



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ
ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΡΑΔΙΟΔΙΚΤΥΑ 4^{ης} ΓΕΝΙΑΣ ΜΕ
ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Ν. Ανδρεάδης



Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβρης 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ
ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΡΑΔΙΟΔΙΚΤΥΑ 4^{ης} ΓΕΝΙΑΣ ΜΕ
ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Ν. Ανδρεάδης

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβρης 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΡΑΔΙΟΔΙΚΤΥΑ 4^{ης} ΓΕΝΙΑΣ ΜΕ ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Ν. Ανδρεάδης

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την^η Οκτωβρίου 2015

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επίκ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβρης 2015

.....
Ανδρεάδης Ν. Ιωάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ανδρεάδης Ν. Ιωάννης, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος της διπλωματικής εργασίας, το οποίο συνέβαλε στην επέκταση των γνώσεών μου σ'ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον επιστημονικό πεδίο όπως αυτό των Κινητών Επικοινωνιών. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κάθε φορά που ήταν αυτό απαραίτητο καθώς και για τις άρτια επιστημονικά γνώσεις που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια μέσα από τα ακαδημαϊκά έδρανα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Σαγκριώτη Σταύρο, για τη συνεχή εποπτεία κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου και τη διαρκή θέληση που επέδειξε να με βοηθήσει κάθε φορά που απευθυνόμουν σε αυτόν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς όλους τους φίλους μου που ήταν κοντά μου σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας με τους οποίους μοιραστήκαμε αυτά τα πέντε υπέροχα χρόνια και κυρίως τους γονείς μου Νικόλαο και Ειρήνη όπως επίσης και τις αγαπημένες μου αδερφές Ειρήνη και Φωτεινή για όλη τη στήριξη και την αγάπη που απλόχερα μου έδωσαν, παρέχοντάς μου δύναμη και πίστη για να συνεχίζω σε κάθε νέο μου βήμα.

Αφιερώνεται στη μνήμη του παππού μου
Ιωάννη και της πολυαγαπημένης μου
γιαγιάς Παρθενόπης.

Περίληψη

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζονται και προτείνονται πολιτικές διαχείρισης του δικτυακού φορτίου σε ετερογενή συστήματα 4^{ης} γενιάς. Λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης στην κίνηση δεδομένων η κατάλληλη δρομολόγηση του φορτίου και η στρατηγική ανάθεση των ραδιοπόρων παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στη βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου και τη διατήρηση της αξιοπιστίας του όσο και στην αμείωτη προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) προς τον πελάτη.

Στα Κεφάλαια 1 και 2 γίνεται αναφορά στα προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι πάροχοι στα σύγχρονα δίκτυα 4G καθώς επίσης παρουσιάζεται η δομή, η αρχιτεκτονική και οι προδιαγραφές IEEE του βασικού μας δικτύου LTE.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύουμε τους λόγους που επικεντρωνόμαστε στην κατερχόμενη ζεύξη, παρουσιάζουμε το ετερογενές περιβάλλον δύο επιπέδων (WiFi, LTE) που συναντά ο χρήστης καθώς και τους λόγους επιλογής του προτύπου 802.11a ως δίκτυο εναλλακτικής δρομολόγησης. Τέλος, αναφέρουμε τις τρεις προτεινόμενες πολιτικές βάσει των οποίων γίνεται η διαχείριση της κίνησης εντός του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 4 αποδεικνύουμε την προσέγγιση που επιτυγχάνει η κατανομή Poisson στην οριακή περίπτωση της διωνυμικής κατανομής και εκμεταλλευόμαστε το γεγονός αυτό για να μοντελοποιήσουμε τη διαδικασία αφίξεων πελατών στο επίπεδο συνεδριών. Δίνονται αποτελέσματα για την απόδειξη των ανωτέρω θέσεων.

Στο Κεφάλαιο 5 διατυπώνουμε την πρώτη πολιτική δρομολόγησης σύμφωνα με το κριτήριο του μέγιστου λόγου SINR που λαμβάνει ο χρήστης από το σταθμό βάσης και επιλέγει έτσι το δίκτυο σύνδεσης.

Στο Κεφάλαιο 6 αναλύεται η δεύτερη πολιτική σύμφωνα με την οποία η διαδρομή που ακολουθεί ένα αρχείο προς το συνδρομητή επιλέγεται με βάση το πιθανοτικό μοντέλο δρομολόγησης. Εξάγεται η ρυθμαπόδοση των δικτύων LTE και WiFi για διάφορες περιπτώσεις ακτινών κάλυψης, ενώ επίσης αναδεικνύεται η γραμμική εξάρτηση της ρυθμαπόδοσης χρήστη με τη τρέχουσα ζήτηση της κίνησης. Πραγματοποιούνται υπολογισμοί στο περιβάλλον Matlab και παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα με τα συμπεράσματά τους.

Το Κεφάλαιο 7 πραγματεύεται η τελευταία πολιτική διαχείρισης φορτίου και ίσως η πιο σημαντική. Πλέον ο τρόπος που γίνεται η λήψη ενός αρχείου από τον UE καθορίζεται με βάση την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος των σταθμών βάσης. Προσομοιώνονται διάφορα σενάρια λειτουργίας με αντίστοιχη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Κλείνοντας, στο Κεφάλαιο 8 γίνεται αναφορά στις προοπτικές που παρουσιάζονται για μελλοντική έρευνα καθώς και πιθανές προκλήσεις που προκύπτουν.

Λέξεις Κλειδιά: πολιτικές διαχείρισης φορτίου, Poisson, μέγιστος λόγος SINR, πιθανοτικό μοντέλο δρομολόγησης, LTE, Round-Robin, διωνυμική κατανομή, σύστημα αναμονής M/G/1, ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ισχύος, ελαστική κίνηση

Abstract

The objective of this Diploma thesis is to analyze the traffic management policies for the 4G heterogeneous networks. Due to the rapidly increasing traffic data demand an appropriate routing of network load and the strategic allocation of radio resources plays a key role in the improvement of network operation as well as to maintain the reliability and irreducible offered quality of service (QoS) to the customer.

The 1st and 2nd Chapters refer to the problems that are encountered by the providers in modern 4G networks as well as we present the structure, architecture and the IEEE specifications of our basic LTE network.

In Chapter 3 we explain the reasons why we focus on downlink, we present the two-tier heterogeneous environment (WiFi, LTE) that user meets and the reasons for selecting 802.11a standard as an alternative network for routing our traffic demand. Finally, we briefly describe the three proposed policies that are employed for traffic management within the network.

In Chapter 4 we prove the approach that is achieved by the Poisson distribution in the limit case of the binomial and exploits this fact to model the process of customer arrivals at sessions. Subsequently we carry out a simulation to demonstrate this position.

In 5th Chapter we formulate the first routing policy that is proposed, according to the criterion of the maximum SINR ratio. That's the way in which a user chooses the base station that will be connect.

Chapter 6 analyzes the second policy according to which, the path that a file selects to reach the subscriber's interface is in accordance with probabilistic routing protocol. Extract the throughput of LTE and WiFi for various cases of radius coverage while also highlight the linear dependence of user throughput by current traffic demand in the network. Analytical simulations in Matlab environment and their results are presented along their conclusions.

Chapter 7 deals with the final proposed load management policy and perhaps the most important. Now, the criterion for downloading data to a user is determined based on the minimum power consumption of the base stations. Various scenarios have been modeled and simulated and their results with the corresponding conclusions have been presented.

Finally, Chapter 8 refers to the future research and potential challenges that arise from the present Diploma Thesis.

Key words: traffic management policies, Poisson, maximum SINR ratio, probabilistic routing protocol, LTE, Round-Robin scheduler, binomial distribution, M/G/1 PS queueing model, minimization of power consumption of BS, elastic data traffic

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	22
Κεφάλαιο 2: Η πορεία από το GSM στο LTE και Ενδιάμεσες Τεχνολογίες.....	27
2.1 Κυψελωτά Συστήματα 2ης Γενιάς (2G) - Global System for Mobile Communications (GSM)	27
2.2 Κυψελωτά Συστήματα 2.5ης Γενιάς (2.5G) - General Packet Radio Service (GPRS)	28
2.3 Κυψελωτά Συστήματα 3ης Γενιάς (3G) - High Speed Packet Access (HSPA)	29
2.4 Κυψελωτά Συστήματα 4ης Γενιάς (4G) – Long Term Evolution (LTE) και LTE-Advanced	30
2.4.1 Διαδικασία Τυποποίησης του 3GPP	31
2.4.2 Προδιαγραφές ΙΕΕΕ Δικτύου LTE	33
2.4.3 Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης και Δίκτυο Κορμού.....	34
2.4.4 Αρχιτεκτονική του Δικτύου LTE	37
2.4.5 Φυσικό Στρώμα και Εύρος Ζώνης	39
2.4.6 LTE-Advanced.....	41
Κεφάλαιο 3: Μετακύλιση του Δικτυακού Φορτίου μέσω των Διαθέσιμων WiFi APs.....	43
3.1 Διατύπωση του Προβλήματος.....	43
3.2 Τα δίκτυα WiFi ως η βέλτιστη προτεινόμενη λύση.....	43
3.3 Μοντελοποίηση του Δικτύου στο Επίπεδο Ροής.....	44
3.4 Ανάλυση των Παραμέτρων του Ετερογενούς Περιβάλλοντος.....	45
3.5 Πολιτικές Δρομολόγησης της Κίνησης Φορτίου.....	47

Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση της Διαδικασίας Αφίξεων Αιτημάτων των Κινητών Χρηστών (UEs).....	51
4.1 Δοκιμές Bernoulli.....	51
4.2 Διωνυμική Κατανομή.....	54
4.3 Η Κατανομή Poisson ως Οριακή Περίπτωση της Διωνυμικής Κατανομής.....	56
4.4 Καταγραφή της Κίνησης των Αιτημάτων με Χρήση της Διωνυμικής Κατανομής.....	62
4.4.1 Ελαστική Κίνηση των Δεδομένων.....	63
4.4.2 Ανάλυση και Χρόνος Διαφίξεων στο Επίπεδο Συνεδριών.....	64
4.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	66
Κεφάλαιο 5: Πολιτικές Δρομολόγησης Φορτίου με Χρήση Κριτηρίου Μέγιστου Λόγου SINR.....	71
Κεφάλαιο 6: Πολιτική Διαχείρισης Φορτίου σύμφωνα με το Κριτήριο Πιθανοτικής Δρομολόγησης και Χρήση Round-Robin Προγραμματιστή για την Εξυπηρέτηση των UEs.....	82
6.1 Εισαγωγή.....	82
6.2 Μοντελοποίηση της Κίνησης Δεδομένων.....	83
6.2.1 Εισαγωγή Χρηστών στο Σύστημα Χωρίς Έλεγχο Εισόδου ($\rho < 1$).....	85
6.3 Προγραμματισμός Εξυπηρέτησης Ροών με τον Αλγόριθμο Round-Robin.....	87
6.4 Μοντέλα Διαμοιρασμού Διεργασίας (Processor-Sharing Models).....	92
6.4.1 Συμβολισμός του Κένταλ (Kendall's Notation).....	92
6.4.2 Το Μοντέλο Αναμονής M/G/1.....	94
6.4.3 Μοντελοποίηση Αφίξεων Πελατών με την Κατανομή Poisson.....	95
6.4.4 Πιθανοτικό Μοντέλο Δρομολόγησης.....	96

6.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα.....	97
6.6 Ρυθμαπόδοση Χρήστη Ανάλογα με το Δίκτυο Σύνδεσης.....	107
Κεφάλαιο 7: Πολιτική Ελάχιστης Κατανάλωσης Ισχύος των Σταθμών Βάσης.....	114
7.1 Εισαγωγή.....	114
7.2 Περιγραφή και Ανάλυση του Μαθηματικού Μοντέλου.....	117
7.3 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αριθμητικών Αποτελεσμάτων	118
7.4 Εξαγωγή Συμπερασμάτων.....	126
Κεφάλαιο 8: Μελλοντική Έρευνα.....	128
Παράρτημα: Οι Κώδικες των Αποτελεσμάτων σε Matlab.....	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	139

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Απεικόνιση περιοχών κάλυψης για την κατερχόμενη ζεύξη σε δίκτυο 3 επιπέδων με μακροκυψέλες, πικο-κυψέλες και φεμτο-κυψέλες..24	
Σχήμα 2.1: Καμπύλες πρόβλεψης για το πλήθος συνδρομητών κινητών επικοινωνιών από την Ericsson έως το 2020.....28	
Σχήμα 2.2: Η πορεία από το GSM στο LTE-Advanced.....31	
Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του δικτύου από το UMTS στο LTE.....33	
Σχήμα 2.4: Δομή και αρχιτεκτονική από το επίπεδο των χρηστών μέχρι το επίπεδο υπηρεσιών.....35	
Σχήμα 2.5: Γραφική απεικόνιση της διασύνδεσης του E-UTRAN και του EPC για τη σύνθεση του συνολικού δικτύου EPS.....36	
Σχήμα 2.6: Λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ E-UTRAN και EPC του δικτύου LTE.....36	
Σχήμα 2.7: Διαστρωμάτωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου LTE.....37	
Σχήμα 2.8: Ενδεικτική απεικόνιση του τρόπου σύνδεσης των διαφόρων τεχνολογιών μεταξύ τους σ' ένα ενιαίο σύστημα.....37	
Σχήμα 2.9: Βασικοί πόροι μετάδοσης δικτύου LTE.....39	
Σχήμα 2.10: Παρεχόμενη ευελιξία στο εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης στο δίκτυο LTE.....40	
Σχήμα 3.1: Απεικόνιση του διεπίπεδου ετερογενούς δικτύου με χρήση δύο ειδών RAT, της τεχνολογίας LTE (Macro BS) και του προτύπου 802.11a (WiFi APs).....47	
Σχήμα 3.2: Ανάδειξη της ασυμμετρίας του όγκου δεδομένων που διακινούνται μεταξύ των ζεύξεων Downlink/Uplink και ανάλυση του είδους πληροφορίας που μεταφέρεται στα κινητά τερματικά.....49	
Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της προσέγγισης που επιτυγχάνει η κατανομή Poisson με παράμετρο στη διωνυμική.....61	
Σχήμα 4.2: Αναπαράσταση της κατανομής Poisson με παράμετρο και των διωνυμικών με πλήθος δοκιμών σε συνάρτηση με την πιθανότητα επιτυχίας.....62	
Σχήμα 4.3: Αναπαράσταση της διαδικασίας αφίξεων των συνεδριών στον BS και σχηματική ανάδειξη του χρόνου διαφίξεων συνεδριών.....66	
Σχήμα 5.1: Απεικόνιση κατανομής των WiFi AP στην επιφάνεια μιας μακροκυψέλης του δικτύου LTE.....71	
Σχήμα 5.2: Απεικόνιση της κατανομής των UEs με σκοπό την ανάδειξη της συνολικής παρεμβολής που δημιουργείται, όταν ένας εξ'αυτών συνδέεται με τον BS του μακροκυψελωτού δικτύου.....78	
Σχήμα 5.3: Απεικόνιση της κατανομής των UEs με σκοπό την ανάδειξη της παρεμβολής που δημιουργείται εντός της περιοχής κάλυψης του WiFi AP με το οποίο συνδέεται ο χρήστης αναφοράς (tagged UE).....79	

Σχήμα 6.1: Η δομή του πλαισίου στο LTE.....	82
Σχήμα 6.2: Ανάδειξη της γραμμικής σχέσης που συνδέει την απόδοση ροής με το φορτίο της κυψέλης.....	87
Σχήμα 6.3: Παρουσίαση του αλγορίθμου Round-Robin.....	89
Σχήμα 6.4: Ρυθμός μετάδοσης του δικτύου LTE για πλήθος ενεργών χρηστών ίσο με 27, στα 5MHz εύρους ζώνης.....	91
Σχήμα 6.5: Γράφημα επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης λήψης αρχείου κάθε χρήστη για διαφορετικές αποστάσεις από τον eNB και για τους διάφορους αλγόριθμους εξυπηρέτησης.....	91
Σχήμα 6.6: Το μοντέλο αναμονής G/G/1.....	93
Σχήμα 6.7: Αλγόριθμος Πιθανοτικής Δρομολόγησης Ροής Δεδομένων...97	
Σχήμα 6.8: Ανάδειξη της πυκνότητας κατανομής των WiFi ανάλογα με την ακτίνα κάλυψής τους.....	106
Σχήμα 7.1: Απεικόνιση των διαστημάτων «ON», «OFF» συναρτήσει του χρόνου στα οποία ο BS είναι ενεργός και σε αναμονή αντίστοιχα.....	115
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα του ολικού συστήματος μετάδοσης του πομποδέκτη ενός σταθμού βάσης του μακροκυψελωτού δικτύου LTE..	116
Σχήμα 7.3: Μπλοκ διαγράμματος του κυκλώματος πομπού και δέκτη στο φυσικό στρώμα του προτύπου 802.11a για OFDM.....	116

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Εύρος ζώνης συστήματος LTE.....	40
Πίνακας 2.2: Συγκριτικός πίνακας των απαιτήσεων επίδοσης για τις τεχνολογίες LTE-Advanced και LTE αντίστοιχα.....	41
Πίνακας 6.1: Κατανομές διαδικασιών άφιξης ενός συστήματος αναμονής.....	93
Πίνακας 6.2: Ρυθμαπόδοση Συστήματος.....	107
Πίνακας 7.1: Συγκεντρωτικός πίνακας ελάχιστης κατανάλωσης ισχύων για τα σενάρια προσμείωσης.....	125

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 4.1: Διωνυμική κατανομή για $n=50$ και $p=0,025$	67
Γράφημα 4.2: Διωνυμική κατανομή για $n=100$ και $p=0,025$	67
Γράφημα 4.3: Διωνυμική κατανομή για $n=1000$ και $p=0,025$	68
Γράφημα 4.4: Ανάδειξη της προσέγγισης της οριακής περίπτωσης της διωνυμικής κατανομής από την κατανομή Poisson για $n=50$ και $p=0,025$	68
Γράφημα 4.5: Ανάδειξη της προσέγγισης της οριακής περίπτωσης της διωνυμικής κατανομής από την κατανομή Poisson για $n=100$ και $p=0,025$	69
Γράφημα 4.6: Ανάδειξη της προσέγγισης της οριακής περίπτωσης της διωνυμικής κατανομής από την κατανομή Poisson για $n=1000$ και $p=0,025$	69
Γράφημα 6.1: Ρυθμοί μετάδοσης δικτύου LTE και WiFi για ακτίνα $R_b=40m$	99
Γράφημα 6.2: Ρυθμοί μετάδοσης δικτύου LTE και WiFi για ακτίνα $R_b=30m$	102
Γράφημα 6.3: Ρυθμοί μετάδοσης δικτύου LTE και WiFi για ακτίνα $R_b=20m$	103
Γράφημα 6.4: Ρυθμοί μετάδοσης δικτύου LTE και WiFi για ακτίνα $R_b=10m$	104
Γράφημα 6.5: Απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης για κατερχόμενη ζεύξη του UE που συνδέεται στο LTE για $R_b=40m$	109
Γράφημα 6.6: Απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης για κατερχόμενη ζεύξη του UE που συνδέεται στο WiFi για $R_b=40m$	109
Γράφημα 6.7: Απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης για κατερχόμενη ζεύξη του UE που συνδέεται στο LTE για $R_b=30m$	110

Γράφημα 6.8: Απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης για κατερχόμενη ζεύξη του UE που συνδέεται στο WiFi για $R_b=30m$	110
Γράφημα 6.9: Απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης για κατερχόμενη ζεύξη του UE που συνδέεται στο LTE για $R_b=20m$	111
Γράφημα 6.10: Απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης για κατερχόμενη ζεύξη του UE που συνδέεται στο WiFi για $R_b=20m$	111
Γράφημα 6.11: Απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης για κατερχόμενη ζεύξη του UE που συνδέεται στο LTE για $R_b=10m$	112
Γράφημα 6.12: Απεικόνιση του ρυθμού μετάδοσης για κατερχόμενη ζεύξη του UE που συνδέεται στο WiFi για $R_b=10m$	112
Γράφημα 7.1: Γραφική παράσταση της μέσης συνολικής κατανάλωσης ισχύος συναρτήσει της πιθανότητας p που ορίζει ο αλγόριθμος πιθανοτικής δρομολόγησης για $R_b=40m$	119
Γράφημα 7.2: Γραφική παράσταση της μέσης συνολικής κατανάλωσης ισχύος συναρτήσει της πιθανότητας p που ορίζει ο αλγόριθμος πιθανοτικής δρομολόγησης για $R_b=30m$	120
Γράφημα 7.3: Γραφική παράσταση της μέσης συνολικής κατανάλωσης ισχύος συναρτήσει της πιθανότητας p που ορίζει ο αλγόριθμος πιθανοτικής δρομολόγησης για $R_b=20m$	121
Γράφημα 7.4: Ανάδειξη του σημείου ελάχιστης ισχύος κατανάλωσης του Γραφήματος 7.3.....	121
Γράφημα 7.5: Γραφική παράσταση της μέσης συνολικής κατανάλωσης ισχύος συναρτήσει της πιθανότητας p που ορίζει ο αλγόριθμος πιθανοτικής δρομολόγησης για $R_b=10m$	122
Γράφημα 7.6: Ανάδειξη του σημείου ελάχιστης ισχύος κατανάλωσης του Γραφήματος 7.5.....	123
Γράφημα 7.7: Συγκριτική απεικόνιση των μέσων ισχύων κατανάλωσης για τις διάφορες περιπτώσεις ακτίνων κάλυψης των WiFi.....	124

Γράφημα 7.8: Γραφική παράσταση της μέσης συνολικής κατανάλωσης ισχύος συναρτήσει της πιθανότητας p που ορίζει ο αλγόριθμος πιθανοτικής δρομολόγησης για ακτίνα μακροκυψέλης ίση με $R_{cell}=1000m$ και $R_b=40m$124

Γράφημα 7.9: Ανάδειξη του σημείου ελάχιστης ισχύος κατανάλωσης του Γραφήματος 7.8.....125

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Τον τελευταίο καιρό έχει παρατηρηθεί μια κολοσσιαία αύξηση στη κίνηση δεδομένων. Αυτή η ζήτηση για αύξηση της κίνησης των δεδομένων οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη σημαντική διείσδυση των smartphones, των laptop και των tablets στην αγορά, τερματικά που εξυπηρετούν εφαρμογές όπως Live streaming, HD Video, Online Gaming, γρήγορη πλοήγηση στο internet, uploading/downloading εικόνων σε ελάχιστο χρόνο, οι οποίες έχουν υψηλές απαιτήσεις ευρυζωνικότητας [3]. Σύμφωνα με εκθέσεις της Cisco οι απαιτήσεις σε κίνηση δεδομένων πρόκειται να αυξηθούν ακόμη περισσότερο και μέχρι το 2017 θα είναι 13 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με σήμερα. Να αναφέρουμε ενδεικτικά ότι κατά προσέγγιση θα μιλάμε για περίπου 5,2 δισεκατομμύρια χρήστες με 13,2 Exabytes να διακινούνται μηνιαίως, ενώ τα δεδομένα που απαιτούνται μόνο για τη μεταφορά αρχείων τύπου video μέσω κινητών τερματικών συσκευών θα αγγίξουν το 66% των συνολικών δεδομένων κίνησης του δικτύου, ποσοστό σημαντικά αυξημένο συγκριτικά με το 51% του 2012. Ένας ικανός αριθμός μελετών έδειξε μάλιστα ότι από τα τις αρχές του 2008 η κίνηση των δεδομένων μέσα από δίκτυα κινητών επικοινωνιών αυξάνει κάθε χρόνο κατά 100% και θα συνεχίσει να αυξάνει επ' αόριστον προσεγγίζοντας μια x1000 αύξηση στον όγκο δεδομένων τη δεκαετία 2007-2016.

Η ραγδαία λοιπόν αύξηση της ζήτησης για μεταφορά δεδομένων άρχισε να προκαλεί υπερφόρτωση στα παραδοσιακά κυψελωτά δίκτυα - ειδικά σε μητροπολιτικές περιοχές – με αποτέλεσμα τα συστήματα να αναγκάζονται να λειτουργούν στα όρια της χωρητικότητάς τους και πολλές φορές πάνω από αυτά. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είχε ως συνέπεια τη σημαντική κλιμάκωση της εμπειρίας του χρήστη, η οποία κάθε φορά εξαρτιόταν απ' τη διαθεσιμότητα των ραδιοπόρων του φάσματος της κυψέλης στην οποία ανήκει. Για το λόγο αυτό οι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών δικτύων άρχισαν να προθυμοποιούνται ούτως ώστε να βρουν άμεσες και καινοτόμες εναλλακτικές λύσεις οι οποίες θα δρουν συμπληρωματικά με το υπάρχον δίκτυο προκειμένου να ανακουφίζουν τη πίεση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που δημιουργείται κυρίως σε σημεία με μεγάλο αριθμό συνδρομητών.

Η ολοκληρωτική αναβάθμιση του δικτύου 4G (LTE-Advanced), καθώς και η ανάπτυξη επιπρόσθετων δικτυακών υποδομών ήταν ανάμεσα στις λύσεις που προτάθηκαν. Ωστόσο οι παραπάνω ιδέες δεν προωθήθηκαν εξαιτίας του υπέρογκου κόστους (ενοικίαση μεγαλύτερου εύρους ζώνης συχνοτήτων, ανάπτυξη και συντήρηση των δομών του δικτύου, αύξηση ενεργειακών απαιτήσεων κ.α) που τις συνόδευε, χωρίς να υπάρχει κάποια προοπτική για αντίστοιχη αύξηση στα έσοδα των λειτουργιών.

Μια αρκετά ελκυστική λύση ήταν η ανάπτυξη ετερογενών σταθμών βάσης υποστρωματικά, παράλληλα με το μακρο-κυψελωτό δίκτυο. Η πρόταση αυτή δεν ήταν μόνο καινοτόμα αλλά και οικονομικά συμφέρουσα αφού περιλαμβάνει σ' ένα μεγάλο ποσοστό αξιοποίηση του ήδη υπάρχοντος εξοπλισμού, μειώνοντας έτσι σημαντικά το κόστος υλοποίησης της πολυπόθητης αναβάθμισης της δικτυακής υποδομής.

Σύμφωνα με αυτή, μέσα σ' ένα ετερογενές δίκτυο θα υπάρχουν διάφορες κατηγορίες κόμβων χαμηλής ισχύος (Low Power Nodes-LPNs) που θα είναι κατανομημένοι σ' όλη

την έκταση του μακρο-κυψελωτού δικτύου. Στους κόμβους χαμηλής ισχύος περιλαμβάνονται οι: micro Σταθμοί Βάσης (eNodeBs - eNBs), οι pico eNBs, οι φεμτοκυψέλες που καλύπτουν κυρίως περιοχές εντός των σπιτιών (home eNBs-femtocells), αναμεταδότες (Replays) και κατανομημένα κεραιοσυστήματα (Distributed Antenna Systems-DAS ή Remote Radio Heads-RRHs). Η λογική των ετερογενών δικτύων είναι να παρέχουν μέσω της κλασικής μακρο-κυψέλης μια γενική ευρεία κάλυψη της περιοχής για την οποία έχουν σχεδιαστεί να εξυπηρετούν και μέσα σε αυτή να αναπτύσσονται στοχευμένα διάφοροι LPNs που θα ανακουφίζουν τις «νεκρές» ζώνες (περιοχές με χαμηλή ποιότητα σήματος - dead zones) καθώς και τις υποπεριοχές εντός της κυψέλης στις οποίες παρατηρείται αυξημένη ζήτηση για μεταφορά δεδομένων (hot zones).

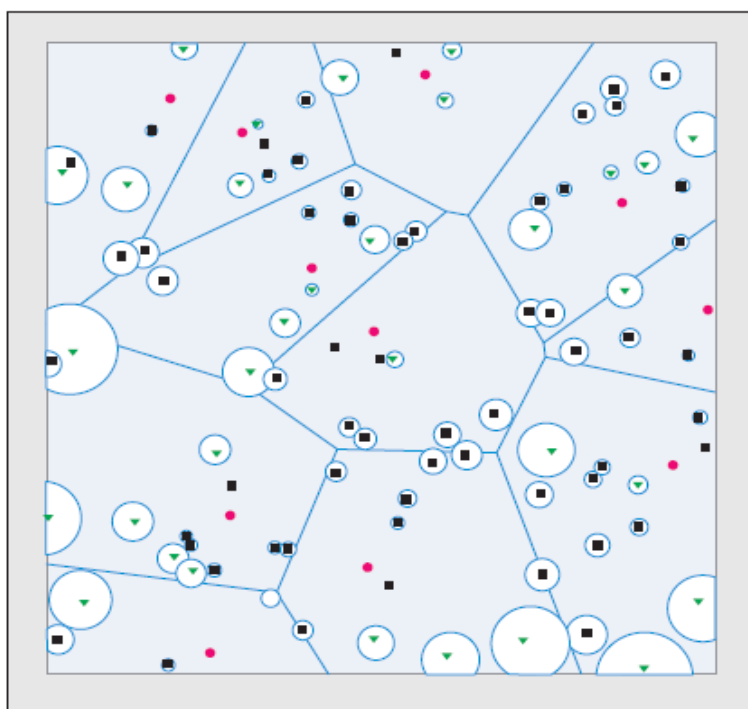
Ο τρόπος αυτός, για την εκφόρτωση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης (offloading) μέσα από ετερογενή δίκτυα έγινε πολύ γρήγορα δημοφιλής κι άρχισε να αναπτύσσεται κατά κόρον. Το 2012 μάλιστα, το 33% του συνόλου των δεδομένων που μεταφέρθηκαν έγινε μέσω offloading, ενώ οι προβλέψεις αναφέρουν ότι το ποσοστό αυτό θα αυξηθεί στο 46% μέχρι το 2017. Το μεγαλύτερο μέρος της προσοχής τράβηξε η εκφόρτωση δεδομένων μέσω WiFi, κι όχι άδικα. Τα WiFi λειτουργούν ως Σημεία Πρόσβασης (Access Points - AP) προσφέροντας εναλλακτική διαδρομή της ροής πληροφορίας και η τεχνική αυτή παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα όπως χαμηλό κόστος υλοποίησης καθώς και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Δεν πρέπει να παραβλέπεται επίσης το γεγονός πως η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ευρέως ανεπτυγμένη κι έτσι μειώνεται το κόστος της υπηρεσίας και για τον τελικό καταναλωτή.

Στην παρούσα διπλωματική προσεγγίζεται το θέμα της εκφόρτωσης της κίνησης δεδομένων από πλευράς “on-the-spot”, δηλαδή όταν υπάρχει διαθεσιμότητα σε WiFi όλα τα δεδομένα αποστέλλονται μέσω WiFi, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η αποστολή τους γίνεται κανονικά από το κυψελωτό δίκτυο. Τελευταία έχει προταθεί μια ακόμα λύση η οποία περιλαμβάνει εκφόρτωση της κίνησης δεδομένων με χρονο-καθυστερήση, κατά την οποία, σε περίπτωση μη διαθεσιμότητας WiFi η αποστολή μέρους της κίνησης μπορεί να καθυστερήσει μέχρι ενός συγκεκριμένου χρονικού κατωφλίου αντί να σταλεί απευθείας από το κυψελωτό δίκτυο. Σε περίπτωση που δεν εντοπιστεί όμως κάποιο διαθέσιμο Σημείο Πρόσβασης (AP) μέσα σε αυτό το χρονικό πλαίσιο, τότε η ροή πληροφορίας ακολουθεί την παραδοσιακή διαδρομή μέσω του Σταθμού Βάσης (Base Station – BS) της μακροκυψέλης. Η δεύτερη λύση που προτάθηκε, βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο μελετών και συζητήσεων χωρίς να είναι γνωστές σημαντικές παράμετροι, όπως ο χρόνος που είναι πρόθυμος ο κάθε χρήστης να περιμένει μέχρι να γίνει η μετάδοση πακέτων προς αυτόν. Επίσης απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στη δικτυακή υποδομή του συστήματος κυρίως στα πρωτόκολλα ανώτερου στρώματος (π.χ TCP) και συνεπώς γίνεται απλή αναφορά σε αυτή χωρίς να επικεντρωθούμε περαιτέρω. Από εδώ και στο εξής όταν αναφερόμαστε σε offloading κίνησης δεδομένων, θα εννοούμε την on-the-spot.

Παρ’όλο που η “on-the-spot” εκφόρτωση της κίνησης δεδομένων χρησιμοποιείται ήδη και η αποτελεσματικότητά της στη μείωση του φορτίου του δικτύου έχει αποδειχτεί οσάκις, δεν είναι ακόμα σαφές το πως επηρεάζουν την συνολική απόδοση του

συστήματος παράγοντες όπως: η διαθεσιμότητα των WiFi ως AP, η μέση απόδοση των συστημάτων WiFi εντός της περιοχής κάλυψης που δραστηριοποιούνται καθώς και η ύπαρξη εξελιγμένων τεχνολογιών όπως το LTE. Υπό συζήτηση βρίσκεται επιπλέον, το κατά πόσο η εκφόρτωση της κίνησης των δεδομένων μέσω ετερογενών δικτύων έχει άμεσα ωφέλη και για τον ίδιο το χρήστη όσον αφορά την απόδοσή του, τη μειωμένη κατανάλωση μπαταρίας κ.α. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι τα παραπάνω ωφέλη είναι άμεσα εξαρτώμενα με τη διαθεσιμότητα και την επίδοση των δικτύων WiFi που υπάρχουν στο χώρο.

Παραθέτουμε στη συνέχεια μια γενική απεικόνιση μιας περιοχής η οποία καλύπτεται από σταθμούς βάσης του παραδοσιακού μακρο-κυψελωτού δικτύου και εντός των κυψελών κατανέμονται σε συγκεκριμένες θέσεις σημεία πρόσβασης όπως πικοκυψέλες και φεμτοκυψέλες δημιουργώντας ετερογένεια στο συνολικό δίκτυο. Τα όρια κάλυψης των μικρότερων κυψελών παρατίθενται με κύκλους γύρω από τα σημεία πρόσβασής τους.



Σχήμα 1.1: Απεικόνιση περιοχών κάλυψης για την κατερχόμενη ζεύξη (downlink) σε δίκτυο 3 επιπέδων (3-tier) με μακροκυψέλες (κόκκινο), πικο-κυψέλες (πράσινο) και φεμτο-κυψέλες (μαύρο) [7].

Η μελέτη του τρόπου της εκφόρτωσης της κίνησης δεδομένων αποτελεί σίγουρα ένα αρκετά σύνθετο πρόβλημα με πολλούς και διαφορετικούς παράγοντες να λαμβάνουν το δικό τους ρόλο. Η ολοένα αυξανόμενη ετερογενής ανάπτυξη του παρόντος και του μελλοντικού κυψελωτού περιβάλλοντος με μερική κάλυψη διαφορετικών τεχνολογιών αναλόγα με την περιοχή που βρίσκεται ο χρήστης (GPRS, EDGE, HSPA/HSPDA, LTE) καθώς και η συνεχής αύξηση του αριθμού των χρησιμοποιούμενων «μικρών κυψελών» (φεμτοκυψέλες, πικοκυψέλες) περιπλέκει ακόμα περισσότερο τη κατάσταση. Αν συνυπολογίσουμε στα παραπάνω το βαθμό κινητικότητας του χρήστη, τις παρεμβολές που υπάρχουν από γειτονικές κυψέλες, τις παρεμβολές χρηστών από την ίδια κυψέλη στην οποία ανήκει ο χρήστης όπως επίσης και το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται (αστικό, ημιαστικό κλπ) τότε γίνεται κατανοητό ότι ο βαθμός πολυπλοκότητας του προβλήματος αυξάνεται σημαντικά. Γι' αυτό το λόγο γίνονται κατάλληλες μοντελοποιήσεις, που αναλύονται στη συνέχεια, οι οποίες απλοποιούν κατά ένα μέρος τη συνθετότητα του ζητήματος, διατηρώντας παράλληλα την εγκυρότητα και την αρτιότητα των επιστημονικών συμπερασμάτων που εξάγουμε, στο ακέραιο.

Κεφάλαιο 2. Η πορεία από το GSM στο LTE και Ενδιάμεσες Τεχνολογίες

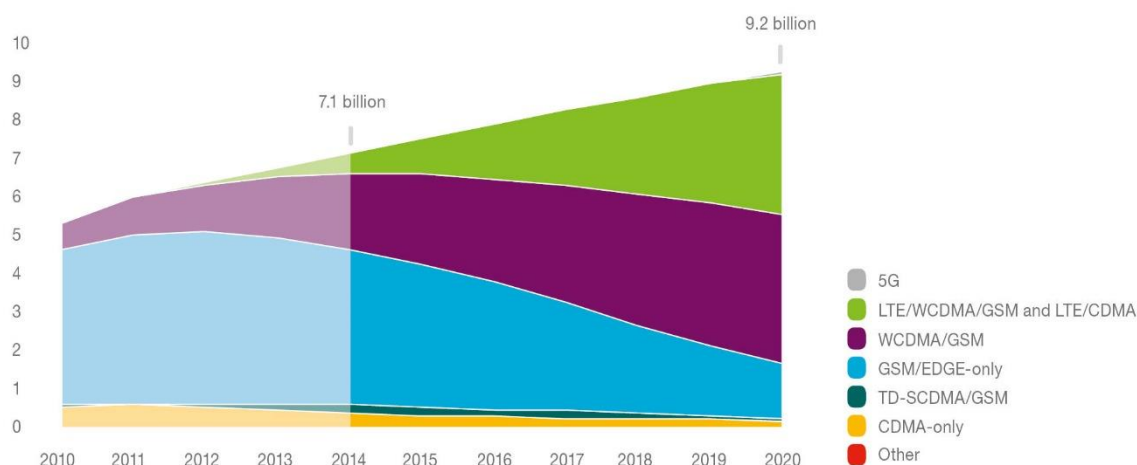
2.1 Κυψελωτά Συστήματα 2^{ης} Γενιάς (2G) - Global System for Mobile Communications (GSM)

Το σύστημα GSM ήταν από τα πρώτα εμπορικά κυψελωτά συστήματα που υλοποιήθηκαν με μεγάλη επιτυχία στην Ευρώπη και μάλιστα χαρακτηρίστηκε ως το πλέον επιτυχημένο παγκοσμίως συγκριτικά με τα αντίστοιχα IS-54, IS-136, IS-95 της Αμερικής και το PDC της Ιαπωνίας. Σχεδιάστηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Προτυποποίησης (ETSI) που ιδρύθηκε το 1988 γι' αυτό το σκοπό και υλοποιήθηκε εξ ολοκλήρου στην Ευρώπη. Η τεχνική στην οποία στηρίχθηκε είναι η FDMA με απόσταση μεταξύ φερόντων 200kHz, ωστόσο συνδυάζει και τεχνική TDMA με σύστημα διαίρεσης συχνότητας (FDD) λόγω της ζητούμενης κάλυψης μεγάλων αποστάσεων με υψηλή ισχύ εκπομπής. Κάθε φέρον σήμα διαθέτει οκτώ (8) διαύλους-χρονοσχισμές με διάρκεια χρονοσχισμής τα 0,577msec, χρησιμοποιεί τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης GMSK και έχει τελικό ρυθμό μετάδοσης τα 270,8kbps.

Το δίκτυο GSM υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής (6,5kbps) και δεδομένων μέχρι 9,6kbps με τις υπηρεσίες αυτές να προσφέρονται μέσω τεχνικών μεταγωγής κυκλώματος. Το σύστημα έχει βελτιστοποιηθεί για τερματικές συσκευές χειρός με μέγιστη ισχύ εκπομπής τα 250mWatt ή το 1 Watt ενώ παράλληλα υποστηρίζει την επικάλυψη κυψελών διαφορετικού μεγέθους (μακροκυψέλες, μικροκυψέλες).

Πρόσφατη έρευνα που έγινε το Μάιο του 2013 έδειξε πως τα υπάρχοντα δίκτυα GSM αποτελούν πλειοψηφία δικτύων κινητών επικοινωνιών παρέχοντας ασύρματες ψηφιακές υπηρεσίες σε περισσότερους από 2,5 δισεκατομμύρια συνδρομητές. Βέβαια από το 2013 μέχρι σήμερα, ο αριθμός των συνδρομητών στα δίκτυα GSM έχει μειωθεί σημαντικά μιας και πλέον έχουν αρχίσει να επικρατούν τα συστήματα 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς, όπως μας το επιβεβαιώνει το σενάριο πρόβλεψης της μελέτης που πραγματοποίησε πρόσφατα η Ericsson.

Mobile subscriptions by technology (billion)



Σχήμα 2.1: Καμπύλες πρόβλεψης για το πλήθος συνδρομητών κινητών επικοινωνιών από την Ericsson έως το 2020 [71].

2.2 Κυβελωτά Συστήματα 2.5^{ης} Γενιάς (2.5G) - General Packet Radio Service (GPRS)

Τα κυβελωτά συστήματα 2^{ης} γενιάς έδωσαν τη δυνατότητα παροχής φωνητικών υπηρεσιών πολύ καλής ποιότητας, ωστόσο η υποστήριξη υπηρεσιών δεδομένων ήταν σημαντικά περιορισμένη. Η ανάγκη που δημιουργήθηκε για παροχή υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης ώστε να μεταδίδονται εικόνες και video υψηλής ποιότητας σε πραγματικό χρόνο καθώς επίσης και η χρεία πρόσβασης στο διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες πλοήγησης οδήγησε στη σχεδίαση των συστημάτων 2.5G. Ουσιαστικά, πρόκειται τα συστήματα που μας παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλότερης ταχύτητας υποστηρίζοντας τεχνολογίες μεταγωγής πακέτου. Το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η παροχή κινητικότητας IP, φέρνοντας έτσι τους χρήστες κινητών επικοινωνιών πιο κοντά στην ιδέα του Internet εξασφαλίζοντας παράλληλα μια ομαλότερη μετάβαση στα συστήματα 3^{ης} γενιάς (3G).

Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας GPRS είναι η αποδοτικότερη αξιοποίηση των υπαρχόντων ραδιοπόρων του δικτύου GSM, υποστηρίζοντας ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 112kbps, ταχύτητα αισθητά βελτιωμένη αν αναλογιστεί κανείς πως τα 9,6kbps αποτελούσαν το όριο στα συστήματα 2^{ης} γενιάς. Ωστόσο ο παραπάνω ρυθμός μετάδοσης αποτελεί μόνο ονομαστικό μέγεθος και κανείς δεν μπορεί να εγγυηθεί ταχύτητες κοντά στο όριο αυτό, μιας και η τεχνολογία GPRS αξιοποιεί τους ραδιοπόρους που δεν χρησιμοποιούνται από το GSM και συνεπώς δεν μπορεί να είναι γνωστή η διαθεσιμότητα των ραδιοδιαύλων εκ των προτέρων. Για να είναι εφικτή η ταυτόχρονη λειτουργία του GPRS με το GSM έγιναν κάποιες τροποποιήσεις στην αρχική δομή του δικτύου με πιο βασικές την τοποθέτηση δυο επιπλέον κόμβων: α) του Gateway GPRS Support Node (GGSN) και β) του Serving GPRS Support Node (SGSN).

Μετεξέλιξη της τεχνολογίας GPRS αποτέλεσε η τεχνολογία EDGE (Enhanced Data for Global Evolution) η οποία χρησιμοποιεί διαφορετική διαμόρφωση, την 8-PSK και διαφορετικούς τύπους κωδικοποίησης διαύλου. Το αποτέλεσμα ήταν μια αύξηση του ρυθμού μετάδοσης πάνω από τη ραδιοεπαφή του GSM υποστηρίζοντας ταχύτερους ρυθμούς που αγγίζουν τα 384kbps.

Με τη εξέλιξη του EDGE, κάθε χρονοσχισμή πλέον μπορεί να εξυπηρετήσει πολλούς χρήστες κι έτσι πέραν από την αύξηση της ταχύτητας του δικτύου έχουμε και σημαντική αύξηση της χωρητικότητάς του. Παρ'όλο που το EDGE μας έφερε ακόμα πιο κοντά στα συστήματα 3G, αποτελεί απλώς μια προσθήκη του GPRS και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, αδυνατώντας να αποτελέσει μια ξεχωριστή κατηγορία «νέας γενιάς» συστημάτων.

