



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Μελέτη και Προσομοίωση Τεχνικών Βέλτιστης Τοποθέτησης
Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών για την Παροχή Κάλυψης
σε Δίκτυα LTE-A**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Δούμουρα Γεωργίου

Επιβλέπων : Καθηγητής Βουγιούκας Δημοσθένης

Σάμος, Ιούνιος 2022

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της ακαδημαϊκής μου πορείας με την παρούσα διπλωματική εργασία, θα ήθελα πρώτα από όλα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Βουγιούκα Δημοσθένη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντας μου την ευκαιρία να αναλάβω και να υλοποιήσω την παρούσα διπλωματική εργασία, όπως και τον κύριο Καράβολο Μιχάλη, για τις συμβουλές και οδηγίες που μου προσέφερε κατά την διάρκεια υλοποίησης του προσομοιωτή της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την διπλωματική εργασία στην οικογένεια, τους φίλους και τους κοντινούς μου ανθρώπους. Τους ευχαριστώ από καρδιάς, για την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια, η οποία με βοήθησε να ολοκληρώσω το ακαδημαϊκό μου ταξίδι.

© 2022

του

Δούμουρα Γεώργιου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	9
1.1	Αντικείμενο διπλωματικής	9
1.2	Δομή της διπλωματικής	9
2	Αρχές Σχεδιασμού Κυψελωτών Δικτύων	11
2.1	Προσδιορισμός κυψελωτών δικτύων.....	11
2.2	Θεμελιώδεις έννοιες	11
2.2.1	Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.....	11
2.2.2	Τεχνικές ανάθεσης συχνοτήτων σε κελιά	12
2.2.3	Μεταπομπές μεταξύ κελιών	13
2.2.4	Μεταπομπή Χρηστών Σε Νέα Κελιά Με Προσοχή Στις Παρεμβολές.....	14
2.2.5	Επέκταση της περιοχής κάλυψης	16
2.3	Διάδοση ασύρματων τηλεπικοινωνιακών κυμάτων	17
2.3.1	Βασικοί Μηχανισμοί Διάδοσης.....	17
2.3.2	Μοντέλο Διάδοσης Ελεύθερου Χώρου.....	17
2.3.3	Μοντέλα διάδοσης σημάτων σε υπαίθριους χώρους.....	19
2.3.4	Μοντέλα διάδοσης σημάτων σε εσωτερικούς χώρους.....	20
2.3.5	Εξέλιξη Μοντέλων διάδοσης σε μοντέλα ειδικών περιπτώσεων	21
2.3.6	Το Μοντέλο του Hata	22
2.4	Σήματα πολλαπλών διαδρομών και η εξασθένηση τους.	24
2.4.1	Ορισμός σημάτων πολλαπλών διαδρομών.....	24
2.4.2	Εξασθένηση σημάτων κατά την διάδοση τους στον χώρο.....	24
2.4.3	Τύποι εξασθένησης σημάτων - Διαλείψεις.....	25
2.4.4	Μοντέλο Διαλείψεων Rayleigh.....	26
3	Το πρότυπο LTE-A	28
3.1	Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα LTE-A.....	28
3.2	Τεχνολογίες LTE-A Δικτύων	29
3.2.1	Συνάθροιση Φορέων	29
3.2.2	Κόμβοι Αναμετάδοσης.....	30
3.2.3	MIMO Τεχνικές Κεραιών	30
3.2.4	Σχήματα Πολλαπλής Πρόσβασης στο Πρωτόκολλο LTE-A	31
3.3	Εξέλιξη του Πρωτοκόλλου LTE-A	33
3.3.1	Συνάθροιση Φορέων στο Πρωτόκολλο LTE-A Pro	34

3.3.2	Κατανομή Φόρτου Μεταξύ Φορέων στο LTE-A Pro	34
3.3.3	Κοινόχρηστες Αδειοδοτημένες Προσβάσεις στο LTE-A Pro.....	35
3.3.4	Αυτό-Οργάνωση Δικτύου LTE-A Pro	36
4	Παροχή Κάλυψης μέσω μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών και οι Τεχνικές της.....	37
4.1	Σύγχρονα Μη επανδρωμένα αεροσκάφη.....	37
4.2	Μη επανδρωμένα Αεροσκάφη και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.....	38
4.3	Τηλεπικοινωνιακό μοντέλο κάλυψης χρηστών με μη επανδρωμένα αεροσκάφη.....	39
4.3.1	Υποδομή συστήματος εναέριας κάλυψης.....	39
4.3.2	Προβλήματα και Προκλήσεις Βελτιστοποίησης	40
4.3.3	Μοντέλο Καναλιού	42
4.4	Τεχνικές Βέλτιστης Τοποθέτησης	45
4.4.1	Αλγόριθμός UDP	45
4.4.2	Αλγόριθμος KDP	48
4.4.3	Αλγόριθμος Mini Batch K-Means.....	50
4.4.4	Αλγόριθμος Mean Shift.....	51
5	Προσομοιώσεις και αποτελέσματα.....	53
5.1	Προσομοιωτής Τηλεπικοινωνιακού Δικτύου	53
5.2	Προσομοιώσεις και Αλγοριθμικά αποτελέσματα.....	56
5.3	Ανάλυση και Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων.....	60
5.4	Διαφορετικές Τιμές Εισόδου και Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	65
6	Συμπεράσματα.....	67
6.1	Συμπεράσματα	67
6.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	67
	Βιβλιογραφία	69
	Παράρτημα Ι: Κώδικας Προσομοιωτή.....	71

Λίστα Σχημάτων

N° 1	Αναπαράσταση ενός κυψελωτού δικτύου	Σελ. 11
N° 2	Μοντέλο διάδοσης εσωτερικού χώρου του Ericsson	Σελ. 20
N° 3	Τύποι διαλείψεων	Σελ. 25
N° 4	Μοντέλο Rayleigh για συχνότητα 900 MHz	Σελ. 26
N° 5	Διαμορφώσεις σημάτων με OFDMA & SC-FDMA	Σελ. 32
N° 6	Απεικόνιση Ισοροπίας φόρτου	Σελ. 34
N° 7	Κατηγορίες Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών	Σελ. 37
N° 8	Μοντέλο Τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών ως σταθμούς βάσης	Σελ. 39
N° 9	Κατανομή Rician	Σελ. 44
N° 10	(Α) Υπολογισμός τυχαίων θέσεων, (Β) Ομαδοποίηση χρηστών, (Γ) Υπολογισμός κεντρικού σημείου και εκ νέου ομαδοποίηση χρηστών, (Δ) Υπολογισμός κεντρικού σημείου	Σελ. 48
N° 11	Χρονική Σύγκριση K-Means & Mini-Batch K-Means βάση συνόλου δεδομένων	Σελ. 49
N° 12	Διάγραμμα Ροής Προσομοιωτή	Σελ. 53
N° 13	Αποτελέσματα προσομοίωσης με UDP τοποθέτηση	Σελ. 55
N° 14	Αποτελέσματα προσομοίωσης με KDP τοποθέτηση	Σελ. 56
N° 15	Αποτελέσματα προσομοίωσης με Mini Batch K-Means τοποθέτηση	Σελ. 57
N° 16	Αποτελέσματα προσομοίωσης με Mean Shift τοποθέτηση	Σελ. 58
N° 17	Αποτελέσματα Αποσυμφόρησης Δικτύου	Σελ. 59
N° 18	Μέση Τιμή Λαμβανόμενου Σήματος	Σελ. 60
N° 19	Χρονική Σύγκριση Αλγορίθμων	Σελ. 61
N° 20	Αποτελέσματα SumRate Αλγορίθμων	Σελ. 62
N° 21	Αποτελέσματα Spectral Efficiency Αλγορίθμων	Σελ. 63
N° 22	Αποσυμφόρηση Δικτύου Μετά από Ανάπτυξη Δεκαπέντε Αεροσκαφών	Σελ. 64
N° 23	Αποτελέσματα SumRate για Εύρος Ζώνης 3MHz	Σελ. 65
N° 24	COST-231 Μοντέλο	Σελ. 70
N° 25	Διάλειψη Rayleigh	Σελ. 70
N° 26	LAP Pathloss Μοντέλο	Σελ. 71
N° 27	Πρώτη φάση UDP Αλγορίθμου	Σελ. 72
N° 28	Πρώτη φάση KDP Αλγορίθμου	Σελ. 73

