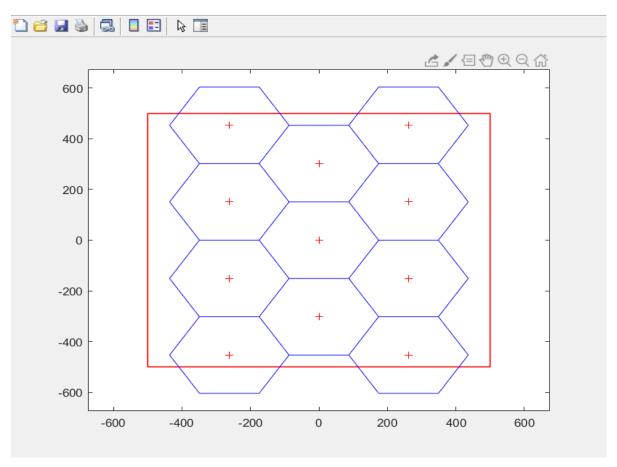


Figure 3.3: Τοποθέτηση σταθμών βάσης για ημιαστικό περιβάλλον, εντός km^2

Κάθε σταθμός θα εξυπηρετεί 53 συνδρομητές, κάθε χρονική στιγμή. Με κόκκινο σημάδι δηλώνεται η κεραία εκπομπής κάθε κυψέλης, που είναι παντοκατευθυντική (εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις) και βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης. Να τονιστεί ότι προϋπόθεση για να θεωρείται μία κυψέλη εντός δικτύου, είναι το κέντρο της να περικλείεται μέσα στο οριοθετημένο τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Η θέση των συνδρομητών μέσα σε κάθε εξάγωνο, γίνεται τυχαία, ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσέγγιση ενός πραγματικού δικτύου.

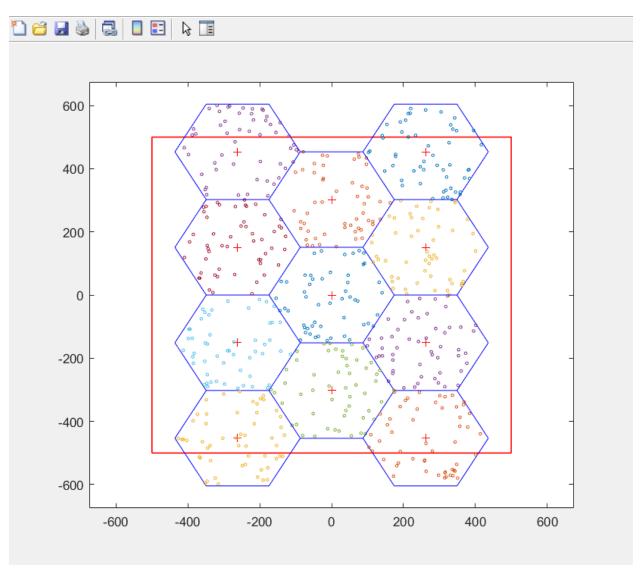


Figure 3.4: Διασκορπισμός συνδρομητών μέσα στις κυψέλες

3.4. Αστικό περιβάλλον διάδοσης

Για την προσομοίωση του αστικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιούμε δημογραφικά δεδομένα του πιο πυκνοκατοικημένου δήμου της χώρας, του δήμου Αθηνών. Συγκεκριμένα, έχουμε κατά προσέγγιση 17051 χρήστες ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, επομένως και 17051 UEs. Χρησιμοποιούμε το μοντέλο διάδοσης Walfish-Ikegami για urban microcells, αρχικά για τον υπολογισμό της ακτίνας της κάθε κυψέλης του δικτύου:

$$PL = -55.9 + 38 \cdot \log_{10} d + \left(24.5 + 1.5 \cdot \frac{f_c}{925}\right) \cdot \log_{10} f_c + S \tag{3.10}$$

PL	Απώλειες όδευσης, αφορούν τις απώλειες του μέσου διάδοσης κατά τη μετάδοση δεδομένων.
f _c	Συχνότητα φέρουσας (carrier frequency)
d	Απόσταση κεραίας εκπομπής με κεραία λήψης
$S = \begin{cases} 4, & d \le 20m \\ 8.5, & d > 20m \end{cases}$	Shadowing: μεταβλητή που καθορίζει πόσα ''φυσικά εμπόδια'', όπως ψηλά κτίρια, βουνά, δέντρα, υπάρχουν στη γεωγραφία του δικτύου, τα οποία δυσχεραίνουν την επικοινωνία. Για το αστικό περιβάλλον της Αθήνας, θεωρούμε ότι για απόσταση d≤20m υπάρχει LOS (Line of Sight), δηλαδή απευθείας δρόμος ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη, οπότε θέτουμε S=4. Αντίθετα, για απόσταση d>20m δεν υπάρχει LOS, οπότε S=8.5

Πίνακας 3.3: Παράμετροι υπολογισμού απώλειας όδευσης αστικού περιβάλλοντος

Θέτουμε στον τύπο του Path Loss, PL=PL_{max} δηλαδή ότι έχουμε μέγιστες απώλειες όδευσης, και λύνοντας τον τύπο ως προς d, λαμβάνουμε τη μέγιστη απόσταση που αναμεταδίδει ο σταθμός βάσης, δηλαδή την ακτίνα της κυψέλης. Για τα δεδομένα της προσομοίωσης, για το αστικό περιβάλλον διάδοσης η ακτίνα της κυψέλης ισούται με 162.4508 m.

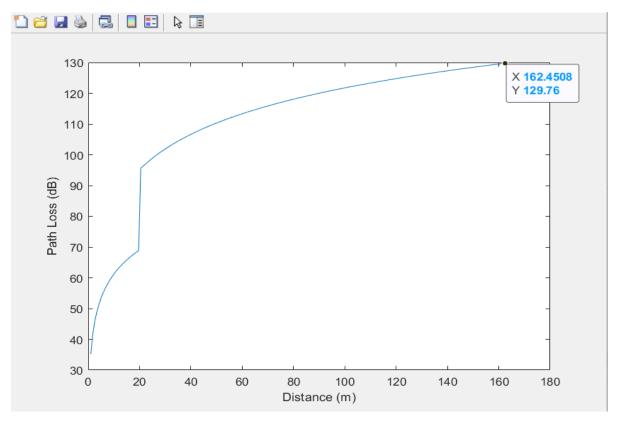


Figure 3.5: Απώλεια όδευσης συναρτήσει της απόστασης για το αστικό περιβάλλον

Διαιρώντας την συνολική επιφάνεια του δικτύου (1 km²) με την επιφάνεια μιας κυψέλης προκύπτει ότι για τη γεωγραφική κάλυψη του δικτύου θα χρειαστούν 17 σταθμοί βάσης (eNBs), ώστε να εξυπηρετηθεί η κίνηση του δικτύου.

Κάθε σταθμός θα εξυπηρετεί 1003 συνδρομητές, κάθε χρονική στιγμή. Με κόκκινο σημάδι δηλώνεται η κεραία εκπομπής κάθε κυψέλης, που είναι παντοκατευθυντική (εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις) και βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης. Να τονιστεί ότι προϋπόθεση για να θεωρείται μία κυψέλη εντός δικτύου, είναι το κέντρο της να περικλείεται μέσα στο οριοθετημένο τετραγωνικό χιλιόμετρο.

Η θέση των συνδρομητών μέσα σε κάθε εξάγωνο, είναι τυχαία, ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσέγγιση ενός πραγματικού δικτύου.

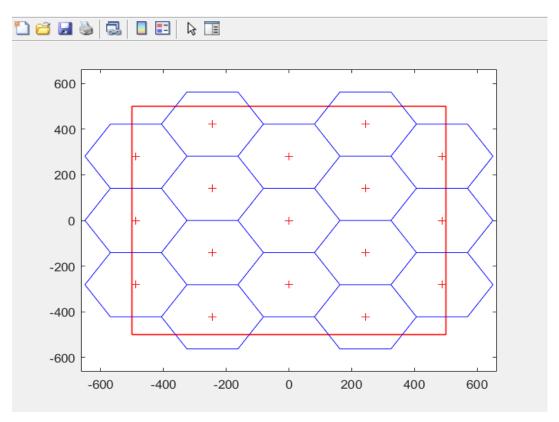


Figure 3.6: Τοποθέτηση σταθμών βάσης για αστικό περιβάλλον, εντός km²

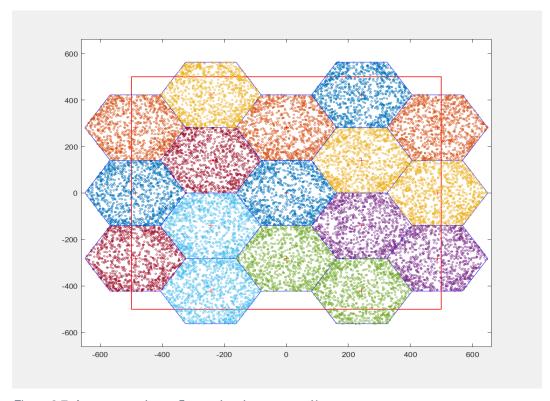


Figure 3.7: Διασκορπισμός συνδρομητών μέσα στις κυψέλες

3.5. Αστικό περιβάλλον διάδοσης με τριχοτόμηση

Το πολύ πυκνοκατοικημένο περιβάλλον των μεγάλων πόλεων δημιουργεί πρόβλημα στην εξυπηρέτηση του τεράστιου συνδρομητικού φορτίου από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Αποτέλεσμα είναι είτε η εξυπηρέτηση λιγότερων συνδρομητών, είτε το χαμηλό QoS (Quality of Service). Για την επίλυση του προβλήματος των πολλών συνδρομητών, χρησιμοποιούμε την τεχνική του sectoring (τριχοτόμηση). Κάθε κυψέλη διαιρείται σε τρεις περιοχές ή sectors με τη χρήση τριών κατευθυντικών κεραιών με γωνία κάλυψης 120°, αντί της μίας παντοκατευθυντικής κεραίας εκπομπής ανά κυψέλη. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε, χωρίς τεράστια έξοδα, τον τριπλασιασμό των πόρων του δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται το συνολικό throughput του δικτύου, και να βελτιώνεται η εμπειρία των χρηστών με κακές συνθήκες επικοινωνίας.

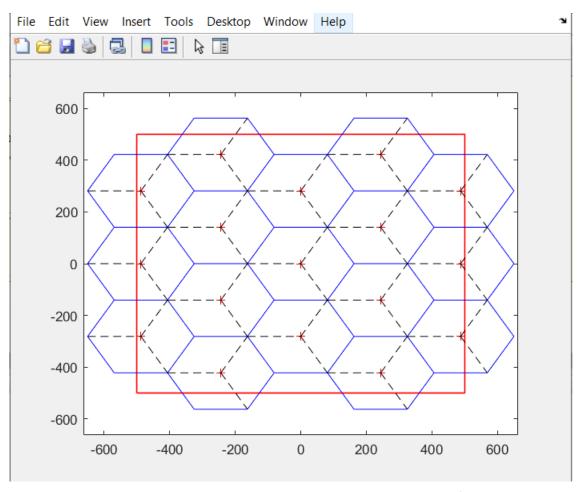


Figure 3.8: Τοποθέτηση σταθμών βάσης και τομέων για αστικό περιβάλλον, εντός km²

Να επισημανθεί ότι κάθε sector δεν περιέχει ακριβώς 1003/3 ≈ 334 UEs. Ενδέχεται να υπάρχει απόκλιση από sector σε sector μέχρι και 20 UEs, αποτέλεσμα που προκύπτει από την τυχαία τοποθέτηση των χρηστών μέσα στην κυψέλη. Ωστόσο, οι μικρές διαφορές συνδρομητών ανάμεσα στους sectors δεν επιφέρουν αλλαγή στα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης, αφενός γιατί πρόκειται για μικρό αριθμό, αφετέρου διότι ο συνολικός αριθμός χρηστών της κυψέλης παραμένει σταθερός.