2.3 Κυβελωτά Συστήματα 3^{ης} Γενιάς (3G) - High Speed Packet Access (HSPA)

Τα συστήματα 3^{ης} γενιάς είναι αυτά που έφεραν ουσιαστικά την επανάσταση στον κλάδο των κινητών επικοινωνιών. Το βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών είναι η υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων καθώς και η πρόσβαση σε πληροφορίες και υπηρεσίες από δημόσια ή ιδιωτικά δίκτυα με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Οι βασικές απαιτήσεις που τέθηκαν στα 3G συστήματα ήταν μεταξύ άλλων:

- Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων έως και 2Mbps
- Πολυπλεξία υπηρεσιών στην ίδια σύνδεση με διαφορετικές απαιτήσεις όπως π.χ. φωνή, video, πακέτα δεδομένων
- Μεγάλη φασματική απόδοση
- Υποστήριξη ασύμμετρης τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε uplink και downlink
- Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ποιότητας ανάλογα με την υπηρεσία, από 10% Frame Error Rate (FER) ως 10^{-6} BER
- Συνύπαρξη συστημάτων διαίρεσης χρόνου (TDD) και διαίρεσης συχνότητας (FDD)

Οι συχνότητες που αποδόθηκαν στα συστήματα 3^{ης} γενιάς στην Ευρώπη είναι:

- Για WCDMA FDD συστήματα, 2*60 MHz: 1920-1980 MHz uplink, 2110-2170 MHz downlink
- Για WCDMA TDD συστήματα με υποχρέωση άδειας, 25 MHz: 1900-1920 MHz και 2020-2025 MHz
- Για WCDMA TDD συστήματα χωρίς υποχρέωση άδειας (SPA), 10 MHz: 2010-2020 MHz

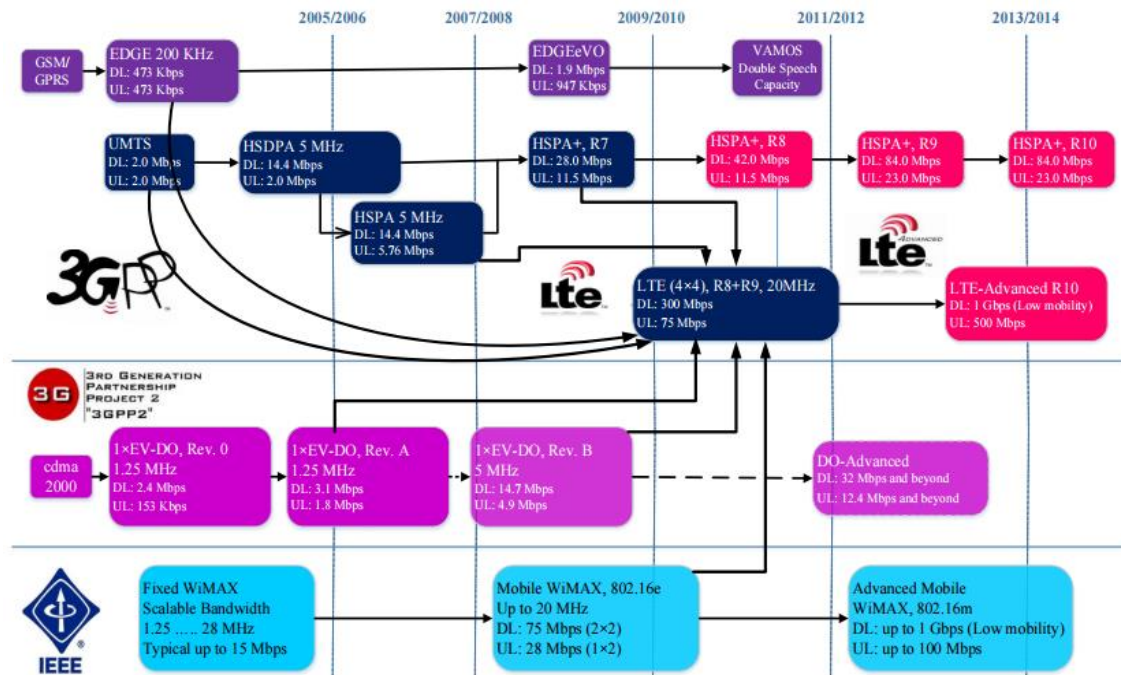
Για την τεχνική WCDMA το εύρος διαύλου που επιλέχθηκε είναι 5MHz με ακολουθία διασποράς ρυθμού Mcps και κάθε φέρον διαιρείται σε χρονο-πλαίσια των 10msec έκαστο απ'τα οποία διαθέτει 15 χρονοσχισμές (timeslots). Η τεχνολογία HSPA εισήχθη στην έκδοση R5 της προδιαγραφής για τα δίκτυα 3G παρέχοντας εμπορικές υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων πολύ υψηλής ταχύτητας όπως πρόσβαση στο διαδίκτυο με πολύ ταχείς ρυθμούς, ανάκτηση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου με συνημμένα αρχεία, πρόσβαση σε ασύρματες υπηρεσίες ήχου και video, ανάκτηση εικόνων υψηλής ανάλυσης κ.α. Στην έκδοση R5 που προαναφέραμε, έγινε εισαγωγή της τεχνολογίας High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) για την κάτω ζεύξη, ενώ στην έκδοση R6 εισήχθη η τεχνολογία High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) για τη ζεύξη Σταθμού Βάσης (BS) – Χρήστη (UE) (Ανω Ζεύξη).

Ακολούθησαν νέες εκδόσεις των προδιαγραφών του HSPA, με την τεχνολογία HSPA+ να εντάσσεται στις εκδόσεις R7-R10 και η HSPA+Advanced στην έκδοση R11, το 2012 από το 3GPP. Με τις τρέχουσες υλοποιήσεις των δικτύων HSPA υποστηρίζονται ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων έως και 337 Mbps σε downlink, οι οποίοι επιτεύχθηκαν κυρίως λόγω των νέων καναλιών που ορίστηκαν στο στρώμα μετάδοσης, της χρήσης τεχνικών διαμόρφωσης μέχρι και 64-QAM, της χρησιμοποίησης τεχνικών MIMO τάξεως ως 4x4 καθώς και της δυνατότητας διάθεσης εύρους ζώνης μέχρι και 20 MHz.

2.4 Κυψελωτά Συστήματα 4^{ης} Γενιάς (4G) – Long Term Evolution (LTE) και LTE-Advanced

Η ανάγκη που δημιουργήθηκε τα τελευταία χρόνια για ενσωμάτωση των υπηρεσιών του διαδικτύου από τις κινητές συσκευές με ρυθμούς μετάδοσης που να ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο, καθιστώντας τις υπηρεσίες αυτές λειτουργικές, οδήγησε σε αυτό που σήμερα γνωρίζουμε ως ευρυζωνική κινητή τεχνολογία. Η τάση αυτή που αναπτύχθηκε, κατέστησε αναγκαία την δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών που βασίζονται στο πρωτόκολλο IP, από κινητά τερματικά. Αν συνυπολογίσουμε στα ανωτέρω, την περαιτέρω εξέλιξη πολυμερών υπηρεσιών όπως multimedia telephony, mobile-TV, real time multimedia gaming κ.α -υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις λειτουργίας- γίνεται κατανοητό πως η στροφή της τεχνολογικής κοινότητας στην αναβάθμιση και εξέλιξη των υπάρχοντων δικτυακών υποδομών, ήταν μονόδρομος. Αποτέλεσμα της τεχνολογικής πορείας που ακολούθησε ήταν η ανάπτυξη των συστημάτων 4^{ης} γενιάς όπως το LTE, το LTE-Advanced και το WiMAX.

Τα κυψελωτά συστήματα 4^{ης} γενιάς αποτελούν ουσιαστικά συνέχεια των προδιαγραφών του 3GPP και του IEEE όσον αφορά την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών σε κινητά τερματικά. Το LTE που αποτελεί τις εκδόσεις R8, R9 του 3GPP και ιδιαίτερα το LTE-Advanced που αποτελεί την έκδοση R10 και την ανερχόμενη R11 αποτελούν τις πρώτες προδιαγραφές που ήρθαν για να αντιμετωπίσουν με αξιώσεις τις απαιτήσεις για ακόμα ταχύτερους ρυθμούς μετάδοσης σε πληθώρα από περιβάλλοντα και για χρήστες στις πλέον απομακρυσμένες και «δύσκολες» περιοχές των κυψελών.



Σχήμα 2.2: Η πορεία από το GSM στο LTE-Advanced [2].

2.4.1 Διαδικασία Τυποποίησης του 3GPP

Ο φορέας 3GPP (3rd Generation Partnership Project) ιδρύθηκε το 1998, με σκοπό τη παραγωγή παγκόσμιων προδιαγραφών για τα 3G συστήματα κινητών επικοινωνιών, τα οποία θα είχαν ως βάση ένα εξελιγμένου τύπου δίκτυο κορμού του GSM, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων πρόσβασης UTRA FDD που βασίζονται στην τεχνική WCDMA καθώς και των συστημάτων UTRA TDD που βασίζονται στην τεχνική TD-CDMA. Ο 3GPP συνιστά το αποτέλεσμα της συνεργασίας των οργανισμών τυποποίησης ETSI, TTC, TTA, ARIB, CCSA, ATIS και είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη των προτύπων 2G GSM, 3G UTRA καθώς και των νεότερων LTE, LTE-Advanced.

Ο φορέας αποτελείται από τέσσερις (4) ομάδες εργασίας τεχνικών προδιαγραφών (Technical Specification Groups) και πλέον πέραν από τον αρχικό σκοπό δημιουργίας του, ο 3GPP είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη, συντήρηση και έγκριση των προδιαγραφών όλων των συστημάτων μέχρι σήμερα, GSM/EDGE (2G/2.5G), UTRA (3G) και E-UTRA (LTE-4G). Ο κύκλος εργασιών του φορέα πραγματοποιείται σε

συνεργασία με την ITU, η οποία πραγματοποιεί σχετικές συστάσεις και μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία έγκρισης οι προδιαγραφές που προέκυψαν από την τεχνική μελέτη παραδίδονται σε έγγραφα και στη συνέχεια κατηγοριοποιούνται στις επονομαζόμενες εκδόσεις (Releases) του 3GPP. Παρακάτω αναφέρουμε ενδεικτικά τις εκδόσεις R8-R11, που αποτελούν τις προδιαγραφές των τεχνολογιών LTE/LTE-Advanced [2].

Release 8 (R8)

December 2008

- First Edition of LTE, EPC-SAE
- Spectrum Flexibility
- Multi antenna transmission
- ICIC

Release 9 (R9)

December 2009

- Spectrum Flexibility
- Multi antenna transmission
- ICIC
- LTE Positioning
- Home eNodeB specification (femto-cell)
- MBMS (Broadcast/ Multicast Services)
- LTE MIMO: dual-layer beamforming

Release 10 (R10)

March 2011

- LTE-Advanced
- Carrier Aggregation
- Wireless Relaying
- eICIC
- CoMP transmission/reception
- Enhanced downlink MIMO
- Uplink MIMO
- Relay Node [HeNB] (femto-cell)

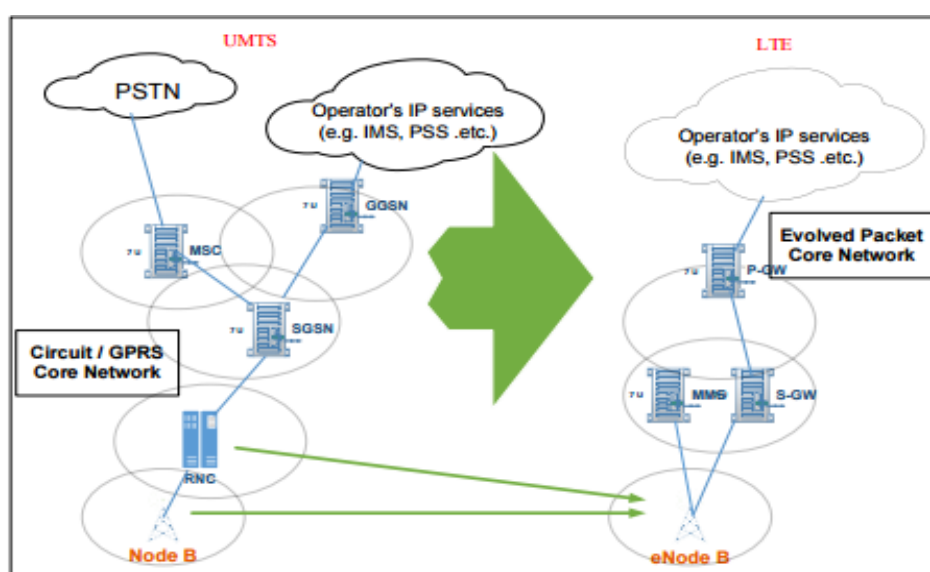
Release 11 (R11)

- LTE-Advanced
- Enhanced Carrier Aggregation
- Intra band Carrier Aggregation
- Advanced IP Interconnection of Services
- System Improvements to Machine-Type Communications
- QoS Control Based on Subscriber Spending Limits
- Optimized Service Charging and Allocation of Resources in IMS whilst Roaming
- Non Voice Emergency Services
- Anonymous Call Rejection in the CS domain
- Network-provided Location information for IMS (NETLOC)

2.4.2 Προδιαγραφές ΙΕΕΕ δικτύου LTE

Στο σημείο αυτό θα πρέπει αρχικά να τονίσουμε ότι οι τεχνολογίες LTE και LTE-Advanced (LTE-A) αποτελούν ίδια τεχνολογία απλά ο όρος “Advanced” τοποθετήθηκε για να κάνει σαφή τη σχέση μεταξύ της έκδοσης R10 του 3GPP για το LTE-Advanced και των προδιαγραφών ITU/IMT-Advanced. Συνεπώς, το LTE-A δεν διαφοροποιείται από το σύστημα LTE και σαφέστατα δεν συνιστά το τελικό στάδιο εξέλιξης αυτής της τεχνολογίας. Λόγω του ότι το LTE αποτελεί δίκτυο μεταγενέστερης τεχνολογίας, αναπτύχθηκαν πολλές προδιαγραφές ώστε το πρότυπο να είναι συμβατό με πλήθος διαφορετικών τεχνολογικών συστημάτων αλλά και σεναρίων χρήσης. Κατά τη σχεδίαση του LTE τέθηκαν κάποιες προδιαγραφές οι οποίες θα είχαν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά και ταυτόχρονα θα παρείχαν το κάτι παραπάνω στην υπάρχουσα υποδομή, εξελίσσοντάς τη. Οι στόχοι που ορίστηκαν λοιπόν, ήταν:

- Υποστήριξη πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης, οι οποίοι έχουν μέγιστη τιμή τα 100Mbps για το Downlink και τα 50Mbps για το Uplink
- Εξοικονόμηση εύρους ζώνης, με αποτέλεσμα οι παραπάνω ρυθμοί να επιτυγχάνονται μεταξύ 1,4 και 20 MHz
- Δυνατότητα υποστήριξης κινητικότητας χρήστη με ταχύτητες έως και 350km/h
- Πολλαπλή πρόσβαση με τεχνικές OFDMA και SC-FDMA για το Downlink και Uplink αντίστοιχα
- FDD, TDD καθώς και half duplex FDD
- Υποστήριξη συστημάτων MIMO 2x2, 4x2, 4x4 για το Downlink και 1x2, 1x4 για το Uplink με στόχο την επίτευξη ακόμα μεγαλύτερων ρυθμών. Συγκεκριμένα στο Downlink με σύστημα MIMO 2x2 η ταχύτητα φτάνει τα 172Mbps, ενώ για 4x4 τα 326Mbps στα 20MHz. Ομοίως, για το Uplink με MIMO 1x2 μπορούμε να επιτύχουμε ρυθμούς έως 86Mbps.



Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του δικτύου από το UMTS στο LTE

2.4.3 Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης και Δίκτυο Κορμού

Για την επίτευξη όλων των ανωτέρω στόχων ήταν απαραίτητο να συνδυαστεί μια ενδυναμωμένη τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης μαζί με μια νέα αρχιτεκτονική συστήματος. Με βάση την προϋπόθεση αυτή, διακρίνουμε στο δίκτυο EPS (Evolved Packet System) που χρησιμοποιείται, δυο βασικά μέρη:

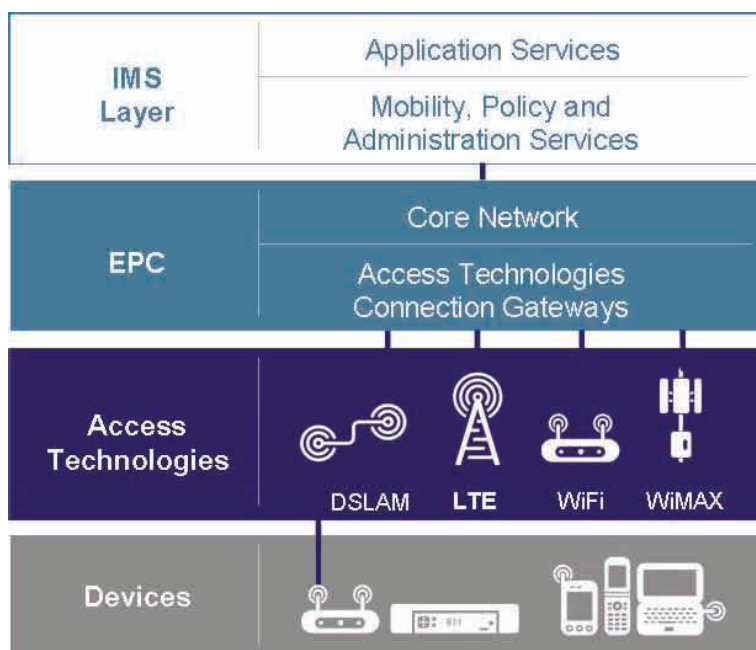
- i. Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης (E-UTRAN)
- ii. Δίκτυο Κορμού (EPC- Evolved Packet Core)

Το **Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης** (RAN) για το LTE ονομάζεται E-UTRAN (Evolved UMTS Radio Access Network) και συνδυάζει πολλαπλούς κόμβους eNBs σε μια ενιαία

δικτυακή οντότητα. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι η υποστήριξη υπηρεσιών-πραγματικού χρόνου και μη- με τη χρήση πρωτοκόλλων IP. Ο σχεδιασμός του τμήματος αυτού αποσκοπεί στη βελτίωση των ρυθμών διέλευσης των τελικών χρηστών, τη χωρητικότητα των τομέων των κυψελών καθώς και τη μείωση της καθυστέρησης που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Η κίνηση για υπηρεσίες ομιλίας υποστηρίζεται αποκλειστικά ως Voice over IP (VoIP), προσέγγιση που επιτρέπει την επίτευξη αυξημένης φασματικής απόδοσης και συνεπώς αυξημένη χωρητικότητα στο δίκτυο.

Βασικά χαρακτηριστικά του E-UTRAN:

✓ Ευέλικτη χρησιμοποίηση του φάσματος
✓ Μειωμένη καθυστέρηση τελικού χρήστη λόγω του συνδυασμού του Node B και του RNC στην αρχιτεκτονική του UMTS, σε έναν ενιαίο κόμβο τον eNodeB
✓ x10 αποτελεσματικότερη μετάδοση φωνητικών κλήσεων από το GSM με χωρητικότητα που προσεγγίζει τους 200 χρήστες ανά κυψέλη στα 5MHz
✓ Χρήση τεχνικών πολλαπλών κεραιών και τεχνικών «beamforming»
✓ Υψηλά επίπεδα ασφάλειας τόσο στο Κεντρικό Δίκτυο όσο και στο Δίκτυο Πρόσβασης
✓ Υποστήριξη κινητικότητας χρηστών με ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες που φτάνουν μέχρι και τα 500km/h
✓ Χρήση τεχνολογιών βασισμένες στην OFDM που παρέχουν αυξημένη αξιοπιστία παράδοσης
✓ Κάλυψη που επεκτείνεται από 5-100 km με κλιμάκωση μετά τα πρώτα 30km

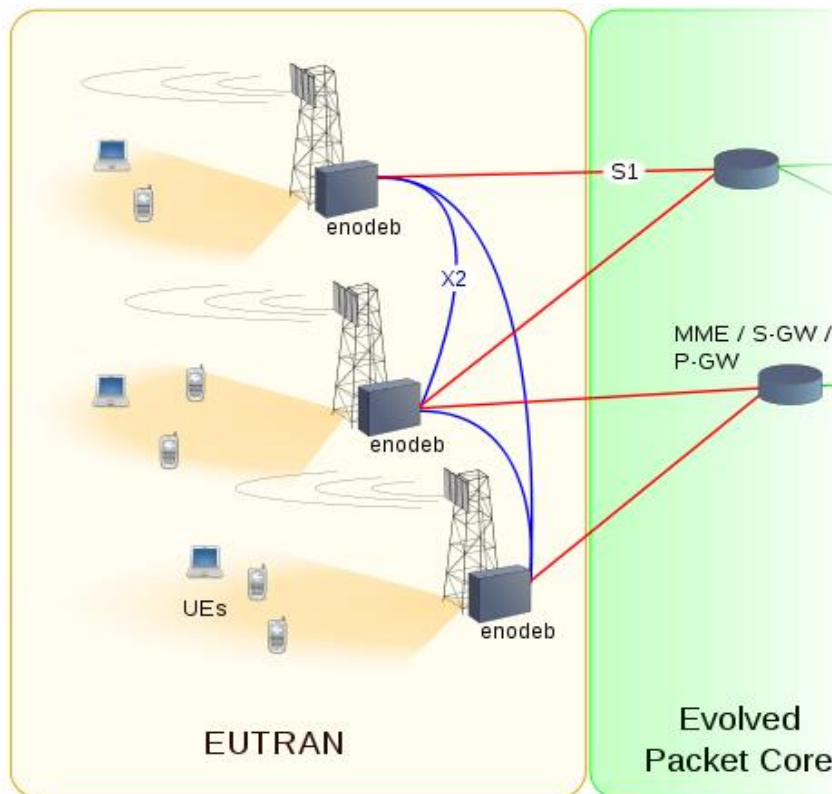


Σχήμα 2.4: Δομή και αρχιτεκτονική από το επίπεδο των χρηστών (τερματικά-συσκευές) μέχρι το επίπεδο υπηρεσιών

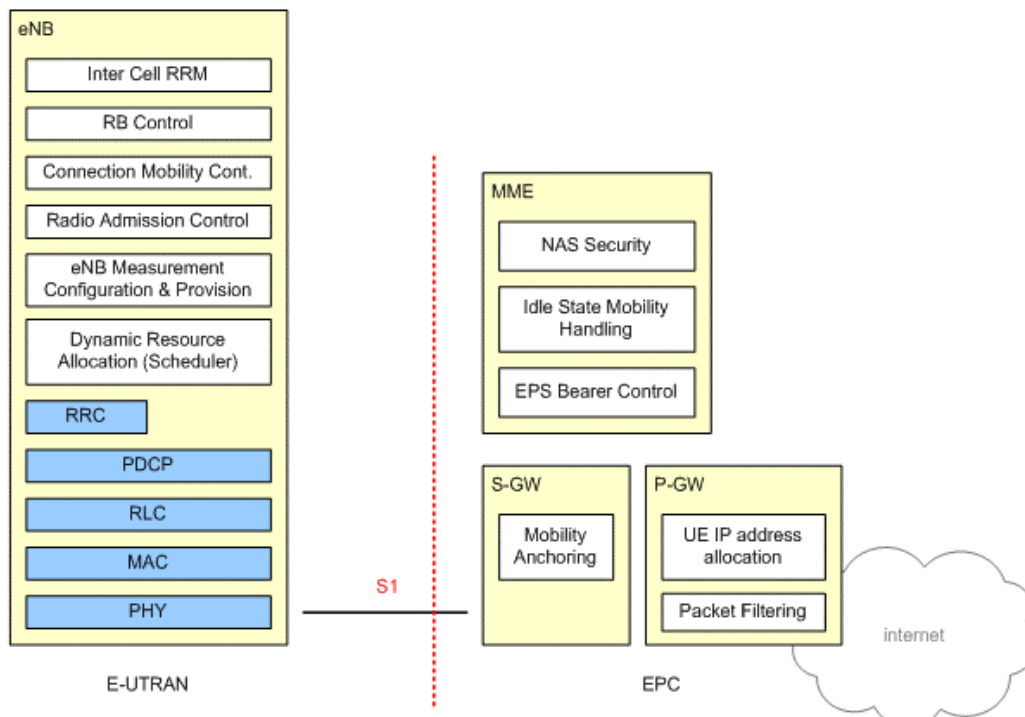
Το **Δίκτυο Κορμού** ή αλλιώς Evolved Packet Core (EPC) όπως έχει καθιερωθεί να αναφέρεται, αποτελεί την εξέλιξη των πυρήνων των δικτύων 3G καλύπτοντας μόνο το τμήμα μεταγωγής πακέτων. Διαθέτει την ικανότητα παροχής ανεπτυγμένων υπηρεσιών πραγματικού χρόνου καθώς επίσης και υπηρεσιών με υψηλές απαιτήσεις multimedia. Έχει υψηλή απόδοση και χωρητικότητα γεγονός που το καθιστά υπεύθυνο για την υψηλή ποιότητα υπηρεσιών που απολαμβάνει ο χρήστης. Χάρη στο δίκτυο κορμού οι διαδικασίες στο σύστημα βελτιστοποιούνται λόγω του διαχωρισμού των λειτουργιών που γίνεται ανάμεσα στον έλεγχο και τη διαχείριση δεδομένων με αποτέλεσμα ακόμη ταχύτερους χρόνους απόκρισης.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα που έφερε η χρήση του EPC σε συνδυασμό με την τεχνολογία LTE στις επικοινωνίες είναι:

- ✓ Χρήση τεχνολογίας Voice over IP (VoIP) για τη μεταφορά της πληροφορίας φωνής κι όχι μέσω μεταγωγής κυκλώματος
- ✓ Αυξημένη Ασύρματη Ευρυζωνικότητα
- ✓ Ποιότητα Υπηρεσίας από άκρο σ'άκρο με σκοπό την παράδοση υψηλού περιεχομένου και χαμηλής καθυστέρησης για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου
- ✓ Παγκόσμια αναγνώριση για το LTE – παρόμοιες δυνατότητες περιαγωγής με αυτές των δικτύων GSM, UMTS
- ✓ Μειωμένο κόστος μεταδιδόμενης πληροφορίας
- ✓ Μειωμένη καθυστέρηση στους τελικούς χρήστες – σημαντικά πιο ολοκληρωμένη εμπειρία για τους χρήστες υπηρεσιών αλληλεπίδρασης και εφαρμογών πραγματικού χρόνου



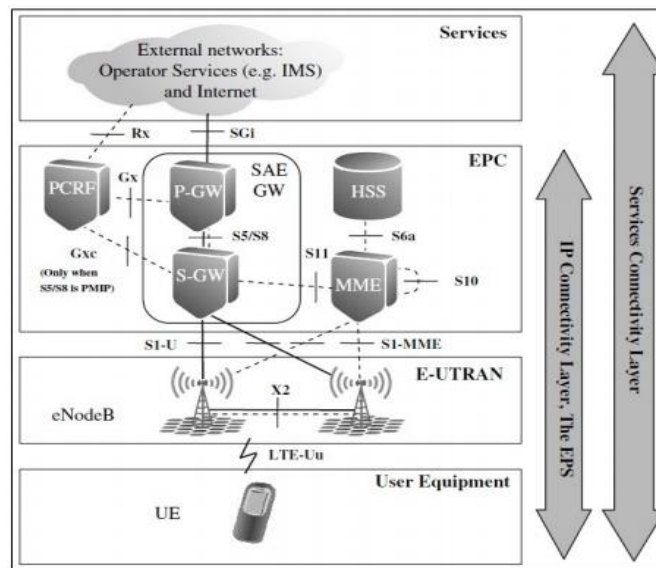
Σχήμα 2.5: Γραφική απεικόνιση της διασύνδεσης του E-UTRAN και του EPC για τη σύνθεση του συνολικού δικτύου EPS [74].



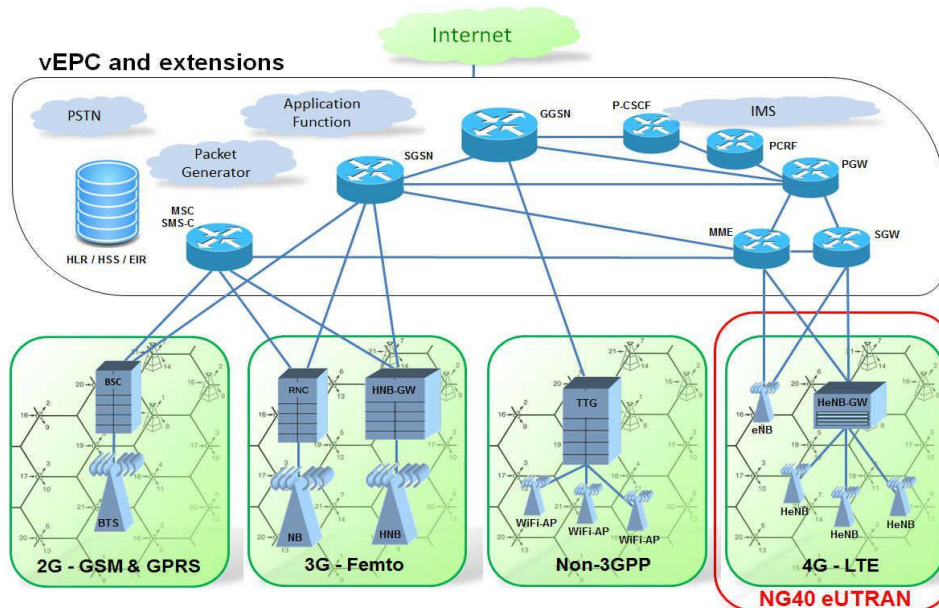
Σχήμα 2.6: Λειτουργικός διαχωρισμός μεταξύ E-UTRAN και EPC του δικτύου LTE [72].

2.4.4 Αρχιτεκτονική του δικτύου LTE

Μαζί με το δίκτυο πρόσβασης ο φορέας 3GPP τυποποιεί και μια νέα αρχιτεκτονική για το δίκτυο κορμού με σκοπό την οικοδόμηση μιας σαφώς απλούστερης επίπεδης αρχιτεκτονικής δικτύου που να βασίζεται στο πρωτόκολλο IP. Η αρχιτεκτονική αυτή φέρει το όνομα System Architecture Evolution (SAE) και σηματοδοτεί τη βελτίωση των υφιστάμενων δικτύων κορμού GSM Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) με στόχο τη πιο αποδοτική εξυπηρέτηση της αγοράς των IP υπηρεσιών. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζουμε συνοπτικά τη διαστρωμάτωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου κορμού με σκοπό την πληρέστερη κατανόηση του αναγνώστη.



Σχήμα 2.7: Διαστρωμάτωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου LTE

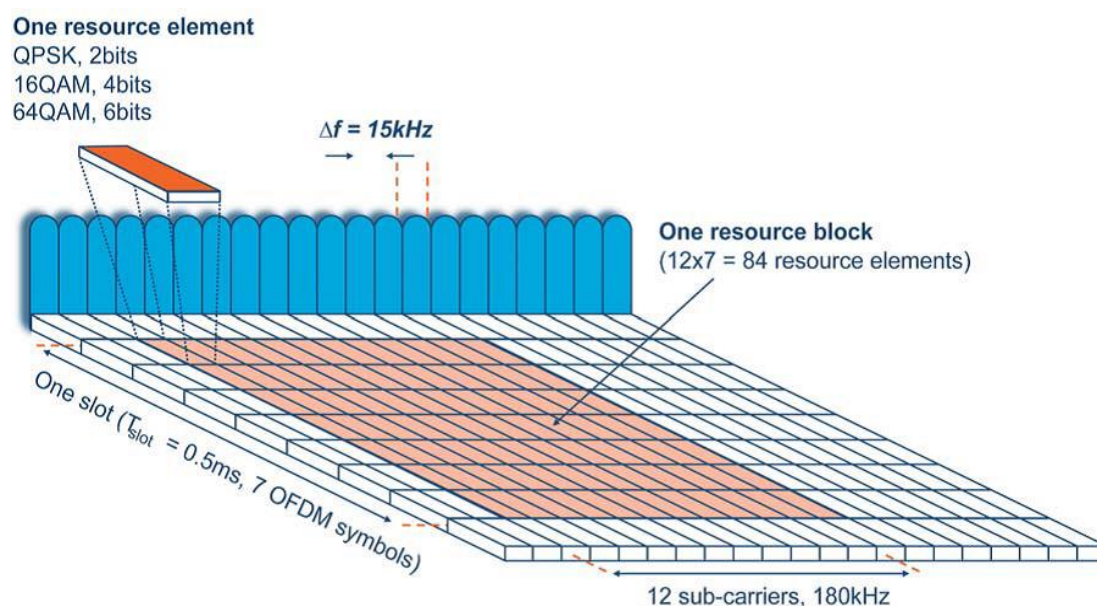


Σχήμα 2.8: Ενδεικτική απεικόνιση του τρόπου σύνδεσης των διαφόρων τεχνολογιών μεταξύ τους σ' ένα ενιαίο σύστημα [73].

- ✚ **Διεπαφή Uu:** Μέσω αυτής πραγματοποιείται η επικοινωνία των χρηστών (UE) με το Δίκτυο Πρόσβασης (E-UTRAN).
- ✚ **Διεπαφή X2:** Υπεύθυνη για την επικοινωνία των σταθμών βάσης (eNBs) που αποτελούν το δίκτυο E-UTRAN.
- ✚ **Διεπαφή S1:** Η συγκεκριμένη διεπαφή συνδέει το δίκτυο E-UTRAN του LTE με το δίκτυο κορμού EPC.
- ✚ **Διεπαφή SGI:** Υπεύθυνη για τη διασύνδεση του Δικτύου Κορμού (EPC) με τα υπόλοιπα δίκτυα (π.χ. Internet).
- ✚ **Οικείος Εξυπηρετητής Συνδρομητών (Home Subscriber Server - HSS):** Συνιστά μια κεντρική βάση δεδομένων που περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία των συνδρομητών του παρόχου του συγκεκριμένου LTE δικτύου. Περιέχει επίσης, στοιχεία για τα Δίκτυα Πακέτων Δεδομένων (Packet Data Networks – PDNs) όπου μπορεί να συνδεθεί ο χρήστης καθώς και πληροφορίες για τα MME με τα οποία το τερματικό επικοινωνεί.
- ✚ **Gateway P-GW:** Είναι η κεντρική πύλη του δικτύου πακέτων δεδομένων (PDN) και επικοινωνεί με τα υπόλοιπα PDNs, όπως το Internet, μέσω της διεπαφής SGI. Η πύλη αυτή διασφαλίζει τη συνδεσιμότητα του χρήστη με εξωτερικά δίκτυα δεδομένων, φιλτράρει τα πακέτα που διέρχονται από και προς αυτόν, υποστηρίζει τις διαδικασίες χρεώσεων, νόμιμης υποκλοπής και απόρριψης πακέτων ενώ λειτουργεί και ως «άγκυρα» για την κινητικότητα μεταξύ των δικτύων 3GPP και non-3GPP (π.χ. WiMAX).
- ✚ **Serving Gateway S-GW:** Αποτελεί την κεντρική πύλη εξυπηρέτησης και ενεργεί σαν δρομολογητής, προωθώντας τα πακέτα δεδομένων του χρήστη από το σταθμό βάσης (eNB) προς την αντίστοιχη κεντρική πύλη του αντίστοιχου PDN (P-GW). Παράλληλα έχει το ρόλο της άγκυρας κινητικότητας για το επίπεδο χρήστη κατά τη μεταπομπή μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης ή μεταξύ δικτύου LTE και άλλων δικτύων. Ανάλογα με το αν οι δύο τερματικοί κινητοί σταθμοί ανήκουν στο ίδιο ή σε διαφορετικό δίκτυο η διεπαφή μεταξύ της πύλης S-GW και P-GW καλείται S5 ή S8 αντίστοιχα.
- ✚ **Μονάδα Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Entity – MME):** Είναι εκείνη η μονάδα που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο των λειτουργιών υψηλού επιπέδου του κινητού σταθμού όπως η σηματοδότηση και η επικοινωνία με το HSS. Αποτελεί τον κύριο κόμβο ελέγχου του δικτύου πρόσβασης του LTE καθώς είναι υπεύθυνη για το tracking τερματικών σε άεργη κατάσταση, υπηρεσιών τηλεειδοποίησης και επανεκομής ενώ έχει και την ευθύνη επιλογής του S-GW για ένα κινητό σταθμό κατά την αρχική εισαγωγή του στο δίκτυο. Η μονάδα MME διαχειρίζεται τα κλειδιά ασφαλείας, παρέχει λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου για την υποστήριξη κινητικότητας μεταξύ LTE και δικτύων 2G/3G ενώ διαθέτει δυνατότητα υποστήριξης των διαδικασιών σηματοδότησης στην περίπτωση καταγραφής συνομιλίας.
- ✚ **Policy and Charging Rules Function – PCRF:** Συνιστά τη μονάδα λογισμικού που επικοινωνεί με τις βάσεις δεδομένων του δικτύου και ελέγχει την εφαρμογή της πολιτικής χρεώσεων που εφαρμόζεται για κάθε συνδρομητή.

2.4.5 Φυσικό Στρώμα και Εύρος Ζώνης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μια από τις πιο σημαντικές καινοτομίες που εισήγαγε η τεχνολογία LTE είναι η υποστήριξη ευέλικτου εύρους ζώνης μέχρι την τιμή των 20MHz. Με βάση αυτό το κριτήριο, η αρχιτεκτονική του φυσικού επιπέδου σχεδιάστηκε ώστε να υποστηρίζει βήματα εύρους ζώνης των 180kHz, ξεκινώντας από τα 1,25MHz. Ένα άλλο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας ήταν η επίτευξη ελάχιστης δυνατής καθυστέρησης (TTI – Transmission Time Interval) εντός της οποίας μεταδίδεται η ελάχιστη πληροφορία προς το χρήστη και είναι ίση με 1ms. Ως βασική μονάδα μετάδοσης της πληροφορίας στο LTE ορίζεται το resource block, η χρονική διάρκεια του οποίου είναι ίση με ένα (1) TTI και στο πεδίο της συχνότητας αποτελείται από 12 υποφέροντα (subcarriers) που απέχουν μεταξύ τους βήμα ίσο με 15kHz. Η απόσταση των 15kHz κάθε άλλο παρά τυχαία είναι εξασφαλίζοντας αξιοπιστία στη μετάδοσή μας από φαινόμενα διασποράς Doppler. Για την κατανόηση του αναγνώστη σχετικά με το ζήτημα της οργάνωσης των πόρων μετάδοσης των δεδομένων παρατίθεται λεπτομερής γραφική απεικόνιση στο σχήμα που ακολουθεί παρακάτω.



Σχήμα 2.9: Βασικοί πόροι μετάδοσης δικτύου LTE [83].

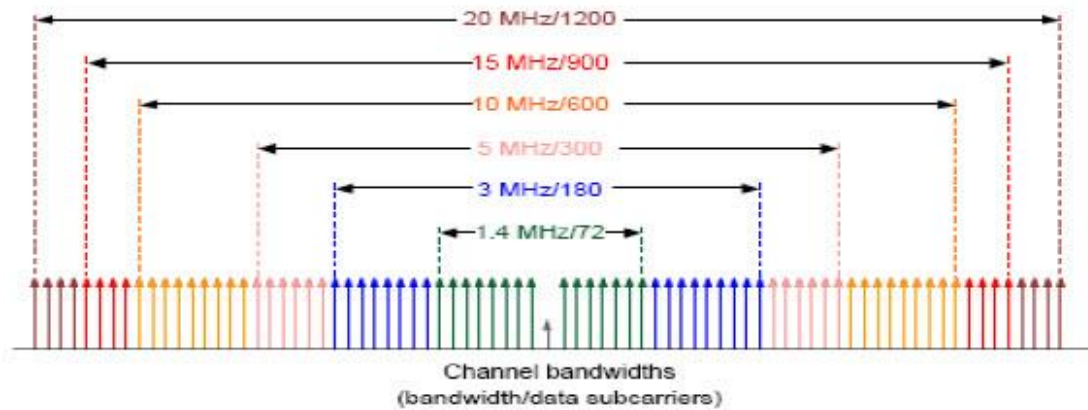
Στον πίνακα που ακολουθεί παραθέτουμε τα υποστηριζόμενα εύρη ζώνης του συστήματος LTE, μαζί με τα αντίστοιχα εύρη ζώνης μετάδοσης και τον αριθμό των Resource Blocks (RB) που απαιτείται. Το εύρος ζώνης μετάδοσης, $BW_{\text{transmission}}$, προκύπτει από το αντίστοιχο εύρος ζώνης καναλιού BW_{channel} που διατίθεται, από τη σχέση (2.1) που ακολουθεί, ενώ ο αριθμός των RB από τη σχέση (2.2), ως εξής:

$$BW_{transmission} = BW_{channel} \cdot 90\% \quad (2.1)$$

$$N_{RB} = \frac{BW_{transmission}}{180} \quad (2.2)$$

Channel Bandwidth	Usable Bandwidth	Usable Bandwidth in number of subcarriers	Usable Bandwidth in number of resource blocks	Measurement Window Size	Window Size in number of raster frequencies
1.4 MHz	1.08 MHz	72	6	1.1 MHz	11
3 MHz	2.7 MHz	180	15	2.7 MHz	27
5 MHz	4.5 MHz	300	25	4.5 MHz	45
10 MHz	9 MHz	600	50	9.1 MHz	91
15 MHz	13.5 MHz	900	75	13.5 MHz	135
20 MHz	18 MHz	1200	100	18.1 MHz	181

Πίνακας 2.1: Εύρος ζώνης συστήματος LTE



Σχήμα 2.10: Παρεχόμενη ευελιξία στο εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης στο δίκτυο LTE [75].

2.4.6 LTE-Advanced

Παρόλο που η τεχνολογία LTE σχεδιάστηκε ώστε να επιτυγχάνει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών μέσα από υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και πολύ μικρές καθυστερήσεις στα τελικά τερματικά, προσφέροντας ολοκληρωμένη εμπειρία στο χρήστη, αυτή καθ' αυτή δεν ικανοποιεί απόλυτα τις προδιαγραφές που έχει θεσπίσει η ITU-R ούτως ώστε να μπορεί να χαρακτηριστεί αμιγώς τεχνολογία 4G. Για το σκοπό αυτό ορίστηκε η τεχνολογία LTE-Advanced, γνωστή και ως LTE-A μέσα από την έκδοση R10 του φορέα 3GPP με στόχο να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά του LTE. Το LTE-A χρησιμοποιεί βασικές δομές και τεχνολογίες του δικτύου LTE συνδυάζοντάς τες ταυτόχρονα με καινοτόμες και πιο εξελιγμένες τεχνικές για τη βελτίωση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσιών. Οι προδιαγραφές της ITU-R για το δίκτυο LTE-A όπως προκύπτουν από τις R10, R11 είναι οι εξής:

✓ Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης για το Downlink: 1Gbps και 500Mbps για την κίνηση Uplink
✓ Μέγιστη αποδοτικότητα φάσματος στα 30bps/Hz για Downlink και 15bps/Hz για Uplink
✓ Καθυστερήση για πλήρη σύνδεση στο επίπεδο χρήστη μικρότερη των 5ms
✓ x2 μεγαλύτερος ρυθμός διέλευσης ακραίου χρήστη σε σύγκριση με το LTE
✓ x3 υψηλότερη χωρητικότητα
✓ -x3 μεγαλύτερος ο μέσος ρυθμός διέλευσης χρήστη σε σχέση με το δίκτυο LTE
✓ Εύρος ζώνης μετάδοσης για κίνηση Downlink μεγαλύτερο από 70MHz και για κίνηση Uplink 40MHz
✓ Επίπεδα φορητότητας ίδια με το LTE

System Performance		LTE-Advanced	LTE
Peak rate	Uplink	1000Mbps@100MHz	100Mbps@20MHz
	Downlink	500Mbps@100MHz	50Mbps@20MHz
Control-plane delay	Idle to connected	<50ms	<100ms
	Dormant to active	<10ms	<50ms
User-plane delay (without load)		Lower than that of LTE	<5ms
Spectral efficiency	Peak	Downlink: 30 bps/Hz @ $\leq 8 \times 8$, Uplink: 15 bps/Hz @ $\leq 4 \times 4$	Downlink: 5 bps/Hz @ 2×2 , Uplink: 2.5 bps/Hz @ 1×2
	Average	Downlink: 3.7 bps/Hz/cell @ 4×4 , Uplink: 2.0 bps/Hz/cell @ 2×4	Downlink: 3 to 4 times of R6 HSPA @ 2×2 , Uplink: 2 to 3 times of R6 HSPA @ 1×2
	Cell edge	Downlink: 0.12 bps/Hz/cell/user @ 4×4 Uplink: 0.07 bps/Hz/cell/user @ 2×4	N/A
Mobility		≤ 350 km/h, ≤ 500 km/h@freq band	≤ 350 km/h
Flexible bandwidth deployment		Continuous spectrum @ >20 MHz, Spectral convergence	1.4, 3, 5, 10, 15, 20MHz Support paired spectrum and unpaired spectrum

Πίνακας 2.2: Συγκριτικός πίνακας των απαιτήσεων επίδοσης για τις τεχνολογίες LTE-Advanced και LTE αντίστοιχα

Κεφάλαιο 3. Μετακύλιση του Δικτυακού Φορτίου μέσω των Διαθέσιμων WiFi APs

3.1 Διατύπωση του Προβλήματος

Όπως έχει αναφερθεί, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης όπως η HSPA ή η έκδοση LTE επέτρεψαν στους χρήστες να απολαμβάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης συγκρίσιμους με εκείνους μιας σταθερής σύνδεσης. Με αυτά τα επίπεδα επιδόσεων έγινε εφικτή η πρόσβαση σε υπηρεσίες για uploading/downloading περιεχομένου ακόμη και αρκετών megabits, υπηρεσίες video streaming υψηλής ανάλυσης, HD Smart TV, VoIP (Voice over IP) κ.α. Σαν αποτέλεσμα λοιπόν, ολοένα και περισσότεροι χρήστες ενθαρρύνονται προς την κατεύθυνση αξιοποίησης τέτοιων υπηρεσιών, για τις οποίες απαιτείται φυσικά πρόσβαση στο Internet. Η ραγδαία αύξηση της κίνησης δεδομένων είναι συνεπώς φυσικό επακόλουθο όλων των παραπάνω. Δυστυχώς τα κυψελωτά δίκτυα που σχεδιάστηκαν δεν έχουν τη δυνατότητα εξυπηρέτησης αυτής της τεράστιας ζήτησης για μεταφορά δεδομένων κι επρόκειτο πολύ σύντομα να κορεστούν. Αυτό θα είχε σοβαρές επιπτώσεις στην ποιότητα εμπειρίας που αντιλαμβάνεται ο χρήστης (Quality of Experience-QoE) κάτι που θα ζημίωνε σημαντικά και τους παρόχους. Γενικά, σε ένα κυψελωτό περιβάλλον η συμφόρηση της δικτυακής κίνησης μπορεί να συμβεί σε δυο σημεία: είτε στο Δίκτυο Ασύρματης Πρόσβασης (Radio Access Network - RAN) είτε στο Δίκτυο Κορμού (EPC), ωστόσο εμείς στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε μόνο με τεχνικές διαχείρισης φορτίου στο RAN.

Για την ανακούφιση του φορτίου κίνησης εντός του κυψελωτού δικτύου, οι πάροχοι μπορούν να επιλέξουν μεταξύ αρκετών λύσεων, ωστόσο εμείς αναφέρουμε τις δυο πιο δημοφιλείς: την εκφόρτωση μέσω φεμτοκυψελών που δεν είναι τίποτα περισσότερο από τους οικιακούς σταθμούς βάσης ή μέσω των δικτύων WiFi. Και στις δυο προτεινόμενες λύσεις οι μακροκυψέλες του κυψελωτού δικτύου παρέχουν γενική κάλυψη εντός των ορίων τους τα οποία είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα των φεμτοκυψελών ή των WiFi. Γι' αυτό το λόγο οι λύσεις που προτάθηκαν υπόκεινται σε κάποιους περιορισμούς που σχετίζονται με την εκάστοτε θέση του κινητού χρήστη, η οποία άλλοτε «επιτρέπει» κι άλλοτε «απαγορεύει» τη δυνατότητα μετάθεσης της κίνησης δεδομένων σε άλλο δίκτυο απ' αυτό του LTE μιας και δεν εξασφαλίζεται η συνεχής συνδεσιμότητα.

3.2 Τα δίκτυα WiFi ως η βέλτιστη προτεινόμενη λύση

Παρόλο που υπήρχαν εναλλακτικές προτάσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος που αναλύουμε (όπως π.χ. οι φεμτοκυψέλες), θεωρούμε πως το WiFi είναι η καλύτερη δυνατή λύση και γι' αυτό με αυτή θα πορευτούμε στη συνέχεια της διπλωματικής για την εκφόρτωση της κίνησης.