Λίστα Πινάκων

N° 1	Παράμετροι μοντέλων	Σελ. 22
N° 2	Επιδόσεις τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ανά διαφορετική έκδοση του 3GPP	Σελ. 35
N° 3	Παράμετροι Εισόδου δικτύου UAV	Σελ. 41
N° 4	Παράμετροι Προσομοιωτή	Σελ. 54

Ακρωνύμια

LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced Standard
3GPP	3rd Generation Partnership Project
BS	Base station
UAV	Unmanned aerial vehicle
UAV-BS	Unmanned aerial vehicle base station
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
GSM	Global System for Mobile
4G	Fourth Generation of Cellular Communications
5G	Fifth Generation of Cellular Communications
MIMO	Multiple input Multiple Output
SU-MIMO	Single-User Multiple Input – Multiple Output
MU-MIMO	Multiple-User Multiple Input – Multiple Output
ITU	International Telecommunication Union
MSC	Mobile Switching Center
PCS	Broadband Personal Communications Service
LOS	Line of Site
NLOS	Non-Line of Sight
GOS	Grade of Service
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
AOA	Angle of Arrival
PSS	Primary Synchronization Signal
SSS	Secondary Synchronization Signal
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
GSM	Global Mobil Communication System
PAPR	Peak To Average Power Ratio
CDMA	Code Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
SISP	Strategic Information Systems Planning
SINR	Signal To Interference Plus Noise Ratio

UE	User Equipment
SSC	Sustained Service Continuity
RSRP	Reference Signal Received Power
LSA	License and Service Agreement
HHM	Handover Hysteresis Margin
ITS	Irregular Terrain Model
OBS	Obstruct
UF	Urban Factor
PCell	Primary Cell
SCell	Secondary Cell
RRC	Radio Resource Control
eNodeB	Evolved Node B
RN	Relay Nodes
DFT	Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QOS	Quality Of Service
HO	Handover
HAP	High Altitude Platform
LAP	Low Altitude Platform
UDP	UAV-BS Deployment Process
KDP	K-Mean Deployment Process
A2G	Air To Ground

Περίληψη

Στις μέρες μας έχει αυξηθεί η ανάγκη να παρέχεται τηλεπικοινωνιακή κάλυψη σε περιοχές που είναι απομακρυσμένες από επίγειους σταθμούς βάσης. Η αύξηση του αριθμού των επίγειων σταθμών βάσης και η δημιουργία μεγαλύτερου δικτύου τηλεπικοινωνιών εγείρει προβλήματα κόστους και αποδοτικότητας, καθώς σε μια δοθείσα χρονική στιγμή, ένας σταθμός βάσης ενός αστικού κέντρου θα αντιμετωπίζει μεγάλη συμφόρηση χρηστών, εν' αντιθέσει με έναν σταθμό βάσης μιας απομακρυσμένης περιοχής που θα αντιστοιχεί σε ένα μικρό ή ακόμα και μηδενικό φορτίο χρηστών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τα μοντέλα βέλτιστης τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών, με σκοπό την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη περιοχών, όπου ήδη υπάρχοντες επίγειοι σταθμοί βάσης αδυνατούν να καλύψουν, όπως επίσης και περιοχών που χρίζουν έκτακτη τηλεπικοινωνιακή κάλυψη ή αποσυμφόρηση. Λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη την αποδοτικότερη κάλυψη με όσο το δυνατόν λιγότερο κόστος, θα αναλυθούν τα πεδία εφαρμογής αυτών των μοντέλων στον πραγματικό κόσμο, οι στόχοι που θέλουμε να επιτύχουμε, οι μέθοδοι αλγοριθμικής αντιμετώπισης και υλοποίησης. Κλείνοντας θα παρουσιαστούν αποτελέσματα και συμπεράσματα από προσομοιώσεις που έγιναν, οι οποίες αντικατοπτρίζουν την εφαρμογή της τοποθέτησης τέτοιων μη επανδρωμένων αεροσκαφών ως σταθμούς βάσης, κάνοντας χρήση δεδομένων και λειτουργιών του πραγματικού κόσμου.

Λέξεις Κλειδιά: Σταθμός βάσης, μη επανδρωμένο αεροσκάφος UAV-BS, βέλτιστη τοποθέτηση, τηλεπικοινωνίες

Abstract

Nowadays, we witness an increased requirement of telecommunication coverage in remote areas where terrestrial base stations can't reach or serve efficiently. The solution to expand the network of terrestrial base stations is not feasible due to energy consumption and cost problems. Moreover, at any given time a base station that corresponds to a city may suffer from congestion, in contrast with a base station that corresponds to a countryside, that will cover a minimum number of users or will not have any load at all.

This thesis analyzes the model of efficient UAV placement, where the UAVs work as moving base stations with the goal to provide telecommunication coverage in areas where terrestrial base stations are unable to cover, or work as decongestants for areas with a big amount of load. This paper takes into consideration the need for the best possible cover with the minimum amount of cost. The topics that will be covered in this paper address to real world scenarios, the target that we are looking to succeed, and what solutions can be given through algorithms. Lastly there will be a presentation and analysis from the results of simulations that correspond to real life attributes and scenarios.

Keywords: Base station, Unmanned aerial Vehicle, UAV-BS, efficient drone placement, telecommunications

1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη και ανάλυση του πώς μία αποτελεσματική τοποθέτηση μη επανδρωμένου αεροσκάφους, εξασφαλίζει την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη χρηστών σε ένα απομακρυσμένο ή επιβαρυνμένο από φόρτο, κομμάτι του δικτύου. Βασικός πυλώνας της παρούσας διπλωματικής, είναι η κάλυψη των χρηστών του δικτύου με το λιγότερο δυνατό κόστος. Ως κόστος ορίζεται ο αριθμός των απαιτούμενων αεροσκαφών και η συνολική ενέργεια που καταναλώνουν. Αξίζει να σημειωθεί πως δίνεται μεγάλη έμφαση στην ενέργεια που καταναλώνεται από το κάθε μη επανδρωμένο αεροσκάφος. Η κατανάλωση ενέργειας είναι μια εξίσωση που λαμβάνει υπόψιν, το υψόμετρο που βρίσκεται το αεροσκάφος και των δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας (κατά μέσω όρο) που παρέχει ο κάθε κατασκευαστής του. Ο αριθμός των αεροσκαφών που θα αποσταλούν για την κάλυψη μιας περιοχής εξαρτάται από, τον αριθμό των χρηστών που πρέπει να καλυφθούν, την κίνηση τους στον χώρο, καθώς και το πόσο διάσπαρτα τοποθετημένοι είναι στην γεωγραφική περιοχή κάλυψης του συστήματος. Στην πορεία της διπλωματικής θα αναλυθεί το μαθηματικό και αλγοριθμικό υπόβαθρο του προβλήματος, θα προταθούν μοντέλα για την βέλτιστη τοποθέτηση των αεροσκαφών και λύσεις των προβλημάτων κόστους και αποδοτικότητας.