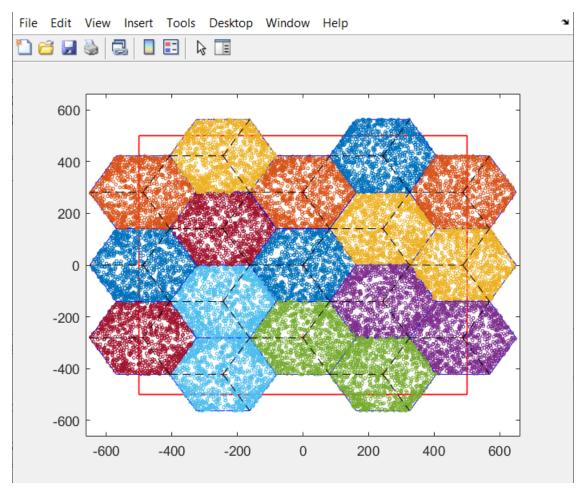


Figure 3.9: Διασκορπισμός συνδρομητών μέσα στις κυψέλες

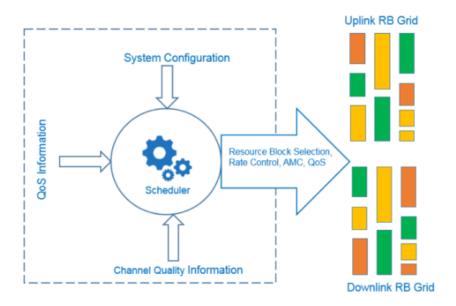
3.6. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε τα περιβάλλοντα διάδοσης που θα χρησιμοποιήσουμε κατά την προσομοίωση. Για το ημιαστικό περιβάλλον της Νάξου, έχουμε 11 κυψέλες που εξυπηρετούν από 53 χρήστες η καθεμία, ενώ για το αστικό περιβάλλον της Αθήνας έχουμε 17 κυψέλες που εξυπηρετούν από 1003 χρήστες η καθεμία. Αν χρησιμοποιήσουμε την τεχνολογία της τριχοτόμησης, έχουμε επιπλέον υποδιαίρεση των χρηστών μέσα σε κάθε κυψέλη και συγκεκριμένα 334 χρήστες ανά τομέα, με τρεις τομείς ανά κυψέλη. Από τα παραπάνω δεδομένα, αναμένουμε η μέση ταχύτητα (average throughput) κάθε χρήστη να είναι μεγαλύτερη στο ημιαστικό περιβάλλον, και πιο μικρή στο αστικό, λόγω του μεγάλου συνδρομητικού φορτίου. Επομένως στο αστικό περιβάλλον αναμένουμε χειρότερο QoS (Quality of Service).

4. Ανάλυση αλγορίθμων κατανομής πόρων δικτύου

4.1. Εισαγωγή

Χρονοπρογραμματισμός ή scheduling είναι η διαδικασία με την οποία ένας σταθμός βάσης του δικτύου, που στο LTE ονομάζεται eNB (element Node B), αποφασίζει μέσω συγκεκριμένου αλγορίθμου ποιοι χρήστες του δικτύου (UEs = user equipment), θα διαμοιραστούν τους ραδιοπόρους του δικτύου (RBs = resource blocks).



Εικόνα 4.1: LTE scheduler, [22]

O scheduler του LTE χρησιμοποιεί τον κατάλληλο αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού ανάλογα με:

- Το περιβάλλον διάδοσης του δικτύου (αστικό, ημιαστικό ή αγροτικό).
- Τις ιδιαιτερότητες του γεωγραφικού τοπίου και του καιρού (λόφοι, βουνά, πυκνή βλάστηση, έντονες βροχοπτώσεις).
- Το συνολικό capacity του δικτύου.
- Το QoS (Quality of Service) που απαιτείται για τους χρήστες.
- Τις ανάγκες των χρηστών σε ταχύτητα.

4.2. Αλγόριθμος Round Robin

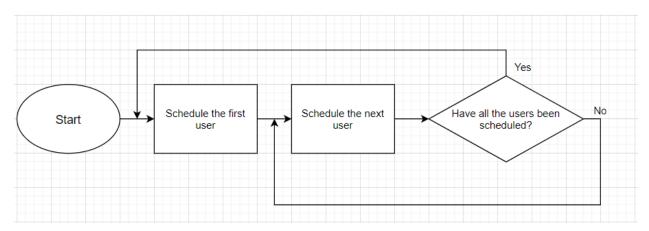
4.2.1. Διαμοιρασμός πόρων με round robin

Ο αλγόριθμος Round Robin επιλέγει και προγραμματίζει όλους τους χρήστες με ένα κυκλικό τρόπο, ισομοιράζοντας τους πόρους του δικτύου μεταξύ των χρηστών. Το πλεονέκτημα του είναι ότι μεγιστοποιεί το fairness μέσα στο cell, δίνοντας τον ίδιο αριθμό πόρων σε κάθε UE. Το μειονέκτημα του είναι ότι δίνει πόρους σε χρήστες με κακό CQI (Channel Quality Index), δηλαδή χρήστες, οι οποίοι έχουν κακές συνθήκες επικοινωνίας, και επομένως δεν μπορούν να τους αξιοποιήσουν πλήρως μεταφράζοντας τους σε καλό data rate. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό throughput του cell, λόγω του μη-βέλτιστου διαμοιρασμού των πόρων.

4.2.2. Τρόπος λειτουργίας του round robin

O round robin λειτουργεί ως εξής:

- Αποθηκεύει όλους τους χρήστες της κυψέλης σε ένα πίνακα.
- Προγραμματίζει όλους τους χρήστες με τη σειρά.
- Όταν προγραμματίσει τον τελευταίο χρήστη, ξεκινά τη διαδικασία από την αρχή, μέχρι να τελειώσουν οι πόροι στο δίκτυο.



Σχήμα 4.1: Block διάγραμμα του αλγορίθμου Round Robin

4.3. Αλγόριθμος Best CQI

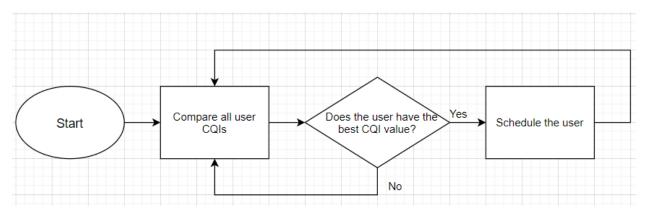
4.3.1. Διαμοιρασμός πόρων με Best CQI

Ο αλγόριθμος Best CQI επιλέγει τους χρήστες που θα διαμοιράσει τους πόρους του δικτύου με βάση το CQI που έχουν εκείνη τη χρονική στιγμή. Χρήστες με υψηλό CQI είναι πιθανότεροι υποψήφιοι να εξυπηρετηθούν από το δίκτυο. Αυτό έχει σαν θετικό αποτέλεσμα να αυξάνεται κατά πολύ το throughput του cell. Το πρόβλημα του Best CQI, είναι πως χρήστες με κακές συνθήκες επικοινωνίας είναι πολύ πιθανό να μην λάβουν ποτέ υπηρεσίες (starvation), δυσχεραίνοντας την επικοινωνίας τους.

4.3.2. Τρόπος λειτουργίας του Best CQI

Ο Best CQΙ λειτουργεί ως εξής:

- Αποθηκεύει όλους τους χρήστες της κυψέλης σε ένα πίνακα.
- Συγκρίνει τα CQI των χρηστών.
- Προγραμματίζει τον χρήστη με το υψηλότερο CQI.
- Ανανεώνει τον πίνακα των CQI των χρηστών.



Σχήμα 4.2: Block διάγραμμα του αλγορίθμου Best CQI

4.4. Αλγόριθμος Proportional Fair

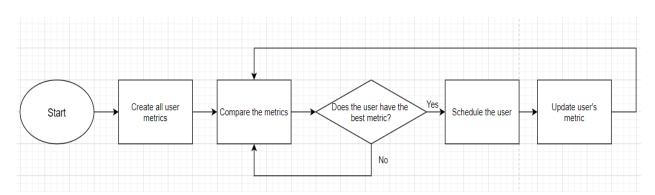
4.4.1. Διαμοιρασμός πόρων με Proportional Fair

Ο αλγόριθμος Proportional Fair προγραμματίζει τους χρήστες της κυψέλης με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτύχει μια σχετική ισορροπία, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τις κακές συνθήκες επικοινωνίας ορισμένων χρηστών, όσο και την ανάγκη να υπάρχει υψηλό throughput στην κυψέλη. Είναι ο αλγόριθμος που συνήθως χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας.

4.4.2. Τρόπος λειτουργίας του Proportional Fair

Ο Proportional Fair λειτουργεί ως εξής:

- Αποθηκεύει όλους τους χρήστες της κυψέλης σε ένα πίνακα.
- Δημιουργεί ένα metric για κάθε χρήστη, το οποίο είναι ένα κλάσμα με αριθμητή το throughput του χρήστη εάν προγραμματιστεί αυτή τη χρονική στιγμή, και παρονομαστή το μέσο όρο throughput του χρήστη.
- Προγραμματίζει το χρήστη με το υψηλότερο metric.
- Ανανεώνει τα metric των χρηστών.



Σχήμα 4.3: Block διάγραμμα του αλγορίθμου Proportional Fair

4.5. Βελτιωμένος αλγόριθμος Proportional Fair

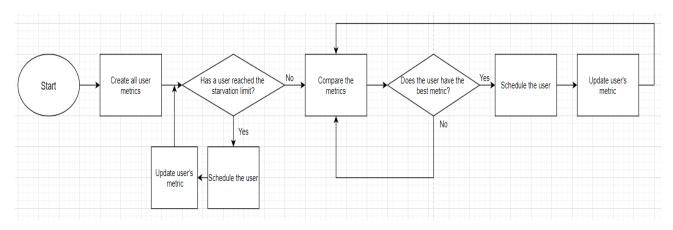
4.5.1. Διαμοιρασμός πόρων με βελτιωμένο αλγόριθμο Proportional Fair

Η πρώτη έκδοση του PF καταφέρνει μια σχετική ισορροπία μεταξύ εξυπηρέτησης όλων των χρηστών και μεγιστοποίησης του throughput της κυψέλης. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις χρηστών με κακό CQI για μεγάλο χρονικό διάστημα, ο PF ενδέχεται να μην τους παρέχει υπηρεσία καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, οδηγώντας τους σε starvation. Στα πλαίσια της διπλωματικής, για την καθολική εξυπηρέτηση των χρηστών του δικτύου, αναπτύχθηκε μια βελτιωμένη έκδοση του PF, η οποία έχει σαν πρώτο σκοπό να εξυπηρετήσει όλους τους χρήστες, έστω με τους ελάχιστους πόρους και έπειτα την, κατά το δυνατό, μεγιστοποίηση του throughput.

4.5.2. Τρόπος λειτουργίας του βελτιωμένου Proportional Fair

Ο βελτιωμένος Proportional Fair λειτουργεί ως εξής:

- Αποθηκεύει όλους τους χρήστες της κυψέλης σε ένα πίνακα.
- Δημιουργεί ένα metric για κάθε χρήστη, το οποίο είναι ένα κλάσμα με αριθμητή το throughput του χρήστη εάν προγραμματιστεί αυτή τη χρονική στιγμή, και παρονομαστή το μέσο όρο throughput του χρήστη.
- Ελέγχει αν υπάρχουν χρήστες που δεν έχουν εξυπηρετηθεί για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο εξαρτάται από τη συμφόρηση του δικτύου και τον αριθμό των συνδρομητών. Εξυπηρετεί άμεσα τους χρήστες αυτούς.
- Με όσους πόρους του δικτύου απομένουν στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, εξυπηρετεί τους χρήστες με τα υψηλότερα metric.
- Ανανεώνει τα metric των χρηστών.