Μερικά από τα στοιχεία που μας οδήγησαν στο πόρισμα αυτό είναι τα εξής:

- Η τεχνολογία WiFi λόγω του ότι είναι ευρέως διαδεδομένη απαιτεί μικρό κόστος ανάπτυξης και συνεπώς πρόκειται για μια φθηνή και συνάμα αξιόπιστη λύση
- Εύκολη διασύνδεση με την υπάρχουσα δικτυακή υποδομή του παραδοσιακού κυψελωτού δικτύου που στις περιπτώσεις των εγκατεστημένων WiFi είναι ήδη δεδομένη
- Αποφεύγεται η δημιουργία παρεμβολών μεταξύ του δικτύου LTE λόγω του ότι το πρότυπο 802.11 χρησιμοποιεί διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και μάλιστα είναι άνευ αδείας (free license)
- Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί εύρος ζώνης υπηρεσιών μεγαλύτερο από 40MHz (εδώ θεωρείται 50MHz) το οποίο είναι επαναχρησιμοποιήσιμο, κάτι που μας επιτρέπει την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης
- Η συντριπτική πλειοψηφία των φορητών συσκευών που χρησιμοποιούμε σήμερα έχει τη δυνατότητα σύνδεσης σε WiFi, άρα δεν απαιτείται επιπλέον κόστος εγκατάστασης ώστε να αποκτηθεί η προοπτική αυτή

Έτσι λοιπόν, η λύση μέσω WLAN είναι ιδιαίτερα ελκυστική στους παρόχους διότι πέραν των άλλων πλεονεκτημάτων που συγκεντρώνει, μπορεί και εκμεταλλεύεται τα δημόσια WiFi APs που έχουν εγκαταστήσει οι πελάτες τους.

3.3 Μοντελοποίηση του Δικτύου στο Επίπεδο Ροής

Η ροή των δεδομένων που διακινούνται μέσα σε ένα δίκτυο μπορεί να χαρακτηριστεί μέσα από μια μεγάλη ποικιλία όρων όπως πακέτα, συνεδρίες (sessions), σχήματα (frames), ροές και συνδέσεις, οι στατιστικές διακυμάνσεις των οποίων επέρχονται σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες και ορίζονται με βάση τα διαφορετικά στρώματα της στοιβάδας πρωτοκόλλου OSI. Διαισθητικά, κάποιος θα μπορούσε να αναλύσει την κίνηση της πληροφορίας στο επίπεδο πακέτου (π.χ. θεωρώντας ροές από IP πακέτα). Ωστόσο η δυνατότητα ανάλυσης της κίνησης IP παρουσιάζει εμφανείς δυσκολίες, δεδομένου ότι οι στατιστικές που αφορούν τις αφίξεις και τις αναχωρήσεις των πακέτων IP από και προς τους κόμβους του δικτύου επιδεικνύουν τέτοια συμπεριφορά που κατ'ουσίαν παρουσιάζει ακραίες διακυμάνσεις στο ρυθμό μετάδοσης σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Λόγω των ιδιοτήτων των ροών σε επίπεδο πακέτων καθώς και των περίπλοκων μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης του TCP, μπορούμε να εξάγουμε ένα βασικό συμπέρασμα το οποίο καταλήγει στο ότι είναι δύσκολα προσιτή η μέτρηση επίδοσης του δικτύου εφόσον θεωρήσουμε την κίνηση των δεδομένων ως ροή πακέτων.

Από πλευράς μοντελοποίησης του δικτύου η ασύρματη διακίνηση της πληροφορίας είναι πιο εύκολο να χαρακτηριστεί στα επίπεδα ροής και συνεδρίας (session). Σε γενικές γραμμές, μια ροή αντιπροσωπεύει ένα συνεχές ρεύμα πακέτων που σχετίζονται με συγκεκριμένο περιεχόμενο όπως μια ιστοσελίδα, κατέβασμα αρχείου οποιουδήποτε είδους, news feed κ.α. Μια συνεδρία σχετίζεται με έναν μοναδικό χρήστη και

αποτελείται από μια σύλλογη ροών που είναι κοντινές μεταξύ τους στο χρόνο και των οποίων οι στατιστικές ιδιότητες είναι ανεξάρτητες σε σχέση με εκείνες άλλων ροών. Αν υποθέσουμε ότι ο κάθε χρήστης δημιουργεί τέτοιες συνεδρίες ανεξάρτητα από τους άλλους, η ποσότητα συνεδριών από κάθε χρήστη μπορεί να γίνει υπερβολικά μεγάλη, καθώς και ο πληθυσμός των χρηστών που εξυπηρετούνται από τον BS της κυψέλης που ανήκουν μπορεί να έχει ένα αρκετά υπολογίσιμο μέγεθος, τότε μπορούμε να προσεγγίσουμε τη διαδικασία αφίξεων των συνεδριών κατά την αίτηση για download των χρηστών στη ζεύξη DL μέσω της διαδικασίας Poisson. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί σε λύση που εμφανίζει αναλυτική ευπείθεια κι έτσι οι παραπάνω υποθέσεις μας ορθώς θεωρήθηκαν. Η δομή μιας συνεδρίας όσον αφορά τον αριθμό, το μέγεθος και τους χρόνους μεταξύ των αφίξεων των ροών για την εκάστοτε συνεδρία, κληρονομεί πλήρως τις πολύπλοκες στατιστικές ιδιότητες της ανάλυσης που εμφανίζονται στην περίπτωση θεώρησης της κίνησης σε επίπεδο πακέτων όπως είδαμε προηγουμένως. Παρ'όλες όμως αυτές τις ιδιαιτερότητες, μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι αν γίνει ισομερής κατανομή των πόρων μετάδοσης μεταξύ των ροών, τότε ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης που εξυπηρετεί τις ροές των χρηστών, εξακολουθεί να αντιπροσωπεύεται εξίσου καλά από ένα Μαρκοβιανό Μοντέλο Ουρών Αναμονής όπου τόσο η ροή άφιξης των συνεδριών όσο και η μορφή των χρονικών στιγμών αναχώρησής των (απάντηση από BS προς τον UE – downlink association) ακολουθούν με εξαιρετική προσεγγιστική ακρίβεια διαδικασίες Poisson. Ένα τέτοιο μοντέλο και συγκεκριμένα το M/G/1 εισάγουμε και εξετάζουμε αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

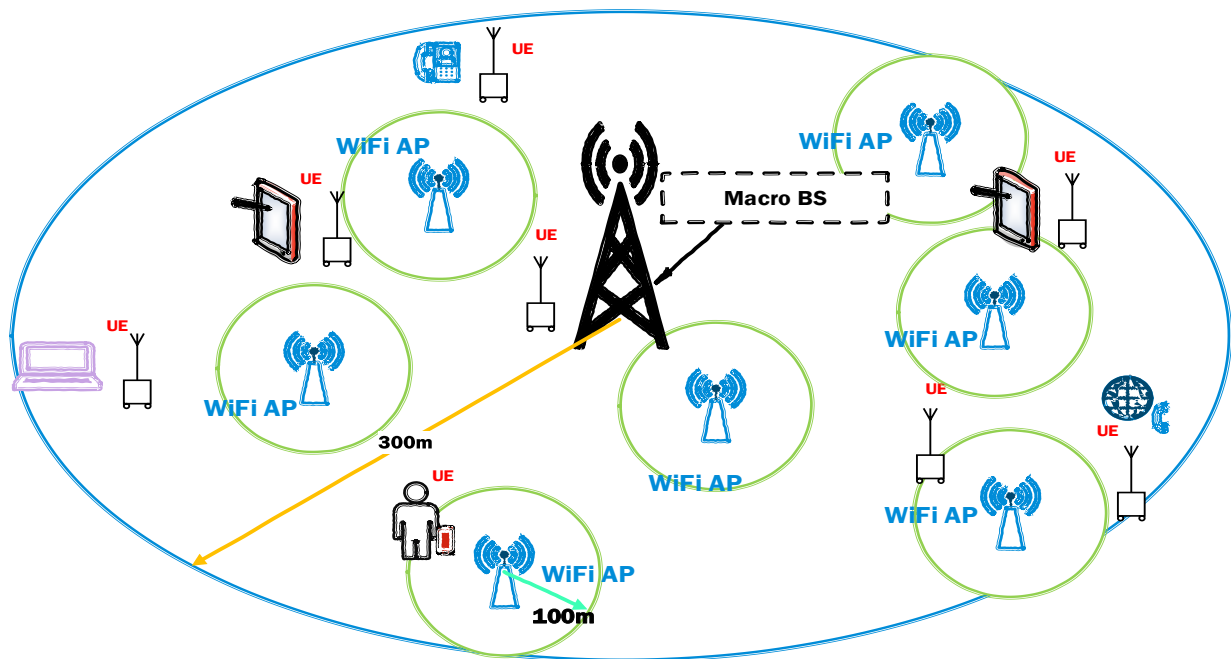
3.4 Ανάλυση των Παραμέτρων του Ετερογενούς Περιβάλλοντος

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στα πλαίσια της μετάβασής τους από προσεκτικά σχεδιασμένα σύνολα μεγάλων σταθμών βάσης τοποθετημένων σε συγκεκριμένα σημεία με ακρίβεια, σε μια παράτυπη ανάπτυξη ετερογενούς υποδομής, καθιστούν αναγκαία τη δυνατότητα συνύπαρξης των διαφορετικών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (Radio Access Technology – RAT). Αυτή η συνανάπτυξη των διάφορων κατηγοριών BSs τόσο ως προς χώρο κάλυψης όσο και ως προς το φάσμα συχνοτήτων λειτουργίας τους δημιουργούν δίκτυα μιας ολοένα αυξανόμενης πολυπλοκότητας. Υψηλής ισχύος μακροκυψελωτοί BSs έχουν ήδη εγκατασταθεί από τους παρόχους ώστε να συνδέονται και να επικοινωνούν με μικρο-κυψέλες [10], [11], καταναμημένα κεραιοσυστήματα συμπαγούς μορφής [12] – [14], καθώς και χαμηλής ισχύος φεμτοκυψέλες που έχουν τοποθετηθεί από τους ίδιους τους πελάτες [15], [16]. Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι εξέλιξη των παραδοσιακών μακροκυψελωτών δικτύων σε ετερογενή κυψελωτά δίκτυα, γνωστά κι ως Heterogeneous Cellular Networks (HCNs). Το πιο έντονο χαρακτηριστικό γνώρισμα των συστημάτων αυτών είναι η συνύπαρξη πολλών BSs μαζί, που διαφέρουν τόσο ως προς την ισχύ εκπομπής τους όσο και ως προς την πυκνότητα με την οποία τοποθετούνται ανά επιφάνεια κάλυψης μιας μακροκυψέλης.

Για παράδειγμα, δεν είναι δύσκολο να φανταστούμε ένα δίκτυο LTE (Long Term Evolution), που αποτελείται από μακρο, πίκτο και φέμτοκυψέλες οι ισχείς εκπομπής των οποίων είναι 50W, 2W και 200mW αντίστοιχα όπου πιθανώς να υπάρχουν 10 πικοκυψέλες και 100 φέμτοκυψέλες εντός της κυψέλης του δικτύου LTE, που να μοιράζονται το ίδιο αδειοδοτημένο φάσμα. Στην έρευνα που πραγματοποιούμε το ετερογενές περιβάλλον μας αποτελείται μόνο από δύο τέτοια είδη τεχνολογιών, το πρότυπο 802.11a (WiFi) και την τεχνολογία LTE που συνιστά το γνωστό σε όλους μας 4G.

Στη μελέτη που πραγματοποιούμε εδώ, αναπτύσσουμε ένα ευέλικτο και ακριβές μοντέλο για τη ζεύξη downlink για το ετερογενές κυψελωτό δίκτυο HCN που αποτελείται από 2 επίπεδα, όπου προφανώς για κάθε επίπεδο έχουμε διαφορετική μέση ισχύ εκπομπής, διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης και διαφορετική κατανομή των BSs τόσο ως προς τον αριθμό όσο και ως προς την πυκνότητά τους στο χώρο. Η μέση ισχύς εκπομπής των BSs για το κυψελωτό δίκτυο LTE λαμβάνεται ίση με $P_{BS_LTE}=0,3W$ ενώ στην περίπτωση του πομπών για τα WiFi APs η μέση ισχύς εκπομπής είναι ίση με $P_{BS_WiFi}=0,01W$. Οι ακτίνες των περιοχών κάλυψης για τις δυο τεχνολογίες θεωρούνται ίσες με $R_{cell_LTE}=300m$ και $R_{cell_WiFi}=300m$ για τα δίκτυα LTE και WiFi αντίστοιχα.

Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται η απεικόνιση της τοπολογίας του ετερογενούς κυψελωτού δικτύου με 2 επίπεδα (LTE, WiFi):



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση του διεπίπεδου ετερογενούς δικτύου με χρήση δύο ειδών RAT, της τεχνολογίας LTE (Macro BS) και του προτύπου 802.11a (WiFi APs).
 Για λόγους απλότητας και κατανόησης του σχήματος σχεδιάσαμε μόνο μια κυψέλη από το μακροκυψελωτό περιβάλλον του δικτύου 4^{ης} γενιάς

3.5 Πολιτικές Δρομολόγησης της Κίνησης Φορτίου

Έξω από τα παραδοσιακά συστήματα επικοινωνίας, η εξισορρόπηση φορτίου έχει ήδη μελετηθεί εδώ και καιρό ως μια προσέγγιση προκειμένου να υπάρξει μια εξισορρόπηση στο «φόρτο εργασίας» είτε αναφερόμαστε σε κάποιον εξυπηρετητή (server) ενός δικτύου είτε αναφερόμαστε στη λειτουργία των μηχανημάτων μιας γραμμής παραγωγής στον κατασκευαστικό τομέα ενός εργοστασίου. Ο στόχος της πολυετούς μελέτης που έχει ξεκινήσει να πραγματοποιείται στο κομμάτι αυτό απορρέει κυρίως απ' τη φιλοδοξία για βελτιστοποίηση διαφόρων ποσοτήτων όπως η αξιοποίηση των πόρων ενός συστήματος στο μέγιστο δυνατό βαθμό, η απόδοσή του, η μείωση των καθυστερήσεων αναμονής και επεξεργασίας στις διεργασίες του συστήματος, η αμεροληψία του κ.α.

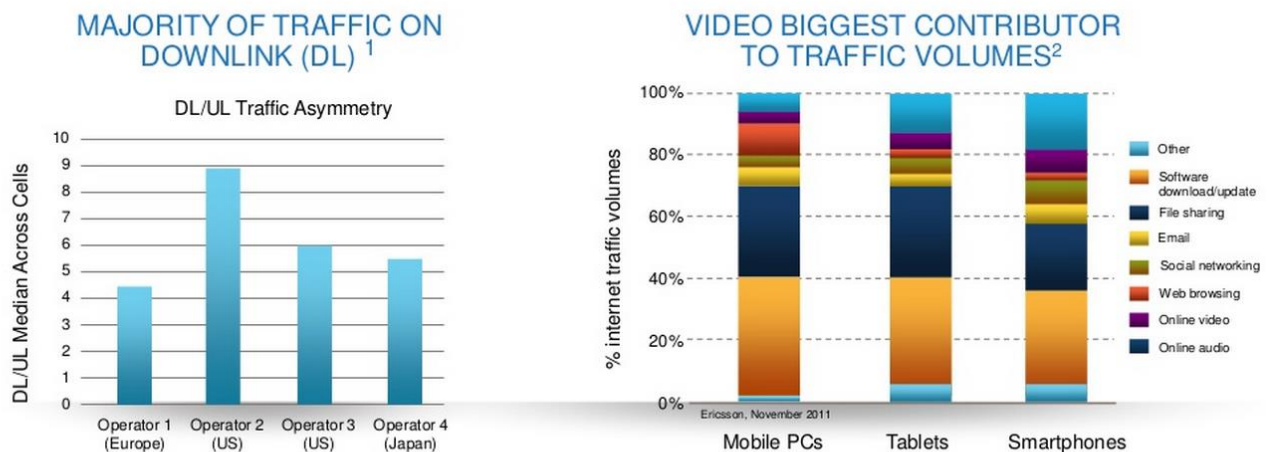
Στα ανερχόμενα ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούνται σήμερα, λόγω της μεγάλης ανομοιογένειας που επικρατεί κυρίως σε χαρακτηριστικά όπως η ισχύς μετάδοσης και οι δυνατότητες μεταξύ των BSs - που οφείλεται ξεκάθαρα στη χρήση ποικίλων RAT -

πρέπει να υπάρχουν μετρικές που να μας καθορίζουν και να μας υποδεικνύουν τον τρόπο αλλά και το «μονοπάτι» που θα ακολουθήσει μια ροή δεδομένων. Η επιλογή μεταξύ αυτών των εναλλακτικών λύσεων που είναι γνωστή ως επιλογή τρόπου μεταφοράς δεδομένων αναφέρεται συχνά στη βιβλιογραφία και ως «πολιτικές δρομολόγησης της κίνησης φορτίου» μέσα στο δίκτυο. Οι λύσεις που έχουν προταθεί κατά καιρούς ποικίλουν και μεταξύ των πιο δημοφιλών βρίσκονται η μεγιστοποίηση του σήματος-προς-θορυβο-και-παρεμβολή (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio ή SINR) που λαμβάνει ο χρήστης από τους γειτονικούς BSs, η βέλτιστη απόδοση και ενεργειακή αξιοποίηση, η ελάχιστη καθυστέρηση στη μεταφορά των δεδομένων, η πιθανότητα διακοπής της σύνδεσης, η μέγιστη ισχύς λήψης του χρήστη, η ελάχιστη απόσταση από το σταθμό βάσης, η ελαχιστοποίηση των BER&PER κ.α. Στην παρούσα μελέτη γίνεται αναφορά και ανάλυση τριών τέτοιων πολιτικών από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω σύμφωνα με την κρίση του συγγραφέα ενώ στο τέλος πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξάγονται μεταξύ αυτών.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε πως η έρευνά μας περιορίζεται μόνο στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink), δηλαδή εξετάζουμε τον τρόπο που ένας χρήστης πρόκειται να λάβει την πληροφορία για την οποία πρώτα έκανε τη σχετική αίτηση (request) στον BS της μακροκυψέλης του δικτύου LTE. Το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται στην κάτω ζεύξη λόγω της φυσικής τάσης που υπάρχει οι κινητοί χρήστες να στέλνουν αιτήματα συχνότερα και σε μεγαλύτερη ένταση για κατέβασμα πληροφοριών προς το interface τους (Mobile Browsing, Downloading, Live Streaming) απ' ότι για ανέβασμα. Ακριβώς λοιπόν για το λόγο της ασυμμετρίας του φορτίου των δυο ζεύξεων η υπερφόρτωση του κυψελωτού δικτύου 4G (LTE) προκαλείται σε πλειονότητα από την κίνηση Downlink και ουσιαστικά εκεί έχει νόημα να εστιάσουμε όσον αφορά τη διαχείριση της κίνησης. Συνεπώς, η ζεύξη Uplink δεν θα μας απασχολεί στην παρούσα διπλωματική.

Οι παραπάνω θέσεις μας επιβεβαιώνονται απόλυτα από το γράφημα που ακολουθεί:

Mobile traffic typically downlink centric



Traffic asymmetry could rise to a **10:1** ratio or more³

Σχήμα 3.2: Γράφημα ανάδειξης της ασυμμετρίας του όγκου δεδομένων που διακινούνται μεταξύ των ζεύξεων Downlink/Uplink (αριστερά) και ανάλυση του είδους πληροφορίας που μεταφέρεται στα κινητά τερματικά (δεξιά) [76].

Ουσιαστικά, η βέλτιστη διαχείριση των πόρων για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του δικτύου έχει άμεση σχέση με τη βελτιστοποίηση του γενικότερου συστήματος και συνεπώς οι αποφάσεις σχετικά με τον χρονοπρογραμματισμό χρηστών και την επίτευξη σύνδεσης με την κατάλληλη κυψέλη (cell association) που επιλέγεται με βάση τις πολιτικές που αναπτύξαμε ανωτέρω είναι αλληλένδετες έννοιες. Συνδέονται μάλιστα άμεσα λόγω του φορτίου που καλείται να διαχειριστεί το σύστημα και των παρεμβολών που αναπόφευκτα υπάρχουν μέσα σ' αυτό. Σε γενικές γραμμές θα λέγαμε, πως η εύρεση της βέλτιστης ένωσης ενός χρήστη με τον κατάλληλο σταθμό βάσης ώστε να αξιοποιείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος των πόρων όλων των διαθέσιμων υποδομών κι όχι μόνο του LTE, που αποτελεί το βασικό δίκτυο, είναι ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και η πολυπλοκότητα του αυξάνεται εκθετικά ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος. Για το ετερογενές περιβάλλον που διαθέτουμε οι προτεινόμενες πολιτικές δρομολόγησης είναι οι εξής:

- ❖ Ο κινητός χρήστης συνδέεται σε εκείνον τον BS απ' τον οποίο λαμβάνει το μέγιστο λόγο SINR, δηλαδή: $\max(\text{SINR})$
- ❖ Πολιτική πιθανοτικής δρομολόγησης της κίνησης με χρήση του Πιθανοτικού Μοντέλου Δρομολόγησης
- ❖ Πολιτική Ελαχιστοποίησης της Κατανάλωσης Ισχύος των Σταθμών Βάσης

Αναλύουμε καθεμία από τις παραπάνω στα Κεφάλαια 5, 6, 7 που ακολουθούν.

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση της Διαδικασίας Αφίξεων των Ροών στο Σταθμό Βάσης προς Εξυπηρέτηση των Κινητών Χρηστών (UEs)

4.1 Δοκιμές Bernoulli

Στη θεωρία των πιθανοτήτων και της στατιστικής, μια δοκιμή Bernoulli αποτελεί μια τυχαία πειραματική διαδικασία κατά την οποία υπάρχουν δύο πιθανά αποτελέσματα, αυτό της «επιτυχίας» και αυτό της «αποτυχίας» όπου το επιτυχές αποτέλεσμα έχει την ίδια πιθανότητα πραγματοποίησης κάθε φορά που διεξάγεται το πείραμα [24]. Στην παρούσα εργασία ως επιτυχές αποτέλεσμα θεωρούμε την έκβαση του πειράματος κατά την οποία ο BS της μακροκυψέλης λαμβάνει αίτηση σύνδεσης από κάποιο κινητό χρήστη. Όταν δηλαδή υπάρχει αίτηση για έναρξη της διαδικασίας ανταλλαγής συνεδριών και στο κανάλι μετάδοσης υπάρχει ροή δεδομένων τότε το αποτέλεσμα της δοκιμής Bernoulli είναι «επιτυχές». Στην αντίθετη περίπτωση που δεν υπάρχει κίνηση πληροφορίας τότε έχουμε «αποτυχία» στη δοκιμή, γιατί το κανάλι μετάδοσης είναι κενό. Ο επίσημος μαθηματικός ορισμός της «Δοκιμής Bernoulli» είναι γνωστός ως «Διαδικασία Bernoulli». Από τη στιγμή που στη δοκιμή Bernoulli υπάρχουν πάντα μόνο δύο πιθανά αποτελέσματα, ουσιαστικά μπορεί να θεωρηθεί ως μια διαδικασία ερωτήσεων με δύο πιθανές απαντήσεις, αυτή του «ναι» και αυτή του «όχι».

Σε αυτό το πλαίσιο μπορούμε να δώσουμε τα εξής παραδείγματα:

- Δεδομένης μιας τράπουλας καρτών, είναι το πρώτο φύλλο «άσσος» ;
- Κατά τη στιγμή μιας γέννησης, το φύλλο του νεογέννητου παιδιού είναι αγόρι;

Όπως εύκολα διαπιστώνουμε στα δύο παραπάνω ερωτήματα το σύνολο των δυνατών απαντήσεων είναι {«ναι», «όχι»}. Αποτελούν συνεπώς δοκιμές Bernoulli όπως αυτές ορίστηκαν παραπάνω. Ο λόγος που εισάγαμε τα παραδείγματα αυτά, πέραν της γενικότερης κατανόησης του όρου που προσφέρουν, είναι για να δείξουμε ότι οι έννοιες «επιτυχία» και «αποτυχία» είναι απλώς ετικέτες και δεν θα πρέπει να ερμηνεύονται κυριολεκτικά. Γενικότερα, δεδομένου ενός διαστήματος πιθανοτήτων, για κάθε γεγονός (σύνολο αποτελεσμάτων), κάποιος θα μπορούσε να ορίσει την δοκιμή Bernoulli αντιστοιχίζοντάς την ως μια διαδικασία στην οποία ένα γεγονός είτε συμβαίνει είτε όχι. Στα παραδείγματα δοκιμών Bernoulli συγκαταλέγονται τα εξής:

- Ρίχνουμε ένα κέρμα. Θεωρούμε ότι η προστινή όψη του νομίσματος («κορώνα») υποδηλώνει συμβατικά την «επιτυχία», ενώ η πίσω όψη του («γράμματα») υποδηλώνει «αποτυχία». Εξ' ορισμού, ένα αμερόληπτο κέρμα έχει πιθανότητα επιτυχίας 0,5. Όσες φορές και να επαναλάβουμε το πείραμα, η πιθανότητα αυτή δεν πρόκειται να αλλάξει. Έτσι λοιπόν, υπάρχουν δύο δυνατά αποτελέσματα με ίση πιθανότητα 0,5.
- Ρίψη ενός ζαριού. Στη διαδικασία αυτή θεωρούμε ότι π.χ. το «6» υποδηλώνει το αποτέλεσμα «επιτυχία», ενώ κάθε άλλος αριθμός που προκύπτει συγκαταλέγεται ως «αποτυχία». Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχουν έξι πιθανές

εκβάσεις, πάντα για την περίπτωση ενός αμερόληπτου ζαριού. Όταν το αποτέλεσμα είναι «6» τότε έχουμε το ένα γεγονός, ενώ τα αποτελέσματα «1,2,3,4,5» συνιστούν το συμπληρωματικό του παραπάνω γεγονότος που αντιστοιχεί στο γεγονός «όχι 6».

- Κατά τη διεξαγωγή μιας πολιτικής δημοσκόπησης, η επιλογή ενός τυχαίου ψηφοφόρου μέσα από ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα πληθυσμού, προκειμένου να εξακριβωθεί εάν αυτός θα ψηφίσει «ναι» στο επικείμενο δημοψήφισμα αποτελεί μια δοκιμή Bernoulli.

Μαθηματική Διατύπωση της Δοκιμής Bernoulli:

Λαμβάνοντας υπόψη μια διαδικασία κατά την οποία έχουμε μια σειρά επαναλαμβανόμενων ανεξάρτητων δοκιμών ενός πειράματος, το οποίο έχει ακριβώς δύο πιθανά ενδεχόμενα τότε η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαδικασία Bernoulli ή δοκιμή Bernoulli. Ορίζουμε το ένα αποτέλεσμα «επιτυχία» και το συμπληρωματικό του «αποτυχία». Με το σύμβολο p συμβολίζουμε την πιθανότητα «επιτυχίας» ενώ με q την πιθανότητα «αποτυχίας». Προφανώς, το άθροισμα των δύο πιθανοτήτων είναι ίσο με τη μονάδα, απ'τη στιγμή που τα δύο γεγονότα είναι συμπληρωματικά και τα αποτελέσματα «επιτυχία», «αποτυχία» αμοιβαία αποκλειόμενα. Πιο αναλυτικά, διακρίνουμε τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$1. \quad p = 1 - q \quad (4.1)$$

$$2. \quad q = 1 - p \quad (4.2)$$

$$3. \quad p + q = 1 \quad (4.3)$$

Στην περίπτωση που μια δοκιμή Bernoulli αντιπροσωπεύει ένα γεγονός από ένα πεπερασμένο πλήθος ισοπίθανων αποτελεσμάτων, όπου με S συμβολίζουμε το σύνολο των επιτυχών αποτελεσμάτων και με F το σύνολο των αποτελεσμάτων αποτυχίας έχουμε τους ακόλουθους μαθηματικούς τύπους για τις πιθανότητες και τις αντίστοιχες αποδόσεις:

$$p = \frac{S}{S + F} \quad (\text{Πιθανότητα επιτυχίας}) \quad (4.4)$$

$$q = \frac{F}{S + F} \quad (\text{Πιθανότητα αποτυχίας}) \quad (4.5)$$

$$o_f = \frac{S}{F} = \frac{p}{q} = \frac{p}{1-p} = \frac{1-q}{q} \quad (\text{Απόδοση υπέρ}) \quad (4.6)$$

$$o_a = \frac{F}{S} = \frac{q}{p} = \frac{1-p}{p} = \frac{q}{1-q} \quad (\text{Απόδοση κατά}) \quad (4.7)$$

Οι αποδόσεις αυτές χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την πιθανότητα ενός γεγονότος να πραγματοποιηθεί [25]. Οι αποδόσεις αυτές είναι, όπως διακρίνεται στις (4.6), (4.7), ένα ποσοστό που συγκρίνει τον αριθμό των τρόπων πραγματοποίησης ενός γεγονότος να συμβεί («επιτυχία» - S) σε σχέση με τον αριθμό των τρόπων μη πραγματοποίησης του γεγονότος αυτού («αποτυχία» - F).

Απόδοση υπέρ (Odds in favor): Είναι ο λόγος του αριθμού των τρόπων πραγματοποίησης ενός γεγονότος (S) προς τον αριθμό των τρόπων μη πραγματοποίησης αυτού (F).

Απόδοση κατά (Odds against): Είναι ο λόγος του αριθμού των τρόπων μη πραγματοποίησης ενός γεγονότος (F) προς τον αριθμό των τρόπων πραγματοποίησης του γεγονότος (S).

Παράδειγμα: Διαθέτουμε ένα κουτί μέσα στο οποίο έχουμε 5 μπλέ στυλό, 2 πράσινα και 6 κόκκινα. Ποια είναι η πιθανότητα επιλογής ενός μπλέ στυλό, λαμβάνοντας υπόψιν μας ότι η διαδικασία επιλογής είναι τυχαία και αμερόληπτη;

Αρχικά πρέπει να ορίσουμε το πότε έχουμε επιτυχία και πότε αποτυχία. Το γεγονός επιτυχούς πραγματοποίησης της διαδικασίας ταυτίζεται με το συμβάν επιλογής ενός μπλέ στυλό μέσα από το κουτί. Ο αριθμός των δυνατών τρόπων πραγματοποίησης του γεγονότος (επιτυχία) είναι ίσος με 5. Άρα:

$$S = 5$$

Ο αριθμός μη πραγματοποίησης του γεγονότος, δηλαδή το ενδεχόμενο επιλογής κάποιου άλλου στυλό εκτός των μπλέ, περιλαμβάνει το πλήθος των αποτελεσμάτων αποτυχίας. Αυτό το σύνολο ορίζεται ίσο με 2+6, δηλαδή:

$$F = 8$$

Έτσι, λέμε ότι η απόδοση υπέρ είναι ίση με 5:8 ή

$$o_f = \frac{5}{8}$$

Ενώ στην αντίθετη περίπτωση η απόδοση κατά είναι ίση με 8:5 ή

$$o_a = \frac{8}{5}$$

Σημείωση: Αξίζει να τονιστεί ότι οι αποδόσεις εδώ υπολογίζονται όπως είδαμε και στο παράδειγμα με διαίρεση του πλήθους των αποτελεσμάτων πραγματοποίησης/μη πραγματοποίησης κι όχι των πιθανοτήτων p και q , ωστόσο η αναλογία παραμένει η ίδια.

4.2 Διωνυμική Κατανομή

Μια διαδικασία στενά και άμεσα συνδεδεμένη με τη δοκιμή Bernoulli είναι το διωνυμικό πείραμα, το οποίο αποτελείται από ένα σταθερό και δεδομένο αριθμό n στατιστικά ανεξάρτητων δοκιμών Bernoulli, με πιθανότητα πραγματοποίησης επιτυχούς αποτελέσματος ίση με p για καθεμία, μετρώντας τον αριθμό των επιτυχιών. Μια τυχαία μεταβλητή η οποία αντιστοιχεί στο παραπάνω πείραμα ορίζεται ως η $B(n, p)$ και λέμε ότι ακολουθεί την διωνυμική κατανομή. Η διωνυμική κατανομή είναι μια κατανομή πιθανοτήτων, η οποία χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την πιθανότητα να πάρουμε ένα από τα δύο πιθανά ενδεχόμενα που υπάρχουν («επιτυχία», «αποτυχία»), για ένα συγκεκριμένο πλήθος συνεχόμενων φορών k από έναν δεδομένο αριθμό δοκιμών Bernoulli ενός τυχαίου γεγονότος [26]. Η μεταβλητή αυτή μας περιγράφει απόλυτα το πείραμα που εκτελούμε αφού μας δίνει τόσο το πλήθος n των δοκιμών όσο και την πιθανότητα p επιτυχίας αυτών.

Με βάση αυτή, είμαστε πλέον σε θέση να μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα πραγματοποίησης k συνεχόμενων επιτυχιών κατά την διεξαγωγή του πειράματος, σύμφωνα με τη σχέση [27], [28]:

$$P(k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \quad (4.8)$$

Όπου:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (4.9), \text{ ο διωνυμικός συντελεστής}$$

Παράδειγμα: Έστω ότι εκτελούμε ένα πείραμα ρίψης νομίσματος και θέλουμε να βρούμε την πιθανότητα που υπάρχει να έρθει 3 συνεχόμενες φορές «κορώνα» για πλήθος ρίψεων ίσο με 4. Με δεδομένη την αμεροληψία του νομίσματος να υπολογιστεί η πιθανότητα αυτή.

Αρχικά θεωρούμε ως επιτυχία το αποτέλεσμα του γεγονότος να έρθει «κορώνα» και «αποτυχία» το ενδεχόμενο να έρθουν «γράμματα». Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως

η πιθανότητα p της «επιτυχίας» είναι ίση με 0,5 όπως και αυτή του συμπληρωματικού γεγονότος.

Έτσι, έχουμε:

Το πλήθος των δοκιμών Bernoulli είναι ίσο με $n = 4$. Επίσης, λόγω του ότι ζητάμε 4 συνεχόμενες επιτυχίες, δηλαδή να έρθει «κορώνα» 4 φορές συνεχόμενα έχουμε ότι $k = 3$. Από τη σχέση (4.9) λαμβάνουμε ότι:

$$\binom{4}{3} = \frac{4!}{3!(4-3)!} = 4$$

Επομένως, από την (4.8) λέμε ότι:

$$P(3) = 4 \cdot 0,5^3 \cdot 0,5^{4-3} \text{ ή}$$

$$P(3) = 0,25$$

Κριτήρια Εφαρμογής της Διωνυμικής Κατανομής

Όταν όλα τα ακόλουθα κριτήρια πληρούνται, τότε μπορούμε να κάνουμε χρήση της διωνυμικής κατανομής για τη μοντελοποίηση των πιθανοτήτων εμφάνισης ενός συμβάντος:

- **Κανόνας N° 1:** Υπάρχουν μόνο δύο αμοιβαία αποκλειόμενες εκβάσεις για μια διακριτή τυχαία μεταβλητή (επιτυχία, αποτυχία)
- **Κανόνας N° 2:** Υπάρχει συγκεκριμένος σταθερός αριθμός επαναλαμβανόμενων δοκιμών (οι διαδοχικές δοκιμές στις οποίες δεν έχουμε έκβαση συμβάντος εξαιρούνται)
- **Κανόνας N° 3:** Κάθε δοκιμή που πραγματοποιείται είναι ανεξάρτητη από τις άλλες, συνεπώς το αποτέλεσμα μιας δοκιμής δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των επόμενων
- **Κανόνας N° 4:** Η πιθανότητα επιτυχίας για κάθε δοκιμή είναι σταθερή και προφανώς η τιμή της είναι ίδια για όσες δοκιμές κι αν πραγματοποιηθούν

Υπενθυμίζουμε πως η χρησιμοποίηση του μοντέλου της Διωνυμικής Κατανομής έγινε λόγω της χρησιμότητας και ευκολίας χειρισμού που μας προσφέρει στην μοντελοποίηση της κίνησης στο επίπεδο συνεδρίας. Πλέον είναι πολύ εύκολο να ξέρουμε πότε ο BS δέχεται ένα αίτημα για την εξυπηρέτηση κάποιου UE. Όταν ένα τέτοιο αίτημα σύνδεσης για downloading πραγματοποιείται, τότε λέμε πως το αποτέλεσμα του γεγονότος είναι «επιτυχές» ενώ σε αντίθετη περίπτωση έχουμε «αποτυχία» και συνεπώς κανένας χρήστης δεν θέλει να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο εκείνη τη στιγμή. Το μοντέλο αυτό μας προσφέρει σημαντική απλότητα στην εποπτεία

της κίνησης των δεδομένων καθώς και επιτήρηση του BS για το πότε είναι απασχολημένος προς εξυπηρέτηση των συνδρομητών.

Η κατανομή της δειγματοληψίας μιας μετρήσιμης μεταβλητής είναι καλώς ορισμένη απ'τη διωνυμική κατανομή μόνο στις περιπτώσεις στις οποίες το μέγεθος του πληθυσμού είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το δείγμα που λαμβάνουμε. Σαν γενικό κανόνα θα λέγαμε πως η διωνυμική κατανομή δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται στις παρατηρήσεις ενός απλού τυχαίου δείγματος εάν το μέγεθος του πληθυσμού δεν είναι 10 φορές μεγαλύτερο απ'αυτό του δείγματος [28].

4.3 Η Κατανομή Poisson ως Οριακή Περίπτωση της Διωνυμικής Κατανομής

Σε πολλά διωνυμικά προβλήματα, ο αριθμός των δοκιμών Bernoulli n τυχαίνει να είναι αρκετά μεγάλος σχετικά, καθώς και η πιθανότητα επιτυχούς έκβασης p να είναι μικρή, έτσι ώστε το $n \cdot p$ να είναι μετρίου μεγέθους. Για να έχουμε μια πιο ακριβή αντίληψη του πόσο μικρή μπορεί να είναι αυτή η πιθανότητα μπορούμε για παράδειγμα να εξετάσουμε προβλήματα τα οποία ασχολούνται με σπάνια γεγονότα όπου η πιθανότητα εμφάνισης επιτυχίας είναι σημαντικά μικρή. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να μετρήσουμε το πλήθος των ανθρώπων που έχουν ως ημέρα γέννησης την 1^η Ιουλίου, μέσα από ένα τυχαίο δείγμα 1000 ατόμων. Κατανοούμε εύκολα πως η περίπτωση επιτυχίας σε ένα τέτοιο πείραμα είναι εξαιρετικά σπάνια. Γι'αυτό είναι συχνά βολικό τέτοιου είδους διωνυμικά προβλήματα να τα προσεγγίζουμε με τη βοήθεια της κατανομής Poisson. Η αιτιολόγηση γι'αυτήν την παραδοχή είναι ότι η Poisson είναι μια οριακή περίπτωση της διωνυμικής κάτι το οποίο αποδεικνύουμε αμέσως μετά.

Θεώρημα

Σύμφωνα με το θεώρημα, αν υποθέσουμε ότι X είναι η τυχαία διακριτή μεταβλητή της διωνυμικής κατανομής με παραμέτρους το πλήθος των δοκιμών n που διεξάγονται και p την πιθανότητα πραγματοποίησης του γεγονότος τότε στην περίπτωση που το n είναι αρκετά μεγάλο και το p αρκετά μικρό τότε η διωνυμική κατανομή προσεγγίζεται στην οριακή της περίπτωση από την κατανομή Poisson με παράμετρο λ όπου $\lambda = np$.

Απόδειξη του Θεωρήματος

Λόγω του μεγάλου πλήθους των δοκιμών, θεωρούμε ότι $n \rightarrow \infty$, ενώ η πιθανότητα είναι τόσο μικρή ώστε να μπορεί να υποθεθεί πως $p \rightarrow 0$ καθώς το $\lambda = np$ παραμένει

σταθερό. Η τυχαία μεταβλητή X αποτελεί τη μεταβλητή της διωνυμικής κατανομής. Αυτό που καλούμαστε να αποδείξουμε είναι ότι ισχύει η (4.10) με τις υποθέσεις που έγιναν παραπάνω.

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \rightarrow \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (4.10)$$

Η απόδειξη [29] μας ξεκινάει από τον ορισμό της διωνυμικής κατανομής ως εξής.

Έχουμε ότι:

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \stackrel{q=1-p}{=} \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad (4.11)$$

Όμως $\lambda = np$ και άρα:

$$p = \frac{\lambda}{n} \quad (4.12)$$

Με αντικατάσταση της (4.12) στην (4.11) έχουμε:

$$P(X = k) = \binom{n}{k} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k}$$

Με βάση τον ορισμό του διωνυμικού συντελεστή από την (4.9) προκύπτει:

$$\begin{aligned} P(X = k) &= \frac{n!}{k!(n-k)!} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} \\ &= \frac{\lambda^k}{k!} \frac{n!}{(n-k)!} \frac{1}{n^k} \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} \quad (4.13) \end{aligned}$$

Αν συγκρίνουμε προσεκτικά τις (4.10) και (4.13) παρατηρούμε ότι αυτό που απομένει να δείξουμε για να καταλήξουμε στην απόδειξη του Θεωρήματος είναι ότι:

$$\frac{n!}{(n-k)!} \frac{1}{n^k} \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} \rightarrow e^{-\lambda}, \text{ καθώς το } n \rightarrow \infty$$

Λαμβάνοντας τον 1^ο και 2^ο όρο του γινομένου και σύμφωνα με τον ορισμό του παραγοντικού ισχύει:

$$\frac{n!}{(n-k)!} \frac{1}{n^k} = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-k+1)(n-k)!}{(n-k)!n^k}$$

Όπου:

$$n! = n(n-1)(n-2)\dots(n-k+1)(n-k)!$$

Με απαλοιφή του όρου $(n-k)!$ προκύπτει ότι:

$$\frac{n!}{(n-k)!} \frac{1}{n^k} = \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-k+1)}{n^k}$$

$$= \underbrace{\frac{n}{n} \cdot \frac{n-1}{n} \cdot \frac{n-2}{n} \cdot \dots \cdot \frac{n-k+1}{n}}_{k\text{-όροι}}$$

$$= 1 \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{k+1}{n}\right)$$

Καταλήξαμε τελικά στο συμπέρασμα ότι:

$$\frac{n!}{(n-k)!} \frac{1}{n^k} = 1 \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{k+1}{n}\right)$$

Αναπτύσσουμε εν συνεχεία τον 3^ο όρο του γινομένου στα δύο:

$$\left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} = \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{-k}$$

Επομένως,

Για την οριακή περίπτωση, πρέπει να υπολογίσουμε το όριο της διωνυμικής κατανομής καθώς το $n \rightarrow \infty$. Παρατηρούμε ότι επειδή το λ είναι σταθερό, ο όρος $\frac{\lambda^k}{k!}$ είναι ανεξάρτητος του n κι έτσι μπορεί να βγει έξω από το όριο. Τελικά, έχουμε:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} &= \\ \frac{\lambda^k}{k!} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{k+1}{n}\right) \right) \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n \right) \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{-k} \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot 1 \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{k+1}{n}\right) \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{-k}$$

Για λόγους ευκολίας υπολογίζουμε κάθε όριο ξεχωριστά:

- $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{k+1}{n}\right) \right) = 1 \quad (4.15),$

αφού για $n \rightarrow \infty$ τα $\frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \dots, \frac{k+1}{n} \rightarrow 0$

- Για τον υπολογισμό του ορίου $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n \right)$ κάνουμε χρήση της γενικής ιδιότητας που προκύπτει από τη θεωρία των ορίων:

$$e^x = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 + \frac{x}{n}\right)^n \right)$$

Έτσι, λαμβάνουμε ότι:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 + \frac{(-\lambda)}{n}\right)^n \right) = e^{-\lambda} \quad (4.16)$$

- Τέλος, λόγω του ότι $n \rightarrow \infty$ η ποσότητα $\frac{\lambda}{n} \rightarrow 0$ και συνεπώς:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\left(1 - \frac{\lambda}{n} \right)^{-k} \right) = (1)^{-k} = 1 \quad (4.17)$$

Από τις (4.14) – (4.17) προκύπτει πως για την οριακή περίπτωση της διωνυμικής κατανομής ισχύει ότι:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \right) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot 1 \cdot e^{-\lambda} \cdot 1 \quad \text{ή}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \right) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!}$$

Ως εκ τούτου, συμπεραίνουμε:

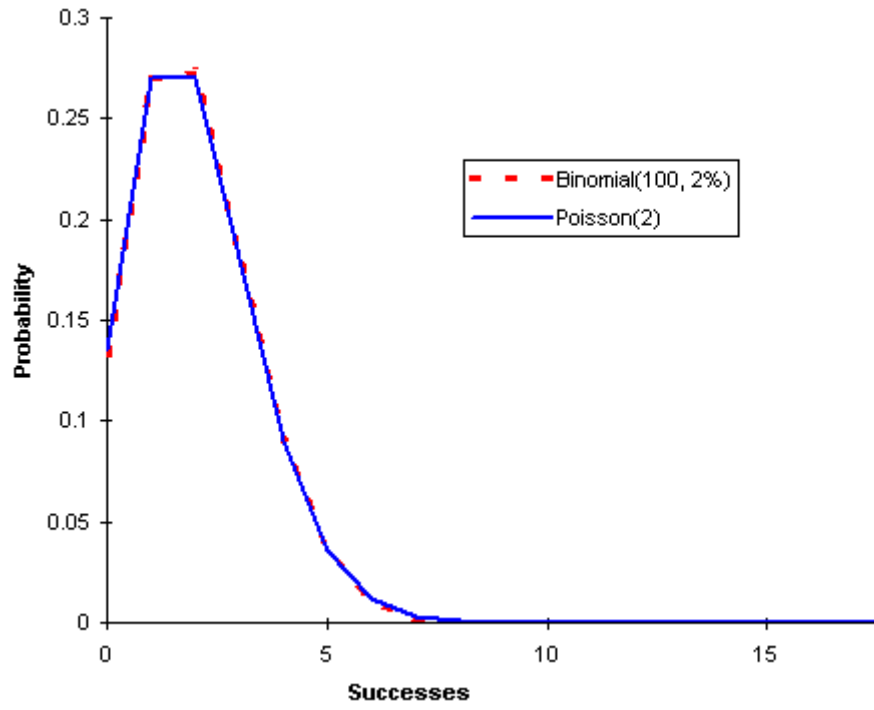
$$P(X = k) \rightarrow \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!} \quad (4.18)$$

Αν παρατηρήσουμε το 2^ο μέλος της (4.18) διαπιστώνουμε ότι αυτό αποτελεί τον ορισμό της κατανομής Poisson [31] οπότε καταλήγουμε στην (4.10) αποδεικνύοντας την ισχύ του Θεωρήματος που διατυπώθηκε.