1.2 Δομή της διπλωματικής

Αναφορικά με την διάρθρωση της εργασίας, στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται ο σχεδιασμός των κυψελωτών δικτύων. Αναφέρονται θεμελιώδεις έννοιες, λειτουργίες και μοντέλα που είναι σημαντικά για την κατανόηση του αντικειμένου της διπλωματικής. Εν συνεχεία, στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται το πρότυπο Long Term Evolution Advanced (LTE-A) στο οποίο βασίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο μελέτης και προσομοίωσης της εργασίας. Το Κεφάλαιο 4, εμπεριέχει τις τεχνικές βέλτιστης τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα LTE-A, όπως και τους αλγόριθμους βέλτιστης τοποθέτησης που επιλέχθηκαν για μελέτη και ανάλυση. Στο Κεφάλαιο 5, αναφέρονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που έγιναν για τον

σκοπό της διπλωματικής εργασίας και η σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των αλγορίθμων βέλτιστης τοποθέτησης, ενώ η εργασία κλείνει με το Κεφάλαιο 6, που εμπεριέχει τα συμπεράσματα, ακολουθούμενα από την βιβλιογραφία και το παράρτημα I, στο οποίο ο αναγνώστης μπορεί να βρει επιλεγμένα κομμάτια κώδικα τα οποία υλοποιήθηκαν στον προσομοιωτή της εργασίας.

2

Αρχές Σχεδιασμού

Κυψελωτών Δικτύων

2.1 Προσδιορισμός κυψελωτών δικτύων

Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι σημαντικό να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της χωρητικότητας του δικτύου και της φασματικής συμφόρησης του δικτύου. Ο κυψελωτός σχεδιασμός προσέφερε λύση σε αυτά τα προβλήματα με ελάχιστες αλλαγές ανάλογα την γεωγραφική περιοχή κάλυψης. Ο κυψελωτός σχεδιασμός σε επίπεδο συστήματος, χωρίζει μια περιοχή σε μικρά εξάγωνα κελιά, που το καθένα παρέχει τηλεπικοινωνιακή κάλυψη σε ένα προκαθορισμένο σημείο του χάρτη. Στο κάθε κελί αντιστοιχεί ένας σταθμός βάσης, ο οποίος παρέχει ένα σύνολο καναλιών μικρότερου μεγέθους από τον συνολικό αριθμό που παρέχει ολόκληρο το σύστημα. Όσον αφορά τα γειτονικά κελιά, είναι σημαντικό να αποφευχθούν οι παρεμβολές των σημάτων που λαμβάνει ο κάθε χρήστης. Για αυτό τον λόγο σε γειτονικούς σταθμούς βάσης και αντίστοιχα στα κελιά που αυτοί εκπέμπουν, αναθέτονται διαφορετικές ομάδες συχνοτήτων.

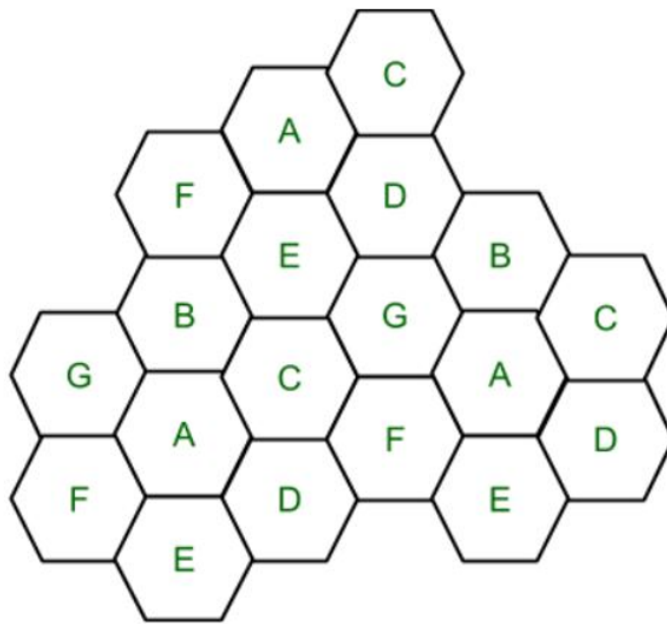
Καθώς η ανάγκη για τηλεπικοινωνιακή κάλυψη αυξάνεται, ο κυψελωτός σχεδιασμός των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων, προσφέρει ένα συγκεκριμένο αριθμό συχνοτήτων για κάθε γεωγραφική περιοχή (πχ μια χώρα ή μια ήπειρο) οι οποίες επαναχρησιμοποιούνται σε διάφορα σημεία της περιοχής που καλύπτεται από το σύστημα.

2.2 Θεμελιώδεις έννοιες

2.2.1 Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

Τα κυψελωτά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, τρίτης γενιάς τηλεπικοινωνιών βασίζονται στην αποτελεσματική ανάθεση συχνοτήτων στο κάθε κελί μιας γεωγραφικής περιοχής. Έτσι ο κάθε σταθμός βάσης εκπέμπει σε συγκεκριμένες συχνότητες και η περιοχή κάλυψης του δεν παρεμβάλλεται με αυτή ενός γειτονικού σταθμού. Ίδιες συχνότητες δύναται να χρησιμοποιούνται

από διαφορετικούς σταθμούς βάσης, με την προϋπόθεση να αντιστοιχούν σε κελιά που είναι αρκετά απομακρυσμένα το ένα από το άλλο έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές. Η τεχνική που ορίζει την ακριβή ανάθεση συχνοτήτων μέσα στα κανάλια ενός συστήματος ονομάζεται “frequency planning”. Μια αναπαράσταση της τοπολογίας ενός κυψελωτού δικτύου τρίτης γενιάς φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1: Αναπαράσταση ενός κυψελωτού δικτύου

Κατά την τέταρτη γενιά τηλεπικοινωνιών, η οποία πήρε μορφή μέσω του πρωτοκόλλου Long Term Evolution (LTE), όλοι οι πόροι του συστήματος εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα, με την ομαλή λειτουργία των επικοινωνιών εντός του δικτύου να γίνεται μέσω αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψιν τις παρεμβολές

2.2.2 Τεχνικές ανάθεσης συχνοτήτων σε κελιά

Η επιλογή τεχνικής ανάθεσης συχνοτήτων στα κελιά ενός συστήματος μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος, έτσι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες την προκαθορισμένη και την δυναμική. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής θα προσφέρει στο σύστημα μεγαλύτερη χωρητικότητα και ελαχιστοποίηση των παρεμβολών.