Σχήμα 4.4: Block διάγραμμα του βελτιωμένου Proportional Fair

4.6. Σύγκριση των αλγορίθμων

Αλγόριθμοι	Round Robin	Best CQI	Proportional Fair	Βελτιωμένος Proportional Fair
Τρόπος	Οι πόροι του	Οι πόροι του	Οι πόροι του	Οι πόροι του δικτύου
λειτουργίας	δικτύου	δικτύου	δικτύου	διανέμονται με βάση τόσο στην
	διανέμονται	διανέμονται με	διανέμονται με	εξυπηρέτηση των χρηστών,
	στους χρήστες	βάση τις	βάση τόσο στην	όσο και στη μεγιστοποίηση του
	ανεξάρτητα	συνθήκες	εξυπηρέτηση των	συνολικού throughput. Έμφαση
	των συνθηκών	επικοινωνίας	χρηστών, όσο και	δίνεται στην ελάχιστη
	επικοινωνίας	κάθε χρήστη.	στη	εξυπηρέτηση όλων των
		Δίνεται	μεγιστοποίηση	χρηστών
		προτεραιότητα	του συνολικού	
		στους χρήστες	throughput	
		με το καλύτερο		
		κανάλι		
Θετικά (+)	Ισότιμος	Υψηλό	Ισορροπία μεταξύ	Περισσότερη δικαιοσύνη από
	διαμοιρασμός	throughput	δικαιοσύνης και	Proportional Fair
	πόρων		throughput	
Αρνητικά (-)	Χαμηλό	Χρήστες με κακό	Μεγάλη	Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα
	throughput	CQI δεν	πολυπλοκότητα,	από Proportional Fair
		εξυπηρετούνται	μικρότερο	
			throughput από	
			Best CQI	

Πίνακας 4.1: Σύγκριση των αλγορίθμων

4.7. Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι κάθε αλγόριθμος επιτυγχάνει ένα συγκεκριμένο στόχο. Ο round robin ισομοιράζει τους πόρους κυκλικά σε όλους τους χρήστες του δικτύου. Ο best CQI μεγιστοποιεί το throughput του δικτύου. Ο κλασικός proportional fair σιγουρεύει ότι θα εξυπηρετηθούν οι χρήστες με κακό κανάλι, με έστω ελάχιστους πόρους, προσφέροντας έτσι δικαιοσύνη. Ο βελτιωμένος proportional fair, δίνει ακόμα περισσότερους πόρους στους αδύναμους χρήστες, οδηγώντας σε χειρότερο όμως throughput από την κλασική εκδοχή του αλγορίθμου. Κατά βάση, μας ενδιαφέρουν οι επιδόσεις των proportional fair αλγορίθμων, διότι είναι οι πρακτικά εφαρμόσιμοι σε αληθινά δίκτυα. Οι αλγόριθμοι round robin και best CQI χρησιμοποιούνται περισσότερο ως μέτρα σύγκρισης για το throughput και τη δικαιοσύνη. Περιμένουμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ο proportional fair να έχει καλύτερο throughput, αλλά χειρότερη δικαιοσύνη από τον βελτιωμένο proportional fair.

5. Ανάλυση απόδοσης του δικτύου

5.1. Εισαγωγή

Η προσομοίωση έγινε σε γλώσσα Matlab. Θεωρούμε κεραιοσύστημα MIMO (Multiple Input Multiple Output) 2x4, δηλαδή με 4 κεραίες εκπομπής στο σταθμό βάσης και 2 κεραίες λήψης στα κινητά των συνδρομητών. Ο χρόνος της προσομοίωσης είναι διακριτοποιημένος και χωρίζεται σε TTI (Transmission Time Interval). Ακολουθώντας το πρότυπο του LTE, θεωρούμε ότι TTI = 1ms. Επιπλέον, θέτουμε συνολικό χρόνο προσομοίωσης το 1s ή 1000 TTIs, θεωρώντας ότι οι χρήστες είναι ακίνητοι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, για να αποφύγουμε την ύπαρξη φαινομένου Doppler.

5.2. Μεταβλητές προσομοίωσης

Παράμετρος	Τιμή
Χρόνος προσομοίωσης	1000 TTI
Συχνότητα φέρουσας	2.14 GHz
Αριθμός κεραιών εκπομπής	4
Αριθμός κεραιών λήψης	2
Ισχύς εκπομπής	1 Watt
Ύψος κεραίας εκπομπής	12.5m
Ύψος κεραίας λήψης	1.5m
Κέρδος κεραίας εκπομπής	10 dBi
Κέρδος κεραίας λήψης	0 dBi
Τύπος δέκτη	MMSE
Εύρος ζώνης	20 MHz
Απώλειες ομοαξονικού καλωδίου	$\frac{0.1}{h_b} \times 30 = 0.24 \text{ dBi}$
Ισχύς κατωφλίου	-90 dBm
Thermal noise density	-174 dBm/Hz

Πίνακας 5.1: Καθολικές παράμετροι προσομοίωσης

Τρέχουμε την προσομοίωση υπό τρεις διαφορετικές συνθήκες. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε ημιαστικό περιβάλλον, στη δεύτερη αστικό και στην τρίτη αστικό περιβάλλον με τριχοτόμηση των υπαρχόντων κυψελών, με τη χρήση τριών κατευθυντικών κεραιών με γωνία κάλυψης 120°.

Παράμετρος	Τιμή
Περιβάλλον διάδοσης	Ημιαστικό
Sectoring	Όχι
Σετ κεραιών ανά κελί	1
Τύπος κεραίας εκπομπής	Παντοκατευθυντική
Αριθμός eNodeBs	11
Αριθμός χρηστών ανά κελί	53
Ακτίνα διάδοσης	174m
Shadowing	4 dB

Πίνακας 5.2: Παράμετροι προσομοίωσης για ημιαστικό περιβάλλον

Παράμετρος	Τιμή
Περιβάλλον διάδοσης	Αστικό
Sectoring	Όχι
Σετ κεραιών ανά κελί	1
Τύπος κεραίας εκπομπής	Παντοκατευθυντική
Αριθμός eNodeBs	17
Αριθμός χρηστών ανά κελί	1003
Ακτίνα διάδοσης	162m
Shadowing	8.5 dB

Πίνακας 5.3: Παράμετροι προσομοίωσης για αστικό περιβάλλον

Παράμετρος	Τιμή
Περιβάλλον διάδοσης	Αστικό
Sectoring	Ναι
Σετ κεραιών ανά κελί	3
Τύπος κεραίας εκπομπής	Κατευθυντική
Αριθμός eNodeBs	17
Αριθμός χρηστών ανά κελί	1003
Ακτίνα διάδοσης	162m
Shadowing	8.5 dB

Πίνακας 5.4: Παράμετροι προσομοίωσης για αστικό περιβάλλον με τριχοτόμηση

Όταν τρέχουμε το πρόγραμμα στη matlab, ο προσομοιωτής μας ζητάει να διαλέξουμε το περιβάλλον προσομοίωσης της επιλογής μας (ημιαστικό ή αστικό) και σε περίπτωση που διαλέξουμε αστικό, με δεύτερη ερώτηση μας ζητάει να διαλέξουμε αν θέλουμε να γίνει τριχοτόμηση.

5.2. Αποτελέσματα

Τρέχουμε μέσα στα 1000 TTI ταυτόχρονα τους τέσσερις αλγορίθμους (round robin, best CQI, proportional fair, βελτιωμένος proportional fair (proportional fair v2)) και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

Τα διαγράμματα που αναλύουμε για κάθε ένα από τα τρία περιβάλλοντα διάδοσης, είναι:

- τη αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (cdf) για κάθε ένα από τους τέσσερις αλγορίθμους,
- το μέσο throughput κάθε αλγόριθμου, δηλαδή τη μέση ταχύτητα κάθε χρήστη μέσα στην κυψέλη για τον αλγόριθμο που εξετάζουμε,
- το cell throughput κάθε αλγορίθμου, δηλαδή τη συνολική ταχύτητα της κυψέλης που προσφέρει ο αλγόριθμος.
- το fairness ή δικαιοσύνη, που είναι ένας δείκτης ο οποίος χαρακτηρίζει κάθε αλγόριθμο ανάλογα με το πως διαμοιράζει τους πόρους στους συνδρομητές του δικτύου.

Χρησιμοποιούμε τον τύπο του Jain, ο οποίος ορίζεται ως εξής:
$$J = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \cdot (\sum_{i=1}^n x_i^2)}$$
 (5.1)

όπου η είναι ο αριθμός των χρηστών μέσα στην κυψέλη και x το μέσο throughput του χρήστη.

5.2.1. Αποτελέσματα για ημιαστικό περιβάλλον

Στην πρώτη γραφική, έχουμε τις CDF των τεσσάρων αλγορίθμων. Παρατηρούμε ότι η CDF του αλγορίθμου Best CQI που ξεχωρίζει με κόκκινο χρώμα, δείχνει ότι το 60% των συνδρομητών έχει σχεδόν μηδενικό throughput, γεγονός που οφείλεται στο ότι δεν παίρνουν πόρους του δικτύου, καθώς ο αλγόριθμος best CQI δεν δίνει πόρους σε UEs με κακές επικοινωνιακές συνθήκες.

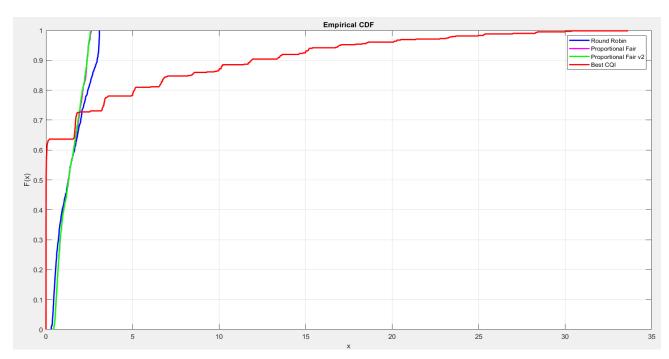


Figure 5.1: CDF όλων των αλγορίθμων για ημιαστικό περιβάλλον

Στη δεύτερη γραφική, έχουμε τις CDF των αλγορίθμων Round Robin (μπλε γραμμή), Proportional Fair (ροζ γραμμή) και βελτιωμένος Proportional Fair (πράσινη γραμμή). Παρατηρούμε ότι το 50% των χρηστών έχει μέση ταχύτητα μικρότερη από 1.5 Mbps.

Παρατηρούμε ότι στους χρήστες με κακό CQI, ο αλγόριθμος Round Robin δίνει χαμηλό throughput, λόγω του ισομοιρασμού των πόρων σε όλους τους χρήστες. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι proportional fair λόγω δικαιοσύνης, δίνουν καλύτερο throughput στους χρήστες με κακό κανάλι. Οι χρήστες με καλές επικοινωνιακές συνθήκες παίρνουν λιγότερους πόρους του δικτύου υπό τον proportional fair συγκριτικά με τον round robin.