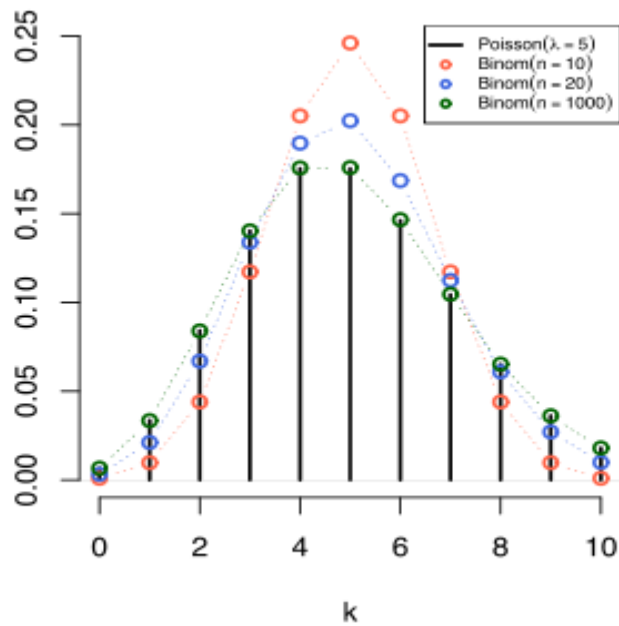
Στη συνέχεια παραθέτουμε δύο γραφήματα τα οποία επιβεβαιώνουν όλα τα παραπάνω.

Στο 1^ο γράφημα παρατηρούμε πόσο καλά προσεγγίζεται η διωνυμική κατανομή απ' την κατανομή Poisson για σχετικά μικρό πλήθος δοκιμών ($n = 100$) και πιθανότητα επιτυχούς έκβασης τόσο μεγάλη όσο η τιμή $p = 0,02$. Η αναπαράσταση αυτή αποτελεί τεκμήριο για το πόσο καλή προσέγγιση μπορούμε να έχουμε ακόμη και σε αυτές τις οριακές περιπτώσεις των τιμών που αναφέραμε (ούτε το n είναι ιδιαίτερα μεγάλο, ούτε το p ιδιαίτερα μικρό, παρόλα αυτά η διωνυμική προσεγγίζεται με σημαντική ακρίβεια).

Στην 2^η περίπτωση, το γράφημα που απεικονίζεται μας αναδεικνύει την προσέγγιση που επιτυγχάνει η Poisson συγκριτικά με το πλήθος n συναρτήσει πάντα της πιθανότητας p .



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της προσέγγισης που επιτυγχάνει η κατανομή Poisson με παράμετρο $\lambda=2$ στη διωνυμική $B(100,2\%)$ [79].



Σχήμα 4.2: Αναπαράσταση της κατανομής Poisson με παράμετρο $\lambda=5$ και των διωνυμικών $B(n,p)$ με πλήθος δοκιμών $n=10$, $n=20$ και $n=1000$ που διακρίνονται αντίστοιχα με τα χρώματα «κοκκινο», «μπλε», «πράσινο» σε συνάρτηση με την πιθανότητα επιτυχίας p . Παρατηρούμε ότι για πολύ μεγάλο πλήθος n (γραφική παράσταση με τα πράσινα σημεία) η διωνυμική προσεγγίζεται αρκετά ικανοποιητικά [77].

Με την απόδειξη αυτή είμαστε πλέον σε θέση να χρησιμοποιήσουμε την κατανομή Poisson για να μοντελοποιήσουμε την κίνηση των αιτημάτων των κινητών χρηστών με ρυθμό λ προς τον BS του δικτύου LTE, μια διαδικασία που είναι σαφώς πιο δημοφιλής από τη διωνυμική και ταυτόχρονα προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά την απλότητα της λύσης.


















4.4 Καταγραφή της Κίνησης των Αιτημάτων με Χρήση της Κατανομής Poisson

Οι αφίξεις των αιτήσεων για σύνδεση των κινητών χρηστών στον BS του δικτύου έχουμε αναφέρει στην Παράγραφο 3.3 ότι γίνεται μέσω συνεδριών. Η αίτηση που εκδίδεται από τον καθένα είναι εξαιρετικά σπάνια αν αναλογιστούμε το τεράστιο πλήθος χρηστών που εξυπηρετούνται εντός μιας μακροκυψέλης. Για να μπορέσουμε να καταγράψουμε την κίνηση που δημιουργείται και να μοντελοποιήσουμε αυτή τη διαδικασία αφίξεων χωρίζουμε το χρόνο σε ισομηκείς χρονικές σχισμές, υποθέτωντας ότι κάθε συνδρομητής παράγει αιτήματα μέσα σε καθεμία απ' αυτές τις σχισμές με μια μικρή πιθανότητα. Υπό αυτές τις υποθέσεις, μπορούμε με ασφάλεια να αντιληφθούμε ότι ο συνολικός αριθμός των αιτημάτων ακολουθεί μια διωνυμική κατανομή, αφού το

πλήθος τους είναι αρκετά μεγάλο και η πιθανότητα επιτυχίας κάθε αιτήματος ξεχωριστά είναι πολύ μικρή. Έτσι, η κατανομή των αιτημάτων που ανακύπτουν από τον μεγάλο αριθμό χρηστών μπορεί να προσεγγιστεί στην οριακή περίπτωση της διωνυμικής κατανομής από τη διαδικασία Poisson όπως αποδείχτηκε στην 4.3. Το γεγονός λοιπόν ότι το δικτυακό μας σύστημα ικανοποιεί τις ανωτέρω παραδοχές μας εξηγεί το γιατί είναι ορθό να μοντελοποιήσουμε τις αφίξεις μας σαν να ακολουθούν την κατανομή Poisson.

4.4.1 Ελαστική Κίνηση των Δεδομένων

Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η κίνηση που παρατηρείται στο δίκτυο ταξινομείται στις ακόλουθες 17 κατηγορίες [32]:

-  Appstore
-  Jabber
-  MMS
-  Navigation
-  Email
-  FTP
-  Gaming
-  Im
-  Miscellaneous
-  Optimization
-  P2P
-  Apps
-  Streaming
-  Unknown
-  VoIP
-  Vpn
-  Web

Σημειώνουμε πως η κίνηση για POP3 και IMAP συγκαταλέγεται ως υπηρεσία e-mail. Επιπρόσθετη πληροφορία για τον έλεγχο του καναλιού χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της κίνησης VoIP. Το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης HTTP έχει συμπεριληφθεί στην κατηγορία streaming ή web για τύπου MIME. Επίσης γίνεται χρήση ευρετικών μηχανισμών για την ανίχνευση μη-HTTP p2p κίνησης δεδομένων. Υπηρεσίες όπως Gnutella, BitTorrent κατατάσσονται ως p2p. Εφαρμογές χαμηλού όγκου τοποθετούνται στην κατηγορία «διάφορα» (miscellaneous). Περισσότερες πληροφορίες για την κατάταξη των εφαρμογών μπορούν να βρεθούν στα [33] και [34] χωρίς να μας απασχολήσουν περαιτέρω.

Στο σημείο αυτό αξίζει να θυμηθούμε πάλι πως η κίνηση των δεδομένων είναι πιο βολικό να θεωρείται ότι αποτελείται από ροές. Ο όρος «συνεδρία» που ορίσαμε στην 3.3 αποτελεί μια αλληλουχία εναλλασσόμενων ροών οπότε δεν χρειάζεται να πραγματοποιήσουμε ξεχωριστή ανάλυση αφού ουσιαστικά ο ένας όρος εμπεριέχει τον

άλλον. Μια ροή δεν είναι τίποτε παραπάνω από μια ακολουθία πακέτων που ανήκουν στην ίδια υπόσταση μιας εφαρμογής [35]. Κατά τη μελέτη των μέτρων απόδοσης της ελαστικής κίνησης είναι προτιμότερο να μοντελοποιούμε με βάση τη ροή κίνησης δεδομένων παρά με βάση τα πακέτα που ανταλλάσσονται για δύο πολύ βασικούς λόγους. Ο πρώτος και κυριότερος λόγος είναι η πολυπλοκότητα που προσδίδει στο πρόβλημα η θεώρηση της διαδικασίας άφιξης πακέτων, που όπως έχει αποδειχτεί είναι αρκετά δύσκολο να χαρακτηριστεί και να προσδιοριστεί η κίνηση στο επίπεδο αυτό [36]. Ο άλλος λόγος σχετίζεται με την εξέταση της ποιότητας υπηρεσιών που αντιμετωπίζει ο πελάτης. Οι χρήστες ελαστικών εφαρμογών (SMTP email, μεταφορά αρχείων μέσω FTP, TELNET & HTTP για επίσκεψη σε απλές ιστοσελίδες-όχι βίντεο, όχι streaming) δεν είναι γενικά ευαίσθητοι στην απ'άκρο σ'άκρο καθυστέρηση του κάθε πακέτου, αλλά στον απαραίτητο χρόνο που χρειάζεται για την εξ'ολοκλήρου μεταφορά ενός αρχείου, που είναι ίσος με το χρόνο απόκρισης της σχετικής ροής [34].

Οι ροές που συναντάμε διαχωρίζονται σε δύο είδη. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στο αν ο ρυθμός της κίνησης της ροής εξαρτάται από τις συνθήκες της κίνησης ή όχι. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό έχουμε λοιπόν τις ελαστικές ροές και τις ροές streaming. Η ελαστική κίνηση απαρτίζεται από προσαρμοστικές TCP ροές, όπως η μεταφορά ψηφιακών αρχείων κατά την οποία τόσο ο ρυθμός όσο και ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της αποστολής είναι έννοιες άμεσα δυναμικά συνδεδεμένες με την τρέχουσα κατάσταση της δικτυακής κίνησης που επικρατεί. Επομένως, η ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας καταγράφεται εύκολα από το ρυθμό μετάδοσης των ροών καθώς και από τη διάρκειά τους. Στην αντίθετη πλευρά βρίσκονται οι ροές streaming οι οποίες είναι συνεχείς ροές κίνησης αποτελούμενες από UDP ροές. Στην περίπτωση αυτή το UDP δεν ελέγχει το ρυθμό μετάδοσης ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες κίνησης όπως κάνει το TCP. Με απλά λόγια, στο UDP ο ρυθμός μετάδοσης είναι ανεξάρτητος απ'την κίνηση εντός της δικτυακής υποδομής. Τέτοιες ροές streaming δημιουργούνται στις εφαρμογές ήχου και βίντεο.

Στην παρούσα μελέτη που διεξάγουμε μας ενδιαφέρουν μόνο οι υπηρεσίες email και μεταφοράς αρχείων (ftp) γι'αυτό και θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με ελαστική κίνηση δεδομένων.

4.4.2 Ανάλυση και Χρόνος Διαφίξεων στο Επίπεδο Συνεδριών

Στην παράγραφο αυτή αναλύουμε το μοντέλο που χρησιμοποιούμε για τον χαρακτηρισμό της κίνησης στο επίπεδο των συνεδριών για τους κινητούς χρήστες που κάνουν χρήση των «έξυπνων» συσκευών τους. Η κατανόηση της χρονικής διάρκειας μιας συνεδρίας καθώς και της κατανομής του χρόνου διαφίξεων μεταξύ αυτών είναι θεμελιώδης για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των πόρων του δικτύου. Πληροφορίες όπως αυτές είναι πολύτιμες και για τους φορείς εκμετάλλευσης του κυψελωτού δικτύου επειδή ο χρόνος που παραμένει ενεργή μια συσκευή ενός κινητού χρήστη κατά τη μεταφορά των δεδομένων επηρεάζει περισσότερο τη χρησιμοποίηση των ραδιοπόρων παρά το συνολικό όγκο της κίνησης [36]. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα ακριβούς εκτίμησης των χρονικών παραμέτρων μιας συνεδρίας δεν βελτιώνει απλώς την

αποτελεσματική χρήση των πόρων του συστήματος αλλά συμβάλλει και στη παροχή γνώσεων προς τους κατασκευαστές των συσκευών για καλύτερο σχεδιασμό των χαρακτηριστικών τους με στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης της μπαταρίας.

Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών των ροών, πρέπει πρώτα απ'όλα να καθορίσουμε το μέγεθος κάθε χρονικής σχισμής που ορίσαμε στην αρχή της 4.4. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση του συμβολισμού Δ_i όπου $i=1,2,3,\dots$, με το $|\Delta|$ να υποδηλώνει το μέγεθος της σχισμής αυτής. Το i είναι απλά ο δείκτης της μεταβλητής που μας δείχνει τη συνεδρία στην οποία αναφερόμαστε την εκάστοτε φορά, ως εξής: $i=1$ (1^η συνεδρία), $i=2$ (2^η συνεδρία) κ.ο.κ. Οι αφίξεις των ροών μέσα στις χρονικές σχισμές λαμβάνονται ως μια τυχαία δυαδική διαδικασία, η οποία ορίζεται από την έκφραση:

$$\{F_t : t \in T, F \in (0,1)\} \quad (4.19)$$

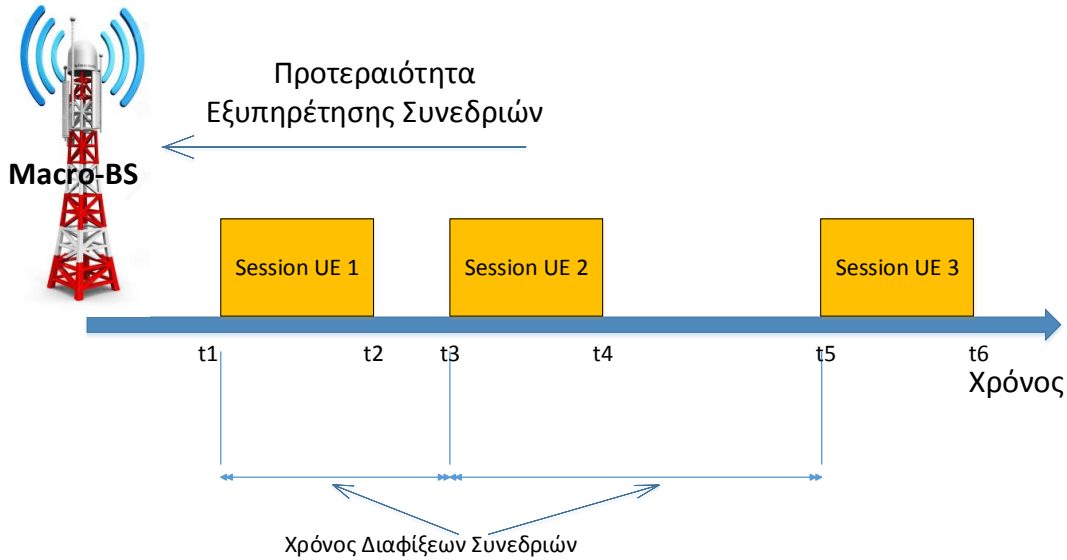
Όπου τα 0 και 1 δηλώνουν απουσία και παρουσία άφιξης ροής, αντίστοιχα. Μια συνεδρία, που αποτελεί μια σειρά ροών αφίξεων μπορεί να οριστεί ως:

$$S\{t_x(i), t_y(i)\} \quad (4.20)$$

Όπου τα $t_x(i), t_y(i)$ είναι οι χρόνοι που αντιστοιχούν στην άφιξη της πρώτης ροής και στην άφιξη της τελευταίας ροής αντίστοιχα για την i -συνεδρία. Ύστερα από τους παραπάνω ορισμούς είμαστε έτοιμοι να ορίσουμε μια πολύ χρήσιμη μετρική, η οποία μας παρέχει τη χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών συνεδριών που καταφθάνουν σε τυχαίες χρονικές στιγμές. Η μετρική αυτή ονομάζεται μέσος χρόνος διαφίξεων συνεδριών (average session interarrival time).

Ο μέσος χρόνος διαφίξεων συνεδριών ορίζεται ως η μέση τιμή του χρόνου διαφίξεων μεταξύ όλων των συνεχόμενων συνεδριών. Για το Σχήμα 4.3 που παρατίθεται κατωτέρω, ο χρόνος διαφίξεων μεταξύ 1^{ης} και 2^{ης} συνεδρίας είναι ίσος με $t_3 - t_1$, ο χρόνος διαφίξεων μεταξύ 2^{ης} και 3^{ης} συνεδρίας είναι ίσος με $t_5 - t_3$ κ.ο.κ για όλα τα ζεύγη συνεχόμενων συνεδριών μέχρι το τέλος. Η μέση τιμή όλων των παραπάνω χρόνων αποτελεί τη μετρική αυτή. Με αυστηρότερη μαθηματική διατύπωση, θα μπορούσαμε να πούμε ότι:

$$T_{avg} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{t_x(i+1) - t_y(i)}{n-1} \quad (4.21)$$



Σχήμα 4.3: Αναπαράσταση της διαδικασίας αφίξεων των συνεδριών στον BS και σχηματική ανάδειξη του χρόνου διαφίξεων συνεδριών

4.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Οι παράγραφοι 4.4.1 και 4.4.2 είχαν σκοπό να θέσουν τις βάσεις και το γνωστικό επίπεδο για την πραγμάτωση των αποτελεσμάτων στα οποία αναπτύσσουμε διάφορα πειράματα με αυξανόμενο αριθμό χρηστών n ώστε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως η διωνυμική κατανομή προσφέρεται για χειρισμό τέτοιων προβλημάτων καθώς και ότι η διαδικασία Poisson που προσεγγίζει την οριακή περίπτωση της διωνυμικής παρέχει κι αυτή με τη σειρά της μια αντίστοιχη σχετική ακρίβεια λύσης.

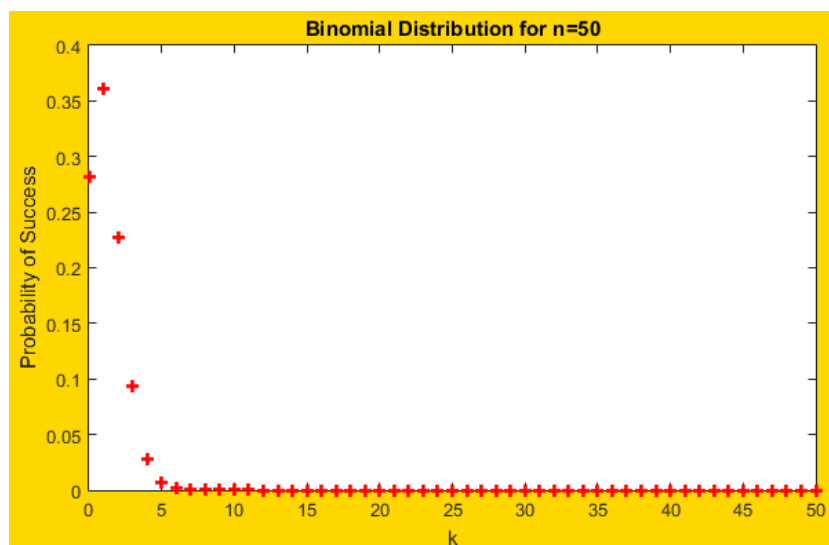
Από [37] λαμβάνουμε την πληροφορία ότι ο μέσος χρόνος διαφίξεων συνεδριών για ένα πλήθος 4900 συνδρομητών (δείγμα αρκετά μεγάλο για να είναι αξιόπιστο) με τις αντίστοιχες τερματικές συσκευές τους είναι ίσος με 40sec. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το πλήθος αυτών των συσκευών και άρα το αντίστοιχο πλήθος χρηστών που τις χειρίζονται παράγει απ'τη σκοπιά του σταθμού βάσης κατά μέσο όρο μια (1) αίτηση σύνδεσης για ελαστική κίνηση δεδομένων κάθε 40sec. Άρα ισχύει ότι ο Σ.Β. δέχεται μια (1) συνεδρία για κάθε 40sec. Η πιθανότητα λοιπόν να βρεθούμε σε κατάσταση επιτυχίας (εκείνη τη στιγμή να δέχεται αίτηση ο Σ.Β.) είναι ίση με:

$$p = \frac{1}{40} = 0,025$$

Με δεδομένο τον αρκετά μεγάλο αριθμό χρηστών (άρα και αιτήσεων) και με την πιθανότητα επιτυχούς πραγματοποίησης του γεγονότος: {ο BS δέχεται αίτηση τώρα} να είναι επαρκώς μικρή καταλήγουμε στο πόρισμα ότι το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με χρήση της διωνυμικής κατανομής $B(n, p)$.

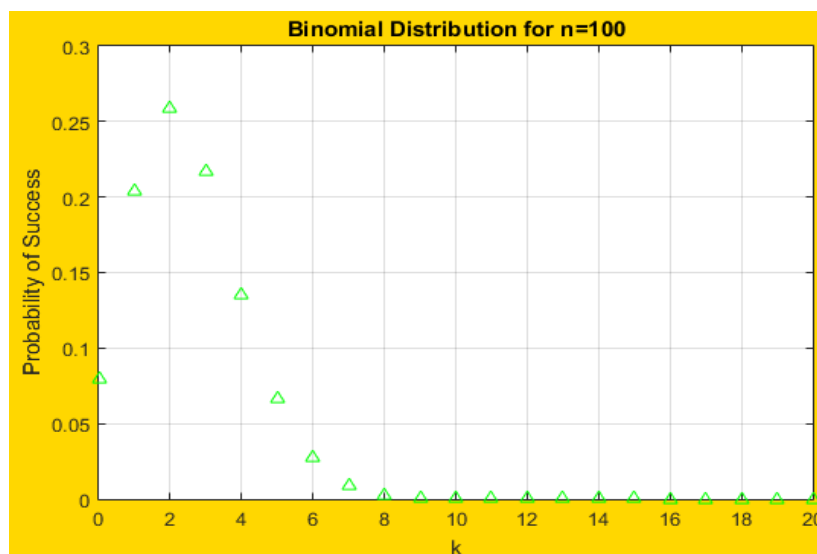
Ακολουθούν οι περιπτώσεις για πλήθος πελατών ίσο με 50, 100, 1000 αντίστοιχα καθώς και τα γραφήματα που τις περιγράφουν.

- Για $n = 50$ η διωνυμική κατανομή δίνεται από το Γράφημα 4.1:



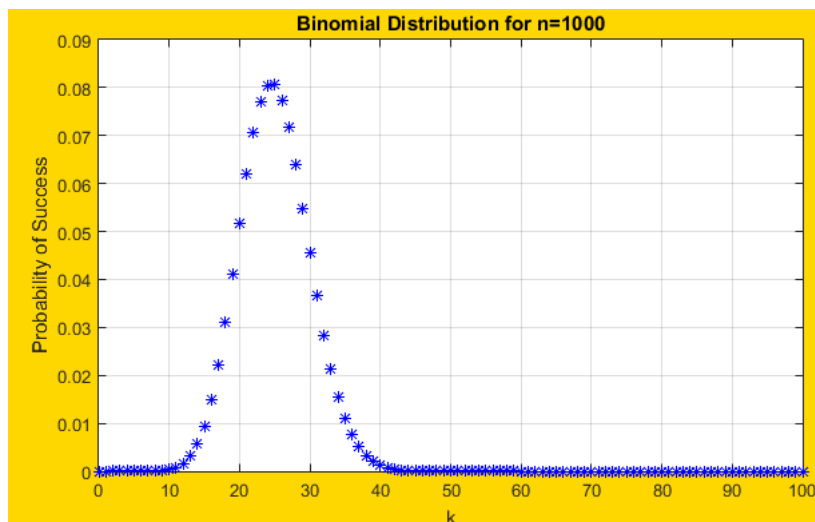
Γράφημα 4.1

- Για $n = 100$ η διωνυμική κατανομή δίνεται από το Γράφημα 4.2:



Γράφημα 4.2

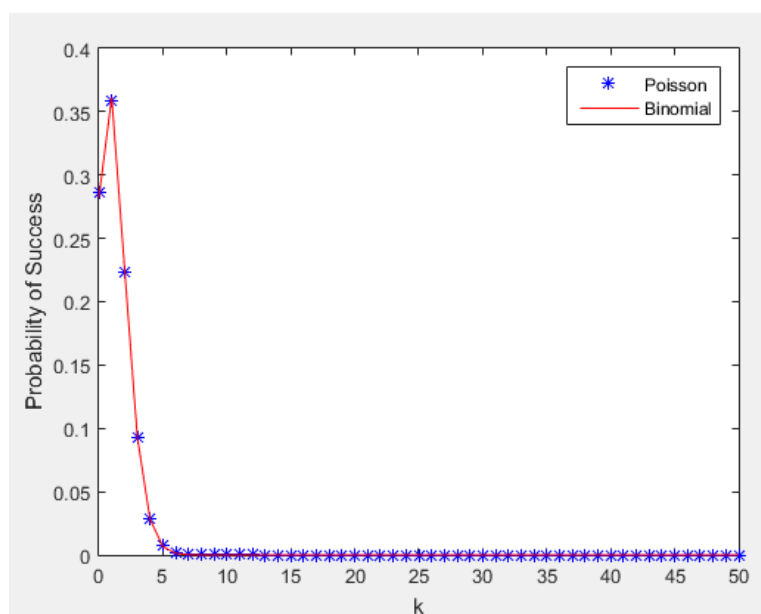
- Για $n = 1000$ η διωνυμική κατανομή δίνεται από το Γράφημα 4.3:



Γράφημα 4.3

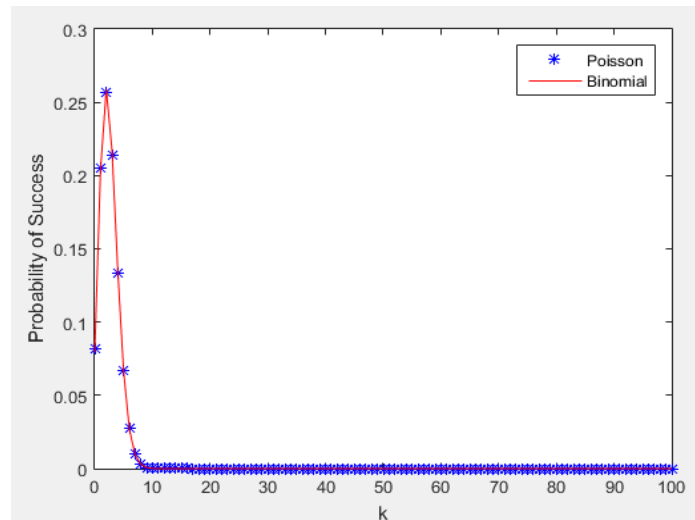
Ακολουθούν τα συγκριτικά γραφήματα 4.4 – 4.6 στα οποία ανάλογα με το πλήθος των χρηστών παρατηρούμε την προσέγγιση που επιτυγχάνει η Poisson στην οριακή περίπτωση της διωνυμικής.

- Για $n = 50$ οι κατανομές Poisson και Διωνυμική δίνονται από το Γράφημα 4.4:



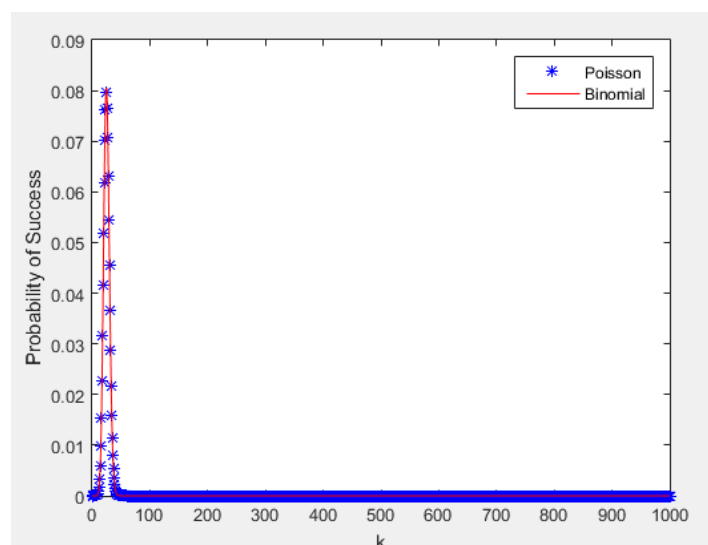
Γράφημα 4.4

- Για $n=100$ οι κατανομές Poisson και Διωνυμική δίνονται από το Γράφημα 4.5:



Γράφημα 4.5

- Για $n=1000$ οι κατανομές Poisson και Διωνυμική δίνονται από το Γράφημα 4.6:

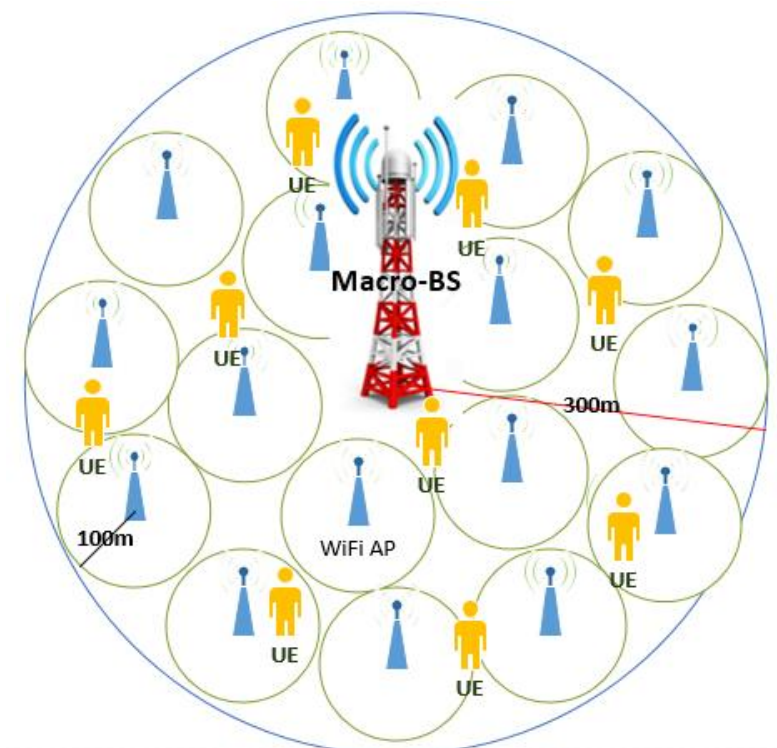


Γράφημα 4.6

Συμπεράσματα: Από τα παραπάνω αποτελέσματα που έλαβαν χώρα διαπιστώνουμε ότι όσο μεγαλώνει το πλήθος των χρηστών που αιτούνται σύνδεσης στον BS της μακροκυψέλης τότε τόσο καλύτερα προσεγγίζει η κατανομή Poisson την διωνυμική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της μεγάλης ακρίβειας που επιτυγχάνεται είναι αυτό που διακρίνεται στο Γράφημα 4.6.

Κεφάλαιο 5. Πολιτικές Δρομολόγησης Φορτίου με Χρήση Κριτηρίου Μέγιστου Λόγου SINR

Μοντελοποιώντας ένα HCN ως ένα κυψελωτό δίκτυο δύο επιπέδων, όπου σε κάθε επίπεδο έχουμε BSs μιας συγκεκριμένης κατηγορίας όπως φεμτοκυψέλες και πικοκυψέλες. Στη μελέτη που πραγματοποιούμε, το βασικό δίκτυο είναι τεχνολογίας LTE, το γνωστό σε όλους μας 4G και στο 2^ο επίπεδο έχουμε το πρότυπο 802.11a μέσω των WiFi APs, που είναι καταναμημένα εντός της μακροκυψέλης με τέτοιο τρόπο ώστε το άθροισμα των περιοχών κάλυψης των WiFi να επικαλύπτει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της κυψέλης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Απεικόνιση κατανομής των WiFi AP στην επιφάνεια μιας μακροκυψέλης του δικτύου LTE

Οι BS μεταξύ των επιπέδων δύνανται να διαφέρουν σε χαρακτηριστικά όπως η ισχύς εκπομπής, ο υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων καθώς και η πυκνότητα με την οποία κατανέμονται στο χώρο. Υποθέτουμε ότι οι BS του i -οστού επιπέδου κατανέμονται με βάση μια διαδικασία Φ_i με πυκνότητα λ_i , ισχύ μετάδοσης P_i και έχουν κατώφλι λόγου SINR ίσο με β_i . Πιο συγκεκριμένα, ο κινητός χρήστης μπορεί να επικοινωνήσει με το BS που βρίσκεται στη θέση x της κυψέλης του i -οστού επιπέδου μόνο εάν ο λόγος του SINR είναι μεγαλύτερος από το SINR του BS από β_i . Έτσι, κάθε επίπεδο μπορεί να ορισθεί μονοσήμαντα με βάση την έκφραση [24]:

$$\{P_i, \beta_i, \lambda_i\} \quad (5.1)$$

Όπου:

P_i : η ισχύς μετάδοσης του BS, ανάλογα το επίπεδο που βρισκόμαστε

β_i : το κατώφλι για SINR

λ_i : η πυκνότητα της διαδικασίας Φ_i που ακολουθούν οι BSs

i : i-οστό επίπεδο

Η κατανομή χρηστών έχει αναλυθεί παραπάνω, επομένως το μόνο που απομένει για να μπορέσουμε να εξάγουμε το λόγο SINR είναι η ισχύς του θορύβου και οι παρεμβολές που δέχεται κάθε χρήστης. Η εξασθένιση της ισχύος μεταξύ ενός BS στη θέση x κι ενός τυπικού χρήστη που διασυνδέεται σε αυτόν ορίζεται με h_x και ακολουθεί το ντεντερμινιστικό μοντέλο απωλειών το οποίο αναλύεται σε επόμενη παράγραφο. Θα μπορούσαμε σε αυτό το πλαίσιο μελέτης μας να επιλέξουμε κάποια από τις παραπάνω κατανομές να είναι πιο σύνθετη, όπως συμβαίνει στο [43] όπου θεωρείται ένα γενικό μοντέλο απωλειών παρεμβολής ικανό να χειριστεί οποιαδήποτε στατιστική κατανομή που χρησιμοποιείται. Τέτοιες γενικεύσεις όμως όπως είναι εύκολα κατανοητό, αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα του προβλήματός μας και ταυτόχρονα μειώνουν την αξιοπιστία και την ευπείθεια της λύσης συνεπώς αφήνονται για μελλοντική εργασία.

Η συνήθης συνάρτηση απωλειών διαδρομής δίνεται [80] από τη σχέση:

$$l(x) = \|x\|^{-a} \quad (5.2)$$

Όπου ο εκθέτης υπακούει στον περιορισμό: $a > 2$ και ορίζεται ως συντελεστής απωλειών διάδοσης.

Ως εκ τούτου, η λαμβανόμενη ισχύς του κινητού χρήστη από τον BS που βρίσκεται στην τοποθεσία x_i (ανήκει στο i-οστό επίπεδο) δίνεται από τη:

$$P_i \cdot h_{x_i} \|x_i\|^{-a} \quad (5.3)$$

Όπου κι εδώ η h_{x_i} ακολουθεί το ντεντερμινιστικό μοντέλο απωλειών. Τελικά, ο λόγος SINR που προκύπτει για τον κινητό χρήστη όταν αυτός συνδέεται στον BS είναι:

$$SINR(x_i) = \frac{P_i \cdot h_{x_i} \|x_i\|^{-a}}{\sum_{j=1}^k \sum_{x \in \Phi_j \setminus x_i} P_j \cdot h_x \|x\|^{-a} + \sigma^2} \quad (5.4)$$

Όπου ο όρος σ^2 αποτελεί το σταθερό προσθετικό θόρυβο κι ένας από τους τρόπους για να εκτιμήσουμε την τιμή του είναι σύμφωνα με το επιθυμητό SNR που έλαβε ο χρήστης στην άκρη της κυψέλης. Υποθέτουμε τώρα πως ο χρήστης συνδέεται απευθείας στον BS που του παρέχει τον μέγιστο λαμβανόμενο SINR. Ένας τυπικός κόμβος είναι εντός της περιοχής κάλυψης αν ισχύει η μαθηματική σχέση:

$$\max_{x \in \Phi_i} SINR(x) > \beta_i \quad (5.5)$$

Για κάποια $1 \leq i \leq k$, όπου προφανώς $k = 2$ επειδή είμαστε σε διεπίπεδο δίκτυο.

Στο σημείο αυτό, για χάριν απλοποίησης υπολογισμού του λόγου SINR ενός κινητού χρήστη, εισάγουμε κάποιες υποθέσεις που θα μας διευκολύνουν σημαντικά το έργο μας.

Θεώρηση 1

Αρχικά, υποθέτουμε ότι κατά τη διάρκεια λήψης δεδομένων ενός χρήστη από τον BS στον οποίον μόλις συνδέθηκε, οι γειτονικοί χρήστες που αιτούνται κι αυτοί σύνδεσης, καλούνται «ενεργοί» (active). Όλοι οι ενεργοί χρήστες που βρίσκονται εντός μιας υπολογίσιμης απόστασης από τον χρήστη ο οποίος είναι ήδη συνδεδεμένος στο δίκτυο είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία παρεμβολής σε αυτόν. Ωστόσο επειδή η έννοια της «υπολογίσιμης απόστασης» είναι σχετική θεωρούμε ότι το μέγεθος της παρεμβολής I (Interference) από τους γειτονικούς ενεργούς χρήστες είναι μια άγνωστη πεπερασμένη μεταβλητή σταθερής τιμής. Αν ορίσουμε ως n τον αριθμό των γειτονικών ενεργών χρηστών τότε ισχύει ότι:

$$n \in [0, m] \quad (5.6)$$

Όπου στην περίπτωση $n=0$ ο αριθμός γειτονικών χρηστών που προκαλούν παρεμβολές είναι μηδενικός και συνεπώς:

$$I = 0 \Big|_{n=0} \quad (5.7)$$

Ενώ για $n = m$ οι γειτονικοί ενεργοί χρήστες φτάνουν το μέγιστο δυνατό πλήθος και επομένως η προκύπτουσα παρεμβολή είναι η μέγιστη δυνατή, δηλαδή:

$$I = I_{\max} \Big|_{n=m} \quad (5.8)$$

Για να μπορέσουμε να καταγράψουμε το μέγεθος της παρεμβολής εισάγουμε τη μετρική $P_{Interference}$ η οποία ισούται με το άθροισμα των ισχύων των γειτονικών ενεργών χρηστών.

Έτσι λέμε ότι:

$$P_{Interference} = \sum_{i=0}^m P_i \quad (5.9)$$

Με $P_{Interference} \Big|_{i=0} = P_0 = 0$ (5.10) λόγω του ότι για $i=0$ έχω μηδενικούς ενεργούς γειτονικούς χρήστες υπεύθυνους για παρεμβολή κι άρα η ισχύς παρεμβολών είναι μηδενική.

Θεώρηση 2

Οι παρεμβολές πιθανών ενεργών χρηστών από γειτονικές κυψέλες θεωρούνται αμελητέες. Η υπόθεση αυτή γίνεται λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας που προκύπτει απ'τη μελέτη ενός τέτοιου φαινομένου (Inter-Cell Interference – ICI) [17], [18] οπότε στη διπλωματική αυτή λαμβάνουμε υπόψιν μόνο την ενδοκυψελική παρεμβολή χρηστών (Intra-Cell Interference) [18] που είναι και η σημαντικότερη από πλευράς ισχύος. Ακόμη και στην περίπτωση που ένας κινητός χρήστης βρίσκεται στα όρια της κυψέλης που ανήκει και η πιθανότητα ανάπτυξης ισχυρών παρεμβολών από χρήστες κάποιας γειτονικής κυψέλης είναι αρκετά αυξημένη θα ισχύει και πάλι η θεώρηση 2, οπότε θα λαμβάνεται μόνο η ενδοκυψελική παρεμβολή.

Με τις ανωτέρω υποθέσεις μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε το μέσο SINR ενός τυπικού κινητού χρήστη του i -οστού επιπέδου που βρίσκεται σε απόσταση r από το BS στον οποίο συνδέθηκε. Με βάση τη σχέση (3.4) αλλά και τον ορισμό του λόγου SINR έχουμε:

$$\overline{SINR}_i = \frac{P_{i,R}}{N_o \cdot W_i + P_{Interference}} \quad (5.11)$$

Όπου:

$P_{i,R}$: η ισχύς που φτάνει στον κινητό χρήστη κατά την μετάδοση από τον πομπό του i -οστού επιπέδου κατά τη ζεύξη downlink μεταξύ των

N_o : η φασματική πυκνότητα θορύβου, που είναι ίση με -174 dBm/Hz (AWGN)

W_i : το εύρος ζώνης συχνοτήτων του i -οστού επιπέδου

$P_{Interference}$: η μετρική που ορίσαμε στην (5.9) και εκφράζει το μέγεθος της ισχύος παρεμβολής από τους ενεργούς γειτονικούς χρήστες

Στα συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα, οι κεραιές που αποτελούν τους σταθμούς βάσης που κυρίως είναι πανκαντευθυντικές τείνουν να είναι αρκετά ψηλά, πάνω από μεγάλα εμπόδια όπως π.χ. λόφους ή ογκώδη κτίρια με αποτέλεσμα η ακτινοβολούμενη ισχύς να σχηματίζει νοητά ένα κυκλικό περίγραμμα στον ορίζοντα. Έτσι είναι δυνατό να καταμετρηθεί η ισχύς που λαμβάνει κάποιος χρήστης εντός της περιοχής κάλυψης της κεραιάς και να μοντελοποιηθεί σύμφωνα με τα [22], [23] οπότε σύμφωνα με την (1) από [21] προκύπτει η σχέση:

$$P_R = P_T \frac{A \cdot V}{r^\gamma} \quad (5.12)$$

Όπου:

P_R : η ισχύς λήψης στη θέση του κινητού χρήστη

P_T : η ισχύς μετάδοσης του πομπού με τον οποίο συνδέεται ο χρήστης

A : σταθερά του νομοτελειακού μοντέλου που σχετίζεται με το φέρον σήμα

V : αποτελεί έναν τυχαίο παράγοντα που σχετίζεται με το φαινόμενο της σκίασης που προκαλείται λόγω της ύπαρξης μεγάλων εμποδίων στην περιοχή κάλυψης της κυψέλης ενός μακροκυψελωτού δικτύου, η τιμή του οποίου μπορεί να μοντελοποιηθεί από μια Γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή, μηδενικής μέσης τιμής (μοντελοποιείται ως λογαριθμοκανονική) και έχει τυπική απόκλιση μεταξύ του εύρους 6 – 12 dB. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί πως εδώ λόγω του ότι δεν λαμβάνουμε υπόψιν το φαινόμενο της σκίασης ο παράγοντας V τίθεται ίσος με 1, δηλαδή: $V = 1$

r : η απόσταση από τον BS σε m

γ : ο εκθέτης απωλειών διάδοσης (συμβολίζεται και με α)

Με συνδυασμό των σχέσεων (5.11), (5.12) καθώς και της (2.2) από [20] λαμβάνουμε ότι ο μέσος λόγος σήματος-προς-θόρυβο-και-παρεμβολή είναι ίσος με:

$$\overline{SINR}_i = \frac{P_T \cdot A \cdot r^{-a}}{N_o \cdot W_i + P_{Interference}} \quad (5.13)$$

Όπου:

a : ο συντελεστής απωλειών διάδοσης του ντεντερμινιστικού μοντέλου που είναι ο ίδιος με τον συντελεστή γ που ορίσαμε παραπάνω

Τελικά, προκύπτει το κριτήριο της συγκεκριμένης πολιτικής δρομολόγησης, σύμφωνα με το οποίο ένας χρήστης επιλέγει να συνδεθεί σε εκείνον τον BS για τον οποίο ισχύει ότι:

$$\arg \max_i \left(\overline{SINR}_i \right) \quad (5.14)$$

Χαρακτηριστικά του διεπίπεδου συστήματος

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, ισχύει ότι:

- $P_{1T} = 0.3W$, για $i=1$ (LTE)
- $P_{2T} = 0.01W$, για $i=2$ (802.11a)

Επίσης, η σταθερά A είναι ίση με:

$$A = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \quad (5.15),$$

όπου λ : το μήκος κύματος για τη συχνότητα f που χρησιμοποιούμε. Επειδή όμως $f = 2GHz$, έχουμε:

$$c = \lambda \cdot f$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^9} \quad \text{ή}$$

$$\lambda = 0,15$$

Από (3.14) και [20] έχουμε λοιπόν:

$$A \approx 0,0015$$

Για τον συντελεστή α του ντεντερμινιστικού μοντέλου απωλειών έχουμε επίσης από [20] ότι για $f = 2GHz$: $\alpha = 3,8$.

Η ισχύς της φασματικής πυκνότητας του θορύβου υπολογίζεται ίση με:

$$N_o = 10^{-20,4} W$$

Επίσης, ισχύουν:

- $W_1 = 50MHz$, για $i=1$ (LTE)
- $W_2 = 50MHz$, για $i=1$ (802.11a)

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια για την ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου με κριτήριο την πολιτική του μέγιστου SINR. Το 1^ο σενάριο περιγράφει την περίπτωση σύνδεσης του κινητού χρήστη στο BS της μακροκυψέλης του LTE, γιατί απλούστατα αυτός του προσφέρει το μέγιστο λογο SINR, ενώ το 2^ο σενάριο περιγράφει την περίπτωση κατά την οποία ο χρήστης βρίσκεται αρκετά κοντά σε ένα από τα AP που υπάρχουν καταναμημένα μέσα στην έκταση της κυψέλης με αποτέλεσμα η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος από το WiFi να υπερτερεί έναντι αυτής της από το σταθμό βάσης του συστήματος 4G. Στη συνέχεια αναλύουμε αυτά τα δύο σενάρια και εξάγουμε το πόρισμα των αποτελεσμάτων μας.

Σενάριο 1: Σύνδεση UE - BS του μακροκυψελωτού δικτύου

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 5.3 που ακολουθεί, ο UE αφού έκανε τη σχετική αίτηση και αφού διαπίστωσε ποιος γειτονικός σταθμός βάσης του παρέχει το $\max(\text{SINR})$ συνδέεται στον BS της μακροκυψέλης με σκοπό να «κατεβάσει» δεδομένα κατά τη ζεύξη downlink. Όπως διακρίνεται εύκολα ο UE δεν είναι μόνος του αλλά περιτριγυρίζεται από ένα τυχαίο πλήθος άλλων UEs οι οποίοι θέλουν να συνδεθούν κι αυτοί στον ίδιο BS αφού – λόγω απόστασης – παρέχει και σε αυτούς το $\max(\text{SINR})$ εξίσου. Οι γειτονικοί αυτοί χρήστες όπως ορίσαμε και παραπάνω ονομάζονται ενεργοί και είναι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη παρεμβολών στον UE που βρίσκεται υπό σύνδεση.

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι για την εξαγωγή του μέγιστου μέσου SINR του «πράσινου» χρήστη, στον παρονομαστή της (5.13) η ισχύς παρεμβολών που εξάγεται από την (5.9) θα πρέπει να περιλαμβάνει μόνο τις ισχύεις των ενεργών ή «κόκκινων» χρηστών σύμφωνα με τη θεωρία μας. Οι ισχύεις των σημάτων των «πορτοκαλί» και άρα πιο απομακρυσμένων κινητών χρηστών είναι αρκετά ασθενείς στο σημείο που βρίσκεται ο tagged UE με αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται καθόλου υπόψιν στο άθροισμα των ισχύων παρεμβολής.