Με τον τίτλο “προκαθορισμένη” αναφερόμαστε στην τεχνική ανάθεσης συχνοτήτων, κατά την οποία υπάρχει ένας περιορισμένος αριθμός συχνοτήτων που αντιστοιχεί στο κάθε κελί. Στην περίπτωση που η συμφόρηση είναι μεγάλη και χρησιμοποιούνται όλα τα κανάλια του κελιού, νέες κλήσεις απορρίπτονται. Η στρατηγική που χρησιμοποιείται σε αυτή την τεχνική, για βελτίωση του συστήματος ονομάζεται «borrowing strategy» και επιτρέπει σε ένα κελί να δανειστεί νέα κανάλια

συχνοτήτων από γειτονικά κελιά, πάντα με την επίβλεψη του Mobile Switching Centre (MSC). Το MSC διασφαλίζει πως δεν θα δημιουργηθεί πρόβλημα σε κλήσεις που είναι σε εξέλιξη.

Η δυναμική τεχνική ανάθεσης συχνοτήτων σε κελιά, δεν αναθέτει συχνότητες στο κάθε κελί του συστήματος για συνεχόμενη χρήση. Αντίθετα, ο κάθε σταθμός βάσης κάνει ένα αίτημα παροχής καναλιού στο MSC και αυτό με την σειρά του χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο με παραμέτρους εισόδου δεδομένα που θα καθορίσουν το κόστος ανάθεσης, όπως η απόσταση μεταξύ των κελιών που χρησιμοποιούν ίδιες συχνότητες (Σχήμα 1) και η πιθανότητα μελλοντικής συμφόρησης, παραχωρεί ένα κανάλι στον αιτών σταθμό βάσης. Έτσι, μπορούμε να πούμε με σιγουριά πως με την δυναμική ανάθεση συχνοτήτων στα κελιά του συστήματος, επιτυγχάνεται η μείωση της πιθανότητας συμφόρησης με ταυτόχρονη αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος, αφού όλα τα κελιά έχουν πρόσβαση σε όλα τα κανάλια συχνοτήτων.

2.2.3 Μεταπομπές μεταξύ κελιών

Σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι πολύ σύνηθες ένας δέκτης σήματος, για παράδειγμα ένας εξοπλισμός χρήστη (User Equipment-UE), κατά την διάρκεια μιας κλήσης να κινείται γεωγραφικά στα σύνορα ενός κελιού ή ακόμα να περάσει από το ένα κελί στο άλλο. Στην περίπτωση αυτή το MSC καλείται να χειριστεί την περίπτωση με την λειτουργία της μεταπομπής συχνότητας σε νέο κανάλι (Handover-HO). Συγκεκριμένα, μεταβιβάζει την επικοινωνία σε ένα νέο κανάλι ενός νέου σταθμού βάσης που αντιστοιχεί στο νέο κελί του δικτύου εφόσον η ποιότητα της σύνδεσης πρόκειται να βελτιωθεί. Αξίζει να σημειωθεί πως το MSC λαμβάνει υπόψιν εκτός από τον νέο σταθμό βάσης που πρέπει να μεταφερθεί η κλήση, το ποια κανάλια αντιστοιχούν σε αυτόν έτσι ώστε να επιτευχθεί ομαλή μετάβαση.

Στις περιπτώσεις μεταβιβάσεων χρηστών σε νέα κανάλια το σύστημα λαμβάνει σοβαρά υπόψιν το κατώφλι (threshold) της μεταπομπής. Συγκεκριμένα το νέο κανάλι είναι σημαντικό να παρέχει σήμα δυνατότερο από το συνηθισμένο, δηλαδή μεγαλύτερης τιμής από (-90 dBm έως -100 dBm). Η τιμή του σήματος που παρέχει το νέο κανάλι δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη ή πολύ μικρή, διότι αν το MSC παρέχει μεγάλο επίπεδο συχνότητας υπάρχει η πιθανότητα να συμβούν αχρείαστες μεταβιβάσεις και αντίστοιχα αν η τιμή είναι πολύ μικρή υπάρχει κίνδυνος η σύνδεση να είναι ανεπιτυχής και η κλήση να χαθεί.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί, πως στην πράξη ένα κυψελωτό τηλεπικοινωνιακό σύστημα δεν είναι δυνατόν να σχεδιαστεί χωρίς προβλήματα. Συγκεκριμένα ένα πρόβλημα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε είναι το σενάριο κατά το οποίο, υπάρχουν χρήστες που κινούνται με μικρή ταχύτητα και δεν θα χρειαστεί ποτέ να μεταβιβαστούν σε νέα κελιά του δικτύου, ενώ χρήστες που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα απαιτείται να μεταβιβαστούν επιτυχώς σε κανάλια ενός νέου σταθμού βάσης μέσα σε ελάχιστα δευτερόλεπτα. Μια τεχνική αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η προσέγγιση «umbrella cell», κατά την οποία τοποθετούνται σταθμοί βάσης με υψομετρικές διαφορές για να καλύψουν αστικές και μη περιοχές, εξασφαλίζοντας έτσι, τηλεπικοινωνιακή κάλυψη σε όλους τους χρήστες ασχέτως της ταχύτητας που κινούνται.

Αντίστοιχα υπάρχει η πιθανότητα, ένας χρήστης που κινείται με μικρή ταχύτητα στα όρια ενός κελιού να μην χάνει απευθείας συνιστώσα (Line Of Site-LoS) με τον σταθμό βάσης και η ισχύ του σήματος να παραμένει σε υψηλά επίπεδα, τέτοια ώστε να μην απαιτείται μεταπομπή σε

νέο σταθμό βάσης, διότι δεν έχουμε ξεπεράσει το όριο του threshold. Την συγκεκριμένη περίπτωση ονομάζουμε «cell dragging» και πολλές φορές οδηγεί σε προβλήματα συμφόρησης του δικτύου, ειδικά σε περιπτώσεις που ο χρήστης βρίσκεται σε αρκετά κεντρικό σημείο ενός γειτονικού κελιού.

2.2.4 Μεταπομπή Χρηστών Σε Νέα Κελιά Με Προσοχή Στις Παρεμβολές

Η εξοικονόμηση ενέργειας, είναι ζωτικής σημασίας για την βέλτιστη απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων στις περιοχές όπου επικαλύπτονται από διαφορετικά κελιά.