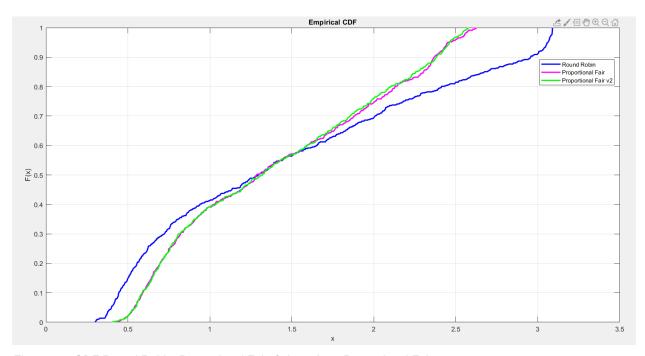


Figure 5.2: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair

Πιο συγκεκριμένα, όπως παρατηρούμε, για χρήστες με κακά CQI, οι δύο εκδοχές του Proportional Fair δίνουν καλύτερα throughputs από τον round robin. Οι διαφορές, ωστόσο, μεταξύ κλασικού proportional fair και βελτιωμένου σε αυτή την περίπτωση είναι δυσδιάκριτες

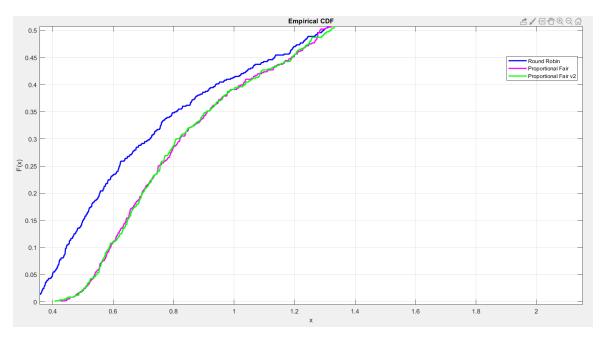


Figure 5.3: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair, μόνο για χαμηλά throughput

Για τους χρήστες με καλύτερες επικοινωνιακές συνθήκες, βλέπουμε ότι ο round robin δίνει καλύτερα throughputs, γεγονός που οφείλεται στον περιορισμένο αριθμό χρηστών του ημιαστικού περιβάλλοντος. Μεταξύ των δύο εκδοχών του proportional fair, παρατηρούμε ότι ο κλασικός proportional fair δίνει ελάχιστα καλύτερα throughputs, αποτέλεσμα αναμενόμενο, καθώς ο βελτιωμένος proportional fair θυσιάζει throughput για δικαιοσύνη.

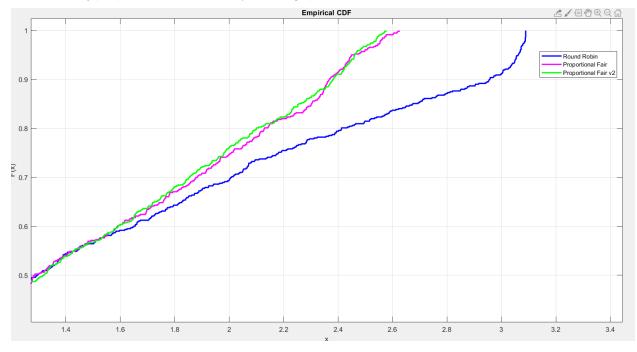


Figure 5.4: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair, μόνο για ψηλά throughput

Στην τρίτη γραφική βλέπουμε το μέσο throughput του δικτύου με την εφαρμογή καθενός από τους τέσσερις αλγορίθμους. Συγκεκριμένα έχουμε:

- Average throughput (round robin) = 1.467 Mbps
- Average throughput (proportional fair) = 1.398 Mbps
- Average throughput (βελτιωμένος proportional fair) = 1.391 Mbps
- Average throughput (Best CQI) = 3.171 Mbps

Τα αποτελέσματα μας είναι αναμενόμενα με βάση το περιβάλλον διάδοσης και το στόχο που εκπληρώνει κάθε αλγόριθμος. Συγκεκριμένα, ο round robin αναθέτει πόρους σε όλους τους χρήστες κυκλικά γι'αυτό έχει το χαμηλότερο throughput, ο best CQI δίνει τους πόρους στους χρήστες με καλές συνθήκες επικοινωνίας, γι'αυτό έχει το υψηλότερο throughput αλλά μειώνει δραματικά το QoS όλων των χρηστών. Ο proportional fair στοχεύει στην εξυπηρέτηση των χρηστών με κακό σήμα, δημιουργώντας μια ισορροπία ανάμεσα στο throughput και στην ανάγκη εξυπηρέτησης όλων των χρηστών. Τέλος ο βελτιωμένος proportional fair είναι μια παραλλαγή του proportional fair, που δίνει περισσότερη έμφαση στην εξυπηρέτηση των χρηστών με κακό κανάλι, γι'αυτό και έχει χειρότερο throughput από το proportional fair, αλλά καλύτερη δικαιοσύνη.

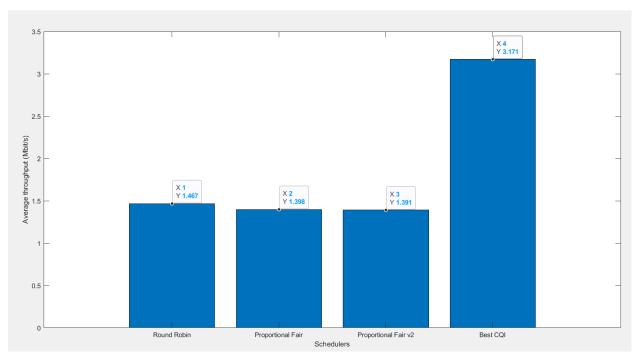


Figure 5.5: Μπαρόγραμμα με το μέσο throughput κάθε αλγορίθμου, για το ημιαστικό περιβάλλον

Στην τέταρτη γραφική, έχουμε το συνολικό throughput της κυψέλης με την εφαρμογή καθενός από τους τέσσερις αλγορίθμους. Συγκεκριμένα:

- Cell throughput (round robin) = 77.73 Mbps
- Cell throughput (proportional fair) = 74.09 Mbps
- Cell throughput (βελτιωμένος proportional fair) = 73.73 Mbps
- Cell throughput (best CQI) = 168 Mbps

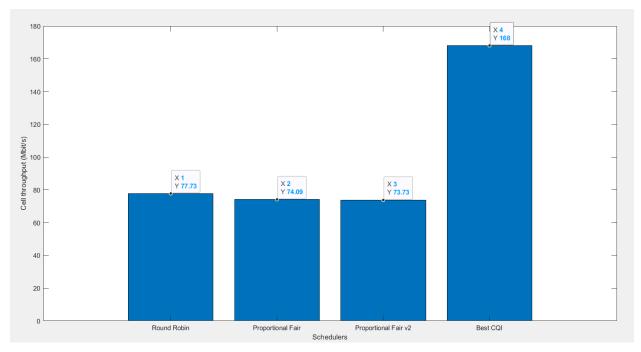


Figure 5.6: Μπαρόγραμμα με το συνολικό throughput των κυψελών ανά αλγόριθμο για ημιαστικό περιβάλλον

Τέλος, στην πέμπτη γραφική, έχουμε τον δείκτη δικαιοσύνης κάθε αλγορίθμου, που παίρνει τιμές από το 1/n ως το 1, όπου n είναι ο αριθμός των συνδρομητών του δικτύου. Συγκεκριμένα:

- Fairness (round robin) = 0.7273
- Fairness (proportional fair) = 0.8127
- Fairness (βελτιωμένος proportional fair) = 0.8147
- Fairness (best CQI) = 0.2107

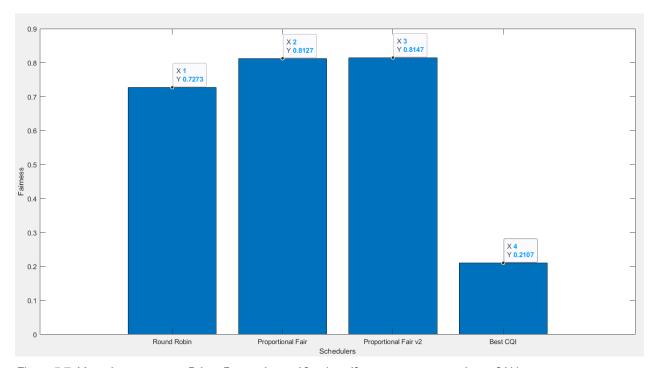


Figure 5.7: Μπαρόγραμμα με το δείκτη δικαιοσύνης κάθε αλγορίθμου, για το ημιαστικό περιβάλλον

5.2.2. Αποτελέσματα για αστικό περιβάλλον

Στην συγκεντρωτική CDF και των τεσσάρων αλγορίθμων σε ένα γράφημα, παρατηρούμε ότι με τον αλγόριθμο best CQI, το 90% των συνδρομητών έχει σχεδόν μηδενικό throughput, καθώς δεν παίρνουν ποτέ πόρους του δικτύου.

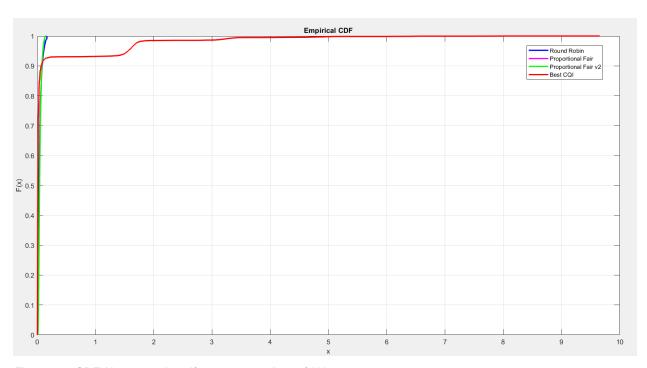


Figure 5.8: CDF όλων των αλγορίθμων για αστικό περιβάλλον

Απομονώνοντας τις CDF των round robin, proportional fair και βελτιωμένου proportional fair, παρατηρούμε το ίδιο μοτίβο με το ημιαστικό περιβάλλον. Η round robin δίνει χειρότερο throughput για τους χρήστες με κακό κανάλι, οι οποίοι στο αστικό περιβάλλον είναι ακόμα περισσότεροι, φτάνοντας το 80%, ενώ δίνει καλύτερο throughput από τους proportional fair για χρήστες με καλό κανάλι.

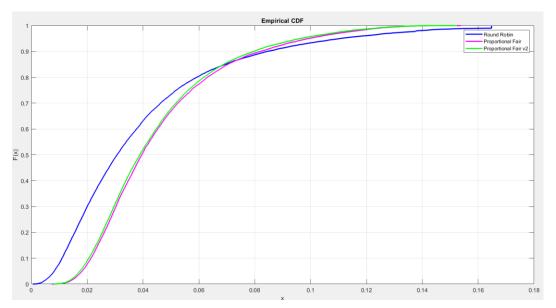


Figure 5.9: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair

Εστιάζοντας στους χρήστες με κακό κανάλι, παρατηρούμε ότι ο κλασικός αλγόριθμος proportional fair δίνει ελάχιστα καλύτερο throughput από τον βελτιωμένο.

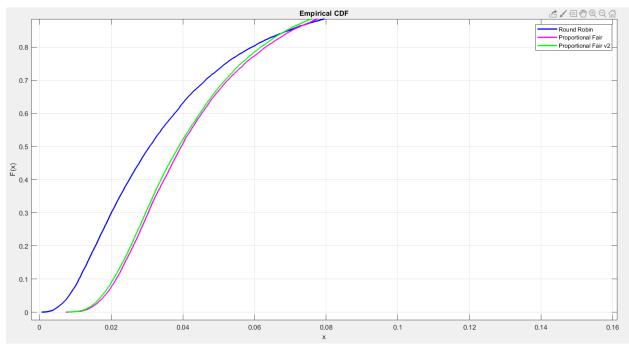


Figure 5.10: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair, μόνο για χαμηλά throughput

Στους χρήστες με καλές συνθήκες επικοινωνίας, ο proportional fair δίνει ελάχιστο μεγαλύτερο throughput από τον βελτιωμένο proportional fair, όπως είναι το αναμενόμενο.