Θα λέγαμε λοιπόν ότι,

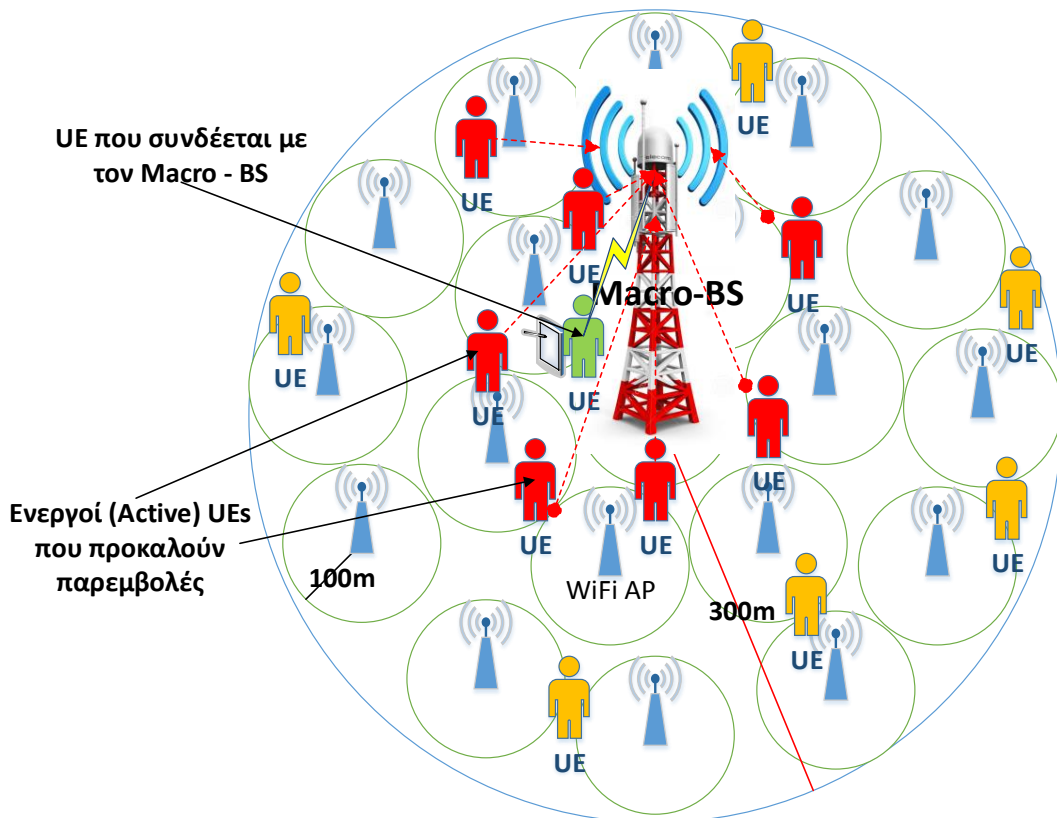
- Για $m = 7$ (7 ενεργοί «κόκκινοι» χρήστες) έχουμε:

$$P_{Interference} = \sum_{i=0}^7 P_i$$

Με $P_0 = 0$ όπως έχουμε δείξει από την (5.10).

Από την (5.13) με αντικατάσταση της ανωτέρω σχέσης λαμβάνουμε το λογο SINR. Ως απόσταση r από το BS χρησιμοποιούμε τη χειρότερη δυνατή περίπτωση (worst case scenario), δηλαδή την περίπτωση που ο UE να μεν είναι συνδεδεμένος στο σταθμό βάσης της μακροκυψέλης όμως απέχει απ'αυτόν τη μέγιστη δυνατή απόσταση που στην προκειμένη είναι ίση με $r = 300m$ (cell-edge association), όσο δηλαδή και η ακτίνα της κυψέλης. Με αντικατάσταση των μεγεθών, έχουμε:

$$\overline{SINR} = \frac{0,3 \cdot 0,0015 \cdot 300^{-3,8}}{10^{-20,4} \cdot 5 \cdot 10^6 + \sum_{i=0}^7 P_i} \quad (5.16)$$

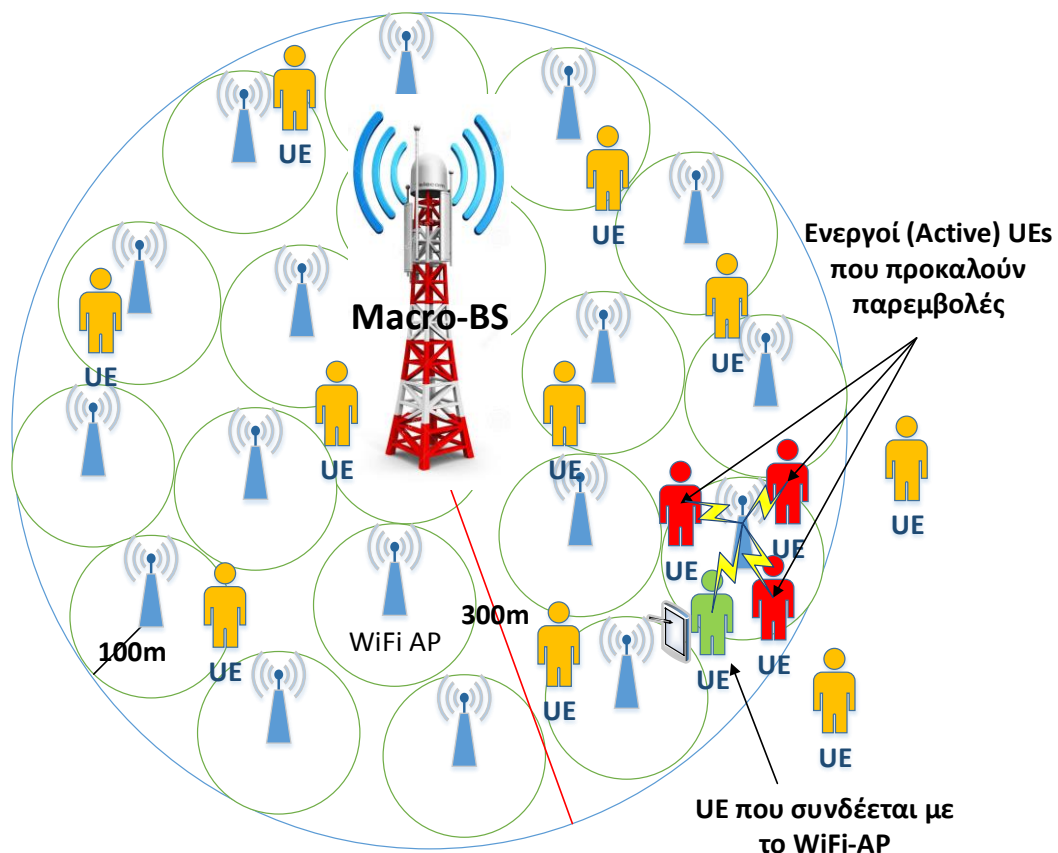


Σχήμα 5.2: Απεικόνιση της κατανομής των UEs με σκοπό την ανάδειξη της συνολικής παρεμβολής που δημιουργείται, όταν ένας εξ'αυτών συνδέεται με τον BS του μακροκυψελωτού δικτύου. Με πράσινο χρώμα διακρίνεται ο UE που κάνει download πληροφοριών (tagged UE), με κόκκινο απεικονίζονται όλοι οι ενεργοί UEs που βρίσκονται σε «κοντινή» απόσταση και είναι υπεύθυνοι για τις παρεμβολές που αναπτύσσονται στον tagged UE, ενώ τέλος με πορτοκαλί εμφανίζονται οι UEs που δεν παίζουν κάποιο ρόλο κατά την ανταλλαγή συνεδριών αφού η απόστασή τους από τον tagged χρήστη είναι τέτοια που πρακτικά η ισχύς του σήματος παρεμβολής που εισάγουν είναι από αμελητέα έως μηδενική

Με γνώση λοιπόν των ισχύων μετάδοσης των πομπών των UEs μπορούμε τελικώς να υπολογίσουμε το \overline{SINR} από την (5.16).

Σενάριο 2: Σύνδεση UE – WiFi AP του προτύπου 802.11a

Στην περίπτωση αυτή, ο UE που εξετάζουμε (απεικονίζεται κι εδώ με πράσινο χρώμα) αφού καταθέτει τη σχετική αίτηση στον BS της μακροκυψέλης για να γίνει η σύνδεσή του με το δίκτυο LTE αντιλαμβάνεται με χρήση του κριτηρίου του max SINR ότι λόγω θέσης υπάρχει WiFi AP που του παρέχει μεγαλύτερη ισχύ απ’ ότι ο σταθμός βάσης του μακροκυψελωτού δικτύου. Έτσι, η διαδικασία του download δεδομένων πραγματοποιείται από αυτό το σημείο και δεν γίνεται όπως προηγούμενως. Η γραφική αναπαράσταση της περιγραφής που μόλις δώσαμε διακρίνεται στο Σχήμα 5.4 που ακολουθεί:



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση της κατανομής των UEs με σκοπό την ανάδειξη της παρεμβολής που δημιουργείται εντός της περιοχής κάλυψης του WiFi AP με το οποίο συνδέεται ο χρήστης αναφοράς (tagged UE). Ο χρήστης αυτός διακρίνεται με πράσινο χρώμα κατά τη διάρκεια του downloading, με κόκκινο απεικονίζονται όλοι οι ενεργοί UEs που βρίσκονται εντός της ακτίνας κάλυψης του AP οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τις παρεμβολές στον tagged UE, ενώ με πορτοκαλί εμφανίζονται οι UEs που δεν παίζουν κάποιο ρόλο κατά την ανταλλαγή συνεδριών αφού η απόστασή τους από τον χρήστη αναφοράς είναι τέτοια που δεν επιτρέπει τη σύνδεσή τους στο ίδιο δίκτυο WiFi με αυτόν

Αρχικά, όλοι οι κινητοί χρήστες που σκοπεύουν να «κατεβάσουν» πληροφορίες από το διαδίκτυο αιτούνται σύνδεσης στον BS της μακροκυψέλης, μια διαδικασία που ακολουθείται όπως και στην περίπτωση του Σεναρίου 1. Η διαφορά με πριν είναι ότι κατόπιν αποστολής του αιτήματος και με τη βοήθεια του κριτηρίου μέγιστου λόγου SINR ο χρήστης αντιλαμβάνεται πως η μέγιστη ισχύς που του παρέχεται είναι από το πλησιέστερο σε αυτόν WiFi, εφόσον φυσικά βρίσκεται εντός της ακτίνας κάλυψής του. Έτσι, αντί η διαδικασία ανταλλαγής συνεδριών να ξεκινήσει μεταξύ του UE και του BS του LTE, πραγματοποιείται μέσω της ζεύξης UE-WiFi AP.

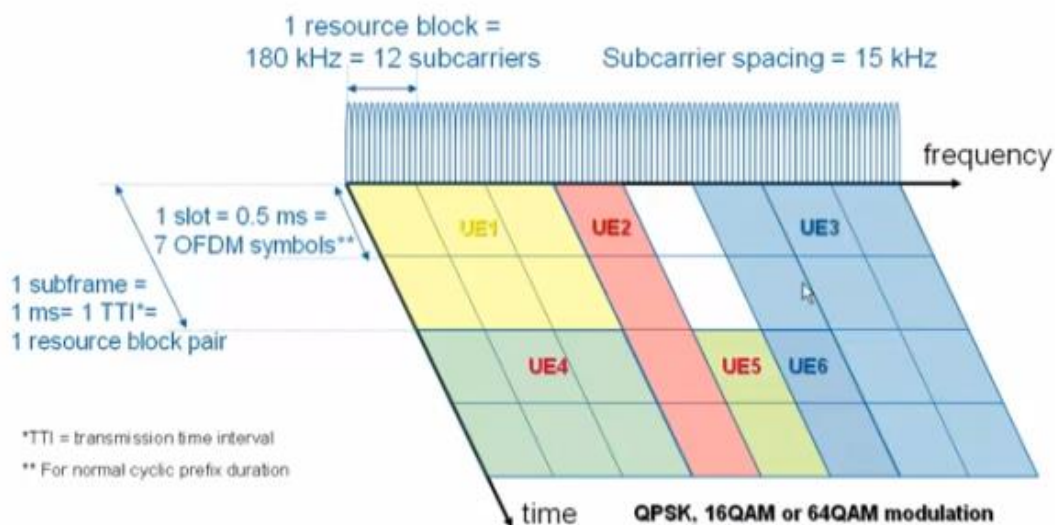
Αξίζει να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι, λόγω της χρησιμοποίησης διαφορετικού εύρους ζώνης συχνοτήτων από το πρότυπο 802.11a για το οποίο μάλιστα δεν απαιτείται αδειοδοτημένο φάσμα λειτουργίας η δημιουργία παρεμβολών του tagged UE οφείλεται τόσο στην ύπαρξη γειτονικών WiFi AP όσο επίσης και στους κινητούς χρήστες που τη στιγμή της σύνδεσης του χρήστη αναφοράς με το WiFi αιτούνται σύνδεσης και αυτοί. Οι ενεργοί χρήστες που διακρίνονται με «κόκκινο» στέλνουν και αυτοί αιτήσεις σύνδεσης πρώτα στον BS και στη συνέχεια συνδέονται στο δίκτυο WiFi, αφού και γι'αυτούς ο μέγιστος SINR λόγος παρέχεται από το πλησιέστερο AP. Η διαδικασία υπολογισμού του SINR είναι ακριβώς ίδια με πριν και βασίζεται στις (5.9), (5.13). Λαμβάνοντας πάλι το σενάριο χειρότερης περίπτωσης, ότι δηλαδή ο κινητός χρήστης που συνδέεται βρίσκεται οριακά εντός της περιοχής κάλυψης του WiFi, έχουμε ότι: $r = 100m$ με την ισχύ εκπομπής να είναι πλέον στα $0,01W$ και τον αριθμό των ενεργών UEs που προκαλούν παρεμβολή να είναι ίσο με 3, σύμφωνα με το παράδειγμα του Σχήματος 5.3 ($m = 3$).

Κεφάλαιο 6. Πολιτική Διαχείρισης Φορτίου σύμφωνα με το Κριτήριο Πιθανοτικής Δρομολόγησης και Χρήση Round-Robin Προγραμματιστή για την Εξυπηρέτηση των UEs

6.1 Εισαγωγή

Το δίκτυο LTE χρησιμοποιεί μια διεπαφή για την κατερχόμενη ζεύξη η οποία βασίζεται στην τεχνολογία OFDMA, ενώ για την ανερχόμενη ζεύξη γίνεται χρήση της SC-FDMA [39]. Στην εργασία αυτή επικεντρωνόμαστε μόνο στην κάτω ζεύξη όπως έχουμε αναφέρει πολλάκις, όπου χρησιμοποιείται μόνο η OFDMA.

Η δομή του πλαισίου της διεπαφής για την κατερχόμενη ζεύξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από 10 υποπλαίσια καθένα απ'τα οποία έχει διάρκεια 1ms και το κάθε υποπλαίσιο διαιρείται επιπλέον σε δύο ισομηκής χρονικές σχισμές των 0,5ms έκαστη [49]. Μια χρονική σχισμή απαρτίζεται από 7 OFDM σύμβολα στο πεδίο του χρόνου (κανονικό κυκλικό πρόθεμα) ενώ διαιρείται στο πεδίο της συχνότητας σ'έναν αριθμό από μπλοκ ραδιοπόρων (Resource Blocks) που εξαρτώνται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού. Ο ρυθμός bit καθώς και η χωρητικότητα κάθε RB καθορίζεται από το σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) που χρησιμοποιείται σε αυτό. Το πρότυπο LTE επιβάλλει κάποιους περιορισμούς όταν σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα μετάδοσης (TTI), RB ανατίθενται στον ίδιο χρήστη, τότε πρέπει να έχουν τα ίδια MCS. Σημειώνουμε πως η μικρότερη μονάδα ραδιοπόρων που μπορεί να εκχωρηθεί σ'έναν UE από τον προγραμματιστή (scheduler) του δικτύου είναι το μπλόκ προγραμματισμού (scheduling block), το οποίο ισούται είτε με δύο γειτονικά RBs όταν αναφερόμαστε σε Διαίρεση Χρόνου (TD) είτε με ένα υπο-κανάλι στη Διαίρεση Συχνότητας (FD). Από δω και στο εξής το RB θα αναφέρεται στο μπλόκ προγραμματισμού και όρος χρονική σχισμή ή χρονοθυρίδα στο μήκος του υποπλαισίου (1TTI).



Σχήμα 6.1: Η δομή του πλαισίου στο LTE [78].

6.2 Μοντελοποίηση της Κίνησης Δεδομένων

Θεωρούμε την έκταση της κυψέλης μας ως μια ομοιόμορφη ιδανικά λεία κυκλική επιφάνεια, ακτίνας r , την οποία συμβολίζουμε με $A \subset R^2$ [40]. Υποθέτοντας ομοιόμορφη και ανεξάρτητη κατανομή χρηστών, η πιθανότητα ένας χρήστης να βρίσκεται σε ένα κυκλικό δακτύλιο πλάτους dr , σε απόσταση R από τον BS είναι:

$$f_R(r) dr = P(r < R < r + dr) = \frac{2\pi r dr}{\pi R^2} = \frac{2r dr}{R^2} \quad (6.1)$$

Ο ρυθμός μετάδοσης ενός χρήστη που βρίσκεται στη θέση $r \in A$ και ο οποίος συνδέεται μόνο με έναν σταθμό βάσης κάθε φορά ορίζεται με τη μεταβλητή $R(r)$. Προς αποφυγή παρερμηνεύσεων όταν αναφερόμαστε σε ρυθμό μετάδοσης θα συνοδεύουμε τη μεταβλητή και από το όρισμα της r ενώ στην περίπτωση που μιλάμε για απόσταση τότε ο συμβολισμός θα είναι μόνο με το γράμμα r . Για να είμαστε πιο σαφείς, λόγω της ύπαρξης εξασθένησης κατά τη διάδοση ενός σήματος, η οποία ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος άλλοτε είναι μεγαλύτερη κι άλλοτε μικρότερη θα πρέπει να ορίσουμε μια ακριβέστερη έκφραση για το ρυθμό μετάδοσης του κινητού χρήστη στη τυχαία θέση r . Μια τέτοια έκφραση που λαμβάνει πρόνοια για φαινόμενα απωλειών είναι η ακόλουθη και βασίζεται στη σχέση του Shannon [42]:

$$R(r) = WE \left[\log_2 (1 + SNR(r)) \right] \quad (6.2)$$

Όπου:

W : είναι το εύρος ζώνης (5MHz)

$E[\]$: η αναμενόμενη τιμή του μεγέθους

Το $SNR(r)$ αντιστοιχεί στο λόγο σήματος-προς-θόρυβο-και-παρεμβολή για την τυχαία θέση r του συνδρομητή. Επειδή η μεταβλητή αυτή δεν μπορεί να είναι γνωστή εκ των προτέρων λόγω ύπαρξης των φαινομένων που προαναφέραμε, ο ρυθμός μετάδοσης που ορίστηκε στην (6.2) αναφέρεται στο μέσο επιτεύξιμο ρυθμό μετάδοσης που προκύπτει λαμβάνοντας μέριμνα για όλες τις πιθανές καταστάσεις απωλειών και υποθέτοντας τέλεια προσαρμογή κατά τη σύνδεση UE-BS.

Όπως γίνεται σε όλη την πορεία της εργασίας έτσι κι εδώ η κίνηση που εξετάζουμε είναι μόνο ελαστική όπως για παράδειγμα η μεταφορά αρχείων από το διαδίκτυο στο τερματικό ενός κινητού χρήστη μέσω FTP. Έστω λοιπόν ότι ο αριθμός των χρηστών μας είναι ίσος με n και το μέγεθος του αρχείου που επιθυμεί κάποιος από αυτούς να κάνει download είναι ίσο με σ , όπου $E[\sigma] < +\infty$ και $E[\sigma^2] < +\infty$ [40]. Με υλοποίηση ενός απλού προγραμματιστή Round-Robin προς εξυπηρέτηση των n συνδρομητών έχουμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης ενός χρήστη που βρίσκεται στη θέση r είναι ίσος με: $\frac{R(r)}{n}$,

λόγω των n εν εξελίξει ροών που αιτούνται σύνδεσης, σύμφωνα πάντα με την προτεραιότητα χρηστών που ορίζει ο προγραμματιστής. Υποθέτουμε ότι ο προγραμματιστής δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση του καναλιού διάδοσης και συνεπώς δεν έχει γνώση του ασύρματου περιβάλλοντος με αποτέλεσμα φαινόμενα

όπως η σκίαση, οι ανακλάσεις και κινητικότητα του χρήστη να μην υπολογίζονται. Ως αποτέλεσμα της παραδοχής αυτής λαμβάνουμε τη σταθερότητα του ρυθμού μετάδοσης που διατηρείται σ' όλη τη διάρκεια του downloading, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά την ανάλυσή μας. Όπως ίσως να παρατηρήσατε, ασχολούμαστε μόνο με μια μακροκυψέλη και το τι συμβαίνει έξω από αυτή δεν μας ενδιαφέρει εδώ. Εξετάζουμε αποκλειστικά τη σύνδεση των χρηστών με το Σ.Β. της ή τα σημεία WiFi εντός αυτής. Αυτή η παραδοχή προέκυψε λόγω του ότι αμελούμε φαινόμενα όπως αυτό της παρεμβολής μεταξύ των κυψελών κι άρα το βασικό μας μοντέλο είναι η μονάδα της κυψέλης. Κάθε κυψέλη λοιπόν, διαθέτει ένα αποκλειστικό κανάλι κατερχόμενης ζεύξης, στο οποίο οι πόροι διαμοιράζονται ισάριθμα στις χρονοθυρίδες μεταξύ των ενεργών χρηστών. Υπό αυτή την οπτική γωνία μπορούμε να εξετάσουμε κάθε σταθμό ξεχωριστά, στο επίπεδο ροών, ως ένα σύστημα αναμονής και συγκεκριμένα ως ένα μοντέλο αναμονής M/G/1/PS (Processor Sharing) [41].

Οι χρήστες που βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψης της κυψέλης και εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης αυτής, παράγουν κίνηση σε συνεδρίες όπως έχουμε αναφέρει. Κάθε συνεδρία απαρτίζεται από έναν τυχαίο αριθμό ροών δεδομένων που χωρίζονται με διαστήματα αδράνειας. Μεταξύ δυο διαδοχικών διαστημάτων αδράνειας παρεμβάλλεται μια ροή δεδομένων (data flow). Οι συνεδρίες που καταφθάνουν στον Σ.Β. ακολουθούν μια τυχαία διαδικασία. Για την μοντελοποίηση της διαδικασίας άφιξης χρησιμοποιούμε την πλέον διαδεδομένη και αποτελεσματική στοχαστική διαδικασία, τη διαδικασία Poisson (Poisson Process) η οποία χρησιμοποιείται και για να προσομοιώσει την κίνηση των κλήσεων στα δίκτυα της κλασικής τηλεφωνίας. Έτσι, λαμβάνονται οι αιτήσεις των χρηστών για κίνηση downlink σύμφωνα με την κατανομή Poisson, με ρυθμό λ . Θεωρούμε επίσης το μέσο μέγεθος των ροών ίσο με $E[\sigma]$, οπότε το φορτίο του BS είναι ίσο με:

$$\rho = E[\sigma] \int_A \frac{\lambda(dr)}{R(r)} \quad (6.3)$$

Όπου:

$\lambda(dr)$: η κατανομή των αφίξεων ρυθμού λ για το στοιχειώδη κυκλικό δίσκο πλάτους dr

$R(r)$: ο ρυθμός μετάδοσης για τη θέση r

A : όλη η επιφάνεια της κυψέλης

Από την (7.3) λαμβάνουμε δύο περιπτώσεις:

- Όταν $\rho < 1$, το σύστημα παραμένει σε σταθερή κατάσταση και η κατανομή του πλήθους των ενεργών πελατών τείνει σε μια πεπερασμένη στάσιμη κατανομή (πεπερασμένο πλήθος ενεργών συνδρομητών)
- Όταν $\rho > 1$, το σύστημα οδηγείται σε ασταθή κατάσταση και ο αριθμός των χρηστών τείνει στο άπειρο. Προφανώς αυτό σημαίνει ότι κάποιοι χρήστες εγκαταλείπουν την προσπάθεια για μεταφορά δεδομένων λόγω του κορεσμού που προκαλείται στο δίκτυο

Η μελέτη που θα διεξάγουμε αναφέρεται στην πρώτη περίπτωση στην οποία δεν έχουμε έλεγχο εισαγωγής χρηστών, για την οποία ισχύει:

$$\rho < 1$$

6.2.1 Εισαγωγή Χρηστών στο Σύστημα Χωρίς Έλεγχο Εισόδου ($\rho < 1$)

Στο σημείο αυτό καλό είναι να τονίσουμε ότι λόγω των παραπάνω υποθέσεων που πραγματοποιήσαμε ο ρυθμός μετάδοσης του i -οστού χρήστη εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την απόσταση R που απέχει ο χρήστης αυτός από τον σταθμό στον οποίον συνδέεται. Ορίζουμε με $R_0(r)$ το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης και με r_0 την απόσταση από το σημείο σύνδεσης για την οποία επιτυγχάνεται αυτός ο μέγιστος ρυθμός. Ο μέγιστος ρυθμός, που εξαρτάται από το εύρος ζώνης του καναλιού διάδοσης και την κωδικοποίηση, μειώνεται μετά από την απόσταση r_0 λόγω των απωλειών διάδοσης. Σύμφωνα με το ντεντερμινιστικό μοντέλο απωλειών που χρησιμοποιούμε ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται με την απόσταση μέσω της συνάρτησης:

$$R(r) = \begin{cases} R_0, & r \geq r_0 \\ R_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^a, & r < r_0 \end{cases} \quad (6.4)$$

Όπου a είναι ο συντελεστής απωλειών διάδοσης του ντεντερμινιστικού μοντέλου απωλειών ο οποίος όπως έχουμε αναφέρει κυμαίνεται μεταξύ [2,4], ωστόσο για την προκείμενη εργασία έχει ληφθεί ίσος με 3,8.

Ορίζουμε τώρα την απόδοση ροής γ ως τον λόγο του μέσου μεγέθους ροής $E[\sigma]$ (ή αναμενόμενη τιμή του μεγέθους) προς τη μέση χρονική διάρκεια της ροής. Με εφαρμογή του Νόμου του Little [45] μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η απόδοση της ροής μπορεί να εκφραστεί επίσης και σαν λόγος της έντασης της κίνησης προς το μέσο αριθμό ενεργών ροών ($E[n]$) προς εξυπηρέτηση. Έτσι:

$$\gamma = \frac{\lambda \cdot E[\sigma]}{E[n]} \quad (6.5)$$

Στην περίπτωση του προγραμματιστή Round-Robin, ο αριθμός των ενεργών ροών n εξελίσσεται όπως ο αριθμός των πελατών φορτίου ρ σε μια ουρά αναμονής που προκύπτει από τον αλγόριθμο διαχωρισμού της κίνησης (processor-sharing). Μιας και σε αυτό το επίπεδο ανάλυσης δεν υπάρχει έλεγχος εισόδου των χρηστών, μπορούμε να

πούμε με ασφάλεια ότι ο μέσος αριθμός χρηστών (δηλαδή ο μέσος αριθμός ροών) είναι ίσος με [42]:

$$E[\mathbf{n}] = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (6.6)$$

Ένα ακόμη μέγεθος που μπορεί να υπολογιστεί βάση κοινής λογικής είναι το φορτίο ρ που έχουμε χρησιμοποιήσει ως τώρα σαν μεταβλητή σε προηγούμενες σχέσεις μας. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό το φορτίο της κυψέλης είναι ίσο με το σύνολο των δεδομένων κίνησης προς εξυπηρέτηση (γινόμενο του μέσου μεγέθους ροής $E[\sigma]$ επί τον ρυθμό άφιξης λ των ροών) προς το μέσο ρυθμό μετάδοσης. Συνεπώς:

$$\rho = \frac{\lambda \cdot E[\sigma]}{R(r)} \quad (6.7)$$

Από τις σχέσεις (6.5) – (6.7) με αντικαταστάσεις λαμβάνουμε ότι η ρυθμαπόδοση τελικά είναι:

$$\gamma(r) = R(r) \cdot (1 - \rho) \quad (6.8)$$

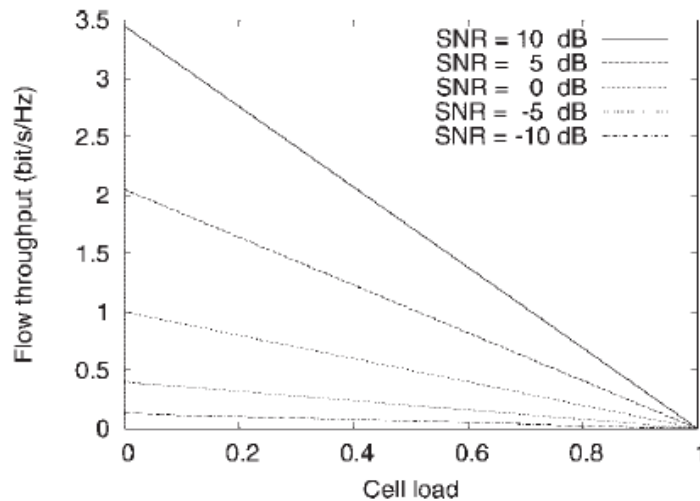
Η σχέση (6.8) μας οδηγεί στο εξής απλό συμπέρασμα:

- ✓ Η ρυθμαπόδοση ροής χρήστη $\gamma(r)$ είναι μέγιστη όταν το φορτίο κυψέλης ρ είναι ίσο με το μηδέν και μειώνεται γραμμικά σε σχέση με αυτό

Σημειώνουμε πως: επειδή η ζήτηση πρέπει να είναι μικρότερη από το ρυθμό εξυπηρέτησης του δικτύου, αναγκαστικά το φορτίο θα είναι μέγεθος μικρότερο της μονάδος από τη στιγμή που επιλέγουμε ευσταθές σύστημα σε ισορροπία, χωρίς άπειρο αριθμό πελατών.

$$\lambda \cdot E[\sigma] < \bar{R} \Rightarrow \rho < 1$$

Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 6.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 6.2: Ανάδειξη της γραμμικής σχέσης που συνδέει την απόδοση ροής με το φορτίο της κυψέλης. Όσο αυξάνει το φορτίο τόσο μειώνεται γραμμικά η απόδοση

Επιπλέον, από την (6.7) προκύπτει η μέση καθυστέρηση, η οποία εξαρτάται από την απόσταση r του χρήστη από τον σταθμό βάσης. Ορίζεται με $T(r)$ και ισούται με:

$$T(r) = \frac{E[\sigma]}{\gamma(r) \cdot (1 - \rho)} \quad (6.9)$$

Η παραδοχή της εξάρτησης της καθυστέρησης αποκλειστικά από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη δεν λαμβάνει υπόψιν τις παραμέτρους του ασύρματου περιβάλλοντος, επιτρέποντάς μας έτσι να έχουμε ένα μοντέλο αναμονής για το κυψελωτό δίκτυο σε μια εξιδανικευμένη κατάσταση, που στην πραγματικότητα δεν υπάρχει. Σε ρεαλιστικές συνθήκες είναι πολλοί οι παράγοντες που επηρεάζουν το διαμοιρασμό του εύρους ζώνης. Η χωρητικότητα του κυψελωτού δικτύου είναι επομένως λογικό να ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό λόγω της διακύμανσης της ισχύος εκπομπής και της αύξησης των παρεμβολών που παρουσιάζονται κατά τη διάδοση. Επιπλέον, διαφορετικά RTTs για μεμονωμένες ροές μπορούν να κάνουν την απόδοση αμεροληψίας και δικαιοσύνης ακόμα δυσκολότερη στα κυψελωτά περιβάλλοντα. Παρόλα αυτά, το απλό και ιδανικό μοντέλο αναμονής M/G/1 PS μπορεί να μας προσφέρει τη μοντελοποίηση που ζητάμε, παρέχοντας σε κάποιο αρκετά ικανοποιητικό βαθμό, σαφείς και ισχυρές φόρμουλες για την περιγραφή της επίδοσης του συστήματος στο επίπεδο ροής.

6.3 Προγραμματισμός Εξυπηρέτησης Ροών με τον Αλγόριθμο Round-Robin

Στην παράγραφο αυτή αναπτύσσουμε τον αλγόριθμο Round-Robin που χρησιμοποιούμε για την εξυπηρέτηση των πελατών που θέλουν να κατεβάσουν αρχεία από το Internet. Εξηγούμε αναλυτικά τον τρόπο που λειτουργεί ο αλγόριθμος αυτός

ενώ παραθέτουμε επιχειρήματα γιατί είναι ένας από τους δημοφιλέστερους προγραμματιστές που χρησιμοποιείται για τη διευθέτηση της κίνησης.

Ο Round-Robin [50], [51] αποτελεί έναν από τους παλαιότερους, απλούστερους και συνάμα πιο δίκαιους αλγόριθμους προγραμματισμού που εφαρμόζονται ευρέως και χρησιμοποιείται από τη CPU του server του BS της μακροκυψέλης για την εξυπηρέτηση των πελατών του. Ο Round-Robin σχεδιάστηκε ειδικά για συστήματα διαμοιρασμού του χρόνου γι' αυτό αποτελεί μια ιδανική λύση για την περίπτωσή μας. Είναι παρόμοιος με τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού First Come First Served (FCFS) ωστόσο είναι προτιμότερος λόγω της προστιθέμενης λειτουργικότητας που προσφέρει για εναλλαγή μεταξύ των διεργασιών του συστήματος.

Για την εξυπηρέτηση των ροών που καταφθάνουν στο σταθμό βάσης ορίζεται μια μικρή χρονική μονάδα που ονομάζεται χρονική σχισμή ή χρονοθυρίδα και αυτή ανατίθεται σε κάθε χρήστη με σκοπό εντός αυτού του διαστήματος να «κατεβάσει» ένα

μέρος του αρχείου που επιθυμεί με ρυθμό ίσο με $\frac{\bar{R}}{n}$ [42] (όπου \bar{R} ο μέσος ρυθμός

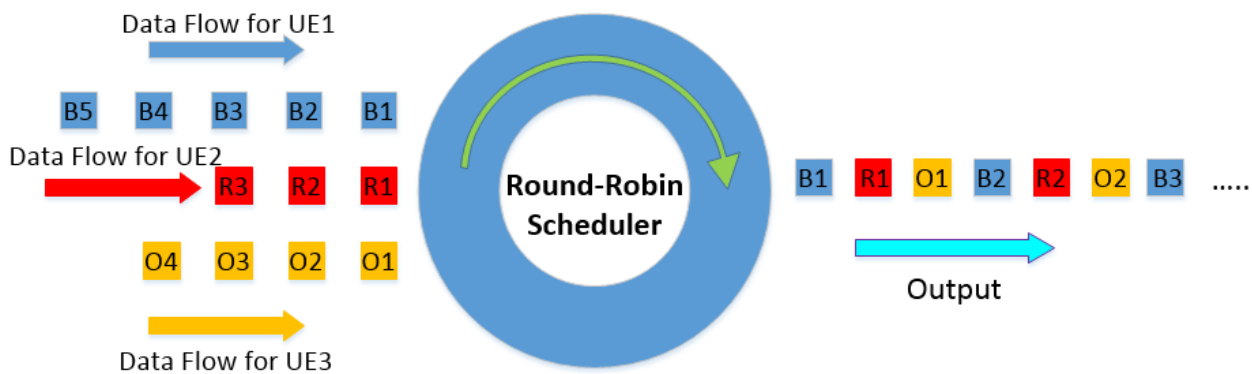
μετάδοσης και n το πλήθος των ενεργών συνδρομητών) έως ότου ξαναέρθει η σειρά του. Η διαδικασία εξυπηρέτησης είναι απλή και βασίζεται στη λειτουργία μιας κυκλικής ουράς. Κάθε χρήστης που επιθυμεί να κάνει downloading ενός αρχείου τοποθετείται στην κυκλική ουρά με τη σειρά που έφτασε η αίτησή του. Οι χρονικά νωρίτερες αιτήσεις προφανώς προηγούνται. Η κυκλική ουρά γυρίζει και ανάλογα με την υπάρχουσα προτεραιότητα οι χρήστες εξυπηρετούνται με κυκλική φορά, ίδια με τη φορά «περιστροφής» της ουράς. Αξίζει να σημειωθεί πως η επιλογή των χρηστών εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την προτεραιότητα τους στην ουρά, χωρίς να λαμβάνεται μέριμνα για τις συνθήκες διάδοσης του καναλιού.

Για να γίνει πιο κατανοητό μπορούμε να φανταστούμε μια ρόδα του λούνα πάρκ στην οποία σε κάθε «κουβούκλιο» τοποθετείται μια ροή δεδομένων η οποία εξυπηρετείται μόλις το κουβούκλιο στο οποίο ανήκει φτάσει στο κατώτερο επίπεδο (σημείο ανάβασης επιβατών στη ρόδα). Η αναφορά στο γεγονός πως η εξυπηρέτηση λαμβάνει χώρα στο κατώτερο επίπεδο του κουβουκλίου είναι προφανώς τυχαία και χρησιμοποιήθηκε για λόγους αναπαράστασης. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας εξυπηρετείται η ροή που ανήκει στο αμέσως επόμενο κουβούκλιο ενώ η ρόδα συνεχίζει να γυρίζει. Το κουβούκλιο που άδειασε γεμίζει με την ροή πληροφορίας που θέλει να κατεβάσει ο επόμενος χρήστης (ο οποίος βρίσκεται στο τέλος της κυκλικής ουράς, διότι μόλις μπήκε σ' αυτή) και η διεργασία συνεχίζεται με αυτό τον τρόπο έως ότου όλοι οι πελάτες κατεβάσουν το επιθυμητό περιεχόμενο.

Να τονιστεί πως ο αλγόριθμος αυτός δεν δίνει τη δυνατότητα εφάπαξ λήψης του περιεχομένου σε 1 δόση (εκτός κι αν είναι τόσο μικρό το αρχείο οπότε του αρκούν οι πόροι που διατίθενται στη χρονοθυρίδα που εντάσσεται η ροή για τη πλήρη λήψη του), αλλά σε κύκλους των m -δόσεων όπου προφανώς το μέγεθος του m εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του αρχείου προς λήψη. Όσο μεγαλύτερο αρχείο, τόσοι περισσότεροι κύκλοι απαιτούνται μέχρι την ολοκλήρωση της αποστολής του.

Το ενδιαφέρον που παρουσιάζει ο αλγόριθμος προγραμματισμού Round-Robin είναι στο μέγεθος της χρονικής θυρίδας που θα ορισθεί. Εάν το μήκος της σχισμής είναι πολύ μικρό τότε θα παρατηρούνται πολλές διακοπές στο περιεχόμενο αφού δεν θα προλαβαίνει να ολοκληρωθεί η διαδικασία αποστολής των δεδομένων της τρέχουσας ροής, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της CPU. Στην αντίθετη περίπτωση, που το μήκος αυτό τεθεί αρκετά μεγάλο τότε θα έχουμε μη αποδοτικό χρόνο απόκρισης για κάθε επόμενη ροή που περιμένει να εξυπηρετηθεί, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να προσεγγίζει τον FCFS. Ως εκ τούτου, ενώ η παρούσα ροή θα έχει κατεβάσει το περιεχόμενο που επιθυμεί για εκείνο το διάστημα, ο προγραμματιστής θα εξακολουθεί να «τρέχει» στην ίδια χρονοθυρίδα με αποτέλεσμα το «νεκρό» διάστημα που ακολουθεί μέχρι το τέλος της να εμποδίζει τη μετάβαση στην επόμενη χρονοσχισμή με συνέπεια αυξημένη καθυστέρηση εξυπηρέτησης του επόμενου πελάτη.

Ακολουθεί το Σχήμα 6.3 στο οποίο απεικονίζεται η διαδικασία που εκτελεί ένας προγραμματιστής Round-Robin:



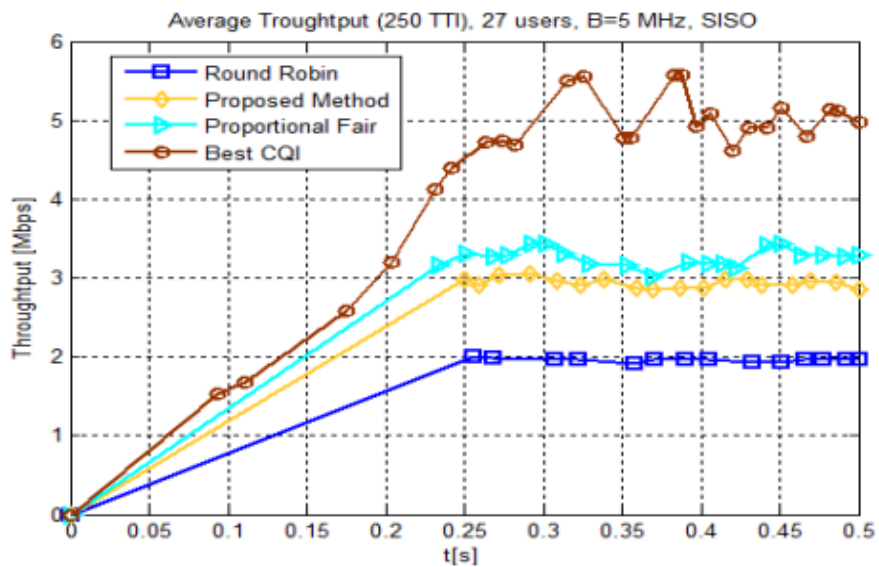
Σχήμα 6.3: Παρουσίαση του αλγορίθμου Round-Robin. Αριστερά διακρίνονται οι ροές των αρχείων που προορίζονται για τους τρεις χρήστες που θεωρήσαμε στο παράδειγμα και στα δεξιά απεικονίζεται η αλληλουχία των ροών όπως αυτές εξέρχονται από τον προγραμματιστή και κατευθύνονται προς τους UE1, UE2, UE3 αντίστοιχα. Όπως παρατηρούμε, η διαδικασία εκτελείται κυκλικά, εξυπηρετώντας την 1^η ροή του 1^{ου} χρήστη σε σειρά προτεραιότητας (B1), ακολουθεί η 1^η ροή του 2^{ου} χρήστη (R1), η 1^η ροή του 3^{ου} (O1) κ.ο.κ. Με το τέλος του πρώτου κύκλου έχουμε επανέναρξη της διαδικασίας για τις 2^{ες} ροές των χρηστών (B2, R2, O2) με την ίδια σειρά προτεραιότητας. Η πορεία εξυπηρέτησης ολοκληρώνεται μόλις και ο τελευταίος χρήστης λάβει την τελευταία ροή που του μένει για την πλήρη λήψη του αρχείου του

Με τον συγκεκριμένο προγραμματιστή η CPU είναι βέβαιη πως ίσοι ραδιοπόροι ανατίθενται μέσω των ισομηκών χρονοθυρίδων σε κάθε χρήστη και η σειρά προτεραιότητας ακολουθεί την κυκλική φορά της ουράς. Όσο ταχύτερα ο πελάτης

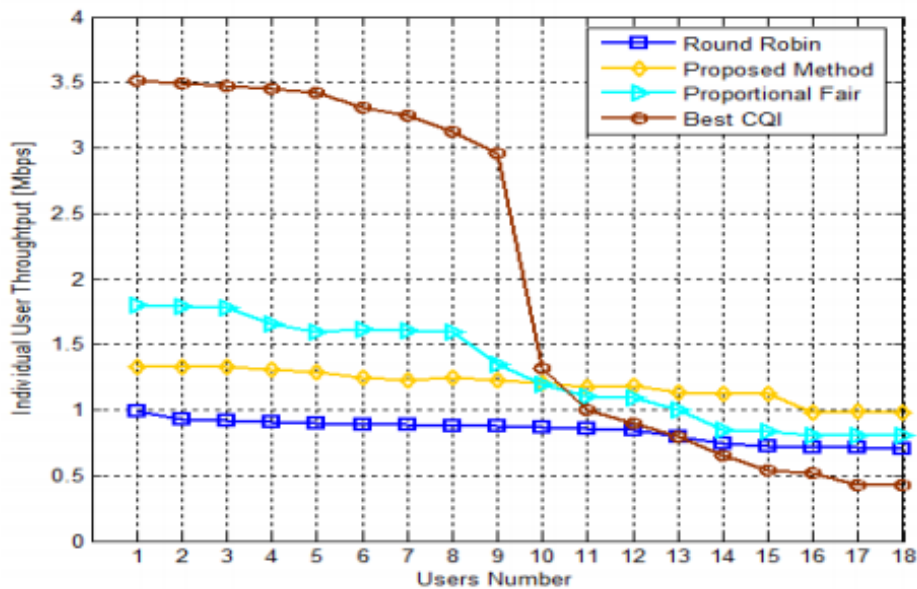
εισήλθε στην ουρά, τόσο πιο γρήγορα κατεβάζει το περιεχόμενό του. Γι' αυτό λέμε πως ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί μια από τις δικαιότερες λύσεις που έχουν προταθεί λόγω της ίσης ανάθεσης πόρων σε κάθε σύνδεση μια προς μια. Ακόμη κι αν ένας χρήστης δεν έχει κάτι να κατεβάσει αλλά στο σταθμό βάσης φαίνεται ως ενεργός τότε ο Round-Robin προγραμματιστής του παρέχει τη χρονοθυρίδα που του «ανήκει» άσχετα με το γεγονός πως αυτή θα παραμείνει κενή για τη συγκεκριμένη διαδικασία. Αν μια διαδικασία δεν ολοκληρωθεί μέσα στο χρονικό πλαίσιο της σχισμής που έχει καθοριστεί, τότε ο αλγόριθμος μεταβαίνει στην αμέσως επόμενη διαδικασία που αναμένει στην κυκλική ουρά και αυτή που δεν εξυπηρετήθηκε τοποθετείται στο τέλος της, περιμένοντας ξανά τη σειρά της. Για λόγους πληρότητας αναφέρουμε πως ο αλγόριθμος πήρε το όνομά του από τη γενική αρχή «Round-Robin» σύμφωνα με την οποία κάθε άτομο λαμβάνει το ίδιο μερίδιο της «πίτας» με κάποιον άλλον που βρίσκεται μέσα στην ίδια σειρά παραμονής.

Αξίζει να αναφερθεί τέλος, πως ένα ακόμη πλεονέκτημα που συγκεντρώνει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ο μικρός υπολογιστικός φόρτος για τον προγραμματιστή [52] και φαίνεται πως οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών τον προτιμούν γι' αυτή του την απλότητα [55].

Ως μειονέκτημα του αλγορίθμου Round-Robin μπορούμε να ορίσουμε το μειωμένο ρυθμό μετάδοσης που προκύπτει [54] σε σχέση με άλλες μεθόδους προγραμματισμού εξυπηρέτησης της ζήτησης, λόγω του ότι δεν λαμβάνει υπόψιν κάποιες παραμέτρους. Ο μικρότερος ρυθμός μετάδοσης αφορά τόσο την απόδοση της μακροκυψέλης του δικτύου LTE όσο και την απόδοση του μεμονωμένου χρήστη, όπως αποδεικνύεται στα Σχήματα 6.4 και 6.5 [53].