Την ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος για τον κάθε χρήστη του συστήματος από το κελί που είναι συνδεδεμένος, την μετράμε με το λόγο Signal to Interference Plus Noise Ratio (SINR), το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του σήματος προς την παρεμβολή και τον θόρυβο. Ο υπολογισμός του SINR για έναν χρήστη i του συστήματος ορίζεται ως εξής:

$$SINR_i = \frac{\frac{P_t |h_i|^2 G_t G_r}{L_i}}{N + \sum_{i \neq j} \frac{P_t |h_j|^2 G_t G_r}{L_j}}, \quad (1)$$

όπου στον αριθμητή υπολογίζεται η ισχύς λήψης P_r , για την οποία P_t είναι η ισχύς εκπομπής, h_i το κανάλι σύνδεσης, G_t το κέρδος κεραίας εκπομπής, G_r το κέρδος κεραίας λήψης και L_i οι απώλειες διαδρομής (pathloss). Η ισχύς λήψης διαιρείται με τον θόρυβο N και την παρεμβολή, όπου ορίζεται ως το άθροισμα της ισχύς που λαμβάνει ο χρήστης από όλους τους σταθμούς βάσης του συστήματος εκτός αυτού που είναι ήδη συνδεδεμένος. Η παρεμβολή (Interference) στις τηλεπικοινωνίες χρίζει παρακολούθησης καθώς μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ποιότητας επικοινωνίας στο κανάλι ενός χρήστη και να επηρεάσει την σύνδεση του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε και αναπαράχθηκε ένα μοντέλο απόφασης για μεταπομπή ενός χρήστη σε ένα νέο κελί, το οποίο δίνει έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας και στις παρεμβολές που δέχεται το κανάλι ενός χρήστη [16]. Πρωταρχικό μέλημα του μοντέλου είναι η αναζήτηση των σταθμών βάσης όπου θα προσφέρουν συνεχή επικοινωνία στον χρήστη χωρίς διακοπή σε μια υποτιθέμενη του μεταπομπή σε αυτούς. Για να καθοριστεί ο βέλτιστος σταθμός βάσης για μεταπομπή του χρήστη, αρχικά, υπολογίζεται η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος αναφοράς ($RSRP_B$) από έναν σταθμό βάσης B [16]:

$$RSRP_B = P_{rs}^B h_B, \quad (2)$$

όπου P_{rs}^B ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος κατερχόμενης ζεύξης και h_B το κανάλι. Έπειτα υπολογίζεται το SSC_B (Sustained Service Continuity) [16]:

$$SSC_B = RSRP_{th} + P_{rs}^B - P_{max}, \quad (3)$$

όπου $RSRP_{th}$ είναι ίσο με -100 dBm και το P_{max} 18 dBm. Τους σταθμούς βάσης που θα ισχύει $RSRP_{(B)} > SSC_{(B)}$ το σύστημα τους ορίζει ως υποψήφιους για μεταπομπή του χρήστη, καθώς θα είναι ικανοί να προσφέρουν συνέχιση προσφοράς των υπηρεσιών και επικοινωνιών μετά την μεταπομπή. Αφότου έχουν υπολογιστεί οι υποψήφιοι σταθμοί βάσης που το σύστημα θα είναι ικανό να μεταβιβάσει τον χρήστη με επιτυχία, υπολογίζεται για τον καθένα τους το περιθώριο υστέρησης καναλιού (Handover Hysteresis Margin - HHM) [16]:

$$HHM_B = 10 \log \frac{P_{rs}^B (I_B - P_{rs}^{B_1} \frac{RSRP_B}{P_{rs}^B})}{P_{rs}^B I_{B_1}}, \quad (4)$$

όπου B_1 ο σταθμός βάσης που ο χρήστης είναι ήδη συνδεδεμένος, με σκοπό να παρθεί η απόφαση, για το ποιος σταθμός βάσης είναι ο βέλτιστος σταθμός για την φιλοξενία του χρήστη. Η απόφαση ονομάζεται «κριτήριο μεταπομπής» και ορίζεται ως αποτέλεσμα της συνάρτησης [16]:

$$\argmax RSRP_B = \{B \mid RSRP_B > RSRP_{B_1} + HHM_B\}, \quad (5)$$

με τον σταθμός βάσης που επιλέγεται για μεταπομπή του χρήστη, να είναι αυτός που θα επιστρέψει το μέγιστο αποτέλεσμα αυτής της συνάρτησης.

Το παραπάνω μοντέλο αποφάσεων για βέλτιστη μεταπομπή χρηστών σε νέα κελιά, αποτελεί ένα πολύ αποδοτικό μοντέλο το οποίο μπορεί να υλοποιηθεί σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που συμμορφώνονται με το πρωτόκολλο LTE-A, καθώς βασίζεται καθαρά σε μετρήσεις των δεδομένων του συστήματος και των συνδέσεων, βελτιώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας και την απόδοση των υπηρεσιών. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος βασισμένος στο παραπάνω μοντέλο, για τον προσομοιωτή της εργασίας ο οποίος αναλύεται παρακάτω.

Algorithm I [16]: Interference-Aware Handover Decision Algorithm

1. **Input:** The UE U , the P_r of U , the B base station that C is connected and the remaining base stations of the system B_s .
2. Calculate the Interference of U from all the B_s except B and the $RSRP_B$.
3. **For each** base station B_s **do**
4. Calculate the sustained service continuity SSC of U from B_s
5. **If** $RSRP_B > SSC$ **then**
6. B_s satisfies the criterion.
7. Add B_s to the candidates list C to evaluate handover.
8. **End if.**
9. **End for.**

10. **If** $C = \text{empty}$ **then**
11. Algorithm is terminated.
12. **Output:** No Handover. UE U stays to the cell of B .
13. **End if.**
14. **For each** base station in C **do**
15. Calculate Handover Hysteresis Margins and store it to $HHM_{(c)}$.
16. **End for.**
17. Handover towards the cell that satisfies the HO criterion.
18. **Output:** The B_s that U should be connected.

2.2.5 Επέκταση της περιοχής κάλυψης

Παρότι τα τελευταία χρόνια, η αρχιτεκτονική των τηλεπικοινωνιακών δικτύων προσφέρει κάλυψη στο μεγαλύτερο κομμάτι του χάρτη υπάρχουν περιοχές που οι σταθμοί βάσης δεν καταφέρνουν να καλύψουν. Αυτές οι περιοχές μπορεί να είναι μια κοιλάδα που περικλείεται από βουνά μακριά από μια πόλη ή ακόμα και μια πολυκατοικία σε μια πυκνή κατοικημένη περιοχή ενός αστικού κέντρου. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιείται ένας συγκεκριμένος τύπος πομπού που ονομάζεται επαναλήπτης (repeater). Οι επαναλήπτες λαμβάνουν τα σήματα από τον σταθμό βάσης τα οποία ενισχύουν και αναμεταδίδουν στην περιοχή που χρήζει εκτενέστερης τηλεπικοινωνιακής κάλυψης. Ακόμα δέχονται σήματα από χρήστες του συστήματος τα οποία επανεκπέμπουν στους κοντινότερους σταθμούς βάσης. Αξίζει να σημειωθεί πως ένας repeater έχει την δυνατότητα αναμετάδοσης όλου του εύρους ζώνης των σημάτων στην Ευρυζωνική Υπηρεσία Προσωπικών Επικοινωνιών (Broadband Personal Communications Service-PCS) (Narrowband, Broadband και Unlicensed σήματα). Αξίζει να σημειωθεί πως παρότι και τα λαμβανόμενα και τα εκπεμπόμενα σήματα ενισχύονται από τους repeaters, δεν δίνεται η δυνατότητα εξάλειψης του θορύβου των σημάτων, για αυτό και είναι σημαντικό η τοποθέτηση τους να γίνεται σε αποδοτικά σημεία για το δίκτυο. Ακόμα είναι σημαντικό να γνωρίζουμε πως οι repeaters δεν αυξάνουν την χωρητικότητα του δικτύου, αφού σε περιπτώσεις που επικοινωνούν με σταθμούς βάσης με μεγάλο φόρτο χρηστών υπάρχει η πιθανότητα να οδηγήσουν σε συμφόρηση του. Σε αυτές τις περιπτώσεις, νέοι σταθμοί βάσης χρειάζονται να ενταχθούν στο σύστημα έτσι ώστε να αποφευχθεί η μείωση της ποιότητας υπηρεσιών προς τους χρήστες.

Στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστεί ένα μοντέλο, στο οποίο ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος μπορεί να λειτουργήσει ως ένας repeater σε ένα κυψελωτό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο για την κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών ή σταθμών βάσης με μεγάλη συμφόρηση.

2.3 Διάδοση ασύρματων τηλεπικοινωνιακών κυμάτων

2.3.1 Βασικοί Μηχανισμοί Διάδοσης

Τα τρία βασικά στοιχεία της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών σημάτων είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η σκέδαση τους. Αξίζει να σημειωθεί, πως όταν μελετήσουμε την επικοινωνία πομπού-δέκτη σε ένα αστικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο παρατηρούμε πως τις περισσότερες φορές δεν υπάρχει άμεση ορατότητα μεταξύ τους. Η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ πομπού και δέκτη σε αυτές τις περιπτώσεις επιτυγχάνεται μέσω της ανάκλασης των κυμάτων από διάφορες επιφάνειες καθώς ταξιδεύουν στο χώρο. Όσες περισσότερες ανακλάσεις υφίσταται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, τόσο μειώνεται η ισχύς του. Για να μετρήσουμε την κάλυψη που παρέχει ένας πομπός σε ένα δίκτυο χρησιμοποιούμε μοντέλα που βασίζονται στην μέση ισχύ του σήματος που λαμβάνει ένας δέκτης βασισμένη στην απόσταση που χωρίζει τον πομπό με τον δέκτη. Παρακάτω θα αναλύσουμε κάποια από αυτά τα μοντέλα και τις ιδιότητες τους

Αναλυτικότερα ως ανάκλαση ηλεκτρομαγνητικού κύματος, αναφερόμαστε στην ιδιότητα του όταν προσπίπτει σε μια επιφάνεια μέρος του να ανακλάται προς διαφορετική κατεύθυνση και ως αποτέλεσμα να ταξιδεύει στον χώρο προς διαφορετικές κατευθύνσεις από την αρχική. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα λέμε πως είναι πολωμένα, έχουν δηλαδή ορθογώνιες κατευθύνσεις στον χώρο, για αυτό και για την βέλτιστη απόδοση του συστήματος χρησιμοποιείται η τεχνική της υπέρθεσης.

Από την άλλη μεριά η διάθλαση των σημάτων δίνει την δυνατότητα να ταξιδεύουν πίσω από εμπόδια ή σε σημεία που δεν είναι άμεσα ορατά από την αρχική πορεία του σήματος, για παράδειγμα πίσω από πολυκατοικίες σε μια αστική περιοχή ή ακόμα και πέρα από τον ορίζοντα χωρίς να επηρεάζει η καμπυλότητα της γης. Σαφώς η ισχύς του σήματος λήψης του δέκτη μικραίνει όσο αυτός βρίσκεται πιο βαθιά στο «σκοτεινό» σημείο του πομπού (πίσω από εμπόδια), όμως μέσω της διάθλασης μπορεί να επιτευχθεί επιτυχής επικοινωνία πομπού-δέκτη. Αξίζει να σημειωθεί πως βάση της αρχής του Huygen κάθε σημείο του κύματος μπορεί να θεωρηθεί δευτερεύουσα πηγή του αρχικού σήματος και η διάθλαση είναι η διάδοση αυτών των δευτερευόντων σημάτων στον χώρο πίσω από εμπόδια.

Όλα τα παραπάνω ενώνονται με την σκέδαση των σημάτων στον χώρο και συχνά παρατηρείται πολύ μεγαλύτερη ισχύς λαμβανόμενου σήματος από αυτή που ένας μηχανικός του συστήματος θα μπορούσε να είχε προβλέψει. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό των τριών μηχανισμών διάδοσης που αναφέρθηκαν σε αυτή την ενότητα. Συγκεκριμένα, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε μια επιφάνεια (πχ έναν τοίχο) και ανακλάται. Εν συνεχεία, μέσω της διάθλασης μετακινείται στις πίσω από εμπόδια (αλλαγή μέσου) και έτσι επιτυγχάνεται η εκπομπή του προς όλες τις κατευθύνσεις, που είναι ο τρίτος και τελευταίος μηχανισμός του, η σκέδαση.

2.3.2 Μοντέλο Διάδοσης Ελεύθερου Χώρου

Το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου, χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την τιμή της ισχύς του σήματος που θα λάβει ο δέκτης όταν αυτός διατηρεί άμεση ορατότητα με τον πομπό.

Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται στις επικοινωνίες και όπως σε όλα τα μοντέλα διάδοσης μεγάλης κλίμακας η ισχύ του σήματος λήψης μικραίνει όσο μεγαλώνει η απόσταση του πομπού από τον δέκτη. Η ισχύς του σήματος λήψης ελεύθερου χώρου υπολογίζεται από την εξίσωση του Friiss:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}, \quad (6)$$

όπου P_r είναι η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος, P_t η εκπεμπόμενη ισχύς του σήματος, G_t το κέρδος κεραίας εκπομπής, G_r το κέρδος κεραίας λήψης, d η απόσταση σε μέτρα μεταξύ πομπού, και τέλος λ το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου σήματος μετρούμενο σε μέτρα. Πήρε το όνομα της από τον Harald T. Friiss, Δανό μηχανικό ασύρματων επικοινωνιών ο οποίος συνέβαλε στις τεχνολογίες διάδοσης ασύρματων επικοινωνιών, την ραδιοαστρονομία και τεχνολογίες των ραντάρ. Η εξίσωση του Friiss αποδεικνύει πως η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος μικραίνει όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη, έτσι χρησιμοποιούνται ιστροπικές κεραίες με απώτερο σκοπό να επιτευχθεί όσο το μεγαλύτερο κέρδος κεραίας εκπομπής στο σύστημα. Για να υπολογίσουμε την μέγιστη δυνατή εκπεμπόμενη ισχύ προς την κατεύθυνσή με το μεγαλύτερο κέρδος κεραίας εκπομπής χρησιμοποιούμε την εξίσωση αποτελεσματικής ιστροπικής ακτινοβολούμενης ισχύς, (Effective Isotropic Radiated Power-EIRP) όπου είναι το γινόμενο της εκπεμπόμενης ισχύς επί του κέρδους της κεραίας εκπομπής ($EIRP = P_t G_t$) για τις ιστροπικές κεραίες.