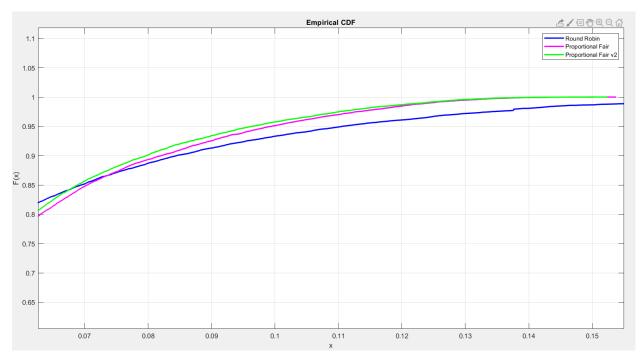


Figure 5.11: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair, μόνο για ψηλά throughput

Στην τρίτη γραφική βλέπουμε το μέσο throughput του δικτύου με την εφαρμογή καθενός από τους τέσσερις αλγορίθμους. Συγκεκριμένα έχουμε:

- Average throughput (round robin) = 0.04039 Mbps
- Average throughput (proportional fair) = 0.04613 Mbps
- Average throughput (βελτιωμένος proportional fair) = 0.04511 Mbps
- Average throughput (Best CQI) = 0.1598 Mbps

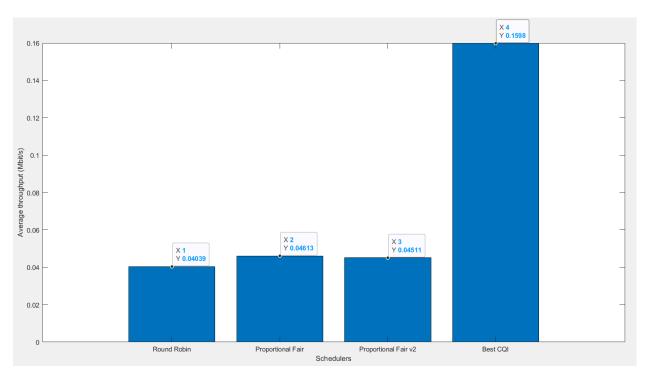


Figure 5.12: Μπαρόγραμμα με το μέσο throughput κάθε αλγορίθμου, για το αστικό περιβάλλον

Στην τέταρτη γραφική, έχουμε το συνολικό throughput της κυψέλης με την εφαρμογή καθενός από τους τέσσερις αλγορίθμους. Συγκεκριμένα:

- Cell throughput (round robin) = 40.52 Mbps
- Cell throughput (proportional fair) = 46.27 Mbps
- Cell throughput (βελτιωμένος proportional fair) = 45.24 Mbps
- Cell throughput (best CQI) = 160.3 Mbps

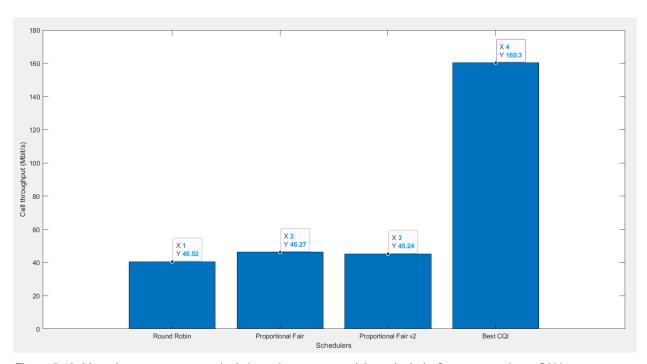


Figure 5.13: Μπαρόγραμμα με το συνολικό throughput των κυψελών ανά αλγόριθμο για αστικό περιβάλλον

Τέλος, στην πέμπτη γραφική, έχουμε τον δείκτη δικαιοσύνης κάθε αλγορίθμου, που παίρνει τιμές από το 1/n ως το 1, όπου n είναι ο αριθμός των συνδρομητών του δικτύου. Συγκεκριμένα:

- Fairness (round robin) = 0.6117
- Fairness (proportional fair) = 0.7766
- Fairness (βελτιωμένος proportional fair) = 0.7761
- Fairness (best CQI) = 0.06495

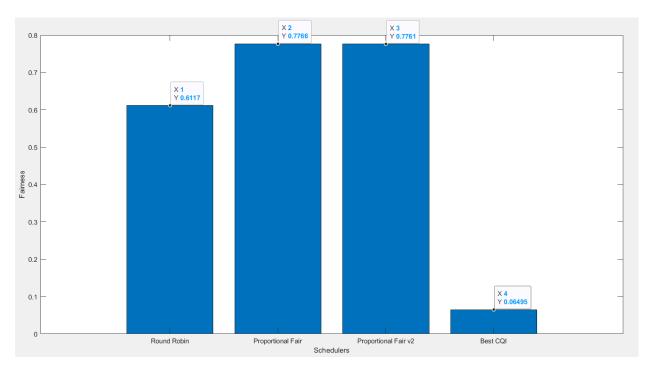


Figure 5.14: Μπαρόγραμμα με το δείκτη δικαιοσύνης κάθε αλγορίθμου, για το αστικό περιβάλλον

5.2.3. Αποτελέσματα για αστικό περιβάλλον με τριχοτόμηση

Στην πρώτη γραφική, έχουμε τις CDF των τεσσάρων αλγορίθμων. Παρατηρούμε ότι η CDF του αλγορίθμου Best CQI που ξεχωρίζει με κόκκινο χρώμα, δείχνει ότι το 85% των συνδρομητών έχει σχεδόν μηδενικό throughput, γεγονός που οφείλεται στο ότι δεν παίρνουν πόρους του δικτύου, καθώς ο αλγόριθμος best CQI δεν δίνει πόρους σε UEs με κακές επικοινωνιακές συνθήκες.

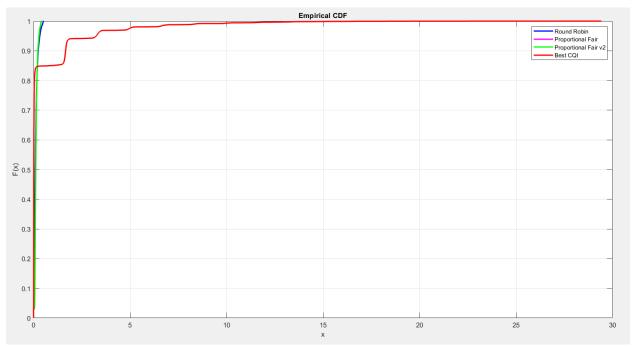


Figure 5.15: CDF όλων των αλγορίθμων για αστικό περιβάλλον με τριχοτόμηση

Απομονώνοντας τις CDF των round robin, proportional fair και βελτιωμένου proportional fair, παρατηρούμε το ίδιο μοτίβο με το ημιαστικό περιβάλλον. Η round robin δίνει χειρότερο throughput για τους χρήστες με κακό κανάλι, που φτάνουν το 80%, ενώ δίνει καλύτερο throughput από τους proportional fair για χρήστες με καλό κανάλι.

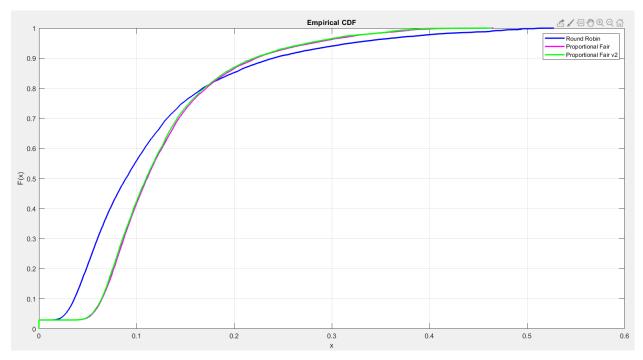


Figure 5.16: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair

Εστιάζοντας στους χρήστες με κακό κανάλι, παρατηρούμε ότι ο κλασικός αλγόριθμος proportional fair δίνει ελάχιστα καλύτερο throughput από τον βελτιωμένο.

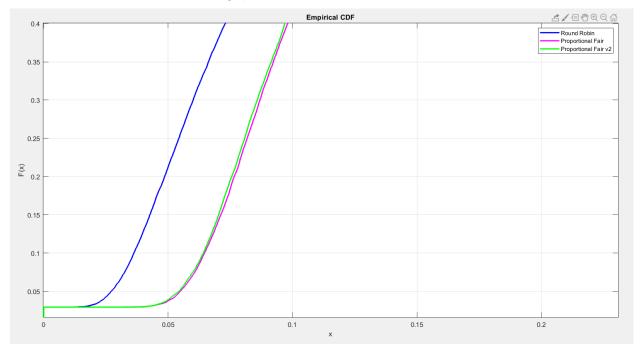


Figure 5.17: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair, μόνο για χαμηλά throughput

Στους χρήστες με καλές συνθήκες επικοινωνίας, ο proportional fair δίνει ελάχιστο μεγαλύτερο throughput από τον βελτιωμένο proportional fair, όπως είναι το αναμενόμενο.

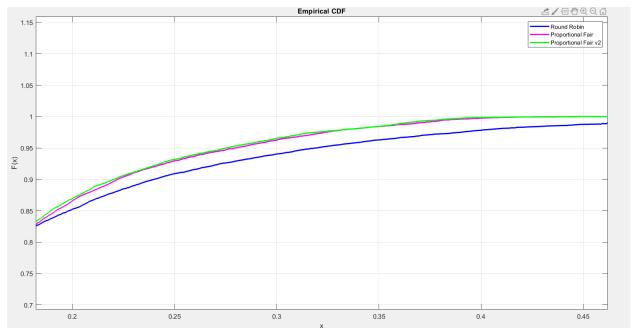


Figure 5.18: CDF Round Robin, Proportional Fair, βελτιωμένου Proportional Fair, μόνο για ψηλά throughput

Στην τρίτη γραφική βλέπουμε το μέσο throughput του δικτύου με την εφαρμογή καθενός από τους τέσσερις αλγορίθμους. Συγκεκριμένα έχουμε:

- Average throughput (round robin) = 0.1168 Mbps
- Average throughput (proportional fair) = 0.1281 Mbps
- Average throughput (βελτιωμένος proportional fair) = 0.1267 Mbps
- Average throughput (Best CQI) = 0.4943 Mbps

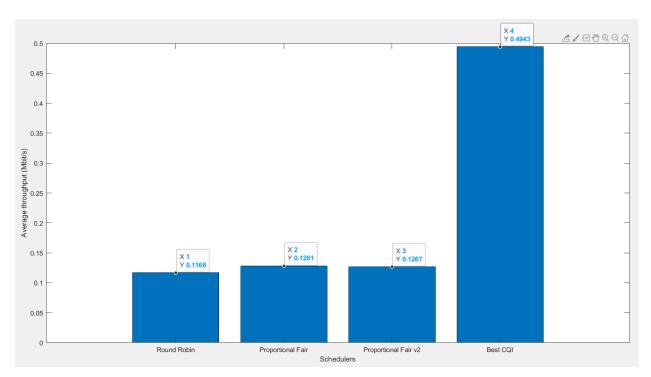


Figure 5.19: Μπαρόγραμμα με το μέσο throughput κάθε αλγορίθμου, για το αστικό περιβάλλον με τριχοτόμηση

Στην τέταρτη γραφική, έχουμε το συνολικό throughput της κυψέλης με την εφαρμογή καθενός από τους τέσσερις αλγορίθμους. Συγκεκριμένα:

- Cell throughput (round robin) = 117.1 Mbps
- Cell throughput (proportional fair) = 128.5 Mbps
- Cell throughput (βελτιωμένος proportional fair) = 127.1 Mbps
- Cell throughput (best CQI) = 495.8 Mbps

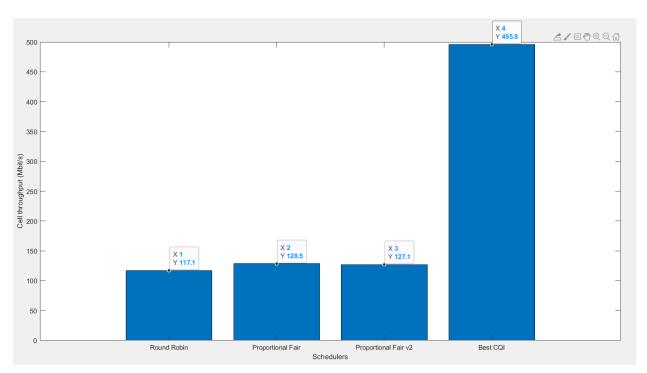


Figure 5.20: Μπαρόγραμμα με το συνολικό throughput των κυψελών ανά αλγόριθμο για αστικό περιβάλλον με τριχοτόμηση

Τέλος, στην πέμπτη γραφική, έχουμε τον δείκτη δικαιοσύνης κάθε αλγορίθμου, που παίρνει τιμές από το 1/n ως το 1, όπου n είναι ο αριθμός των συνδρομητών του δικτύου. Συγκεκριμένα:

- Fairness (round robin) = 0.6132
- Fairness (proportional fair) = 0.7667
- Fairness (βελτιωμένος proportional fair) = 0.767
- Fairness (best CQI) = 0.08698

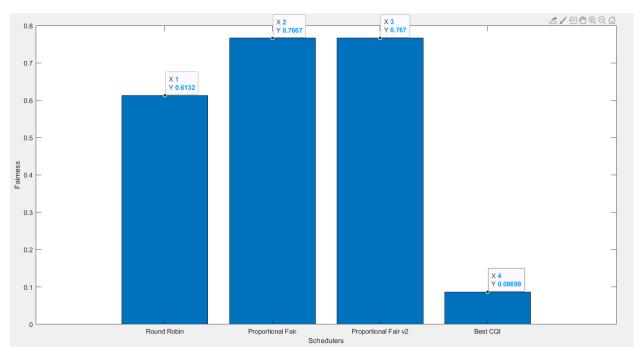


Figure 5.21: Μπαρόγραμμα με το δείκτη δικαιοσύνης κάθε αλγορίθμου, για το αστικό περιβάλλον με τριχοτόμηση

5.3. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τον προσομοιωτή είναι σε ένα μεγάλο βαθμό τα αναμενόμενα, με βάση τις θεωρητικές προβλέψεις που προκύπτουν από τα διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης και τους στόχους που επιτυγχάνει κάθε αλγόριθμος.

Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος Best CQI έχει και στις τρεις προσομοιώσεις το χαμηλότερο δείκτη δικαιοσύνης από όλους τους αλγορίθμους, καθώς αφήνει, αναλόγως το περιβάλλον, το 60-90% των χρηστών χωρίς πόρους, διότι θεωρεί ότι έχουν κακό κανάλι και δεν θα αποδώσουν υψηλό throughput. Ταυτόχρονα, όμως δίνει την υψηλότερη ταχύτητα ανά χρήστη και ανά κυψέλη. Καταλήγουμε επομένως ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες, λόγω του υψηλού αριθμού χρηστών που αφήνει χωρίς υπηρεσίες.

Ο αλγόριθμος round robin, παρατηρούμε ότι έχει ψηλότερο μέσο throughput ανά χρήστη και ανά κυψέλη από τους proportional fair για το ημιαστικό περιβάλλον, αλλά χαμηλότερα από τους proportional fair σε αστικό περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει, διότι στο αστικό περιβάλλον οι χρήστες με κακό κανάλι είναι περισσότεροι αναλογικά από ότι στο ημιαστικό περιβάλλον και ο round robin δεν ευνοεί την εξυπηρέτηση χρηστών με κακές επικοινωνιακές συνθήκες. Επιπλέον, όπως είναι φυσικό και αναμενόμενο, έχει χειρότερο δείκτη δικαιοσύνης από τους proportional fair αλγορίθμους. Σαν αποτέλεσμα, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ρεαλιστικά ασύρματα δίκτυα, καθώς υπάρχει η αναγκαιότητα όλοι οι συνδρομητές να λαμβάνουν ελάχιστους έστω πόρους του δικτύου για να καθίσταται δυνατή η επικοινωνία τους.

Οι αλγόριθμοι proportional fair προσφέρουν, σύμφωνα με τις μετρήσεις, την απαραίτητη ισορροπία μεταξύ throughput και δικαιοσύνης, και επομένως είναι οι πλέον πρακτικοί για εφαρμογή σε πραγματικά ασύρματα δίκτυα, όπου μας ενδιαφέρει η εξυπηρέτηση όλων των συνδρομητών ανεξαιρέτως. Ο βελτιωμένος proportional fair, σε καθεμία από τις τρεις προσομοιώσεις, θυσιάζει ένα μικρό ποσοστό throughput, για να αυξήσει τη δικαιοσύνη του, και επομένως να εξυπηρετήσει ακόμα καλύτερα τους χρήστες με κακές επικοινωνιακές συνθήκες. Αυτό τον καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιβάλλοντα μεγάλων πόλεων, όπου οι συνδρομητές με κακό κανάλι είναι πάρα πολλοί και απαιτείται να εξυπηρετηθούν όσο καλύτερα γίνεται. Η κλασική εκδοχή του proportional fair λειτουργεί βέλτιστα στο ημιαστικό περιβάλλον, όπου οι χρήστες με κακό κανάλι είναι λιγότεροι αναλογικά, και επομένως μπορεί να προσφέρει καλύτερο throughput σε όλους τους συνδρομητές. Να τονιστεί ότι και οι δύο αλγόριθμοι έχουν ~81% δικαιοσύνη στο ημιαστικό περιβάλλον, με την βελτιωμένη εκδοχή να υπερισχύει οριακά, και ~77.6% δικαιοσύνη στο αστικό περιβάλλον. Η πτώση είναι αναμενόμενη, λόγω των πολλών χρηστών με κακό κανάλι. Τέλος, στο ημιαστικό περιβάλλον με τους proportional fair έχουμε μέση ταχύτητα χρηστών 1.398 Mbps και 1.391 Mbps για κλασική και βελτιωμένη εκδοχή αντίστοιχα, στο αστικό περιβάλλον

χωρίς τριχοτόμηση έχουμε 0.04613 Mbps και 0.04511 Mbps, ενώ με τη χρήση τριχοτόμησης στο αστικό περιβάλλον έχουμε 0.1281 Mbps και 0.1267 Mbps αντίστοιχα. Η τριχοτόμηση επομένως προσφέρει 3 φορές μεγαλύτερη μέση ταχύτητα ανά χρήστη στο αστικό περιβάλλον, και με τις δύο εκδοχές του proportional fair. Γίνεται, λοιπόν αντιληπτό πόσο μεγάλη ανάγκη είναι το sectoring σε περιβάλλοντα μεγαλουπόλεων, όπως η Αθήνα.

6. Γενικά Συμπεράσματα

Μετά το πέρας των τριών προσομοιώσεων καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα για τα δίκτυα LTE τέταρτης γενιάς, με βάση τις παραμέτρους που χρησιμοποιήσαμε:

- Ο proportional fair αλγόριθμος είναι ο πλέον πρακτικός και εφαρμόσιμος αλγόριθμος σε ρεαλιστικά σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Στα σύγχρονα δίκτυα είναι απαίτηση να εξυπηρετούνται οι ανάγκες όλων των συνδρομητών, ανεξαρτήτως των συνθηκών επικοινωνίας που έχουν, ενώ η μεγιστοποίηση του throughput έρχεται σε δεύτερη μοίρα. Τις ανάγκες αυτές εξυπηρετούν ιδανικά οι εκδοχές του proportional fair που αναλύσαμε παραπάνω.
- Τα ομοιογενή δίκτυα LTE τέταρτης γενιάς με microcells, όπως αυτό που κατασκευάσαμε, μπορούν να προσφέρουν ταχύτητες σύνδεσης στους συνδρομητές, που δεν συνάδουν τις απαιτήσεις της εποχής. Συγκεκριμένα, όπως είδαμε στην προσομοίωση για αστικό περιβάλλον η μέση ταχύτητα χρήστη είναι 0.045 Mbps = 45 Kbps, ενώ στο αστικό περιβάλλον με τη χρήση των τομέων (sectors) η μέση ταχύτητα είναι 0.127 Mbps = 127 Kbps. Ενδεικτικά, η ελάχιστη ταχύτητα που απαιτείται για πλοήγηση στο ίντερνετ είναι 1.5 Mbps, ενώ για streaming εικόνας και ήχου η αντίστοιχη ταχύτητα αυξάνεται δραματικά. Ενδεικτικά, για streaming video standard quality απαιτείται ταχύτητα 3 Mbps, για high definition 5 Mbps και για 4K video streaming 25 Mbps. Με τα δεδομένα της προσομοίωσης μας, οι ταχύτητες αυτές είναι απλησίαστες.
- Για να αυξήσουμε την ταχύτητα του δικτύου μας, θα μπορούσαμε με κάνουμε περαιτέρω διαίρεση της γεωγραφικής περιοχής, εισάγοντας picocells και femtocells που θα ανέβαζαν πολύ το throughput συνδρομητών με κακό κανάλι, όπως συνδρομητές που βρίσκονται σε εσωτερικούς χώρους, και συνδρομητές σε σημεία συνωστισμού. Το νέο δίκτυο θα ήταν ανομοιογενές και θα αποτελούταν από microcells, picocells και femtocells, με κάθε είδος κυψέλης να χρειάζεται ξεχωριστό κεραιοσύστημα και να έχει διαφορετική ακτίνα κάλυψης και σκοπό.
- Ίσως, η καλύτερη επένδυση για το μέλλον είναι τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), τα οποία καλύπτουν και με τα παραπάνω τις προσωπικές μας ανάγκες για εργασία και διασκέδαση και επιπλέον μας ανοίγουν ένα νέο ορίζοντα δυνατοτήτων. Ο λόγος είναι ότι τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, εκτός από 100 φορές γρηγορότερα από τα δίκτυα τέταρτης γενιάς, θα προσφέρουν και πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Με αυτό τον τρόπο, θα είναι δυνατή η υλοποίηση real time εφαρμογών, όπως αυτοκινούμενα οχήματα, drones, διαδίκτυο των πραγμάτων (internet of things), ιατρικές εφαρμογές (όπως απομακρυσμένες εγχειρίσεις),

έξυπνες πόλεις, ηλεκτρονικά ισχύος, εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα, τηλεκπαίδευση, απομακρυσμένος έλεγχος, βιομηχανικές εφαρμογές.



Εικόνα 6.1: Μελλοντική διασύνδεση με το 5G, [38]

Βιβλιογραφία

- [1]. Σ. Κωτσόπουλος, " Αρχιτεκτονικές και Πρωτόκολλα Δικτύων Επικοινωνίας ΙΙ ", Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012
- [2]. https://www.4g.co.uk/
- [3]. https://smartvision.solutions/?q=node/19
- [4]. https://el.wikipedia.org/
- [5]. https://desmondkhoolte.blogspot.com/
- [6]. http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/lte/content/lte_o verview.htm
- [7]. http://telecompedia.net/ofdma/
- [8]. https://searchnetworking.techtarget.com/definition/orthogonal-frequency-division-multiple-access-OFDMA
- [9]. https://www.everythingrf.com/community/what-is-mimo-technology
- [10]. https://wifijedi.com/2009/02/01/how-stuff-works-spatial-multiplexing/
- [11]. https://silvustechnologies.com/why-silvus/technology/introduction-to-mimo/
- [12]. https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/spatial-multiplexing
- [13]. https://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedure_LTE_PHY_Precoding.html#Spatia %20%20%20%20Multiplexing_largeCDD
- [14]. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-981-10-0539-8_68.pdf
- [15]. https://www.sharetechnote.com/html/Communication_ChannelModel_MMSE.html
- [16]. http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/n5106a/about fading.htm
- [17]. https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Small-scale-fading-vs-Large-scale-fading.html
- [18]. https://ytd2525.wordpress.com/2014/02/02/cqi-channel-quality-indicator/
- [19]. https://www.sharetechnote.com/html/Handbook LTE CQI.html
- [20]. https://www.mathworks.com/
- [21]. https://www.sharetechnote.com/html/LTE_Advanced_LayerMapping.html
- [22]. http://www.techplayon.com/lte-enodeb-scheduler-and-different-scheduler-type/
- [23]. https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/propagationoverview/rayleigh-fading.php
- [24]. https://www.zen.co.uk/blog/posts/zen-blog/2019/04/18/the-minimum-internet-speeds-for-streaming-video-in-2019
- [25]. https://futurenetworks.ieee.org/roadmap/perspectives-on-5g-applications-and-services