Σχήμα 6.4: Ρυθμός μετάδοσης του δικτύου LTE για πλήθος ενεργών χρηστών ίσο με 27, στα 5MHz εύρους ζώνης. Στο σχήμα παρουσιάζονται αποτελέσματα τριών ακόμη αλγορίθμων πέραν του Round-Robin [53].



Σχήμα 6.5: Γράφημα επιτεύξιμου ρυθμού μετάδοσης με τον οποίο «κατεβάζει» κάθε χρήστης για διαφορετικές αποστάσεις από τον eNB και για τους διάφορους αλγόριθμους εξυπηρέτησης [53].

6.4 Μοντέλα Διαμοιρασμού Διεργασίας (Processor-Sharing Models)

Τα μοντέλα διαμοιρασμού διεργασιών αναπτύχθηκαν αρχικά για την ανάλυση της επικοινωνίας υπολογιστικών συστημάτων διαμοιρασμένου χρόνου στα τέλη του 1960 [57], [58]. Το βασικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων μοντέλων είναι η αυστηρή πειθαρχία που διατηρούνε στο ισότιμο διαμοιρασμό των πόρων του δικτύου μεταξύ όλων των εργασιών του συστήματος. Η πιο τυπική και συνήθης εφαρμογή των μοντέλων διαχωρισμού συναντάται στην ανάλυση των επιδόσεων κατά τη μεταφορά δεδομένων στα δίκτυα επικοινωνιών. Τέτοια μοντέλα υπήρξαν πρωτοποριακά από τότε και συνεχίζουν να παίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό και τις λειτουργίες των συστημάτων επικοινωνιών που υποκινούνται από τις διάφορες τεχνολογικές τάσεις, ιδιαίτερα για τα ασύρματα δίκτυα [56], [59].

6.4.1 Συμβολισμός του Κένταλ (Kendall's Notation)

Πριν ξεκινήσουμε να εξετάζουμε στοιχειώδη συστήματα θα εισάγουμε τον τύπο που όρισε ο Kendall για την περιγραφή των συστημάτων αναμονής. Σύμφωνα με αυτόν τον τύπο ένα σύστημα ορίζεται ως εξής:

$$A / B / m / K / n / D,$$

Όπου:

- A : συνάρτηση κατανομής των χρόνων μεταξύ των αφίξεων
- B : συνάρτηση κατανομής των χρόνων εξυπηρέτησης πελατών
- m : αριθμός διακομιστών (servers)
- K : χωρητικότητα του συστήματος (ο μέγιστος αριθμός των πελατών στο σύστημα)
- n : μέγεθος πληθυσμού
- D : πολιτική προτεραιότητας των ροών που αφίκνυνται

Εάν το μέγεθος του πληθυσμού και η χωρητικότητα του δικτύου τείνει στο άπειρο καθώς και η πολιτική εξυπηρέτησης των ροών αφίξεων είναι FIFO τότε παραλείπονται από την περιγραφή. Ωστόσο εδώ δεν θα εξεταστούν τέτοια συστήματα, μιας και το πλήθος των χρηστών είναι πεπερασμένο λόγω του ότι βρισκόμαστε σε κατάσταση σταθερότητας ($\rho < 1$). Ενώ η διαδικασία εξυπηρέτησης γίνεται σύμφωνα με την πολιτική του προγραμματιστή Round-Robin. Γενικά, υπάρχει περίπτωση το «M» να χρησιμοποιείται στη δεύτερη θέση του συμβολισμού. Όταν συμβαίνει αυτό τότε έχουμε εκθετική κατανομή των χρόνων εξυπηρέτησης.

Γενικά, οι κατανομές των διαδικασιών άφιξης και εξυπηρέτησης μπορεί να είναι μια από τις ακόλουθες:

M (Markov)	Μαρκοβιανή
D (Deterministic)	Όλοι οι πελάτες έχουν την ίδια τιμή
G (General)	Οποιαδήποτε τυχαία πιθανοτική κατανομή

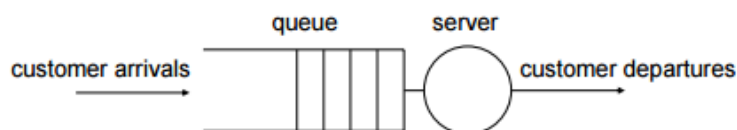
Πίνακας 6.1

Για να είμαστε σίγουροι πως έγινε κατανοητός ο συμβολισμός του Kendall θα δώσουμε μερικά παραδείγματα τα οποία και αναλύουμε ακριβώς από κάτω:

Μια περιγραφή όπως η M/M/1 περιγράφει ένα σύστημα αναμονής με ρυθμό αφίξεων που ακολουθούν κατανομή Poisson, εκθετική κατανομή χρόνου εξυπηρέτησης πελάτη και ενός εξυπηρετητή ($m=1$). Αντίθετα ο συμβολισμός M/G/m υποδηλώνει σύστημα m-εξυπηρετητών, αφίξεων κατανομής Poisson και χρόνων εξυπηρέτησης μιας αυθαίρετης γενικής πιθανοτικής κατανομής (G). Για το τέλος αφήσαμε έναν λίγο πιο σύνθετο τύπο που όπως θα δούμε όμως δεν χρήζει ανησυχίας. Ο τύπος M/M/r/K/n περιγράφει σύστημα του οποίου οι αφίξεις πελατών γίνονται από μια θεωρητικά «άπειρη» πηγή πληθυσμού n στοιχείων στο οποίο παραμένουν για χρόνο που ακολουθεί εκθετική κατανομή. Οι χρόνοι εξυπηρέτησης παρουσιάζουν κι αυτοί εκθετική κατανομή, οι διακομιστές της υπηρεσίας είναι r το πλήθος ενώ η χωρητικότητα της υποδομής δίνεται ίση με K.

Η περίπτωση με την οποία μοντελοποιούμε το σύστημά μας αφορά την περιγραφή M/G/m γι' αυτό καλό είναι πριν προχωρήσει ο αναγνώστης να είναι βέβαιος πως την έχει κατανοήσει.

Στο Σχήμα 6.6 απεικονίζεται το κλασσικό μοντέλο αναμονής, το οποίο συμβατικά ορίζεται ως G/G/1 σύμφωνα με τον συμβολισμό Kendall. Όπως αναπτύχθηκε, απ' τη στιγμή που το 1^ο σύμβολο είναι το «G» αντικατοπτρίζει το γεγονός πως ο χρόνος διαφίξεων μεταξύ δυο συνεχόμενων ροών είναι μια θετική τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί μια γενική κατανομής πιθανότητας. Επειδή και το 2^ο σύμβολο είναι «G» καταλαβαίνουμε άμεσα πως οι χρόνοι για τις ανάγκες εξυπηρέτησης των πελατών ακολουθούν μια γενική πιθανοτική κατανομή. Τέλος, το «1» αναφέρεται στην υπαρξη ενός και μόνο διακομιστή (server). Όσοι πελάτες λάβουν πλήρη εξυπηρέτηση εγκαταλείπουν τη θέση τους, αφήνοντας το σύστημα. Οι χρόνοι διαφίξεων τονίζεται πως είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.



Σχήμα 6.6: Το μοντέλο αναμονής G/G/1 [70].

6.4.2 Το Μοντέλο Αναμονής M/G/1

Όταν η διαδικασία αφίξεων δεν ακολουθεί μια γενική πιθανοτική κατανομή όπως παραπάνω, αλλά πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας Poisson με ρυθμό λ , τότε το μοντέλο αναμονής που έχουμε είναι το M/G/1, όπου το γράμμα «M» αντιπροσωπεύει τη Μαρκοβιανή (χωρίς μνήμη) φύση της διαδικασίας Poisson. Αποκωδικοποιώντας και το υπόλοιπο μέρος της περιγραφής συμπεραίνουμε πως η διαδικασία εξυπηρέτησης των πελατών που εισέρχονται στην ουρά ακολουθεί μια γενική αυθαίρετη κατανομή ενώ ο διακομιστής του συστήματος είναι ένας, αυτός στον BS της μακροκυψέλης μας. Το μοντέλο M/G/1 μοντελοποιεί με τον καταλληλότερο τρόπο τη διαδικασία αφίξεων και τον τρόπο εξυπηρέτησης των πελατών, επομένως είναι αυτό που θα χρησιμοποιήσουμε.

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε πως τα συστήματα επιμερισμού διεργασιών διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) στα συστήματα που κατανέμουν ισότιμα το χρόνο των χρονοθυρίδων στους χρήστες (Egalitarian Processor-Sharing (EPS) Models) και β) στα συστήματα που κάνουν μεροληπτικό διαχωρισμό διαδικασιών στα οποία συναντάμε και πολλαπλές κατηγορίες πελατών (Discriminatory Processor-Sharing (DPS) Models). Η μελέτη μας περιορίζεται εδώ μόνο στα μοντέλα EPS, λόγω χρήσης του αλγόριθμου Round-Robin. Τα μοντέλα αναμονής EPS έχουν πολλές ελκυστικές ιδιότητες. Από πρακτικής άποψης, μια από αυτές είναι τις ιδιότητες περιλαμβάνει πως οι διαδικασίες που φαινομενικά είναι λιγότερο σημαντικές (π.χ. εξυπηρέτηση αρχείων μικρότερου μεγέθους) δεν μπορούν να «κολλήσουν» πίσω από διαδικασίες που σε πιο μεροληπτικούς αλγόριθμους θα ήταν ψηλότερα στην ιεραρχία εξυπηρέτησης. Τέτοια φαινόμενα αποτρέπονται λόγω των δεδομένων πολιτικών δίκαιου καταμερισμού που απαγορεύουν στις πιο απαιτητικές διεργασίες να ιδιοποιηθούν του διακομιστή. Τα συγκεκριμένα μοντέλα λοιπόν έρχονται σε πλήρη αντίθεση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν άλλες πολιτικές προτεραιότητας όπως η FCFS. Απουσία ελέγχου εισαγωγής χρηστών στο σύστημα, έχουμε την ακόλουθη στατική κατανομή για το μήκος της ουράς (ή πλήθος χρηστών σ' αυτή), στο μοντέλο M/G/1 διαχωρισμού διεργασιών που εξετάζουμε για προγραμματιστή Round-Robin:

$$\pi(n) = \rho^n (1 - \rho), \text{ για } \rho < 1 \text{ και } n = 0, 1, 2, \dots \quad (6.10)$$

Όπως παρατηρούμε η (6.10) αποτελεί μια γεωμετρική κατανομή η οποία εξαρτάται μόνο από το φορτίο ρ . Οι σχέσεις (6.6) – (6.9) που αναπτύξαμε στην παράγραφο 6.2.1 ισχύουν κι εδώ αφού έχουμε το μοντέλο M/G/1.

6.4.3 Μοντελοποίηση Αφίξεων Πελατών με την Κατανομή Poisson

Οι χρήστες που βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψης της κυψέλης και εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης αυτής, παράγουν κίνηση σε συνεδρίες. Κάθε συνεδρία απαρτίζεται από έναν τυχαίο αριθμό ροών δεδομένων που χωρίζονται με διαστήματα αδράνειας. Μεταξύ δυο διαδοχικών διαστημάτων αδράνειας παρεμβάλλεται μια ροή πληροφορίας (data flow). Οι συνεδρίες αυτές καταφθάνουν ακολουθώντας μια τυχαία διαδικασία. Για την μοντελοποίηση της διαδικασίας άφιξης χρησιμοποιούμε την πλέον διαδεδομένη και αποτελεσματική στοχαστική διαδικασία, τη διαδικασία Poisson (Poisson Process) η οποία χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την κίνηση των κλήσεων και στα δίκτυα της κλασικής τηλεφωνίας.

Η διαδικασία Poisson μπορεί να ορισθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, όπου και οι τρεις ορισμοί είναι ισοδύναμοι [60]:

1. Η διαδικασία Poisson είναι σαν μια διαδικασία γεννήσεων εξαιρετική φτωχή, σύμφωνα με την οποία μέσα στο απειροελάχιστο χρονικό διάστημα dt μόνο ένα γεγονός μπορεί να συμβεί. Αυτό το γεγονός έχει πιθανότητα εμφάνισης λdt και είναι ανεξάρτητο από κάθε άλλο προηγούμενο γεγονός.
2. Η διαδικασία Poisson είναι μια διαδικασία κατά την οποία οι χρόνοι διαφίξεων μεταξύ των ροών είναι ανεξάρτητοι και ομοιόμορφα κατανεμημένοι (IID) ακολουθώντας την εκθετική κατανομή.
3. Μια διαδικασία καταμέτρησης $(A(t)|t \geq 0)$ μπορεί να ορισθεί σαν μια διαδικασία Poisson με ρυθμό λ εάν τα βήματα της διαδικασίας είναι ανεξάρτητα και ακολουθούν την κατανομή Poisson:

$$A(t + \theta) - A(t) \sim \text{Poisson}(\lambda \theta)$$

Σε κάθε σταθμό βάσης της κυψέλης, λαμβάνονται οι αιτήσεις των χρηστών για κίνηση downlink σύμφωνα με την κατανομή Poisson, με ρυθμό λ . Κάθε συνεδρία χαρακτηρίζεται από ένα μέγεθος σε bits, το οποίο προφανώς είναι ίσο με το άθροισμα των μεγεθών των data flows που το αποτελούν. Έτσι, αν δηλώσουμε « $\bar{\sigma}$ », το μέσο μέγεθος μιας συνεδρίας, μπορούμε να ορίσουμε την ένταση της κίνησης των δεδομένων που ζητούνται (traffic demand) ως το γινόμενο: $\lambda \bar{\sigma}$ (bits/s). Όπως διαπιστώνει κανείς εύκολα από τη σχέση που μόλις ορίσαμε, πρακτικά η ζήτηση κίνησης προς το μέσο ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας μας δίνει το φορτίο.

Ορισμός: Με απλά λόγια θα λέγαμε πως μια διαδικασία Poisson είναι μια σταθερή και διαρκής πιθανότητα ενός γεγονότος να συμβεί. Ως παράδειγμα, μπορούμε να παραθέσουμε τις αστραπές που μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι σε κάθε μικρό διάστημα εντός της καταιγίδας, υπάρχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα να πέσει μια αστραπή. Σε αντίθεση με τη διωνυμική κατανομή που αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 4, σε μια διαδικασία Poisson μπορούμε να έχουμε από μηδέν έως άπειρο αριθμό γεγονότων εντός κάποιου συγκεκριμένου χρονικού πλαισίου και η πιθανότητα ενός γεγονότος να εκδηλωθεί δεν εξαρτάται από το πόσο μικρό μπορεί να είναι το μέγεθος που έχουμε θεωρήσει. Στην πράξη, πολλά είναι τα συστήματα η λειτουργία των οποίων μπορεί να προσεγγιστεί

από μια κατανομή Poisson με αρκετά μεγάλη επιτυχία και ένα από αυτά είναι και το μοντέλο αφίξεων των κλήσεων από πλευράς χρηστών.

Άλλα παραδείγματα για Poisson:

- Οι ασυνέχειες που μπορεί να εμφανίσει μια γραμμή παραγωγής ενός εργοστασίου ακολουθούν την κατανομή Poisson. Ως μέτρο της έκθεσης της διαδικασίας Poisson μπορεί να θεωρηθεί ο όγκος της παραγωγής
- Τα τυπογραφικά λάθη που συμβαίνουν κατά την εκτύπωση ενός συγγράματος από τον εκδοτικό όμιλο

Η έννοια της έντασης κίνησης που αναλύσαμε, αποτελεί αναμφίβολα το κλειδί για την εκτίμηση της χωρητικότητας του δικτύου και της εμπειρίας που βιώνει ο χρήστης από τις προσφερόμενες υπηρεσίες, χαρακτηριστικά που όπως είδαμε σε προηγούμενες παραγράφους παίζουν καθοριστικό ρόλο κατά το σχεδιασμό του δικτύου. Έτσι, από τη στιγμή που ο αριθμός των συνεδριών που φτάνουν από τους χρήστες δεν είναι προκαθορισμένος, η ένταση της κίνησης δεν μπορεί να αποτελεί ένα στατικό σενάριο.

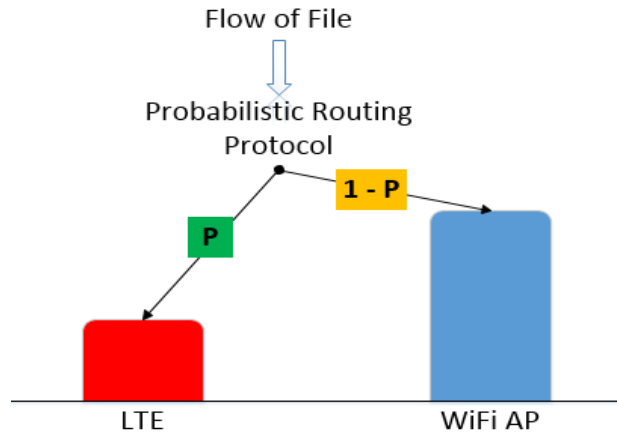
Η κατανομή Poisson δίνεται από την ακόλουθη σχέση με $k = 0, 1, 2, 3, \dots$:

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (6.11)$$

6.4.4 Πιθανοτικό Μοντέλο Δρομολόγησης

Για να αποφασίσουμε πότε ένας χρήστης θα δρομολογεί το κατέβασμα του αρχείου του από το δίκτυο LTE ή από κάποιο γειτονικό WiFi εισάγουμε τον αλγόριθμο πιθανοτικής δρομολόγησης (Probabilistic Routing Protocol). Σύμφωνα με το πρωτόκολλο αυτό, το οποίο βασίζεται σε στοιχεία του ήδη υπάρχοντος φόρτου στο κυψελωτό δίκτυο αποφασίζει να κατευθύνει την κίνηση ενός τυχαίου χρήστη με πιθανότητα p στο δίκτυο LTE και πιθανότητα $1-p$ στο δίκτυο WiFi. Ασφαλώς, όσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα p τόσο μεγαλύτερο ποσοστό των ροών των χρηστών δρομολογείται μέσα από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης με αποτέλεσμα μη αποδοτική διαχείριση των ετερογενών συστημάτων που συνυπάρχουν στην κυψέλη. Επομένως, είναι ζητούμενη η επίτευξη μικρής πιθανότητας p ώστε να μεγιστοποιείται η ποσότητα $1-p$ και άρα το ποσοστό των χρηστών που κατεβάζουν αρχεία μέσω του προτύπου 802.11a να φτάνει στην μέγιστη τιμή του, προς βέλτιστη διαχείριση των πόρων του συστήματος LTE. Ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο στάδια: στο πρώτο στάδιο αφού έχει εγκριθεί η σύνδεση του κινητού χρήστη, πριν ξεκινήσει η διαδικασία της λήψης του αρχείου, το μοντέλο αναζητά πιθανούς κόμβους WiFi στους οποίους μπορεί να έχει πρόσβαση ο κινητός χρήστης ανάλογα με την τρέχουσα θέση του. Στο δεύτερο στάδιο, επεξεργάζεται τα παραπάνω δεδομένα και αν κρίνει ότι υπάρχει μεγάλος δικτυακός φόρτος ο οποίος μπορεί να δρομολογηθεί από διαθέσιμα ασύρματα ετερογενή σημεία

πρόσβασης, τότε τα προωθεί μέσω αυτών στον συνδρομητή. Όπως έχουμε αναφέρει η διαδικασία της αποστολής από διαφορετική διαδρομή θεωρούμε πως παρουσιάζει τόσο μικρές καθυστερήσεις που δεν είναι αντιληπτές από το χρήστη. Ακολουθεί απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα στο οποίο αναπαριστάται η δράση του πιθανοτικού μοντέλου δρομολόγησης τη στιγμή που καταφθάνει μια ροή ενός αρχείου αμέσως μετά τον προγραμματιστή Round-Robin:



Σχήμα 6.7: Αλγόριθμος Πιθανοτικής Δρομολόγησης Ροής Δεδομένων

6.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Για την προσομοίωσή μας θεωρούμε ακτίνα μακροκυψέλης ίση με 300m [16] καθώς και ισχύ εκπομπής στην κατερχόμενη ζεύξη ίση με 0,3W. Όπως επίσης γνωρίζουμε, το δίκτυο LTE λειτουργεί στις μπάντες συχνοτήτων μεταξύ 2,3-2,5GHz με εύρος ζώνης 5MHz [46]. Επιπλέον, θεωρούμε την ισχύ εκπομπής του WiFi AP ίση με 0,01W με την ακτίνα κάλυψης να μεταβάλλεται για χάρη των πειραματικών πορισμάτων που πρόκειται να εξαχθούν, αν και η ονομαστική της τιμή είναι περίπου ίση με 15m για το πρότυπο 802.11a που χρησιμοποιούμε [47]. Επίσης είναι γνωστό ότι το πρότυπο αυτό λειτουργεί στο ραδιοφάσμα μεταξύ των συχνοτήτων 5,15GHz-5,35GHz και το εύρος ζώνης λειτουργίας του είναι ίσο με 5MHz όπως και στην περίπτωση του κυψελωτού δικτύου. Όπως έχουμε πει, οι παρεμβολές από άλλους χρήστες δεν λαμβάνονται στο σημείο αυτό υπόψη είτε προέρχονται από γειτονικές κυψέλες είτε από χρήστες της ίδιας. Επομένως, ο μόνος λόγος εξασθένισης που εισάγεται είναι ο λευκός Γκαουσσσιανός Θόρυβος (AWGN) ο οποίος έχει ισχύ φασματικής πυκνότητας ίση με -174 dBm/Hz ή $N_o = 10^{-20,4} \text{ W}$. Ο προκύπτων θερμικός θόρυβος συνεπώς είναι ίσος με το γινόμενο:

$$\text{Thermal_Noise} = N_o \cdot W$$

Όπου W το αντίστοιχο εύρος ζώνης, ίσο με 5MHz.

Το μοντέλο απωλειών που χρησιμοποιούμε είναι το νομοτελειακό ή ντεντερμινιστικό όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία το οποίο έχει αναλυθεί πλήρως σε προηγούμενες παραγράφους. Σύμφωνα με αυτό, λαμβάνουμε τους συντελεστές $K_a = 0,0015$ και $K_b = 0,0008$ για μεταδόσεις στον BS του LTE και του WiFi AP αντίστοιχα. Ο συντελεστής διάδοσης απωλειών είναι και στις δύο περιπτώσεις ίσος με $a = 3,8$, αφού το περιβάλλον διάδοσης παραμένει το ίδιο. Με χρήση του προγραμματιστή Round-Robin για μεγαλύτερη δικαιοσύνη στη σειρά εξυπηρέτησης των αιτημάτων και εφαρμογή του πρωτοκόλλου πιθανοτικής δρομολόγησης με πιθανότητα p ένας χρήστης να εξυπηρετηθεί από τον σταθμό βάσης του δικτύου LTE και πιθανότητα $1-p$ ο χρήστης να συνδεθεί σε κάποιο WiFi ώστε να δρομολογήσει από εκείνο το σημείο τα δεδομένα που θέλει να κατεβάσει έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε χρήση του κριτηρίου μεγίστου ελαχίστου κατά το οποίο επιλέγεται η ένταση της κίνησης στην οποία μπορεί να αντέξει το δίκτυο.

Από την (6.1) δείξαμε ότι λόγω ομοιόμορφης κατανομής των χρηστών εντός της κυψέλης, η πιθανότητα κάποιος χρήστης να βρεθεί απόσταση r από το σταθμό βάσης είναι:

$$P(r) = \frac{2r}{R^2} \quad (6.12)$$

Επιπλέον, η πιθανότητα που υπάρχει το φορτίο ρ που θα σταλεί στον BS να είναι από χρήστη εντός της κυψέλης, είναι ίση με 1 διότι πολύ απλά αν σταλεί κάποια αίτηση τότε μοιραία θα είναι κάποιου χρήστη που εξυπηρετεί ο BS που την έλαβε (της μακροκυψέλης προφανώς γιατί εκεί κατευθύνονται πρώτα οι αιτήσεις και στη συνέχεια δρομολογούνται ανάλογα με το φορτίο του δικτύου με πιθανοτική δρομολόγηση) και βρίσκεται συνεπώς εντός των ορίων κάλυψης. Μαθηματικά και λόγω πάντα της ομοιόμορφης κατανομής μπορούμε να το διατυπώσουμε με την ακόλουθη σχέση:

$$\int_0^{R_g} \frac{\lambda \cdot E[\sigma]}{R(r)} P(r) dr = 1 \quad (6.13)$$

Επιλύουμε την (6.13) ως προς $\lambda \cdot E[\sigma]$ αφού υπάρχει ανεξαρτησία αυτού του μεγέθους από την απόσταση r καθώς ούτε ο ρυθμός λ της κατανομής Poisson αλλάζει, αλλά ούτε και το αναμενόμενο μέσο μέγεθος της ροής. Μπορούμε μάλιστα για λόγους απλότητας να θέσουμε $E[\sigma] = \sigma$ χωρίς να αλλάζει κάτι ουσιαστικό. Διαπιστώνουμε έτσι ότι:

$$\lambda \cdot \sigma = \int_0^{R_g} \frac{P(r)}{R(r)} dr \quad (6.14)$$

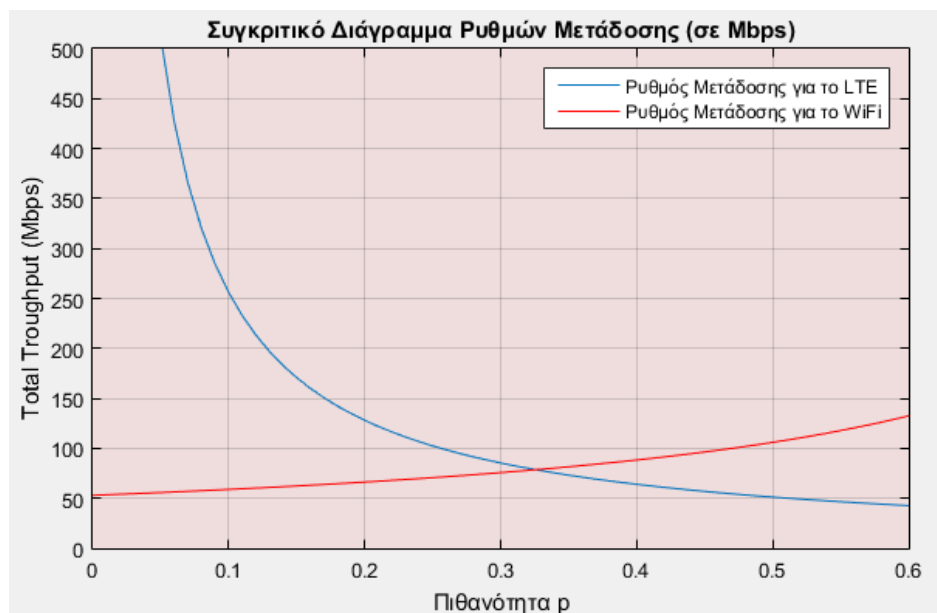
Ο μαθηματικός ορισμός του κριτηρίου μεγίστου ελαχίστου για επιλογή της έντασης κίνησης, δίνεται από την σχέση (6.14) που ακολουθεί:

$$\lambda \cdot \sigma = \arg_p \max \min \left(\frac{\lambda \cdot \sigma \Big|_{(LTE)}^{\overline{R(r)=R_a(r)}}}{p}, \frac{\lambda \cdot \sigma \Big|_{(WiFi)}^{\overline{R(r)=R_b(r)}}}{1-p} \right)$$

(6.14)

Τρέχοντας τον κώδικα του παραρτήματος λαμβάνουμε τα κάτωθι αποτελέσματα:

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=40m$ έχουμε:



Γράφημα 6.1

Όπως εύκολα παρατηρούμε με τη δεδομένη ακτίνα κάλυψης η πιθανότητα που προκύπτει είναι πείρπου:

$$P = 0,32$$

Αυτό σημαίνει πως από το σύνολο των χρηστών που αιτούνται σύνδεσης για downloading δεδομένων ο αλγόριθμος πιθανοτικής δρομολόγησης επιλέγει το 32% της έντασης της κίνησης που παράγουν να δρομολογηθεί μέσω του LTE δικτύου και το υπόλοιπο 68% μέσω των WiFi σημείων. Σε μια πιο ελεύθερη ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων, μπορούμε να πούμε ότι το 32% των χρηστών κατεβάζει από τα κινητά τερματικά που διαθέτει (π.χ smartphones) μέσω της απευθείας σύνδεσης με το 4G δίκτυο, ενώ το υπόλοιπό 68% ουσιαστικά δρομολογεί αυτή τη ροή φορτίου

από γειτονικά WiFi χωρίς ωστόσο ο χρήστης να καταλαβαίνει αυτή την αλλαγή αφού η όλη διαδικασία συμβαίνει υποστρωματικά. Για να επαληθευτεί το γεγονός αυτό (άγνοια συνδρομητή για τον τρόπο που κατεβάζει την πληροφορία) γίνεται θεώρηση μιας ακόμη παραδοχής:

- Υπάρχει περίπτωση να συμβεί αλλαγή στη συνδεσιμότητα του δικτύου (LTE→WiFi) όσο η μεταφορά ενός αρχείου είναι σε εξέλιξη. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε κορεσμό στον οποίο ενδεχομένως έχει υποπέσει το κυψελωτό δίκτυο, αν για παράδειγμα σε έναν Σ.Β. παρατηρηθεί μεγάλη ζήτηση για πρόσβαση στο Internet (αυστηρά ελαστική κίνηση) από κάποιο πεπερασμένο πλήθος πελατών - που κατανέμονται εντός της κυψέλης που ορίζει - και ξεπερνάει το μέγιστο δυνατό πλήθος εξυπηρέτησής του. Σε μια τέτοια κατάσταση υποθέτουμε ότι η μετάβαση από το κυψελωτό δίκτυο στο WiFi δεν προκαλεί διακοπή της υπηρεσίας μεταφοράς δεδομένων, αφού ιδανικά θεωρούμε πως η μετάδοση συνεχίζεται κανονικά με το ρυθμό μετάδοσης του νέου δικτύου, αγνοώντας τις όποιες ενδιάμεσες καθυστερήσεις για την επίτευξη της αλλαγής συνδεσιμότητας
- Ο ρυθμός εξυπηρέτησης μιας ροής δεδομένων σε περίπτωση που η μακροκυψέλη είναι φορτωμένη είναι ίσος με το ρυθμό μετάδοσης του δικτύου WiFi μέσω του οποίου δρομολογείται η κίνηση

Για την πιθανότητα αυτή, ο επιτεύξιμος ρυθμός μετάδοσης για την υποστήριξη ελαστικής κίνησης δεδομένων από το δίκτυο LTE είναι ίσος με:

$$\textit{Throughput} = 75\text{Mbps}$$

Για να υπολογιστεί όμως ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης για την κίνηση που διοχετεύεται μέσω WiFi πρέπει να λάβουμε τον τύπο του Shannon [42]:

$$R_{WiFi} = W_b \cdot \log_2 (1 + SNR_b) \quad (6.15)$$

Όπου:

W_b : το εύρος ζώνης συχνοτήτων για το πρότυπο 802.11a είναι ίσο με 5MHz

SNR_b : σηματοθορυβικός λόγος χρήστη που συνδέεται στο WiFi AP

b : ο δείκτης b χρησιμοποιείται για να δείξουμε ότι αναφερόμαστε στο δίκτυο WiFi

Από τον ορισμό του SNR ισχύει ότι:

$$SNR_b = \frac{P_R}{N_o \cdot W_b} \quad (6.16)$$

Ωστόσο από την (5.12) με:

$$A = K_b = 0,0008,$$

$$P_T = P_b = 0,01W,$$

$V = 1$ (αμελείται η σκίαση),

$$\alpha = 3,8 \text{ και}$$

$$r = R_b$$

Λαμβάνουμε με αντικατάσταση στην (6.15) ότι:

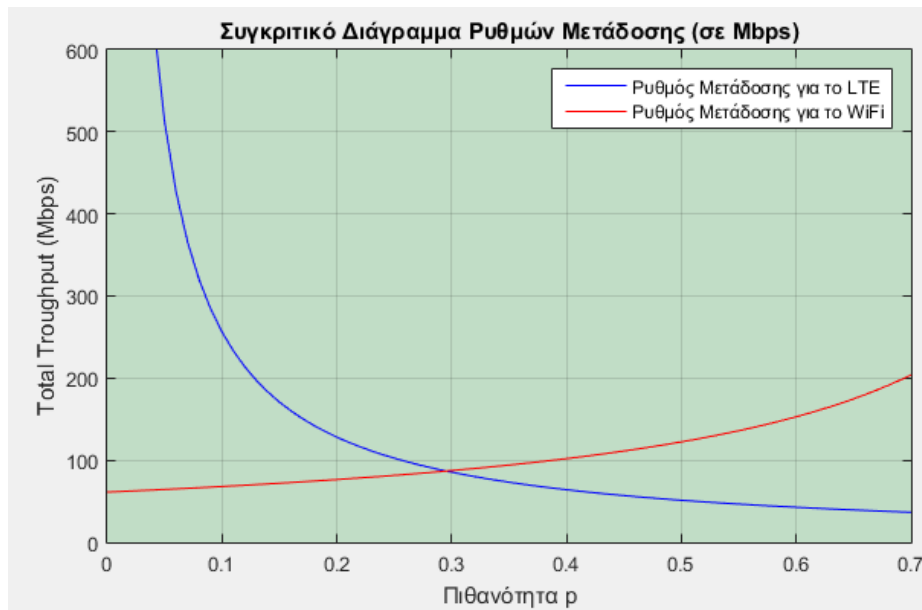
$$SNR_b = \frac{0,01 \cdot 0,0008 \cdot 1}{10^{-20,4} \cdot 40^{3,8} \cdot 5 \cdot 10^6} \approx 328,316$$

Λόγω όμως της (7.14):

$$R_{WiFi} = 5 \cdot 10^6 \log_2(1 + 328,316) \approx 41,817Mbps$$

Παρατήρηση: Διαπιστώσαμε ότι ο πειραματικός ρυθμός μετάδοσης είναι μικρότερος σε σχέση με τον ονομαστικό (54Mbps) που δίνουν οι κατασκευαστές για το πρότυπο 802.11a [48]. Αυτό δικαιολογείται διότι εμείς λάβαμε το σενάριο χειρότερης περίπτωσης στο οποίο ο χρήστης βρίσκεται ακριβώς στο όριο κάλυψης του ασύρματου δικτύου και η απόσταση από το σταθμό βάσης είναι η μέγιστη δυνατή και ίση με την ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας $r = R_b$. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να λάβουμε τη μέγιστη δυνατή απώλεια ισχύος που καταγράφηκε μέσω του ντεντερμινιστικού μοντέλου απωλειών. Συνεπώς, το αποτέλεσμα που εξάχθηκε είναι απόλυτα λογικό και αναμενόμενο.

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=30m$ έχουμε:



Γράφημα 6.2

Για το Γράφημα 6.2 μπορούμε να διαπιστώσουμε πως η πιθανότητα για τα αριθμητικά αποτελέσματα που λάβαμε ισούται με:

$$P = 0,29$$

Συμπεραίνουμε επομένως πως μειώνοντας την ακτίνα R_b η πιθανότητα P παρουσιάζει μια μικρή μείωση για το σημείο τομής των δύο καμπυλών που εξετάζουμε. Αυτό σημαίνει ότι πλέον το 29% της κίνησης φορτίου δρομολογείται από το δίκτυο 4G, ενώ το υπόλοιπο 71% ακολουθεί την εναλλακτική διαδρομή μέσω των προσφερόμενων ετερογενών δικτύων που στην περίπτωσή μας είναι τα γειτονικά WiFi πλησίον των συνδρομητών που «επιλέχθηκαν» να ανήκουν στο ποσοστό αυτό. Από το διάγραμμα μπορούμε εύκολα να εξάγουμε ότι ο νέος ρυθμός μετάδοσης των πελατών που κατεβάζουν από το LTE δίκτυο είναι ίσος με:

$$Throughput = 90Mbps$$

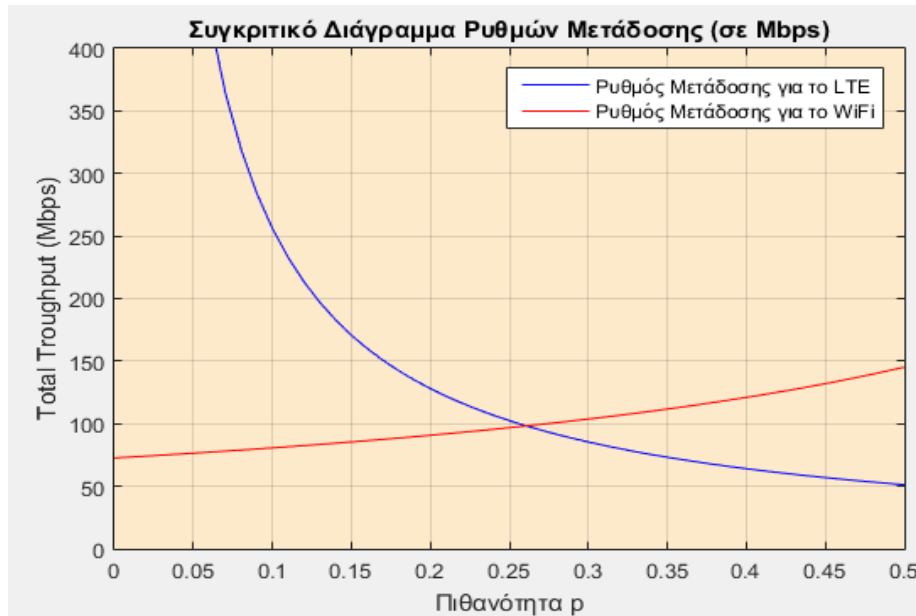
Ενώ για το υπόλοιπο πλήθος πελατών (71%) που η ένταση της κίνησης τους στην κατερχόμενη ζεύξη δρομολογήθηκε, ο ρυθμός μετάδοσης δίνεται με παρόμοια τρόπο που ακολουθήθηκε και παραπάνω από τις (6.15), (6.16) για $R_b = 30m$.

Προκύπτουν:

$$SNR_b = \frac{0,01 \cdot 0,0008 \cdot 1}{10^{-20,4} \cdot 30^{3,8} \cdot 5 \cdot 10^6} \approx 979,624 \quad \text{και}$$

$$R_{WiFi} = 5 \cdot 10^6 \log_2(1 + 979,624) \approx 49,688 Mbps$$

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=20m$ έχουμε:



Γράφημα 6.3

Στην περίπτωση αυτή η πιθανότητα που παίρνουμε είναι ίση με:

$$P = 0,265$$

Με ακριβώς ίδια λογική εργασίας μπορούμε να πούμε πως ολοένα και λιγότερο φορτίο κίνησης μεταφέρεται από το μακροκυβελωτό δίκτυο. Το παραπάνω ποσοστό έχει φτάσει πλέον, μόλις στο 26,5% καθώς όλο το υπόλοιπο 73,5% των χρηστών δρομολογεί τα download που πραγματοποιεί μέσω της υποδομής του WiFi. Φυσικά, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των χρηστών που επιλέγονται να ακολουθήσουν την εναλλακτική διαδρομή τόσο μεγαλύτερο όφελος έχει ο λειτουργός του δικτύου αφού απαιτούνται λιγότεροι ραδιοπόροι προς διάθεση. Οι πόροι αυτοί παρέχονται ουσιαστικά από τους ίδιους τους πελάτες μέσω των AP που έχουν εγκαταστήσει.

Παρατηρώντας το διάγραμμα εξασφαλίζουμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης για τους χρήστες που εξυπηρετούνται ακόμη από το LTE είναι αυξημένος και φτάνει τα:

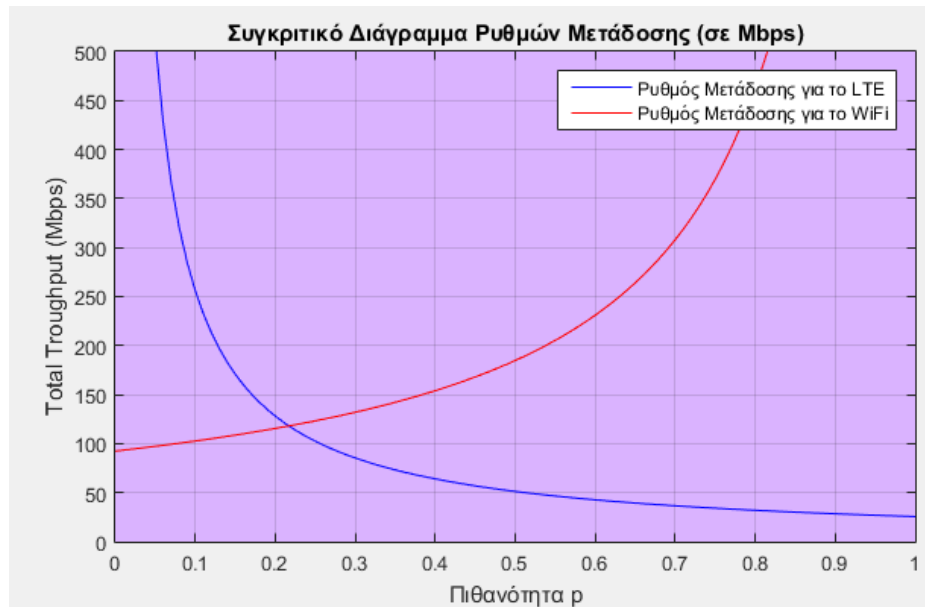
$$Throughput = 100 Mbps$$

Όμοια, από (6.14), (6.15) με $R_b = 20m$:

$$SNR_b = \frac{0,01 \cdot 0,0008 \cdot 1}{10^{-20,4} \cdot 20^{3,8} \cdot 5 \cdot 10^6} \approx 4573,051 \text{ και}$$

$$R_{WiFi} = 5 \cdot 10^6 \log_2 (1 + 4573,051) \approx 60,796 Mbps$$

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=10m$ έχουμε:



Γράφημα 6.4

Από το Γράφημα 6.4 βλέπουμε πως η νέα πιθανότητα είναι ίση με:

$$P = 0,21$$

Το 21% της κίνησης δρομολογείται από το δίκτυο LTE ενώ το 79% από γειτονικά WiFi στα οποία έχουν πρόσβαση οι κινητοί χρήστες με τις συσκευές τους. Υπολογίζουμε, για ακτίνα κάλυψης της περιοχής των WiFi ίση με $R_b = 10m$ από τις σχέσεις (6.14) και (6.15) τα αντίστοιχα μεγέθη:

$$SNR_b = \frac{0,01 \cdot 0,0008 \cdot 1}{10^{-20,4} \cdot 10^{3,8} \cdot 5 \cdot 10^6} \approx 63697,147 \text{ και}$$

$$R_{WiFi} = 5 \cdot 10^6 \log_2 (1 + 63697,147) \approx 79,795 Mbps$$

Ενώ από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ο ρυθμός μετάδοσης με τον οποίο κατεβάζουν οι συνδρομητές που συνδέονται στο LTE και είναι ίσος με:

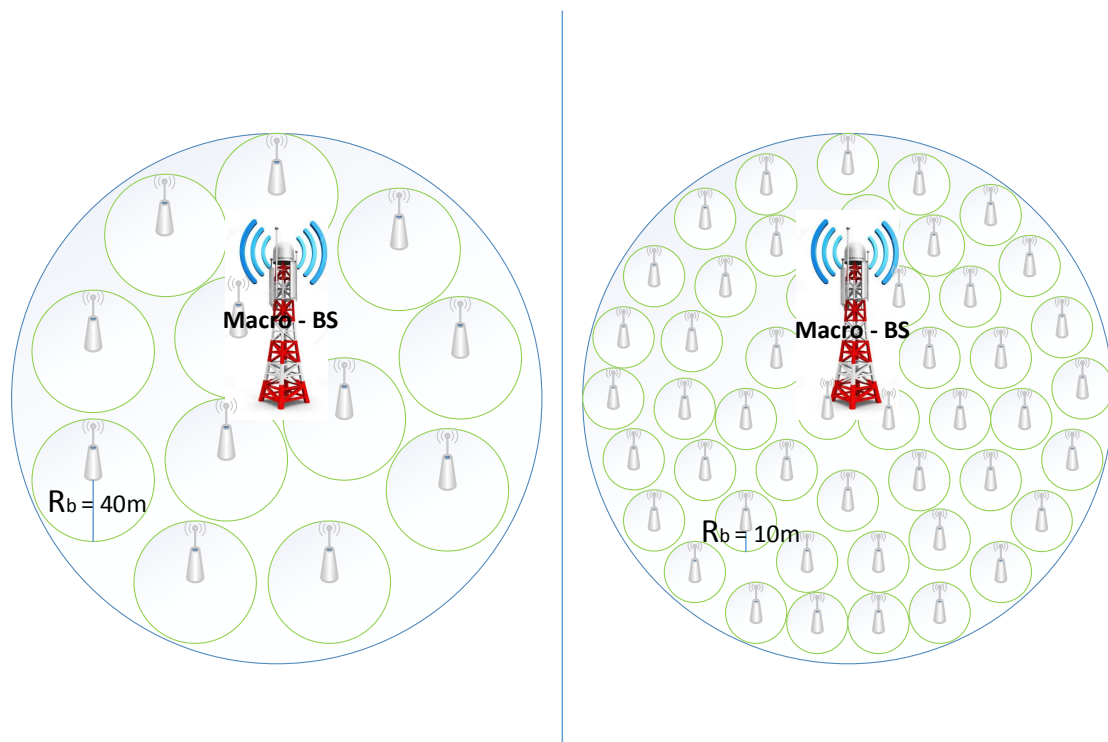
$$Throughput = 120 Mbps$$

Θεωρητικά, θα μπορούσε κάποιος να πει ότι με ανάλογη λογική μπορούμε να μειώνουμε τις ακτίνες κάλυψης των δικτύων WiFi επ' άπειρον εφόσον διαπιστώνουμε πως αυτό φαινομενικά συμφέρει και τον πάροχο του δικτύου αφού δρομολογεί την κίνηση από άλλα ετερογενή δίκτυα μειώνοντας το φόρτο του δικτύου σημαντικά – εδώ είδαμε ότι μειώνεται μέχρι και 79% αλλά και τους συνδρομητές που μπορούν να απολαμβάνουν μεγαλύτερες ταχύτητες για download. Όπως είδαμε ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνει και για όσους κατεβάζουν μέσα από το δίκτυο LTE και για όσους δρομολογούν τα αρχεία στην κατερχόμενη ζεύξη από τα ασύρματα σημεία πρόσβασης των WiFi. Ωστόσο ο παραπάνω συλλογισμός εμπίπτει σε σοβαρό σφάλμα διότι δεν έχουμε λάβει υπόψη μας στα αποτελέσματα αυτά μια βασική παράμετρο του συστήματος, αυτή της παρεμβολής.