Είναι άξιο αναφοράς, για το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου, ο υπολογισμός των απωλειών διαδρομής σήματος (pathloss). Ως απώλεια διαδρομής ορίζεται, η εξασθένιση του σήματος σε dB, η διαφορά δηλαδή της ισχύς εκπεμπόμενου και λαμβανόμενου σήματος. Στο μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου το pathloss, όταν λαμβάνεται υπόψιν το κέρδος των κεραίων, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_L(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \right], \quad (7)$$

όπου L ο συντελεστής απωλειών, ενώ στην περίπτωση που δεν λάβουμε υπόψιν το κέρδος η εξίσωση υπολογισμού είναι:

$$P_L(dB) = 10\log \frac{P_t}{P_r} = -10\log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \right]. \quad (8)$$

2.3.3 Μοντέλα διάδοσης σημάτων σε υπαίθριους χώρους

Στις μέρες μας τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα απαντώνται στις περισσότερες περιοχές του χάρτη η οποίες κατοικούνται από ανθρώπους, ασχέτως της ανομοιομορφίας του εδάφους. Έτσι χρειάζεται να ληφθεί σοβαρά υπόψιν η απώλεια διαδρομής του σήματος (pathloss), κάτι που αυξάνεται ανάλογα με την υψομετρική διαφορά των περιοχών, των εμποδίων που βρίσκονται στην πορεία του σήματος (κτίρια, δέντρα, βουνά), την αλλαγή μορφής του εδάφους ή ακόμα και από την καμπυλότητα της Γης. Για αυτό τον λόγο έχουν υλοποιηθεί μοντέλα που υπολογίζουν και εκτιμούν το πιθανό pathloss της κάθε γεωγραφικής περιοχής.

Το μοντέλο που επί το πλείστον χρησιμοποιείται σε αστικά κέντρα είναι το μοντέλο Okumura. Εφαρμόζεται στο φάσμα των συχνοτήτων από 150 MHz έως και 3000 MHz, η τοποθέτηση των σταθμών βάσης γίνεται σε ύψη από 30 έως 1000 μέτρα και οι αποστάσεις κάλυψης είναι από 1 έως 100 χιλιόμετρα [15]. Για αυτό το μοντέλο δημιουργήθηκε ένα σύνολο από καμπύλες, για πιο εκτεταμένη μελέτη χρησιμοποιώντας κεραίες που στην μεριά του σταθμού βάσης εκπέμπουν προς κάθε κατεύθυνση και στην μεριά του δέκτη λαμβάνουν σήματα από κάθε κατεύθυνση. Αυτές οι καμπύλες θα μας δώσουν την μέση εξασθένηση $A(f, d)$, η οποία είναι συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας f και της απόστασης μεταξύ πομπού-δέκτη d . Ο τύπος υπολογισμού του μοντέλου είναι

$$L(dB) = L_F + A(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}, \quad (9)$$

όπου L η διάδοση ελεύθερου χώρου, $G(h_{te})$ το κέρδος της κεραίας του σταθμού βάσης το οποίο είτε ισούται με $G(h_{te}) = 20 \log_{10}(h_{te}/200)$ αν το ύψος της κεραίας είναι μεταξύ 30 και 1000 μέτρων, είτε με $G(h_{te}) = 10 \log_{10}(h_{te}/200)$ αν δεν ξεπερνά τα 30 μέτρα, $G(h_{re})$ το κέρδος της κεραίας του δέκτη το οποίο είτε ισούται με $G(h_{re}) = 10 \log_{10}(h_{te}/3)$ αν το ύψος της κεραίας δεν ξεπερνά τα 3 μέτρα, είτε με $G(h_{re}) = 20 \log_{10}(h_{te}/3)$ αν είναι μεταξύ 3 και 10 μέτρων. Τέλος, G_{AREA} το κέρδος βάση του είδους της περιοχής, το οποίο ισούται με 33 σε ανοιχτές υπαίθριες περιοχές, με 27 σε αραιοκατοικημένες περιοχές και με 13 σε αστικές περιοχές. Το μοντέλο Okumura είναι από τα πιο απλά στον υπολογισμό του pathloss για κυψελωτά δίκτυα σε αστικά κέντρα και βασικό του πλεονέκτημα είναι η πρακτικότητα. Αξίζει να σημειωθεί, όμως πως το μεγάλο μειονέκτημα του μοντέλου είναι πως δεν αποδίδει σε μεγάλες διαφοροποιήσεις του τύπου του εδάφους (πχ αγροτικές περιοχές). Για συστήματα μεγάλου μέγεθους κυψελών σε αστικά κέντρα, το μοντέλο Hata αποτελεί βελτιωμένη μορφή του Okumura καθώς προσφέρει μεγαλύτερη πρακτικότητα όμως δεν είναι αποδοτικό για συστήματα με μικρές κυψέλες (PCS).

Εν αντίθεσή με τα παραπάνω μοντέλα, όταν αναφερόμαστε σε περιοχές μεγάλης κλίμακας με ανομοιομορφη τοπολογία ένα πολύ αποδοτικό μοντέλο που υλοποιείται σε σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα είναι το μοντέλο Longley-Rice ή αλλιώς μοντέλο Irregular Terrain

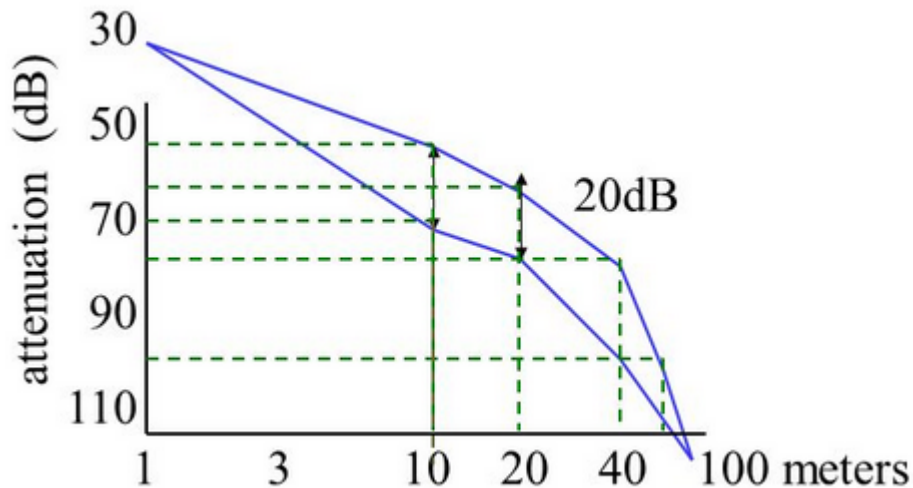
Model (ITS). Τα συστήματα αναφοράς αυτού του μοντέλου είναι point-to-point, μεγάλης κλίμακας και διαφοροποίησης εδάφους και το φάσμα των συχνοτήτων που χρησιμοποιεί το μοντέλο κυμαίνεται από 40 MHz έως 100 GHz. Στο μοντέλο Longley-Rice, ο υπολογισμός του pathloss βασίζεται σε οπτικογεωμετρικά μοντέλα, που μέσω μελέτης αντανάκλασεων 2 ακτινών στο έδαφος μας δίνουν το αποτέλεσμα [5]. Ακόμα η διάθλαση των σημάτων γίνεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο Frensel και Kirchhoff. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειώσουμε πως από την δημιουργία του μοντέλου έχουν γίνει τροποποιήσεις, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμόζεται σε αστικές περιοχές, συγκεκριμένα σε μια τροποποίηση λαμβάνεται υπόψιν μια έξτρα παράμετρος που είναι ο αστικός παράγοντας (Urban Factor-UF) και έτσι έχουμε την δυνατότητα να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του pathloss που μας δίνει το μοντέλο Longley-Rice με αυτά που μας δίνει το μοντέλο Okumura, δοθέντος ενός συνόλου από στοιχεία μιας περιοχής που χρήζει μελέτης. Αυτό το μοντέλο αποτελεί χρήσιμο εργαλείο με αξιόπιστα αποτελέσματα, παρόλα ταύτα τα σημαντικά μειονεκτήματά του είναι πως δεν υλοποιεί μηχανισμούς υπολογισμού διορθώσεων σε θορύβους που δημιουργούνται από κτίρια και δεν λαμβάνει υπόψιν πολλαπλές διαδρομές ενός σήματος.