- [26]. Panagiotis Georgakopoulos, Tafseer Akhtar, Stavros Kotsopoulos, "On game theory-based coordination schemes for mobile small cells", Wireless Communications Laboratory, University of Patras, Greece
- [27]. Panagiotis K. Gkonis,* Maria A. Seimeni, Nikolaos P. Asimakis, Dimitra I. Kaklamani, and Iakovos S. Venieris, "A New Subcarrier Allocation Strategy for MIMO-OFDMA Multicellular Networks Based on Cooperative Interference Mitigation", Scientific World Journal, 2014
- [28]. Mohammed Alhadi Abduljalil, "Resource Scheduling Algorithms in Long Term Evolution (LTE)", 2014
- [29]. AdityaTiwari, Shashikant Suman, Pranav Viswanathan, "Verification of MAC Scheduling algorithms in NetSimTM", 2014
- [30]. Md. Maruf Ahamed and Saleh Faruque, "Propagation Factors Affecting the Performance of 5G Millimeter Wave Radio Channel", Department of Electrical Engineering University of North Dakota
- [31]. Mohamed H. Ahmed, Octavia A. Dobre, and Rabie K. Almatarneh, "Analytical Evaluation of the Performance of Proportional Fair Scheduling in OFDMA-Based Wireless Systems", Faculty of Engineering And Applied Science, Memorial University, 2012
- [32]. Raymond Kwan, Cyril Leung, and Jie Zhang, "Proportional Fair Multiuser Scheduling in LTE", 2009
- [33]. Erwu Liu and Kin K. Leung, "Proportional Fair Scheduling: Analytical Insight under Rayleigh Fading Environment", Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College, London, UK, 2008
- [34]. Donald Parruca, Marius Grysla, Simon Gortzen and James Gross, "Analytical Model of Proportional Fair Scheduling in Interference-limited OFDMA/LTE Networks"
- [35]. Rudi Sianipar1, Arfianto Fahmi2 and Rendy Munadi, "Physical Resource Block (PRB) Allocation using Modified Round Robin Scheduling Algorithm in downlink LTE Network", June 2018
- [36]. Mohammad T. Kawser, Nafiz Imtiaz Bin Hamid, Md. Nayeemul Hasan, M. Shah Alam, and M. Musfiqur Rahman, "Downlink SNR to CQI Mapping for Different Multiple Antenna Techniques in LTE", International Journal of Information and Electronics Engineering, September 2012
- [37]. V.S. Abhayawardhana, I.J. Wassell, D. Crosby, M.P. Sellars, M.G. Brown, "Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems"
- [38]. http://www.emfexplained.info/site/misc/image/Fullsize/11248.png

Παράρτημα

Κώδικας για αλγόριθμο Round Robin:

```
1
        %Round robin scheduler
        function [instant_throughput,usagepertti,usage,allocation,rrcounter]=RR(sectoring,tti,totaleNBs,UEspercell,instant_throughput,usagepertti,...
2
      usage,allocation,rrcounter,modulation_order,coding_rate)
 3
        %% Arxikopoihseis
 6 -
        totalRBs=100;
7
8
        %% round robin scheduling
        if sectoring==0
10 -
11 -
            for i=1:totaleNBs
                for m=1:totalRBs
12 -
                    usagepertti(rrcounter(1,i),i)=usagepertti(rrcounter(1,i),i)+1;
13 -
                     allocation{tti,i}(rrcounter(1,i),m)=1;
14 -
                     if rrcounter(1,i)<UEspercell</pre>
15 -
                         rrcounter(1,i)=rrcounter(1,i)+1;
16 -
17 -
18 -
                    end
19 -
                end
20 -
            end
21 -
            for i=1:totaleNBs
                 for j=1:UEspercell
                     instant throughput(j,i)=throughputcalc(tti,usagepertti(j,i),modulation_order(j,i,1),modulation_order(j,i,2),coding_rate(j,i,1),coding_rate(j,i,2));
usage(j,i)=usage(j,i)+usagepertti(j,i);
23 -
24 -
26 -
27
28 -
      elseif sectoring==1
29 -
            for i=1:totaleNBs
30 -
                for m=1:totalRBs
31 -
32 -
                     usagepertti\left(rrcounter\left(1,i\right),i\right) = usagepertti\left(rrcounter\left(1,i\right),i\right) + 1;
                     \verb|allocation{tti,i}| (\verb|rrcounter(1,i),m) = 1;
33 -
                     if rrcounter(1,i)<UEspercell(1,i)</pre>
34 -
                         rrcounter(1,i)=rrcounter(1,i)+1;
36 -
                         rrcounter(1,i)=1;
37 -
                    end
38 -
                end
39 -
40 -
            for i=1:totaleNBs %totalsectors
41 -
                for j=1:UEspercell(1,i) %UEspersector
42 -
                     tf=isnan(instant_throughput(j,i)); %tf=1 an einai NaN, tf=0 an oxi
43 -
44 -
                         instant_throughput(j,i)=throughputcalc(tti,usagepertti(j,i),modulation_order(j,i,1),modulation_order(j,i,2),coding_rate(j,i,1),coding_rate(j,i,2));
45 -
                         \verb"usage"(j,i) = \verb"usage"(j,i) + \verb"usage"pertti"(j,i);
                    end
46 -
48 -
49 -
       end
50
```

Κώδικας για αλγόριθμο Proportional Fair

```
1
       %Proportionally Fair scheduler
       function [usagepertti,instant_throughput,usage,allocation,metric,num,den]=PF6(sectoring,usagepertti,tti,UEspercell,totaleNBs,...
 2
      totalRBs,instant_throughput,usage,modulation_order,coding_rate,allocation,metric,num,den)
 3
 4
 5
      %% arxikopoihseis
 6 -
       k=10;
                %previous tti memory
 7 -
       a=1-1/k;
 8
       if sectoring==0
 9 -
10 -
           for i=1:totaleNBs
11 -
              if tti==1
12 -
                   for j=1:UEspercell
                        num(j,i) = throughputcalc(tti,5, modulation order(j,i,1), modulation order(j,i,2), coding rate(j,i,1), coding rate(j,i,2));
13
14 -
                       den(j,i)=1;
15
                        metric(j,i,tti) = num(j,i)/den(j,i);
16 -
                   end
17 -
               end
18 -
               for m=1:totalRBs
19 -
                   for j=1:UEspercell
20 -
                       num(j,i)=throughputcalc(tti,1,modulation_order(j,i,1),modulation_order(j,i,2),coding_rate(j,i,1),coding_rate(j,i,2));
21 -
                       metric(j,i,tti)=num(j,i)/den(j,i);
22 -
23 -
                   maxthr=max(metric(:,i,tti));
24 -
                   maxindexes = find(metric(:,i,tti)==maxthr);
25 -
                   if length(maxindexes)>1
                       maxind=maxindexes(randi(numel(maxindexes)));
26 -
27 -
28 -
                       maxind=maxindexes;
29 -
30 -
                   usagepertti(maxind,i)=usagepertti(maxind,i)+1;
31 -
                   allocation{tti,i} (maxind,m)=1;
32
                    %scheduled_once(maxind,i)=1;
33 -
                   den (maxind, i) = a * den (maxind, i) + (1-a) * num (maxind, i);
                    %metric(maxind,i,tti)=num(maxind,i)/den(maxind,i);
34
35 -
                    for j=1:UEspercell
36
                        %if j\sim=\max ind && usagepertti{tti,1}(j,i)==0
37 -
38
                            %num(j,i)=throughputcalc(tti,1,modulation order(j,i,1),modulation order(j,i,2),coding rate(j,i,1),coding rate(j,i,2));
39 -
                            den(j,i)=a*den(j,i);
40
                            metric(j,i,tti)=num(j,i)/den(j,i);
41 -
42 -
                   end
43 -
               end
44 -
                for j=1:UEspercell
45 -
                    if usagepertti(j,i)==0
46 -
                       instant throughput(j,i)=0;
47 -
                   else
48 -
                        instant\_throughput(j,i) = throughputcalc(tti,usagepertti(j,i)), modulation\_order(j,i,1), modulation\_order(j,i,2), \dots
49
                        coding_rate(j,i,1),coding_rate(maxind,i,2));
50 -
51 -
                   usage(j,i)=usage(j,i)+usagepertti(j,i);
               end
52 -
53 -
           end
54
55 -
       elseif sectoring==1
56 -
           for i=1:totaleNBs
57 -
            if tti==1
```

```
58 - 🖨
                   for j=1:UEspercell(1,i)
 59 -
                        tf=isnan(instant throughput(j,i)); %tf=1 an einai NaN, tf=0 an oxi
 60 -
                        if tf==0
                            den(j,i)=1;
 61 -
62 -
                        end
                    end
 63 -
 64 -
                end
 65 -
                for m=1:totalRBs
 66 -
                    for j=1:UEspercell(1,i)
 67 -
                        tf=isnan(metric(j,i)); %tf=1 an einai NaN, tf=0 an oxi
 68 -
 69 -
                            num(j,i)=throughputcalc(tti,1,modulation_order(j,i,1),modulation_order(j,i,2),coding_rate(j,i,1),coding_rate(j,i,2));
 70 -
                            metric(j,i,tti)=num(j,i)/den(j,i);
 71 -
 72 -
                    end
 73 -
                    maxthr=max(metric(:,i,tti));
 74 -
                    maxindexes = find(metric(:,i,tti)==maxthr);
 75 -
                    if length(maxindexes)>1
 76 -
                       maxind=maxindexes(randi(numel(maxindexes)));
 77 -
                    else
 78 -
                       maxind=maxindexes;
 79 -
 80 -
                    usagepertti(maxind,i)=usagepertti(maxind,i)+1;
 81 -
                    allocation{tti,i} (maxind,m)=1;
 82 -
                    den(maxind, i) = a*den(maxind, i) + (1-a)*num(maxind, i);
 83 - 🗏
                    for j=1:UEspercell(1,i)
 84 -
                        tf=isnan(metric(j,i)); %tf=1 an einai NaN, tf=0 an oxi
85 -
                       if j~=maxind && tf==0
86 -
                          den(j,i)=a*den(j,i);
 87 -
                        end
 88 -
                    end
 89 -
                end
 90 -
                for j=1:UEspercell(1,i)
 91 -
                    tf=isnan(instant_throughput(j,i));
 92 -
                    if tf==0
 93 -
                        if usagepertti(j,i)==0
 94 -
                            instant_throughput(j,i)=0;
 95 -
 96 -
                            instant\_throughput(j,i) = throughput calc(tti,usagepertti(j,i),modulation\_order(j,i,1),modulation\_order(j,i,2),\dots
 97
                            coding_rate(j,i,1),coding_rate(maxind,i,2));
 98 -
 99 -
                        usage(j,i)=usage(j,i)+usagepertti(j,i);
100 -
                    end
                end
101 -
102 -
            end
103 -
        end
104
105 -
         end
106
```