Όπως γίνεται αντιληπτό, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας των WiFi τόσο μικρότερο το εμβαδόν κάλυψής των και άρα εντός της κυψέλης για την πλήρη κάλυψη του ίδιου χώρου με πριν απαιτείται πλέον μεγαλύτερος αριθμός AP σύμφωνα πάντα με την ομοιόμορφη κατανομή που ακολουθείται για την τοποθέτησή τους. Η διαπίστωση αυτή αποτυπώνεται στο Σχήμα 6.3 που ακολουθεί.

Αυτή η συνεχής μείωση της ακτίνας R_b σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον διάδοσης που λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι θα είχε ως συνέπεια την αύξηση της παρεμβολής λόγω του μεγάλου πλήθους των WiFi που γειτνιάζουν. Έτσι ο ρυθμός μετάδοσης όχι μόνο δεν αυξάνει, αλλά γνωρίζει σημαντική πτώση, αφού λόγω της (5.11) η ισχύς παρεμβολών μεγαλώνει κι άρα ο λόγος SINR μειώνεται. Μοιραία λοιπόν και η ισχύς που λαμβάνει ο τυχαίος κινητός χρήστης θα είναι σαφώς μικρότερη.

Η συνεχής μείωση της ακτίνας R_b δεν θα μπορούσε εξάλλου να αποτελεί προφανή λύση και για έναν άλλο λόγο. Αφενός, δεν είναι δυνατόν να δημιουργεί η υποδομή στο δίκτυο LTE στην οποία κάθε μακροκυψέλη θα εμπεριέχει ένα τεράστιο πλήθος (που θα τείνει στο άπειρο) δικτύων WiFi με απειροελάχιστη ακτίνα κάλυψης διότι δεν θα ήταν πρακτικό και αφετέρου το κόστος κατασκευής, εγκατάστασης και διασύνδεσης τους θα ήταν υπέρογκο και σίγουρα πολύ μεγαλύτερο από κάθε άλλη προτεινόμενη λύση. Επίσης λόγω των πολύ μικρών διαστάσεων των περιοχών κάλυψης των WiFi θα ήταν δυσνόητα τα όρια μεταξύ των για ένα τερματικό της σημερινής τεχνολογίας κι έτσι ο UE ενδεχομένως να αντιμετώπιζε σοβαρό πρόβλημα για την επιλογή σύνδεσης στο «κοντινότερο» σημείο πρόσβασης. Ακόμη και να ήταν επιτεύξιμο κάτι τέτοιο, η διαδικασία θα περιελάμβανε πολλές χιλιάδες μεταπομπές (handoff) με ένα και μόνο βήμα του χρήστη.



Σχήμα 6.8: Στ'αριστερά βλέπουμε την κατανομή των WiFi AP όταν η ακτίνα κάλυψής τους είναι ίση με 40m. Παρατηρούμε ότι για την κάλυψη της κυψέλης σε ικανοποιητικό βαθμό απαιτούνται 56* σημεία ασύρματης πρόσβασης του προτύπου 802.11a. Αντίθετα, στα δεξιά παρατηρούμε πως η μείωση της ακτίνας έχει επιφέρει εκθετική αύξηση των WiFi που απαιτούνται για να υπάρχει η ίδια κάλυψη με πριν. Πλέον ο αριθμός αυτός ανέρχεται σε 900* AP. Η ανάδειξη του προβλήματος που προκύπτει με υπερβολική μείωση της ακτίνας περιορίζεται μόνο σε μια μακροκυψέλη για λόγους απλότητας του σχήματος καθώς και λόγω του ότι δεν λαμβάνονται υπόψιν παρεμβολές χρηστών από γειτονικές κυψέλες

Οι συνέπειες των συνεχόμενων μεταπομπών είναι γνωστές για την επιβάρυνση που προκαλούν στο δίκτυο και ικανές να αποτελέσουν ένα ακόμη ισχυρό αποδεικτικό της αδυναμίας υλοποίησης μιας τέτοιας «πιθανής» ιδέας. Συνεπώς το ζητούμενο είναι η εξεύρεση μιας λύσης η οποία θα μας επιτρέψει να έχουμε το βέλτιστο συνδυασμό της ελάχιστης δυνατής ακτίνας που θα μας αποδίδει το μέγιστο ποσοστό δρομολόγησης του φορτίου κίνησης μέσω των WiFi και της ελάχιστης δυνατής ισχύος παρεμβολών.

Μπορεί εύκολα κάποιος να φανταστεί πλέον πως πέραν των προβλημάτων παρεμβολών που θα αντιμετωπίσει ένας χρήστης στην περίπτωση υπεράριθμου πλήθους AP, είναι και πρακτικά ασύμφορη η τοποθέτηση όλων αυτών για την εξυπηρέτηση σε μια και μόνο κυψέλη LTE.

*Τα αποτελέσματα για τον απαιτούμενο αριθμό WiFi, ανάλογα με την ακτίνα, δίνονται από τη σχέση:

$$N_{WiFi} = \frac{\text{Εμβαδόν_Κυψέλης}}{\text{Εμβαδόν_Κάλυψης_WiFi}} \quad (6.17)$$

ή

$$N_{WiFi} = \frac{\pi \cdot R_{cell}^2}{\pi \cdot R_b^2} \quad (6.18)$$

Με $R_{cell} = 300m$ και $R_b = 40m$ (56-WiFi), $R_b = 10m$ (900-WiFi) για τις αντίστοιχες περιπτώσεις. Με το κεφαλαίο γράμμα N συμβολίζουμε προφανώς το πλήθος των WiFi που προκύπτει απ' τον παραπάνω λόγο. Επειδή $N_{WiFi} \in \mathbb{Z}$ έχουμε τελικά ότι:

$$N_{WiFi} = \begin{cases} [N_{WiFi}] & , N_{WiFi} \notin \mathbb{Z} \\ N_{WiFi} & , N_{WiFi} \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (6.19)$$

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ρυθμαπόδοσης για τις διάφορες περιπτώσεις που λάβαμε:

Ρυθμαπόδοση Συστήματος (Throughput)

	$R_b=40m$	$R_b=30m$	$R_b=20m$	$R_b=10m$
LTE	75Mbps	90 Mbps	100 Mbps	120 Mbps
WiFi	41,817 Mbps	49,688 Mbps	60,796 Mbps	79,795 Mbps

Πίνακας 6.2

6.6 Ρυθμαπόδοση Χρήστη Ανάλογα με το Δίκτυο Σύνδεσης

Ορίζουμε με Throughput_1 και Throughput_2 τις ρυθμαποδόσεις ενός χρήστη που επιλέγεται από τον αλγόριθμο πιθανοτικής δρομολόγησης να δρομολογήσει το αρχείο που επιθυμεί για την κατερχόμενη ζεύξη μέσα από τα δίκτυα LTE (1) και WiFi (2) αντίστοιχα. Βασιζόμενοι στη σχέση (7.8) λαμβάνουμε ότι:

$$Throughput_i = R_i (1 - \rho_i), \text{ με } i = 1, 2 \quad (6.20)$$

Όπου:

R_i : ο ρυθμός μετάδοσης για το i-δίκτυο

ρ_i : το φορτίο του i-δικτύου

Λόγω της (7.7) όμως η (7.20) λαμβάνει τη μορφή:

$$Throughput_i = R_i - \frac{(\lambda \cdot \sigma)_i}{R_i} \cdot R_i \quad \text{ή}$$

$$Throughput_i = R_i - (\lambda \cdot \sigma)_i \quad (6.21)$$

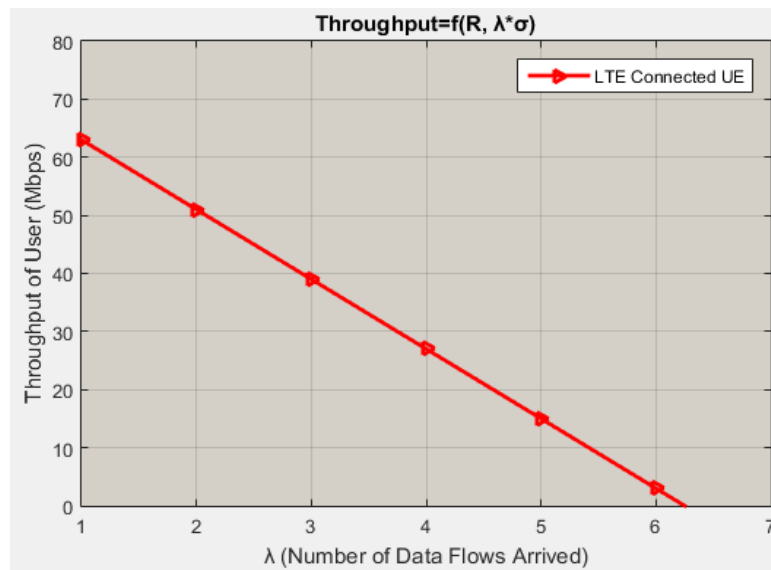
Όπου:

$(\lambda \cdot \sigma)_i$: είναι η ζήτηση της εξυπηρέτησης των χρηστών (traffic demand) όπως έχει ορισθεί και σε προηγούμενες αναφορές

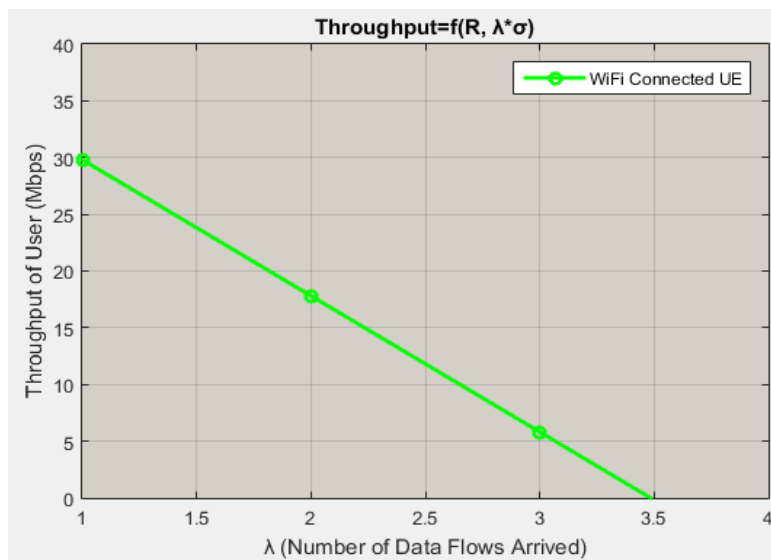
Η σχέση (6.21) όσο απλή μοιάζει, άλλο τόσο μας προσφέρει εξαιρετικά χρήσιμα συμπεράσματα για τη ρυθμαπόδοση ενός τυχαίου κινητού χρήστη εντός της κυψέλης. Με απλά λόγια, μπορούμε να πούμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης με τον οποίον κατεβάζει το αρχείο που επιθυμεί ένας τυχαίος UE είναι ίσος με τον ρυθμό μετάδοσης που του παρέχει το δίκτυο με το οποίο είναι συνδεδεμένος κατά τη λήψη αν αφαιρέσουμε απ' αυτόν τη στιγμιαία ζήτηση της κίνησης των υπόλοιπων ενεργών πελατών που εξυπηρετούνται από το ίδιο δίκτυο. Θα πρέπει βέβαια να λάβουμε υπόψιν μας ότι η πραγματική ρυθμαπόδοση θα διαφέρει από την θεωρητική τιμή που πρόκειται να εξάγουμε λόγω του ότι αφενός δεν έχουμε θεωρήσει στη σχετική εξίσωση τις παρεμβολές που εισάγουν οι γειτονικοί χρήστες καθώς επίσης η ρυθμαπόδοση των δικτύων WiFi έχει υπολογιστεί για το σενάριο χειρότερης περίπτωσης κατά το οποίο ο χρήστης συνδέεται στο όριο της ακτίνας κάλυψης. Προφανέστατα θα μπορούσε ο συνδρομητής μας να είναι σε σαφώς πιο κοντινή θέση σχετικά με τον σταθμό βάσης, οπότε ο ρυθμός μετάδοσης με τον οποίο θα κατέβαζε θα ήταν σίγουρα μεγαλύτερος από την περίπτωση που λάβαμε εδώ. Τέλος, το φαινόμενο της παρεμβολής από γειτονικά δίκτυα WiFi δεν έχει συνυπολογιστεί. Παρά τις παραπάνω όμως παραδοχές - για χάριν απλοποίησης - που ορίσαμε η (6.21) συνιστά μια πολύ καλή προσεγγιστική σχέση για υπολογισμό της ρυθμαπόδοσης χρήστη που επιθυμούμε.

Θεωρώντας το μέγεθος πακέτου ίσο με 1.500Bytes (Μέγεθος MTU), θεωρούμε για την ελαστική κίνηση κατερχόμενης ζεύξης το μέσο μέγεθος ροής (αλληλουχία πακέτων) ίσο με 12Mbits.

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=40m$ έχουμε:

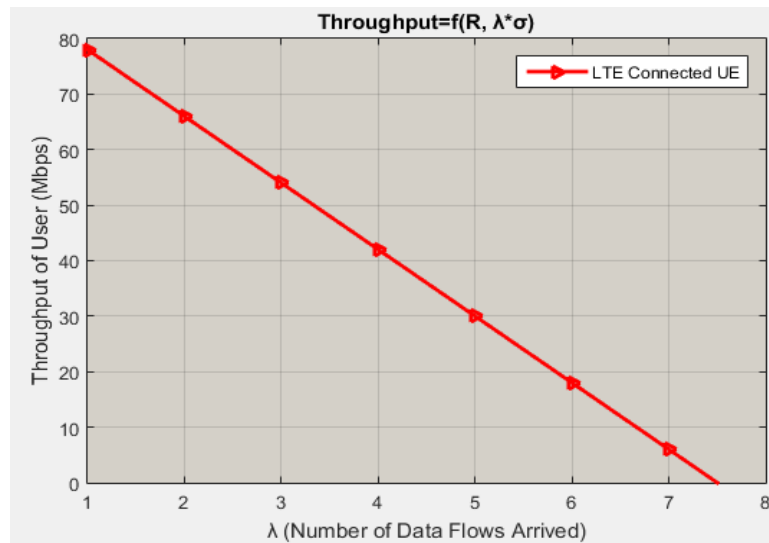


Γράφημα 6.5

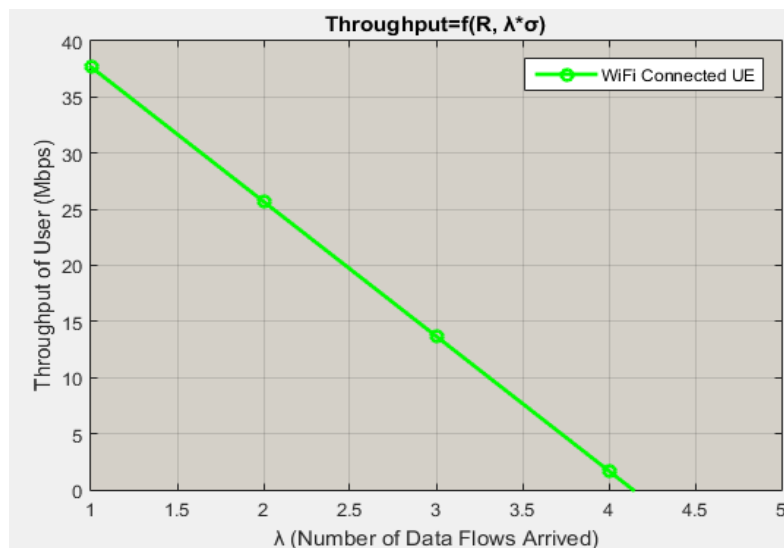


Γράφημα 6.6

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=30m$ έχουμε:

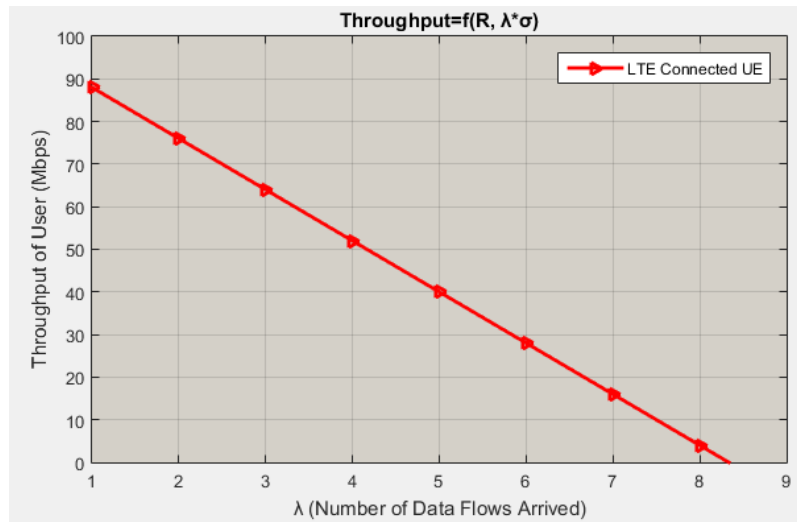


Γράφημα 6.7

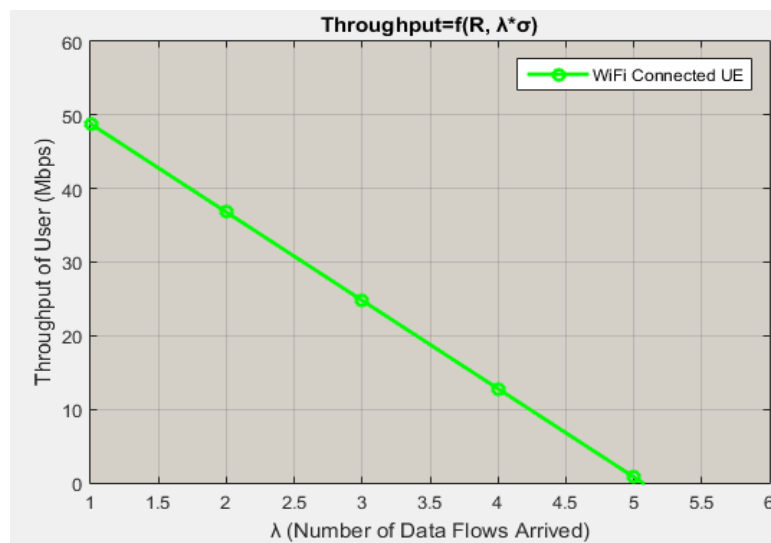


Γράφημα 6.8

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=20m$ έχουμε:

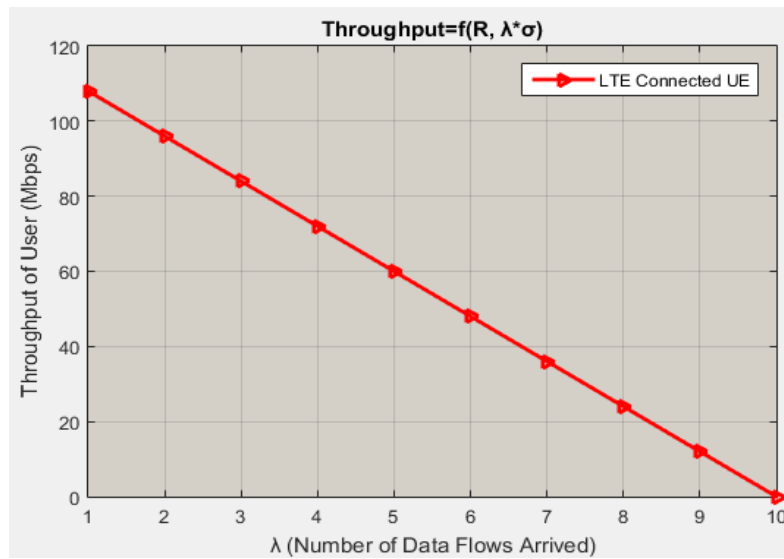


Γράφημα 6.9

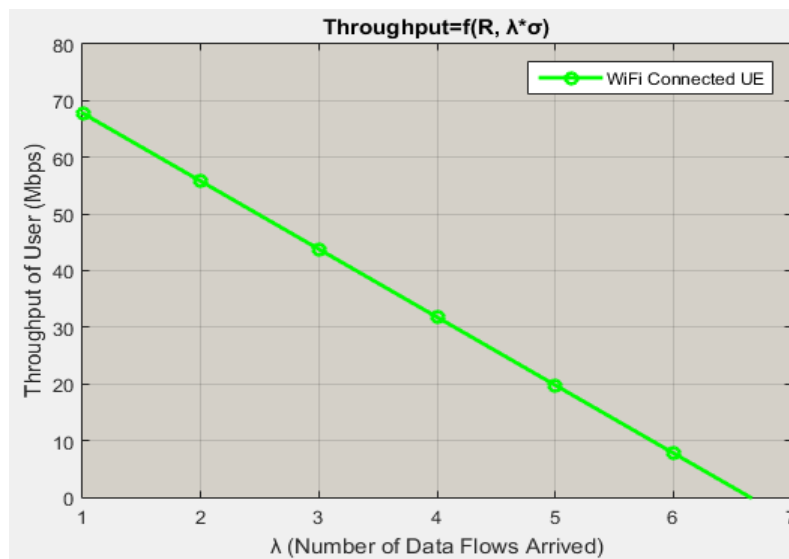


Γράφημα 6.10

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=10m$ έχουμε:



Γράφημα 6.11



Γράφημα 6.12

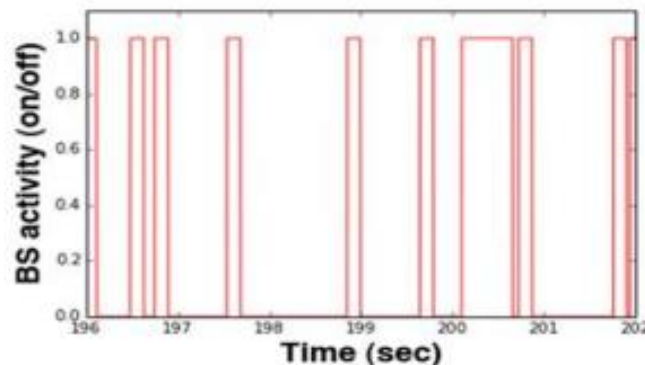
Κεφάλαιο 7. Πολιτική Ελάχιστης Κατανάλωσης Ισχύος των Σταθμών Βάσης

7.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, οι τηλεπικοινωνίες, το φορητό Internet καθώς και πολλές ασύρματες εφαρμογές έχουν κυρίαρχο ρόλο στον κόσμο της Πληροφορίας και της Τεχνολογίας Επικοινωνιών (Information and Communication Technology – ICT). Αυτό με τη σειρά του συνεπάγεται ένα 2-3% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας να αφορά αποκλειστικά για ITC, γεγονός που προκαλεί ένα περίπου 3% των συνολικών εκπομπών ρύπων CO₂ [61]. Οι τεχνολογίες Επικοινωνίας και Πληροφορίας όσο χρήσιμες είναι επομένως για την ανθρωπότητα, άλλο τόσο δυνητικά επιβλαβείς αναμένονται για το περιβάλλον μας. Αν και η σημερινή έκταση της απειλής δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα μεγάλη μπορεί να μετατραπεί ωστόσο σε ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα στο εγγύς μέλλον λόγω της ραγδαίας εξελικτικής διαδικασίας των κινητών εφαρμογών για τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης που απαιτούν ολοένα και μεγαλύτερη ραδιοκάλυψη και αυξάνουν τις απαιτήσεις του Δικτύου Κορμού EPC (Παράγραφος 2.1.4.3 του 2^{ου} Κεφαλαίου). Είναι επομένως αρκετά πιθανό να έχουμε μια σημαντική αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης η οποία θα προκύπτει από τον αυξημένο αριθμό Σ.Β. και των κέντρων δεδομένων στο δίκτυο. Τέλος, όσο αυξάνει η ζήτηση των ICT υπηρεσιών τόσο μεγαλύτερη επρόκειτο να είναι η κατανάλωση των δικτύων ασύρματων υπηρεσιών. Με στόχο την επίτευξη χαμηλότερου κόστους λειτουργίας των δικτύων καθώς και την προστασία του περιβάλλοντος οι πάροχοι προσπαθούν να αναπτύξουν διάφορες στρατηγικές μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης. Αν αναλογιστεί κανείς πως σύμφωνα με τα στοιχεία [62], το 85% της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας ενός δικτύου καταναλώνεται από τους Σ.Β τότε εύκολα μπορεί να συμπεράνει το γιατί αποτελεί μια ενδιαφέρουσα περιοχή μελέτης με στόχο τη μείωση των ενεργειακών τους απαιτήσεων καθώς και για ποιο λόγο η όλη προσπάθεια εστιάζεται γύρω από αυτούς.

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσουμε την πολιτική ελάχιστης κατανάλωσης ισχύος των σταθμών βάσης που βρίσκει εφαρμογή τόσο σε αυτούς του δικτύου LTE όσο και στους αντίστοιχους των σταθμών WiFi εντός μιας μακροκυψέλης. Θεωρούμε ένα μοντέλο δυναμικής κατανάλωσης ισχύος του Σ.Β. βασισμένο στα [63] – [65]. Η βάση λοιπόν για την ανάλυσή μας είναι ο σταθμός βάσης του μακροκυψελωτού δικτύου 4G και ο σταθμός βάσης του WiFi. Στην εργασία αναπτύσσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο αναπαριστά την κατανάλωση ισχύος – η οποία σχετίζεται με το πότε εκπέμπει ένας Σ.Β. – και διαχωρίζει το διάστημα εκπομπής του σταθμού σε «ενεργές» και «ανεργές» περιόδους. Μια περίοδος καλείται ενεργή όταν η ισχύς εκπομπής του BS είναι στα συνηθισμένα επίπεδα κατανάλωσης για να εκτελεί τις διαδικασίες μεταφοράς πακέτων μεταξύ των κόμβων, ενώ ανεργή ονομάζεται εκείνη η περίοδος στην οποία ο σταθμός έχει ρίξει σημαντικά το επίπεδο ισχύος του, λόγω του ότι δεν υπάρχει ζήτηση για κίνηση δεδομένων στην περιοχή που εξυπηρετεί. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως αυτά τα διαστήματα εν τέλει δεν είναι και τόσο σπάνια και μέχρι πρότινος άσκοπα η στάθμη της ισχύος εκπομπής ήταν συνεχώς στο ίδιο επίπεδο ανεξάρτητα από το αν ο σταθμός βάσης είχε να κατευθύνει κίνηση ροών ή όχι. Στα ανενεργά διαστήματα μπορούμε να

λέμε ότι ο σταθμός παραμένει αδρανής ή σε μια κατάσταση «ύπνωσης» (αναμονής) περιμένοντας μέχρι να σταλεί το πρώτο αίτημα σύνδεσης από κάποιο συνδρομητή και να τον θέσει ξανά σε λειτουργία. Για χάριν απλούστευσης μπορούμε να θέσουμε τα ενεργά διαστήματα ως «ON» και τα αντίστοιχα ανενεργά ως «OFF». Λόγω της κατανομής Poisson που ακολουθούν οι αφίξεις των χρηστών, προκύπτει ότι τα διαστήματα μη-αφίξεων στα οποία ο Σ.Β. είναι σε αναμονή ακολουθούν και αυτά τη διαδικασία Poisson ρυθμού λ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1.

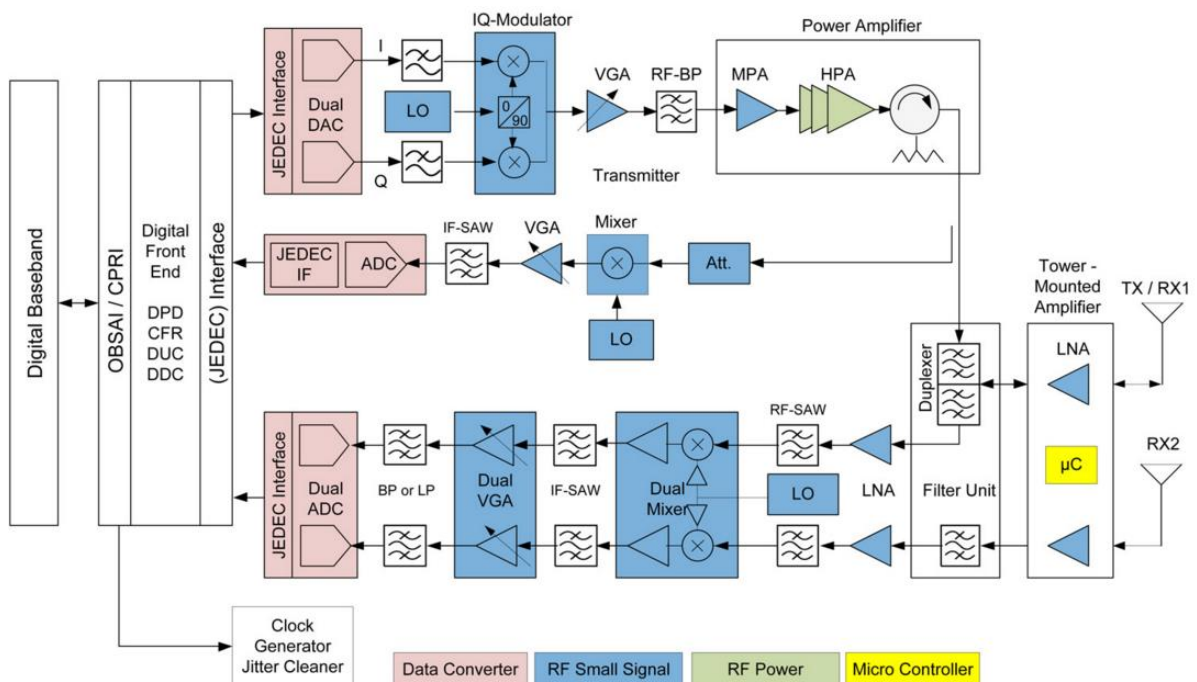


Σχήμα 7.1: Απεικόνιση των διαστημάτων «ON», «OFF» συναρτήσει του χρόνου στα οποία ο BS είναι ενεργός και σε αναμονή αντίστοιχα. Τα διαστήματα ON ξεχωρίζουν λόγω της ύπαρξης «παλμού», ενώ τα διαστήματα OFF βρίσκονται ανάμεσα σε δύο παλμούς «ON» [69].

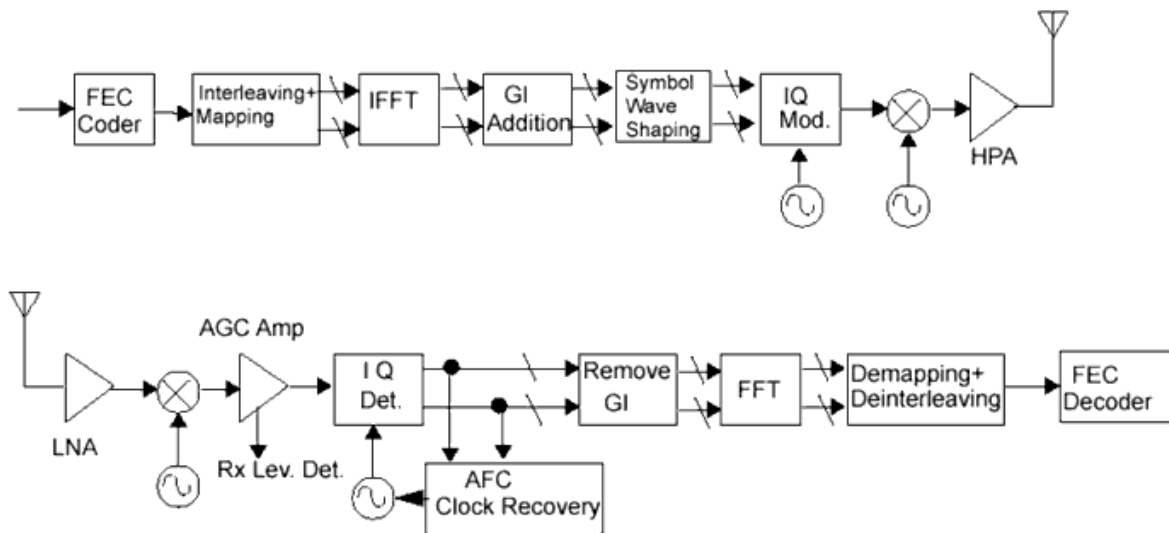
Ο βασικός μηχανισμός που υιοθετούμε για το μοντέλο μας, θεσπίζει την κατάσταση «ύπνωσης» που αναφέραμε προηγουμένως κατά την οποία ο Σ.Β. λειτουργεί στο ελάχιστο επίπεδο κατανάλωσης [66], [67]. Σύμφωνα με αυτόν όταν η ζήτηση για κίνηση πληροφορίας είναι σπάνια, τα περισσότερα μέρη του συστήματος του Σ.Β. απενεργοποιούνται, ενώ παραμένουν ενεργές μόνο βασικές λειτουργίες όπως η σηματοδότηση από το κέντρο μεταγωγής στην περίπτωση που ο σταθμός χρήζει άμεσης ενεργοποίησης και επαναφοράς στην κατάσταση ON [65]. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η ξαφνική αύξηση στην ζήτηση δεδομένων της συγκεκριμένης περιοχής που εξυπηρετεί ο BS.

Όπως γνωρίζουμε ένας σταθμός βάσης αποτελείται από πολλούς και διάφορους συντελεστές όπως ο πομποδέκτης, οι ενισχυτές ισχύος, μετατροπείς AC-DC, ανεμιστήρες ψύξης κλπ, καθένας απ'τους οποίους παίζει το δικό του ρόλο στην κατανάλωση ισχύος του BS. Αναλυτικότερη αναπαράσταση του κυκλώματος ενός σταθμού βάσης δίνεται στο Σχήμα 7.2 και 7.3 για Σ.Β. του LTE και του προτύπου 802.11a αντίστοιχα. Καθεμία από τις ανωτέρω μονάδες του σταθμού μπορεί να έχει

σταθερή την κατανάλωση ισχύος της ή να την εξαρτά από το φορτίο κίνησης που διαχειρίζεται κάθε φορά [68].



Σχήμα 7.2: Διάγραμμα του ολικού συστήματος μετάδοσης του πομποδέκτη ενός σταθμού βάσης του μακροκυψελωτού δικτύου LTE [81].



Σχήμα 7.3: Μπλοκ διαγράμματος του κυκλώματος πομπού και δέκτη στο φυσικό στρώμα του προτύπου 802.11a για OFDM [82].

Ένα απλό αλλά ταυτόχρονα σημαντικό χαρακτηριστικό που συναντάται στα κυψελωτά δίκτυα και πρέπει να αξιοποιηθεί για την εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη διάρκεια ύπνωσης των σταθμών βάσης είναι η καθημερινή συμπεριφορά που ακολουθούν οι χρήστες. Στην διάρκεια της ημέρας οι συνδρομητές μετακινούνται προς τις περιοχές όπου βρίσκονται συγκεντρωμένα τα γραφεία τους, ενώ το βράδυ η διαδρομή αυτή είναι αντίθετη όταν και επιστρέφουν σπίτι. Μπορούμε λοιπόν έτσι να διαπιστώσουμε ότι τα διαστήματα OFF μπορούν να είναι πολύ μεγαλύτερα απ'ότι αρχικά πιστεύαμε αφού η ζήτηση τις πρωινές ώρες κοντά στις περιοχές κατοικίας είναι μικρή και αντίστοιχα στις περιοχές εργασίας τις βραδινές ώρες.

7.2 Περιγραφή και Ανάλυση του Μαθηματικού Μοντέλου

Το μοντέλο που προτείνουμε εδώ βασίζεται στην προσέγγιση που έχει γίνει στην [69] σύμφωνα με το οποίο η μέση συνολική κατανάλωση ισχύος, δίνεται από τη σχέση:

$$P_{TOT} = p_{ON1}(1 - p_{ON2})(P_1 + P_C) + p_{ON2}(1 - p_{ON1})(P_2 + P_C) + p_{ON1}p_{ON2}(P_1 + P_2 + P_C) + p_{OFF}P_S \quad (7.1)$$

Όπου:

P_1 : ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης της μακροκυψέλης

P_2 : ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης του WiFi

P_C : ισχύς που καταναλώνει το κύκλωμα όταν ο σταθμός βάσης είναι στην κατάσταση (ON)

P_S : ισχύς που καταναλώνεται στην κατάσταση ύπνωσης (OFF) του σταθμού βάσης

p_{OFF} : πιθανότητα να βρίσκεται σε κατάσταση ύπνωσης ο σταθμός

p_{ON1} : πιθανότητα του Σ.Β. του LTE να είναι σε κανονική λειτουργία εκπομπής

p_{ON2} : πιθανότητα του Σ.Β. του WiFi να είναι σε κανονική λειτουργία εκπομπής

Ισχύουν ακόμη ότι:

$$p_{ON} = p_{ON1} + p_{ON2} - (p_{ON1}p_{ON2}) \quad (7.2)$$

$$p_{OFF} = 1 - p_{ON} \quad (7.3)$$

Τα p_{ON1} , p_{ON2} μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από τη σχέση:

$$p_{ON_i} = \frac{\rho_i y_{PF}}{1 + \rho_i y_{PF} - \rho_i} \quad (7.4)$$

Η παράμετρος y_{PF} της σχέσης (7.4) εκφράζει την ποικιλομορφία μεταξύ των χρηστών που εισάγεται λόγω του προγραμματιστή και σχετίζεται με το μοντέλο απωλειών που θεωρούμε. Εδώ λαμβάνουμε:

$$y_{PF} = 1$$

Έτσι, με αντικατάσταση στην (7.4) καταλήγουμε στο αποτέλεσμα ότι τα p_{ON1} , p_{ON2} είναι ίσα με τα φορτία ρ_1 , ρ_2 του δικτύου LTE και WiFi αντίστοιχα. Συνεπώς προκύπτει:

$$p_{ON1} = \rho_1 \quad (7.5)$$

$$p_{ON2} = \rho_2 \quad (7.6)$$

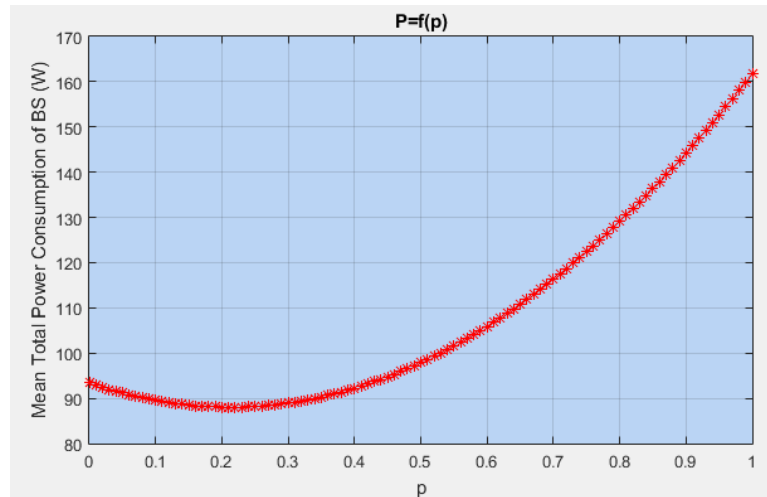
Ωστόσο τα φορτία του εκάστοτε δικτύου σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους, αφού όσο μεγαλύτερη κίνηση δεδομένων δρομολογείται μέσω των WiFi τόσο το φορτίο ρ_1 μειώνεται και αντίστροφα.

7.3 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αριθμητικών Αποτελεσμάτων

Από τον ορισμό του φορτίου κίνησης – σχέση (6.7) – διαπιστώνουμε ότι αυτό εξαρτάται από τον ρυθμό μετάδοσης λ της κατανομής Poisson, το μέσο μέγεθος της ροής σ και τον ρυθμό μετάδοσης του δικτύου. Από τις σχέσεις (7.1)–(7.6) για $\lambda = 4$, $\sigma = 12\text{Mbits}$ και ρυθμό μετάδοσης ίσο με αυτό που λάβαμε από τα αποτελέσματα της 6.5 τρέχουμε τον κώδικα του παραρτήματος και συγκεντρώνουμε τα κάτωθι εξαγόμενα για τη συνολική ισχύ κατανάλωσης P_{TOT} . Όπως έγινε παραπάνω έτσι κι εδώ θεωρούμε τις 4 περιπτώσεις ακτίνων κάλυψης των WiFi ($R_b = 10, 20, 30, 40m$) που μας δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα στην κατανάλωση ισχύος του σταθμού βάσης τα οποία και ερμηνεύουμε. Αναδεικνύεται έτσι η βέλτιστη πολιτική ενεργειακής κατανάλωσης του δικτύου. Η ακτίνα κάλυψης των WiFi παίζει και στο κεφάλαιο αυτό σημαντικό ρόλο, αφού λόγω αυτής της παραμέτρου αυτής εξαρτάται η πυκνότερη ή αραιότερη κατανομή τους στο χώρο και επομένως μεταβάλλεται το φορτίο ρ_1 του δικτύου LTE λόγω της δρομολόγησης μεγαλύτερης ή μικρότερης κίνησης δεδομένων μέσω των σημείων ασύρματης σύνδεσης AP.

Έτσι, έχουμε:

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=40m$ έχουμε:



Γράφημα 7.1

Αρχικά καλό είναι να υπενθυμίσουμε πως η πιθανότητα p συναρτήσσει της οποίας σχεδιάζουμε τη μέση συνολική κατανάλωση ισχύος είναι η πιθανότητα που ορίζει το πιθανοτικό μοντέλο δρομολόγησης για διευθέτηση της κίνησης δεδομένων της κατερχόμενης ζεύξης μέσα από το δίκτυο LTE.

Όπως παρατηρούμε απ' το Γράφημα 7.1 λαμβάνουμε την ελάχιστη τιμή κατανάλωσης ισχύος για:

$$p = 0,22$$

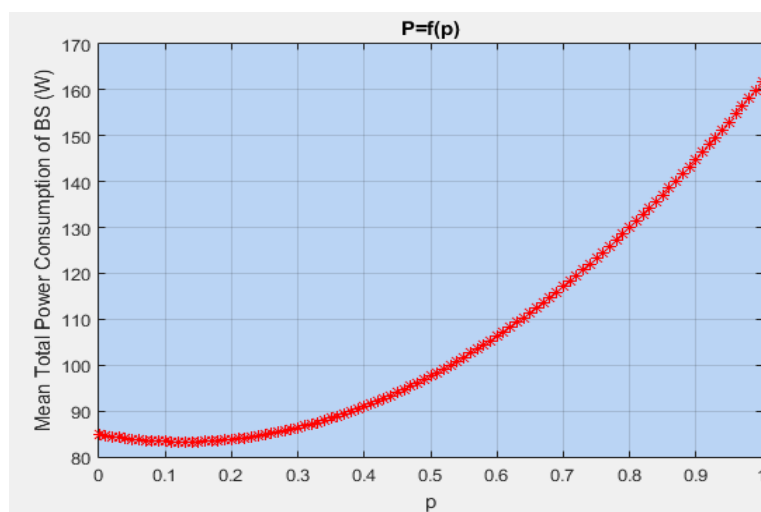
Αυτό ερμηνεύεται ως εξής: αν απ' τη συνολική ζήτηση δεδομένων για κατέβασμα αρχείων ελαστικής κίνησης επιτύγουμε δρομολόγηση του 22% των ροών μέσα από το δίκτυο 4G, τότε έχουμε την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ισχύος των BS. Η τιμή αυτή όπως εύκολα παρατηρούμε είναι περίπου ίση με:

$$P_{TOT} = 88W$$

Μελετώντας το διάγραμμα λίγο περισσότερο, μπορούμε να δούμε πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος των WiFi στην βέλτιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας των σταθμών χωρίς καμία έκπτωση στην προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσιών προς τον πελάτη. Αν υποθέταμε δρομολόγηση της συνολικής κίνησης φορτίου εξ' ολοκλήρου μέσα από το μακροκυψελωτό περιβάλλον (δηλαδή ουσιαστικά μηδενική συμβολή των ετερογενών δικτύων στη διαδικασία δρομολόγησης) τότε από την απεικόνιση λαμβάνουμε πως η ισχύς κατανάλωσης για $p=1$ φτάνει πάνω από τα 160W. Αυτό μεταφράζεται σαν μια ποσοστιαία αύξηση της τάξεως του 84%, μεταβολή που μόνο αμελητέα δεν μπορεί να θεωρηθεί. Βλέπουμε λοιπόν το πόσο καθοριστική είναι η συμβολή των WiFi για την

παροχή εναλλακτικής διαδρομής με στόχο φυσικά τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Συγκριτικά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που εξάγαμε από την προσομοίωση 6.4 και το Γράφημα 6.1 κατά την οποία το πιθανοτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης οδήγησε το 32% των χρηστών μέσα από το LTE, διαπιστώνουμε πως η πολιτική ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης των σταθμών οδηγεί σε μεγαλύτερη αξιοποίηση των σημείων ασύρματης πρόσβασης αφού αντί για το 68% πλέον το 78% της κίνησης αποστέλλεται μέσω αυτών.

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=30m$ έχουμε:



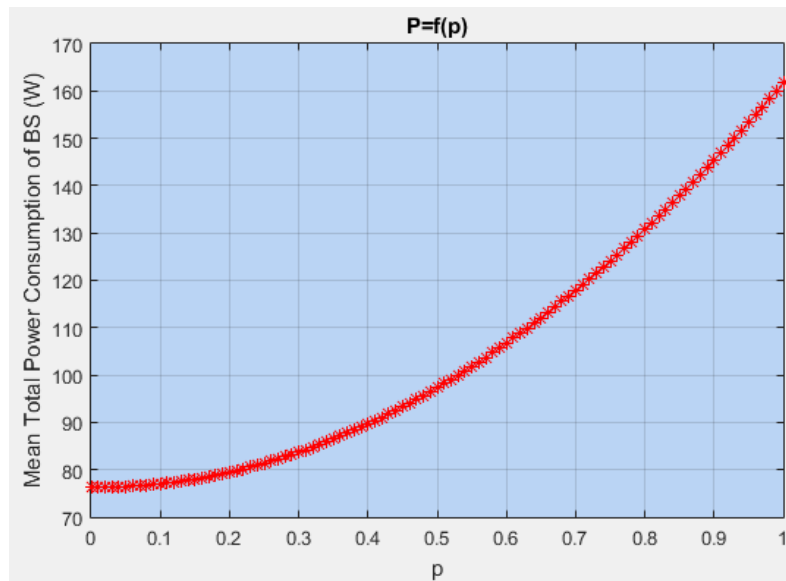
Γράφημα 7.2

Στην περίπτωση αυτή για την τιμή $p = 0,13$ λαμβάνουμε την ελάχιστη στάθμη κατανάλωσης ισχύος η οποία βρίσκεται στα:

$$P_{TOT} = 84W$$

Όπως διαπιστώνουμε, με μείωση της τιμής του p έχουμε δρομολόγηση μεγαλύτερου μέρους της κίνησης από τα δίκτυα WiFi και συνεπώς οι σταθμοί βάσης που πλέον χαρακτηρίζονται από λιγότερα σε πλήθος ή μικρότερα σε διάρκεια διαστήματα λειτουργίας ON καταναλίσκουν μικρότερη ισχύ χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος διακίνησης των δεδομένων. Εδώ, η ποσοστιαία αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος σε περίπτωση διάθεσης των ίδιων αρχείων στα τερματικά αποκλειστικά και μόνο από το σταθμό βάσης της μακροκυψέλης ($p=1$) αγγίζει το 93%! Πλέον το ποσοστό των χρηστών που δρομολογείται η κίνησή τους μέσα από τα WiFi με βάση αυτή την πολιτική είναι ίσο με 87% σε αντίθεση με το 70,5% στην ίδια περίπτωση με εφαρμογή της μεθόδου πιθανοτικής δρομολόγησης του Κεφαλαίου 6.