Κώδικας για βελτιωμένο Proportional Fair

```
%Proportionally Fair v2 scheduler
      function [usagepertti,instant throughput,usage,allocation,metric,num,den,starvcounter]=PF6v2 (type,sectoring,usagepertti,tti,UEspercell,...
3
    totaleNBs, totalRBs, instant_throughput, usage, modulation_order, coding_rate, allocation, metric, num, den, starvcounter)
4
5
    8% arxikopoihseis
     k=10; %previous tti memory
6 -
7 -
     a=1-1/k;
8 -
     if type=="urban"
9 -
     elseif type=="suburban"
10 -
11 -
        death=4;
12 -
     -end
13
14 = %%
15 - if
    if sectoring==0
16 - for i=1:totaleNBs
17 -
           if tti==1
18 -
               for j=1:UEspercell
19 -
                  den(j,i)=1;
20 -
               end
21 -
22 -
            for m=1:totalRBs
23 -
               x=find(starvcounter(:,i)>=death,1); %briskw posa einai starved se auto to tti
               tf=isempty(x); %tf=1 kanena starved, tf=0 exw starved
24 -
25 -
               if tf==1 %den exw starved UEs
26 -
                   for j=1:UEspercell
27 -
                      num(j,i) = throughput calc(tti,1,modulation\_order(j,i,1),modulation\_order(j,i,2));\\
28 -
                      metric(j,i,tti)=num(j,i)/den(j,i);
29 -
                              end
                              maxthr=max(metric(:,i,tti));
30 -
31 -
                              maxindexes = find(metric(:,i,tti)==maxthr);
32 -
                              if length (maxindexes) >1
33 -
                                   maxind=maxindexes(randi(numel(maxindexes)));
 34 -
                              else
                                   maxind=maxindexes;
35 -
36 -
                              end
                              starvcounter(maxind,i)=0;
37 -
38 -
                              usagepertti (maxind, i) = usagepertti (maxind, i) +1;
39 -
                              allocation{tti,i} (maxind,m)=1;
 40 -
                              den (maxind, i) = a*den (maxind, i) + (1-a) *num (maxind, i);
 41 -
                              for j=1:UEspercell
 42 -
                                     if j~=maxind
                                        den(j,i)=a*den(j,i);
 43 -
                                        %starvcounter(j,i)=starvcounter(j,i)+1;
 44
 45 -
                                   end
 46 -
                              end
                         elseif tf == 0 % exw starved UEs
 47 -
                               [maxstarved, maxind] = max(starvcounter(:,i));
 48 -
 49 -
                              usagepertti(maxind,i)=usagepertti(maxind,i)+1;
50 -
                              allocation{tti,i} (maxind,m)=1;
51 -
                              den (maxind, i) = a*den (maxind, i) + (1-a)*num (maxind, i);
52 -
                              starvcounter(maxind,i)=0;
53 -
                              for j=1:UEspercell
 54 -
                                   if j~=maxind
 55 -
                                        den(j,i)=a*den(j,i);
                                        %starvcounter(j,i)=starvcounter(j,i)+1;
 56
```

```
57 -
 58 -
                         end
 59 -
                     end
 60 -
                 end
 61 -
                 for j=1:UEspercell
 62 -
                     if usagepertti(j,i)==0
 63 -
                         instant_throughput(j,i)=0;
 64 -
                          starvcounter(j,i)=starvcounter(j,i)+1;
 65 -
                          instant throughput(j,i)=throughputcalc(tti,usagepertti(j,i), modulation order(j,i,1), modulation order(j,i,2),...
 66
 67
                          coding_rate(j,i,1),coding_rate(maxind,i,2));
 68 -
                     end
 69 -
                     usage(j,i)=usage(j,i)+usagepertti(j,i);
 70 -
                 end
 71 -
             end
 72
 73 -
        elseif sectoring==1
             for i=1:totaleNBs
 74 -
 75 -
                if tti==1
 76 -
                     for j=1:UEspercell(1,i)
 77 -
                         den(j,i)=1;
 78 -
                     end
 79 -
                 end
 80 -
                 for m=1:totalRBs
 81 -
                     x=find(starvcounter(:,i)>=death,1); %briskw posa einai starved se auto to tti
 82 -
                     tf=isempty(x); %tf=1 kanena starved, tf=0 exw starved
 83 -
                     if tf==1 %den exw starved UEs
84 -
                        for j=1:UEspercell(1,i)
 85 -
                             num(j,i)=throughputcalc(tti,1,modulation_order(j,i,1),modulation_order(j,i,2),coding_rate(j,i,1),coding_rate(j,i,
 86 -
                             metric(j,i,tti)=num(j,i)/den(j,i);
 87 -
                         end
 88 -
                         maxthr=max(metric(:,i,tti));
 89 -
                         maxindexes = find(metric(:,i,tti)==maxthr);
 90 -
                         if length(maxindexes)>1
 91 -
                             maxind=maxindexes(randi(numel(maxindexes)));
 92 -
                         else
 93 -
                            maxind=maxindexes;
 94 -
                         end
 95 -
                         starvcounter(maxind,i)=0;
 96 -
                         usagepertti(maxind,i)=usagepertti(maxind,i)+1;
 97 -
                         allocation{tti,i} (maxind,m)=1;
 98 -
                         den (maxind, i) = a*den (maxind, i) + (1-a) *num (maxind, i);
 99 -
                         for j=1:UEspercell(1,i)
100 -
                              if j~=maxind
101 -
                                 den(i,i)=a*den(i,i);
                                 %starvcounter(j,i)=starvcounter(j,i)+1;
102
103 -
                             end
104 -
                         end
105 -
                     elseif tf == 0 %exw starved UEs
106 -
                         [maxstarved, maxind] = max(starvcounter(:,i));
107 -
                         usagepertti(maxind,i)=usagepertti(maxind,i)+1;
108 -
                         allocation{tti,i} (maxind,m)=1;
109 -
                         den (maxind, i) = a*den (maxind, i) + (1-a) *num (maxind, i);
110 -
                         starvcounter(maxind,i)=0;
                         for j=1:UEspercell(1,i)
111 -
112 -
                            if i~=maxind
113 -
                                 den(j,i)=a*den(j,i);
114
                                 %starvcounter(j,i)=starvcounter(j,i)+1;
115 -
                            end
116 -
                        end
117 -
                     end
118 -
                end
119 -
                 for j=1:UEspercell(1,i)
120 -
                     tf=isnan(instant_throughput(j,i));
121 -
                     if tf==0
122 -
                         if usagepertti(j,i)==0
123 -
                            instant_throughput(j,i)=0;
124 -
                             starvcounter(j,i)=starvcounter(j,i)+1;
125 -
                        else
                            instant\_throughput(j,i) = throughputcalc(tti,usagepertti(j,i),modulation\_order(j,i,1),modulation\_order(j,i,2),\ldots \\ [2mm]
126
127
                             coding_rate(j,i,1),coding_rate(maxind,i,2));
128 -
129 -
                        usage(j,i)=usage(j,i)+usagepertti(j,i);
130 -
                    end
131 -
                end
132 -
            end
133
134 -
        end
135
```

Κώδικας για αλγόριθμο Best CQI

```
function [usagepertti,instant throughput,usage,allocation]=bestcqi2 (sectoring,usagepertti,tti,UEspercell,...
2
             totaleNBs, totalRBs, instant_throughput, usage, modulation_order, coding_rate, allocation)
4
5 -
                 if sectoring==0
 6 -
7 -
8 -
9 -
                          metric=zeros(UEspercell,totaleNBs,'single');
                          for i=1:totaleNBs
                                   for j=1:UEspercell
                                            if usage(i,i)==0
10 -
                                                    metric(j,i)=throughputcalc(tti,5,modulation_order(j,i,1),modulation_order(j,i,2),coding_rate(j,i,1),coding_rate(j,i,2));
11 -
12 -
                                                   metric(j,i)=throughputcalc(tti,1,modulation order(j,i,1),modulation order(j,i,2),coding rate(j,i,1),coding rate(j,i,2));
13 -
14 -
                                            end
                                   end
15 -
                                   for m=1:totalRBs
16
                                            %[maxthr, maxind] = max(metric(:,i));
17 -
                                           maxthr=max(metric(:,i));
18 -
                                            maxindexes = find(metric(:,i) == maxthr);
19 -
                                            if length (maxindexes) >1
                                                    maxind=maxindexes(randi(numel(maxindexes)));
21 -
22 -
                                                    maxind=maxindexes;
23 -
                                            end
24 -
                                            usagepertti(maxind,i)=usagepertti(maxind,i)+1;
25 -
                                             usage(maxind,i)=usage(maxind,i)+1;
26 -
                                            allocation{tti,i} (maxind,m)=1;
28 -
                                            \texttt{metric} (\texttt{maxind}, \texttt{i}) = \texttt{throughputcalc} (\texttt{tti}, \texttt{usagepertti} (\texttt{maxind}, \texttt{i}), \texttt{modulation}\_\texttt{order} (\texttt{maxind}, \texttt{i}, \texttt{1}), \texttt{modulation}\_\texttt{order} (\texttt{maxind}, \texttt{i}, \texttt{2}), \dots, \texttt{modulation}\_\texttt{order} (\texttt{index}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}), \dots, \texttt{index} (\texttt{index}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}), \dots, \texttt{index} (\texttt{index}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}), \dots, \texttt{index} (\texttt{index}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i}, \texttt{i})
29
                                            coding rate(maxind,i,1),coding rate(maxind,i,2));
30 -
                                    end
31 -
                                    for j=1:UEspercell
32 -
                                              instant\_throughput(j,i) = throughputcalc(tti,usagepertti(j,i),modulation\_order(j,i,1),modulation\_order(j,i,2),\dots
33
                                              coding_rate(j,i,1),coding_rate(j,i,2));
34
                                              %usage(j,i)=usage(j,i)+usagepertti{tti,1}(j,i);
 35 -
                                    end
 36 -
37
38 -
                  elseif sectoring==1
 39 -
                          metric=zeros(max(UEspercell),totaleNBs,'single');
 40 -
                           for i=1:totaleNBs
 41 -
                                     for j=UEspercell(1,i)+1:max(UEspercell)
 42 -
                                             metric(j,i)=NaN;
 43 -
                                    end
 44 -
45 -
46 -
                            for i=1:totaleNBs
                                    for j=1:UEspercell(1,i)
                                              tf=isnan(instant_throughput(j,i)); %tf=1 an einai NaN, tf=0 an oxi
 47 -
 48 -
                                              if usage(j,i)==0 && tf==0
 49 -
                                                       \texttt{metric}(\texttt{j},\texttt{i}) = \texttt{throughputcalc}(\texttt{tti},\texttt{5},\texttt{modulation\_order}(\texttt{j},\texttt{i},\texttt{1}),\texttt{modulation\_order}(\texttt{j},\texttt{i},\texttt{2}),\texttt{coding\_rate}(\texttt{j},\texttt{i},\texttt{1}),\texttt{coding\_rate}(\texttt{j},\texttt{i},\texttt{2}));
 50 -
                                              elseif usage(j,i)~=0 && tf==0
51 -
                                                     metric(j,i)=throughputcalc(tti,1,modulation order(j,i,1),modulation order(j,i,2),coding rate(j,i,1),coding rate(j,i,2));
52 -
                                              end
                                     end
                                     for m=1:totalRBs
 55
                                              %[maxthr,maxind]=max(metric(:,i));
56 -
                                              maxthr=max(metric(:,i));
 57 -
                                              maxindexes = find(metric(:,i)==maxthr);
58 -
                                              if length(maxindexes)>1
59 -
                                                            maxind=maxindexes(randi(numel(maxindexes)));
 60 -
                                                 else
 61 -
                                                           maxind=maxindexes;
 62 -
 63 -
                                                 usagepertti(maxind,i)=usagepertti(maxind,i)+1;
 64 -
                                                 usage(maxind,i)=usage(maxind,i)+1;
                                                 allocation{tti,i} (maxind,m)=1;
 66
 67 -
                                                 \texttt{metric} (\texttt{maxind}, \texttt{i}) = \texttt{throughputcalc} (\texttt{tti}, \texttt{usagepertti} (\texttt{maxind}, \texttt{i}), \texttt{modulation}\_\texttt{order} (\texttt{maxind}, \texttt{i}, \texttt{1}), \texttt{modulation}\_\texttt{order} (\texttt{maxind}, \texttt{i}, \texttt{2}), \dots
                                                  coding_rate(maxind,i,1),coding_rate(maxind,i,2));
 68
 69 -
 70 -
 71 -
                                                  tf=isnan(instant_throughput(j,i)); %tf=1 an einai NaN, tf=0 an oxi
 72 -
 73 -
                                                            instant\_throughput(j,i) = throughputcalc(tti,usagepertti(j,i), modulation\_order(j,i,1), modulation\_order(j,i,2), \dots
 74
                                                            coding_rate(j,i,1),coding_rate(j,i,2));
 75
                                                            %usage(j,i)=usage(j,i)+usagepertti{tti,1}(j,i);
 76 -
                                                 end
 77 -
                                       end
 78 -
                             end
 79 -
                 end
80
```