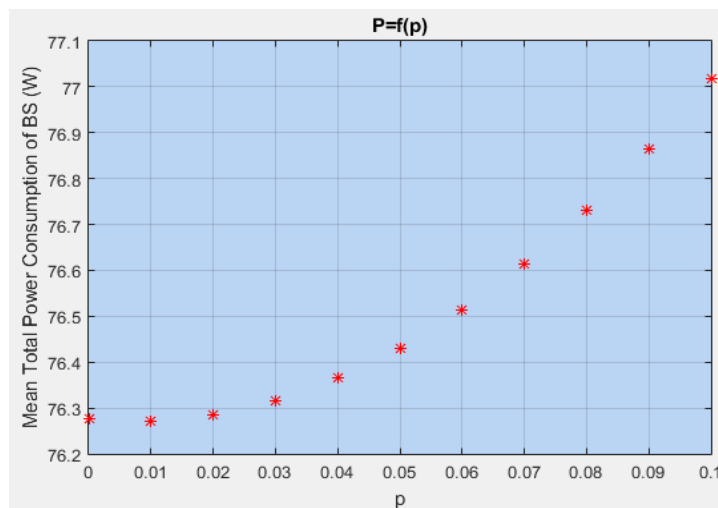
- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=20m$ έχουμε:



Γράφημα 7.3

Στο νέο γράφημα που προκύπτει η πιθανότητα p πέφτει σε ακόμη μικρότερες τιμές, χωρίς ωστόσο να έχει φτάσει στο επίπεδο $p=0$ κάτι που αποδεικνύεται από το Γράφημα 7.4 που ακολουθεί και πλέον είναι ίση με την τιμή:

$$p = 0,01$$



Γράφημα 7.4

Περιορίζοντας το εύρος τιμών της τιμής p για λόγους ακρίβειας στο διάστημα $[0, 0,1]$ δείχνουμε πως το χαμηλότερο σημείο κατανάλωσης είναι πράγματι όσο αναφέρθηκε προηγουμένως.

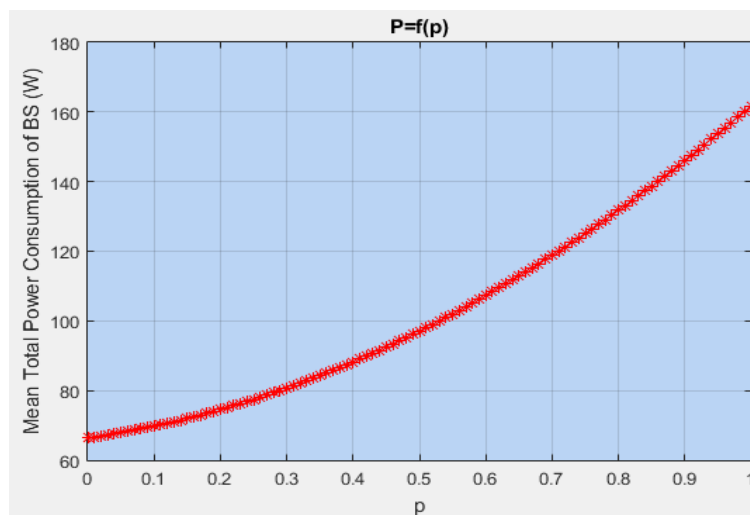
Αυτό συνεπάγεται πως η συντριπτική πλειοψηφία της κίνησης (99,9%) δρομολογείται μέσα από το δίκτυο των σταθμών WiFi κι έτσι το αποτέλεσμα της εκ νέου μείωσης της μέσης συνολικής ισχύος λειτουργίας είναι αναμενόμενο.

Η τιμή αυτή υπολογίζεται βάση γραφήματος ότι είναι περίπου:

$$P_{TOT} = 76,28W$$

Συμπεραίνουμε πως η πτωτική αυτή πορεία στην τιμή του p θα συνεχίσει όσο μειώνεται η ακτίνα κάλυψης των περιοχών των WiFi αφού έτσι η πυκνότητά τους στο χώρο της μακροκυψέλης αυξάνεται με αποτέλεσμα να αναλαμβάνουν να δρομολογήσουν όλο και μεγαλύτερο φορτίο της δικτυακής κίνησης καθώς περισσότεροι χρήστες έχουν πρόσβαση σε κάποιο γειτονικό σημείο ασύρματης πρόσβασης που μπορεί να τους εξυπηρετήσει. Πριν ολοκληρώσουμε ωστόσο και την τελευταία περίπτωση για τη μικρότερη δυνατή ακτίνα που θεωρήθηκε σε αυτήν την εργασία θα πρέπει να ξαναθυμηθούμε στον αναγνώστη πως όλα τα παραπάνω αποτελέσματα πλησιάζουν αρκετά τα πραγματικά δεδομένα όμως παραμένουν προσεγγιστικές σχέσεις λόγω της μη θεώρησης φαινομένων παρεμβολών, σκίασης, διαλείψεων κ.α που συναντάμε σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα της καθημερινότητας.

- Για ακτίνα κάλυψης του WiFi AP ίση με $R_b=10m$ έχουμε:



Γράφημα 7.5

Τέλος, το Γράφημα 7.5 μας παρουσιάζει την «ιδανική» περίπτωση στην οποία πλέον το δίκτυο 4G δεν συμμετέχει καθόλου στη δρομολόγηση αρχείων η οποία γίνεται

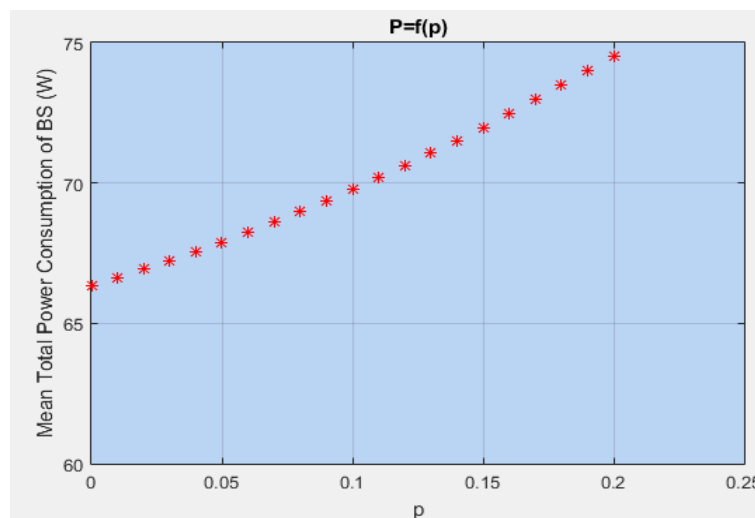
αποκλειστικά από τα WiFi που έχουν εγκατασταθεί από τους ίδιους τους χρήστες. Το φορτίο λοιπόν εδώ είναι ίσο με:

$$p = 0$$

Η συνολική κατανάλωση ισχύος φτάνει στο κατώτερο όριο των αποτελεσμάτων με την τιμή της να διαμορφώνεται στα:

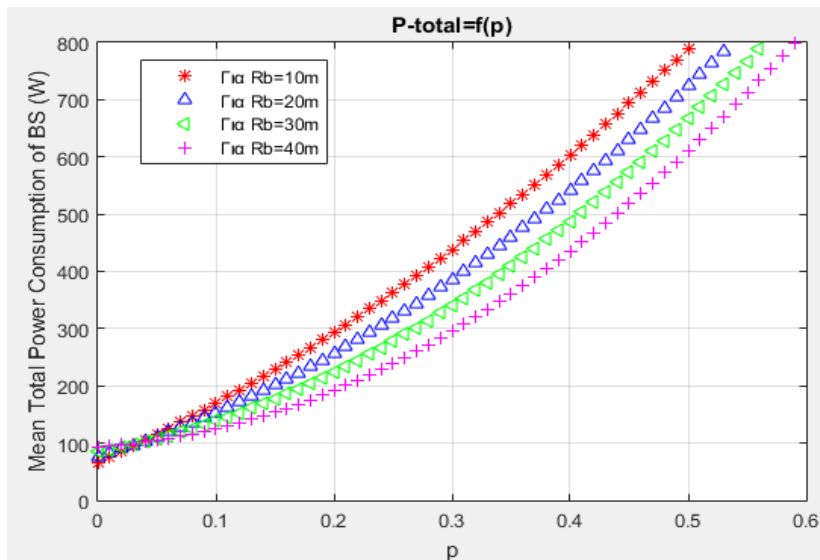
$$P_{TOT} = 66,5W \text{ (Γράφημα 7.6)}$$

Να σημειώσουμε πως στόχος της παρούσας μελέτης μας δεν είναι να «βγάλουμε» τελείως εκτός τους σταθμούς βάσης του LTE για τη δρομολόγηση της κίνησης και αυτή να πραγματοποιείται μόνο μέσω των ετερογενών δικτύων όπως έγινε στην τελευταία περίπτωση. Στόχος μας είναι να αναδείξουμε την άμεση αλληλεξάρτηση μεταξύ της δρομολόγησης του φορτίου μέσω των δικτύων WiFi και της μέσης συνολικής ισχύος κατανάλωσης καθώς και πως αυτή ελαχιστοποιείται σύμφωνα με τις παραδοχές που κάναμε. Απλώς για λόγους πληρότητας κρίθηκε αναγκαίο να γίνει τοποθέτηση και της οριακής περίπτωσης που υπάρχει για $\rho=0$ με όση εξιδανίκευση αυτή περιλαμβάνει.



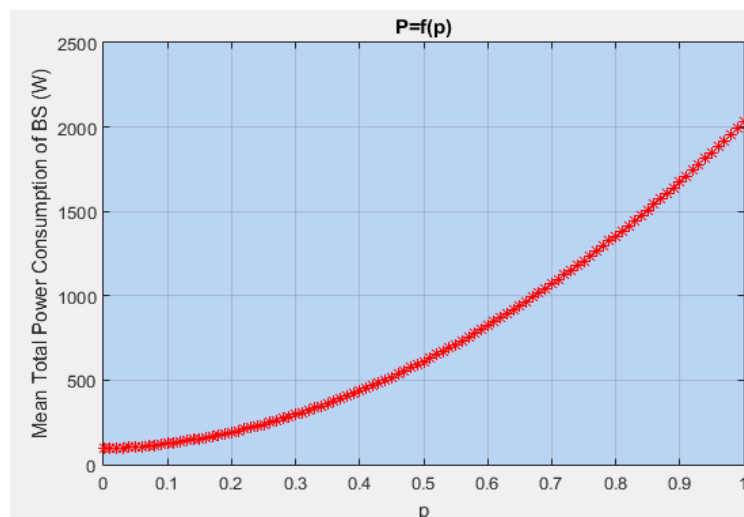
Γράφημα 7.6

Ακολουθεί συγκριτικό γράφημα της μέσης ισχύος κατανάλωσης όλων των παραπάνω περιπτώσεων:



Γράφημα 7.7

Στο σημείο αυτό πραγματοποιούμε ένα ακόμη αριθμητικό υπολογισμό, αφού αυξήσουμε την ακτίνα της κυψέλης του LTE από 300m σε 1000m και διατηρούμε σταθερή την ακτίνα εκπομπής για τα δίκτυα WiFi ίση με 40m. Ο λόγος που πραγματοποιήθηκε αυτό το σενάριο είναι για να αναδείξουμε μια ακόμη περίπτωση και να συμπεράνουμε αν τελικά συμφέρει τον πάροχο του δικτύου να έχει έναν συνδυασμό μεγαλύτερης ακτίνας μακροκυψέλης με περισσότερα δίκτυα WiFi – από τις σχέσεις 6.18, 6.19 προκύπτει πλήθος ίσο με 625 – ή έναν συνδυασμό μικρότερης ακτίνας με λιγότερα σημεία AP. Η απάντηση δίνεται από το Γράφημα 7.8 που ακολουθεί:

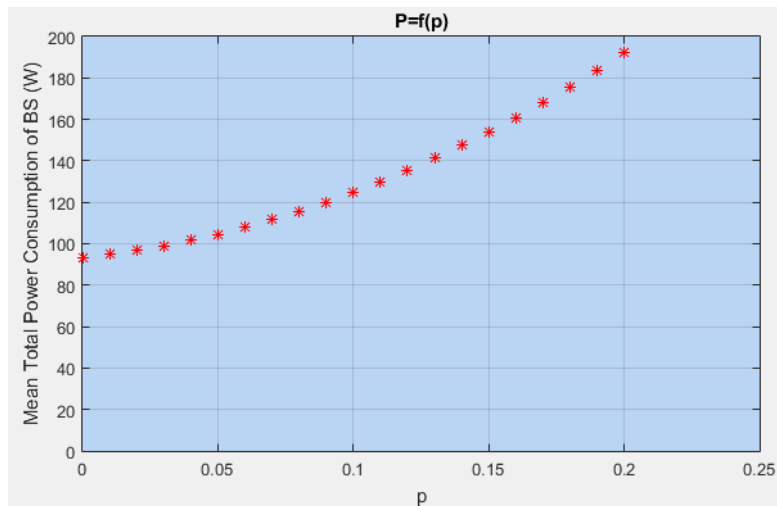


Γράφημα 7.8

Η τιμή της ολικής ισχύος που καταναλώνεται στην περίπτωση αυτή είναι:

$$P_{TOT} = 94,38W$$

Η ακρίβεια προκύπτει με βάση το Γράφημα 7.8.



Γράφημα 7.9

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας παράθεσης των αποτελεσμάτων:

	$R_b=40m$	$R_b=30m$	$R_b=20m$	$R_b=10m$
$R_{cell}=300m$	88W	84W	72,28W	66,5W
$R_{cell}=1000m$	94,38W	—	—	—

Πίνακας 7.1

Όπως βλέπουμε από τον Πίνακα 7.1, δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για ακτίνες κάλυψης WiFi 30, 20 και 10m επειδή από τον πρώτο κίόλας υπολογισμό μας για $R_b=40m$ είδαμε ότι προκύπτει μεγαλύτερη ισχύς κατανάλωσης σε σχέση με την ισχύ του αποτελέσματος που λάβαμε για ακτίνα κυψέλης ίση με 300m.

7.4 Εξαγωγή Συμπερασμάτων

- ✚ Διαπιστώνουμε πως η περίπτωση αύξησης της ακτίνας για την επιφάνεια κάθε μακροκυψέλης στα 1000m με παράλληλη τοποθέτηση περισσότερων δικτύων WiFi ακτίνας 40m εντός αυτής για την επίτευξη του ίδιου ποσοστού κάλυψης απέδιδε ισχύ κατανάλωσης σταθμού βάσης ίση με 94,38W. Το μέγεθος αυτό είναι μεγαλύτερο από τα 88W συνολικής ισχύος στην αντίστοιχη περίπτωση για ακτίνα κυψέλης ίση με 300m επομένως ο συνδυασμός αυτός απορρίπτεται αφού δεν συμφέρει σύμφωνα με την πολιτική ελαχιστοποίησης της μέσης καταναλισκόμενης συνολικής ισχύος των σταθμών.
- ✚ Επιπρόσθετα αποδείξαμε πως όσο μικρότερη είναι η ακτίνα των επιφανειών κάλυψης των σημείων ασύρματης σύνδεσης τόσο μικρότερη κατανάλωση έχουμε. Μάλιστα, η πιο συμφέρουσα λύση για επίτευξη μέγιστης ενεργειακής εξοικονόμησης είναι αυτή με ακτίνα δικτύων WiFi ίση με 10m. Το πόρισμα αυτό προκύπτει απ' την αυξανόμενη δρομολόγηση της κίνησης μέσω του προτύπου 802.11a που ελατώνει σημαντικά την καταπόνηση του 4G συστήματος.

Κεφάλαιο 8. Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα μελέτη που πραγματοποιήσαμε εξετάσαμε διάφορες πολιτικές δρομολόγησης του φορτίου κίνησης στο επίπεδο συνεδριών για την κατερχόμενη ζεύξη. Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί και εξάχθηκαν αποτελέσματα μαζί με τα αντίστοιχα συμπεράσματα που τα συνοδεύουν. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν ωστόσο αποτελούν προσεγγιστικές σχέσεις των πραγματικών αποτελεσμάτων λόγω έλλειψης διαφόρων παραμέτρων. Για την επέκταση της παρούσας έρευνας προτείνουμε τα εξής:

- ❖ Ανάπτυξη του ετερογενούς περιβάλλοντος σε περισσότερα επίπεδα πέραν των LTE και 802.11a. Μπορούν για παράδειγμα να αναπτυχθούν φεμτοκυψέλες, πίκουψελες καθώς και διάφορα ακόμη κατανεμημένα κεραιοσυστήματα εντός της μακροκυψέλης για την εμπέδωση της ποικιλομορφίας εναλλακτικών διαδρομών στη δρομολόγηση της δικτυακής κίνησης.
- ❖ Εισαγωγή παραμέτρων για να συμπεριληφθούν στα ανωτέρω μαθηματικά μοντέλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη μετάδοση ενός αρχείου σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον. Τέτοια φαινόμενα μπορούν να θεωρηθούν η δυναμική παρεμβολή μεταξύ των WiFi που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις, η ενδοκυψελική παρεμβολή, η παρεμβολή χρηστών μεταξύ γειτονικών κυψελών που χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα συχνοτήτων, οι διαλείψεις που παρουσιάζονται κατά τη μετάδοση καθώς και φαινόμενα σκίασης λόγω του ανάγλυφου της γεωγραφικής περιοχής.
- ❖ Θεώρηση κάποιου ακριβέστερου μοντέλου απωλειών πέραν του ντεντερμινιστικού που χρησιμοποιήσαμε εδώ.
- ❖ Πραγμάτωση οικονομικής μελέτης για τον ακριβή προσδιορισμό του κέρδους ενός παρόχου στην περίπτωση που επιλέξει την πολιτική ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ισχύος των σταθμών βάσης

Παράρτημα: Οι Κώδικες των Προσομοιώσεων σε Matlab

4.4.3

Binomial for n=50:

```
n=50;
k=0:1:n
p=0.025;
y=binopdf(k,n,p);
plot(k,y,'r+')
xlabel('k');
ylabel('Probability of Success');
title('Binomial Distribution for n=50');
```

Binomial for n=100:

```
n=100;
k=0:1:n
p=0.025;
y=binopdf(k,n,p);
plot(k,y,'g^')
xlabel('k');
ylabel('Probability of Success');
title('Binomial Distribution for n=100');
```

Binomial for n=1000:

```
n=1000;
k=0:1:n
p=0.025;
y=binopdf(k,n,p);
plot(k,y,'b*')
xlabel('k');
ylabel('Probability of Success');
title('Binomial Distribution for n=1000');
```

Poisson & Binomial for n=50:

```
%poisson and binomial distribution for n=50 users
clear; close all; clc;
n=50;
k=0:n;
p=0.025;
lambda=n*p;
y1=poisspdf(k,lambda);
mean=sum(k.*y1);
variance= sum((k.^2).*y1)-mean^2;
y2=binopdf(k,n,p);
plot(k,y1,'b*',k,y2,'r-')
xlabel('k');
ylabel('Probability of Success');
legend('Poisson','Binomial');
```

Poisson & Binomial for n=100:

```
%poisson and binomial distribution for n=100 users
clear; close all; clc;
n=100;
k=0:n;
p=0.025;
lambda=n*p;
y1=poisspdf(k,lambda);
mean=sum(k.*y1);
variance= sum((k.^2).*y1)-mean^2;
y2=binopdf(k,n,p);
plot(k,y1,'b*',k,y2,'r-')
xlabel('k');
ylabel('Probability of Success');
legend('Poisson','Binomial');
```

Poisson & Binomial for n=1000:

```
%poisson and binomial distribution for n=1000 users
clear; close all; clc;
n=1000;
k=0:n;
p=0.025;
lambda=n*p;
y1=poisspdf(k,lambda);
mean=sum(k.*y1);
variance= sum((k.^2).*y1)-mean^2;
y2=binopdf(k,n,p);
plot(k,y1,'b*',k,y2,'r-')
xlabel('k');
ylabel('Probability of Success');
legend('Poisson','Binomial');
```

6.5

Για $R_b=40m$:

```
%ra= transmission rate for LTE
%rb= transmission rate for WiFi
%p -> probability UE download from LTE network
%1-p -> probability UE download from a WiFi 802.11a AP

clear;
close all;
clc;

Wa=5*10^6; %LTE Bandwidth (Hz)
Wb=5*10^6; %WiFi Bandwidth (Hz)

No=10^(-20.4); %AWGN
Thermal_Noise=No*Wa; %Thermikos thoryvos

p=0:0.01:1;

Ra= 300;
Rb= 40;

Ka=0.0015;
Kb=0.0008;

a=3.8;

Pa=0.3;
Pb=0.01;

la=1:1:300;
lb=1:1:40;

SNRa= (Pa*Ka.*(la.^(-a)))./(Thermal_Noise);

ra= Wa.*log2(1+SNRa); %Τύπος Shannon για το LTE - Μας δίνει ρυθμό
μετάδοσης

SNRb= (Pb*Kb.*(lb.^(-a)))./(Thermal_Noise);

rb= Wb.*log2(1+SNRb); %Τύπος Shannon για το Wi-Fi - Μας δίνει ρυθμό
μετάδοσης

%apotelesma = ra_mean(la);

apotelesma= ((integral (@(la) ra_mean(la, Ra, Wa, No, Ka, a, Pa)
,1,Ra))).^-1;

apotelesma1= ((integral (@(lb) rb_mean(lb, Rb, Wb, No, Kb, a, Pb)
,1,Rb))).^-1;

loadLTE= apotelesma./p ;
loadWiFi= apotelesma1./(1-p);
```

```

figure
plot(p,loadLTE/10^6,'b')
hold on;
plot(p,loadWiFi/10^6,'r')
legend('Ρυθμός Μετάδοσης για το LTE','Ρυθμός Μετάδοσης για το WiFi')

xlabel('Πιθανότητα p')
ylabel('Total Throughput (Mbps)')
title('Συγκριτικό Διάγραμμα Ρυθμών Μετάδοσης (σε Mbps)')

```

ra_mean function:

```

function olok1 = ra_mean(la, Ra, Wa, No, K, a, Pa)

Thermal_Noise=No*Wa; %Thermikos thoryvos

%(3.12)--> Pa.*K*(la.^(-a))=P(Receiver)/ισχύς που φτάνει στο δέκτη
λόγω ντεντερμινιστικού μοντέλου απωλειών/, ενώ Pa=P(Transmitter)
% SNRa --> Προκύπτει από (3.13) για μηδενική ισχύ παρεμβολών
SNRa= [Pa.*K*(la.^(-a))]/(Thermal_Noise);
ra= Wa.*log2(1+SNRa);
olok1 = (2*la)./(Ra.^2)./ra; %λ*σ = traffic demand για το LTE

```

rb_mean function:

```

function olok11 = rb_mean(lb, Rb, Wb, No, Kb, a, Pb)

Thermal_Noise=No*Wb; %Thermikos thoryvos
%(3.12)--> Pb.*K*(lb.^(-a))=P(Receiver)/ισχύς που φτάνει στο δέκτη
λόγω ντεντερμινιστικού μοντέλου απωλειών/, ενώ Pb=P(Transmitter)
% SNRa --> Προκύπτει από (3.13) για μηδενική ισχύ παρεμβολών

SNRb= [Pb.*Kb*(lb.^(-a))]/(Thermal_Noise);
rb= Wb.*log2(1+SNRb);
olok11 = (2*lb)./(Rb.^2)./rb; %λ*σ = traffic demand για το WiFi

```

Για τις περιπτώσεις $R_b=30m$, $R_b=20m$, $R_b=10m$ έχουμε αντίστοιχα ότι:

```

Rb= 30;
lb=1:1:30;

```

```

Rb= 20;
lb=1:1:20;

```

```

Rb= 10;
lb=1:1:10;

```

*Οι συναρτήσεις ra_mean και rb_mean παραμένουν ίδιες όπως και ο υπόλοιπος κώδικας.

6.6

`%Throughput of UE - LTE`

```
clear; close all; clc;
s=12; %flow size σε Mbits
lambda=1:1:10;

R1=0;
throughput1=Rate1(R1)-lambda*s; %ρυθμαπόδοση χρήστη για LTE

plot(lambda,throughput1,'r-')
xlabel('\lambda (Number of Data Flows Arrived)');
ylabel('Throughput of User (Mbps)');
title('Throughput=f(R, \lambda*\sigma)');
legend('LTE Connected UE');
```

Rate1 function

$R_b=40m$:

```
function rate1=Rate1(R1)
R1=0;
rate1=R1+75;
```

$R_b=30m$:

```
function rate1=Rate1(R1)
R1=0;
rate1=R1+90;
```

$R_b=20m$:

```
function rate1=Rate1(R1)
R1=0;
rate1=R1+100;
```

$R_b=10m$:

```
function rate1=Rate1(R1)
R1=0;
rate1=R1+120;
```

`%Throughput of UE - WiFi`

```
clear; close all; clc;
s=12; %flow size σε Mbits
lambda=1:1:10;

R2=0;
throughput2=Rate2(R2)-lambda*s; %ρυθμαπόδοση χρήστη για WiFi

plot(lambda,throughput2,'g-')
xlabel('\lambda (Number of Data Flows Arrived)');
ylabel('Throughput of User (Mbps)');
title('Throughput=f(R, \lambda*\sigma)');
legend('WiFi Connected UE');
```

Rate2 function

R_b=40m:

```
function rate2=Rate2(R2)
R2=0;
rate2=R2+41.817;
```

R_b=30m:

```
function rate2=Rate2(R2)
R2=0;
rate2=R2+49.688;
```

R_b=20m:

```
function rate2=Rate2(R2)
R2=0;
rate2=R2+60.796;
```

R_b=10m:

```
function rate2=Rate2(R2)
R2=0;
rate2=R2+79.795;
```

7.3

Γραφήματα 7.1-7.6

```
%minimum consumption policy - basic body

Pc=100; %Power of circuit
Ps=30; %Power of sleep
P1=0.3; %Power of transmit - LTE BS
P2=0.01; %Power of transmit - WiFi BS
p=0:0.01:1;
lambda=4;
s=12;

mean_rate_LTE = MinCon1(300);
mean_rate_WiFi = MinCon2(); %Εισάγω παράμετρο Rb ίση με 40,30,20,10m

pON1=(lambda*s)./(mean_rate_LTE);
pON2=(lambda*s)./(mean_rate_WiFi);

pON=pON1 + pON2 - pON1.*pON2;
pOFF=1-pON;

Ptot= pON1.*(1-pON2).*(P1+Pc) + pON2.*(1-
pON1).*(P2+Pc)+pON1.*pON2.*(P1+P2+Pc)+pOFF.*Ps;

plot(p,Ptot,'r*')
xlabel('p');
ylabel('Mean Total Power Consumption of BS (W)');
title('P=f(p)');
```


MinCon1 function

```
function fortio1=MinCon1(Ra)

Wa=5*10^6; %LTE Bandwidth (Hz)

No=10^(-20.4); %AWGN
Thermal_Noise=No*Wa; %Thermikos thoryvos

p=0:0.01:1;
Ra_LTE=Ra;
Ka=0.0015;
a=3.8;
Pa=0.3;

la=1:1:Ra_LTE;

SNRa= (Pa*Ka.*(la.^(-a)))./(Thermal_Noise);

ra= Wa.*log2(1+SNRa); %Τύπος Shannon για το LTE - Μας δίνει ρυθμό
μετάδοσης

%apotelesma = ra_mean(la);

apotelesma= ((integral (@(la)ra_mean(la, Ra, Wa, No, Ka, a, Pa)
,1,Ra))).^-1;

loadLTE= apotelesma./p ;

fortio1=(loadLTE./10^6);
end
```

MinCon2 function

```
function fortio2=MinCon2(Rb)

Wb=5*10^6; %WiFi Bandwidth (Hz)

No=10^(-20.4); %AWGN
Thermal_Noise=No*Wb; %Thermikos thoryvos

p=0:0.01:1;
Rb_WiFi=Rb;
Kb=0.0008;
a=3.8;
Pb=0.01;

lb=1:1:Rb_WiFi;

SNRb= (Pb*Kb.*(lb.^(-a)))./(Thermal_Noise);

rb= Wb.*log2(1+SNRb); %Τύπος Shannon για το Wi-Fi - Μας δίνει ρυθμό
μετάδοσης

apotelesma1= ((integral (@(lb) rb_mean(lb, Rb, Wb, No, Kb, a, Pb)
,1,Rb))).^-1;
```

```

loadWiFi= apotelesma1./(1-p);

fortio2=(loadWiFi./10^6);
end

```

Στην τελευταία περίπτωση που $R_{cell}=1000m$ και $R_b=40m$ η **MinCon2 function παραμένει ίδια, ενώ μόνο η **MinCon1 function** αλλάζει ως εξής:**

Εισάγω παράμετρο:
 $R_a=1000$

Γράφημα 7.7

```

Pc=100; %Power of circuit
Ps=30; %Power of sleep
P1=0.3; %Power of transmit - LTE BS
P2=0.01; %Power of transmit - WiFi BS
p=0:0.01:1;
lambda=4;
s=12;

mean_rate_LTE = MinCon1(300);

mean_rate_WiFi1 = MinCon2(10);
mean_rate_WiFi2 = MinCon2(20);
mean_rate_WiFi3 = MinCon2(30);
mean_rate_WiFi4 = MinCon2(40);

pON1=(lambda*s)./(mean_rate_LTE);

pON2_1=(lambda*s)./(mean_rate_WiFi1);
pON2_2=(lambda*s)./(mean_rate_WiFi2);
pON2_3=(lambda*s)./(mean_rate_WiFi3);
pON2_4=(lambda*s)./(mean_rate_WiFi4);

pON_1=pON1 + pON2_1 - pON1.*pON2_1;
pOFF_1=1-pON_1;

Ptot_1= pON1.*(1-pON2_1).*(P1+Pc) + pON2_1.*(1-
pON1).*(P2+Pc)+pON1.*pON2_1.*(P1+P2+Pc)+pOFF_1.*Ps;

pON_2=pON1 + pON2_2 - pON1.*pON2_2;
pOFF_2=1-pON_2;

Ptot_2= pON1.*(1-pON2_2).*(P1+Pc) + pON2_2.*(1-
pON1).*(P2+Pc)+pON1.*pON2_2.*(P1+P2+Pc)+pOFF_2.*Ps;

pON_3=pON1 + pON2_3 - pON1.*pON2_3;
pOFF_3=1-pON_3;

Ptot_3= pON1.*(1-pON2_3).*(P1+Pc) + pON2_3.*(1-
pON1).*(P2+Pc)+pON1.*pON2_3.*(P1+P2+Pc)+pOFF_3.*Ps;

pON_4=pON1 + pON2_4 - pON1.*pON2_4;
pOFF_4=1-pON_4;

```

```

Ptot_4= pON1.*(1-pON2_4).*(P1+Pc) + pON2_4.*(1-
pON1).*(P2+Pc)+pON1.*pON2_4.*(P1+P2+Pc)+pOFF_4.*Ps;

plot(p,Ptot_1,'r*',p,Ptot_2,'b^',p,Ptot_3,'g<',p,Ptot_4,'m+')
xlabel('p');
ylabel('Mean Total Power Consumption of BS (W)');
title('P-total=f(p)');
legend('Gamma alpha Rb=10m','Gamma alpha Rb=20m','Gamma alpha Rb=30m','Gamma alpha Rb=40m')

```

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2012-2017, Feb. 2013,
http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns82/white_paper_c11-520862.pdf
- [2] www.3gpp.com
- [3] Singh S., Dhillon. H.S., Andrews, J.G., "Offloading in Heterogeneous Networks: Modeling, Analysis, and Design Insights," in *Wireless Communications, IEEE Transactions on* , vol.12, no.5, pp.2484-2497, May 2013
- [4] Jeffrey G. Andrews, "The Dark Art of Load Balancing in Heterogeneous Networks",
Wireless Networking and Communications Group Dept. of Electrical and Computer Engineering The University of Texas at Austin IEEE Communication Theory Workshop June 24, 2013
- [5] Gabriel B.T. Kalejaiye, Joao A.S.R. Rondina, Leonardo V.V.L. Albuquerque, Tais L. Pereira, Luiz F.O. Campos, Raphael A.S. Melo, Daniel S. Mascarenhas, Marcelo M. Carvalho, "Mobile Offloading in Wireless Ad Hoc Networks: The Tightness Strategy",
University of Brasilia, Brazil, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 3, July 2014
- [6] Mehmeti, F.; Spyropoulos, T., "Performance analysis of "on-the-spot" mobile data offloading," in *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE* , vol., no., pp.1577-1583, 9-13 Dec. 2013
- [7] Amitabha Ghosh, Nitin Mangalvedhe, Rapeepat Ratasuk, Bishwarup Mondal, Mark Cudak, Eugene Visotsky, and Timothy A. Thomas, Jeffrey G. Andrews, Ping Xia, Han Shin Jo, Harpreet S. Dhillon, and Thomas D. Novlan, "Heterogeneous Cellular Networks: From Theory to Practice Nokia Siemens Networks", The University of Texas at Austin
- [8] Andrews. J., Singh. S., Qiaoyang Ye, Xingqin Lin, Dhillon. H., "An overview of load balancing in hetnets: old myths and open problems," in *Wireless Communications, IEEE* , vol.21, no.2, pp.18-25, April 2014
- [9] Crow. B. P., Widjaja. I., Kim. J. G., & Sakai. P. T. (1997), "IEEE 802.11 wireless local area networks", *Communications Magazine, IEEE*, 35(9), 116-126
- [10] X. Wu, B. Murherjee, and D. Ghosal, "Hierarchical architectures in the third-generation cellular network," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 62 – 71, 2004

- [11] S. Kishore, L. Greenstein, H. Poor, and S. Schwartz, "Uplink user capacity in a CDMA macrocell with a hotspot microcell: exact and approximate analyses", *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 364 – 374, Mar. 2003
- [12] W. Rho and A. Paulraj, "Performance of the distributed antenna systems in a multicell environment," in *Proc., IEEE Veh. Technology Conf.*, Apr. 2003, pp. 587–591
- [13] Jun Zhang, Andrews. J.G., "Distributed Antenna Systems with Randomness," in *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.7, no.9, pp.3636-3646, September 2008
- [14] Wan Choi, Andrews. J.G., "Downlink performance and capacity of distributed antenna systems in a multicell environment," in *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.6, no.1, pp.69-73, Jan. 2007
- [15] Picochip "The case for home base stations" white paper, Apr. 2007
<http://www.femtoforum.org/femto/Files/File/picoChipFemtocellWhitePaper1.1.pdf>
- [16] Chandrasekhar, V.; Andrews, J.G.; Gatherer, Alan, "Femtocell networks: a survey," in *Communications Magazine, IEEE*, vol.46, no.9, pp.59-67, September 2008
- [17] Xinchun Zhang, Haenggi. M., "A Stochastic Geometry Analysis of Inter-Cell Interference Coordination and Intra-Cell Diversity," in *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.13, no.12, pp.6655-6669, Dec. 2014
- [18] Mehta M., Aliu O. G., Karandikar A. & Imran M. A. (2011), "A self-organized resource allocation using inter-cell interference coordination (ICIC) in relay-assisted cellular networks" arXiv preprint arXiv:1105.1504.
- [19] Yan Zhang, Lin Du, Dan Shang, Yuhang Yang, "Performance Analysis of Intra-Cell Spatial Reuse in a P2P-Enabled TDD CDMA Network," in *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*, vol., no., pp.1-5, 25-28 Sept. 2006
- [20] Κωνσταντίνος Π. Μαντζούκας, "Μοντέλα Επίδοσης Ασύρματων Δικτύων 4^{ης} Γενιάς με Χρήση Χρονοπρογραμματιστή", Διπλωματική Εργασία
- [21] Clark M.V., Erceg V., Greenstein L.J., "Reuse efficiency in urban microcellular networks," in *Vehicular Technology Conference, 1996. Mobile Technology for the Human Race.*, IEEE 46th, vol.1, no., pp.421-425 vol.1, 28 Apr-1 May 1996
- [22] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-29, pp. 317–325, Aug.1980
- [23] Yeh Y.S., Schwartz S.C., "Outage Probability in Mobile Telephony Due to Multiple Log-Normal Interferers," in *Communications, IEEE Transactions on*, vol.32, no.4, pp.380-388, Apr 1984

[24] Papoulis A., "Bernoulli Trials". Probability, Random Variables, and Stochastic Processes (2nd ed.). New York: McGraw-Hill. pp. 57–63, 1984.

[25] <http://www.mathplanet.com/education/pre-algebra/probability-and-statistic/finding-the-odds>

[26] http://nucinkis-lab.cc.ic.ac.uk/HELM/workbooks/workbook_37/37_2_binomial_dist.pdf

[27] http://www.mathwords.com/b/bernoulli_trials.htm

[28] <http://www.stat.yale.edu/Courses/1997-98/101/binom.htm>

[29] <http://www.jbstatistics.com/proof-that-the-binomial-distribution-tends-to-the-poisson-distribution/>

[30] <http://www.oxfordmathcenter.com/drupal7/node/297>

[31] Jan Grandell – Chapman & Hall, “Mixed Poisson Processes, Monographs on Statistics and Applied Probability”

[32] Shafiq M.Z., Lusheng Ji, Liu A.X., Pang J., Jia Wang, "Large-Scale Measurement and Characterization of Cellular Machine-to-Machine Traffic," in Networking, IEEE/ACM Transactions on , vol.21, no.6, pp.1960-1973, Dec. 2013

[33] J. Erman, A. Gerber, M. T. Hajiaghayi, D. Pei, and O. Spatscheck, “Network-aware forward caching” in Proc.WWW, 2009, pp. 291–300

[34] M. Z. Shafiq, L. Ji, A. X. Liu, and J.Wang, “Characterizing and modeling Internet traffic dynamics of cellular devices” in Proc. ACM SIGMETRICS, 2011, pp. 305–316

[35] T. Bonald and J. W. Roberts, “Congestion at flow level and the impact of user behaviour” Comput. Netw., vol. 42, no. 4, pp. 521–536, Jul. 2003

[36] S. B. Fred, T. Bonald, A. Proutiere, G. Regnie, and J. W. Roberts, “Statistical bandwidth sharing: a study of congestion at flow level,” in Proceedings of the 2001 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, ser. SIGCOMM '01. New York, NY, USA: ACM, 2001, pp. 111–122

[37] F. Qian, Z.Wang, A. Gerber, Z. M. Mao, S. Sen, and O. Spatscheck, “Characterizing radio resource allocation for 3G networks,” in Proc. ACM IMC, 2010, pp. 137–150

[38] Johannes Färber, Stefan Bodamer, Joachim Charzinski, “Measurement and Modelling of Internet Traffic at Access Networks”, University of Stuttgart, Institute of Communication Networks and Computer Engineering

- [39] Baker M. & Mousley T., Downlink physical data and control channels. “LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice”, (2011), Second Edition, 189-214
- [40] Combes R., Altman Z. & Altman E. (2013, April). “Interference coordination in wireless networks: A flow-level perspective”, In INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE, pp. 2841-2849, IEEE
- [41] T. Bonald and A. Proutiere, “Wireless downlink data channels: user performance and cell dimensioning,” in Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking, ser. MobiCom '03. New York, NY, USA: ACM, 2003, pp. 339–352
- [42] Bonald T., (2005), “Flow-level performance analysis of some opportunistic scheduling algorithms”, European transactions on telecommunications, 16(1), 65-75.
- [43] J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, “A tractable approach to coverage and rate in cellular networks,” IEEE Trans. Commun., vol. 59, no. 11, pp. 3122 – 3134, Nov. 2011
- [44] Clark M.V., Erceg V., Greenstein L.J., "Reuse efficiency in urban microcellular networks," in Vehicular Technology Conference, 1996. Mobile Technology for the Human Race., IEEE 46th , vol.1, no., pp.421-425 vol.1, 28 Apr-1 May 1996
- [45] Kleinrock L. “Queueing Systems, Volume I: Theory”, Wiley: New York, 1975
- [46] Lan, T., Sinkar, K., Kant, L., & Kerpez, K. (2010, December). Resource allocation and performance study for LTE networks integrated with femtocells. In Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE (pp. 1-6). IEEE.
- [47] https://www.wireless.att.com/support_static_files/KB/KB3895.html
- [48] Jangeun Jun, Peddabachagari P., Sichitiu M., "Theoretical maximum throughput of IEEE 802.11 and its applications," in Network Computing and Applications, 2003. NCA 2003. Second IEEE International Symposium on , vol., no., pp.249-256, 18-18 April 2003
- [49] Carpin M., Zanella A., Rasool J., Mahmood K., Grøndalen O. & Østerbø O. N. (2014), “Scheduling Policies for the LTE Downlink Channel: A Performance Comparison”, arXiv preprint arXiv:1409.8633.
- [50] Nsiri B., Nasreddine M., Ammar M., Hakimi W. & Sofien M., “Modeling and Performance Evaluation of Scheduling Algorithms For Downlink LTE cellular Network”
- [51] Mehlführer C., Ikuno J. C., Simko M., Schwarz S., Wrulich M. & Rupp M. (2011), “The Vienna LTE simulators-Enabling reproducibility in wireless communications research”, EURASIP J. Adv. Sig. Proc., 2011, 29.

- [52] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, "4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband", Oxford, UK: Academic Press, 2011
- [53] Bahreyni M.S. & Sattari-Naeini V., "Fairness Aware Downlink Scheduling Algorithm for LTE Networks", Journals of Mathematics and Computer Science
- [54] M.H. Habaebi, J. Chebil, A.G. Al-Sakkaf, T. H. Dahawi, "Comparison between scheduling techniques in long term evolution", IIUM Engineering Journal Vol. 14 No. 1 (2013)
- [55] Hahne E.L., "Round-robin scheduling for max-min fairness in data networks," in Selected Areas in Communications, IEEE Journal on , vol.9, no.7, pp.1024-1039, Sep 1991
- [56] Borst S, "User-level performance of channel-aware scheduling algorithms in wireless data networks", In INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies (Vol. 1, pp. 321-331), IEEE, (2003, March)
- [57] Kleinrock L., (1964). "Analysis of A time-shared processor", Naval research logistics quarterly, 11(1), 59-73
- [58] Kleinrock L., (1967), "Time-shared systems: A theoretical treatment", Journal of the ACM (JACM), 14(2), 242-261
- [59] Litjens R., Roijers F., Van Den Berg H., Boucherie R. J. & Fleuren M. (2004, November). "Analysis of flow transfer times in IEEE 802.11 wireless LANs", In Annales des télécommunications (Vol. 59, No. 11-12, pp. 1407-1432). Springer-Verlag.
- [60] Khalid A., Lassila P. & Aalto S. (2013, September). "Load balancing of elastic data traffic in heterogeneous wireless networks", In Teletraffic Congress (ITC), 2013 25th International (pp. 1-9). IEEE.
- [61] Mancuso V. & Alouf S. (2011). "Reducing costs and pollution in cellular networks", Communications Magazine, IEEE, 49(8), 63-71.
- [62] Chatzipapas A., Alouf S. & Mancuso V. (2011, September). "On the minimization of power consumption in base stations using on/off power amplifiers", In Online Conference on Green Communications (GreenCom), 2011 IEEE (pp. 18-23). IEEE.
- [63] <https://www.ict-earth.eu/default.html>
- [64] <http://www.greentouch.org/>
- [65] Holtkamp H., Auer G., Haas H., "On Minimizing Base Station Power Consumption," in Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE , vol., no., pp.1-5, 5-8 Sept. 2011

- [66] NSN, "Introducing the Nokia Siemens Networks SON Suite - An efficient, future proof platform for SON", white paper, Nov. 2009
- [67] NEC, G. R. (2010). "NECs Approach towards Energy-efficient Radio Access Networks", White paper, Feb.
- [68] Holtkamp H., Auer G., Haas H., "On Minimizing Base Station Power Consumption," in Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE , vol., no., pp.1-5, 5-8 Sept. 2011
- [69] Sagkriotis S.E., Panagopoulos A.D., "Optimal FFR Policies: Maximization of Traffic Capacity and Minimization of Base Station's Power Consumption," in Wireless Communications Letters, IEEE , vol.PP, no.99, pp.1-1
- [70] Bhat U. N., (2008). The General Queue G/G/1 and Approximations. "In An Introduction to Queueing Theory" (pp. 169-183). Birkhäuser Boston.
- [71] Ericsson, "Traffic and Market Report", On The Pulse of Network Society, June 2012
http://www.ericsson.com/res/docs/2012/traffic_and_market_report_june_2012.pdf
- [72] <https://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA>
- [73] http://www.ng4t.com/mwc_2014.html
- [74] http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/LTE/e_utran.html
- [75] <http://www.telecom-cloud.net/lte-nuggets/basics-of-lte-dimensioning/>
- [76] Geraldo Neto, Innovation through Spectrum Management, Qualcomm
http://www.slideshare.net/ANE_Colombia/innovacin-a-travs-de-la-gestin-del-espectro-geraldo-neto
- [77] https://en.wikipedia.org/wiki/Poisson_distribution
- [78] <http://www.eventhelix.com/lte/tutorial/web-presentation.htm#.VjKvOrfhDIU>
- [79] www.vosesoftware.com/ModelRiskHelp/index.htm#Probability_theory_and_statistics/Stochastic_processes/Deriving_the_Poisson_distribution_from_the_Binomial.htm
- [80] Dhillon H.S., Ganti R.K., Baccelli F., Andrews J.G., "Coverage and ergodic rate in K-tier downlink heterogeneous cellular networks," in Communication, Control, and Computing (Allerton), 2011 49th Annual Allerton Conference on , vol., no., pp.1627-1632, 28-30 Sept. 2011
- [81] http://www.microwave-eetimes.com/en/extreme-wideband-digital-vga-with-high-power-gain-over-band-smart-lead-routing-and-power-save-mode.html?cmp_id=71&news_id=222902527
- [82] http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/ads2008/wlan/ads2008/About_WLAN_Design_Library.html

[83] Arief Hamdani Gunawan, “OFDMA & MIMO”, Jakarta, 15 December 2012
<http://www.slideshare.net/hamdani2/day-one-ofdma-and-mimo>