2.3.4 Μοντέλα διάδοσης σημάτων σε εσωτερικούς χώρους

Μιλώντας για την διάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων σε εσωτερικούς χώρους, όπως για παράδειγμα στο σύνολο ορόφων ενός ουρανοξύστη, θα πρέπει να προσεγγίσουμε τον υπολογισμό του pathloss με διαφορετικά μοντέλα από αυτά που χρησιμοποιούμε στις αναλύσεις ολόκληρων αστικών κέντρων και αυτό γιατί οι αποστάσεις μεταξύ πομπού-δέκτη είναι σαφώς μικρότερες και επιπροσθέτως οι διαφοροποιήσεις του τύπου του περιβάλλοντος δεν είναι μεγάλες. Αξίζει να σημειωθεί πως τα τρία βασικά στοιχεία της διάδοσης σημάτων, ανάκλαση-διάθλαση-σκέδαση αποτελούν βασικά στοιχεία αναφοράς, όπως και στα προαναφερθείσα μοντέλα, με σημαντική διαφορά όμως τις διαφορετικές προϋποθέσεις που θέτει η διάδοση σε εσωτερικούς χώρους. Συγκεκριμένα, χρήζει μεγαλύτερης σημασίας η σωστή τοποθέτηση κεραιών στον χώρο για την βέλτιστη διάδοση. Ένα σήμα που εκπέμπεται από μια κεραία που τοποθετείται σε ένα σημείο κοντά στο πάτωμα, θα πάσχει από μεγαλύτερο pathloss, από ότι ένα σήμα κεραίας που τοποθετείται στο ταβάνι ενός μεγάλου χώρου. Ακόμα η ποιότητα των σημάτων επηρεάζονται σημαντικά καθώς εμποδίζονται από τοίχους ή κλειστές πόρτες. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω, καταθέτουμε τα συστήματα εσωτερικών χώρων, στην κατηγορία απευθείας συνιστώσας (LoS) ή OBS (από την αγγλική λέξη obstruct που σημαίνει «παρακωλύω»).

Μελετώντας το pathloss σε εσωτερικούς χώρους διαχωρίζουμε την μελέτη σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τον διαχωρισμό των χώρων που ανήκουν στον ίδιο επίπεδο και τον διαχωρισμό των χώρων που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα ενός πολυώροφου κτιρίου. Μιλώντας για χώρους που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, μετά από μελέτες ετών, οι μελετητές συγκέντρωσαν ένα σύνολο αποτελεσμάτων για το pathloss, στα οποία είναι πιθανόν να καταλήξουμε, το οποίο σύνολο παρατίθεται σε βάσεις δεδομένων για μελλοντική χρήση από τους ενδιαφερόμενους. Από την άλλη μεριά, όταν αναφερόμαστε σε χώρους διαφορετικών επιπέδων ενός πολυώροφου κτιρίου, χρησιμοποιούμε τον μοντέλο «Multiple Breakpoint» του Ericsson. Συγκεκριμένα στο μοντέλο αυτό, το pathloss θεωρούμε πως φράζεται άνω και κάτω από τα τέσσερα σημεία διακοπής (breakpoints) που προκαθορίζονται από το μοντέλο. Ακόμα, στο μοντέλο θέτεται η

προκαθορισμένη τιμή, 30 dB απόσβεσης κάθε 1 μέτρο απόστασης, οι οποία μας δίνει τιμή συχνότητας 900 MHz. Παρακάτω φαίνεται η γραφική παράσταση του pathloss για το μοντέλο του Ericsson συναρτήσει της απόστασης.



Σχήμα 2: Μοντέλο διάδοσης εσωτερικού χώρου του Ericsson

Το μοντέλο αυτό μας δίνει μια ντετερμινιστική αναπαράσταση των τιμών που διακυμαίνεται το pathloss, δοθείσας μιας συγκεκριμένης απόστασης σε εσωτερικούς χώρους που χωρίζονται σε διαφορετικούς ορόφους ενός κτιρίου.

2.3.5 Εξέλιξη Μοντέλων διάδοσης σε μοντέλα ειδικών περιπτώσεων

Με την πάροδο του χρόνου οι υπολογιστές που έχουμε στα χέρια μας έχουν την δυνατότητα να αναλύουν όλο και μεγαλύτερο όγκο δεδομένων. Για τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μπορούμε να χρησιμοποιούμε την πλέον μεγάλη υπολογιστική ισχύ που έχουμε στα χέρια μας, έτσι ώστε να εξελίξουμε τα μοντέλα υπολογισμού της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης είτε σε εξωτερικούς είτε εσωτερικούς χώρους. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν μοντέλα ανάλογα με την περιοχή που μελετάμε μέσω Στρατηγικού Σχεδιασμού Πληροφοριακών Συστημάτων (Strategic Information Systems Planning-SISP) μοντέλων διάδοσης, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα ανάλυσης μέσω γραφικής αναπαράστασης μιας περιοχής. Για εξωτερικούς χώρους, χρησιμοποιούνται φωτογραφίες από δορυφόρους και για εσωτερικούς χώρους τα αρχιτεκτονικά σχέδια, με απώτερο σκοπό την τρισδιάστατη αναπαράσταση της περιοχής κάλυψης. Έτσι, έχοντας αυτά τα δεδομένα στην διάθεση τους οι μελετητές, υπολογίζουν ντετερμινιστικά και όχι στατιστικά, το pathloss, τη διάδοση, την σκέδαση και τη διάθλαση των σημάτων στον χώρο. Ακόμα δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας μεγάλης κλίμακας βάσεων δεδομένων για αποθήκευση των αποτελεσμάτων, τα οποία θα φανούν χρήσιμα σε μελλοντικές μελέτες παρόμοιων περιοχών. Με την πάροδο του χρόνου και με την αύξηση της ήδη υπάρχουσας υπολογιστικής ισχύς, η μελέτη και ο υπολογισμός των βασικών στοιχείων της διάδοσης τηλεπικοινωνιακών σημάτων, θα

γίνει όλο και πιο αποτελεσματικός με αποτέλεσμα την δημιουργία ολοένα και πιο βέλτιστων συστημάτων τηλεπικοινωνιακής κάλυψης.

2.3.6 Το Μοντέλο του Hata

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο [2.3.3], το μοντέλο του Hata αποτελεί το πλέον πρακτικότερο μοντέλο υπολογισμού του pathloss σε αστικές περιοχές. Αυτό το μοντέλο αποτελεί μια πρακτική και εμπειρική διατύπωση του συνόλου των δεδομένων που παρέχονται από το μοντέλο «Okumura» και εφαρμόζεται για το εύρος ζώνης συχνοτήτων από 150 έως 1500 MHz. Το συγκεκριμένο μοντέλο, παρουσιάζεται βάσει ενός τύπου στον οποίο εφαρμόζονται εξισώσεις βελτίωσης ανάλογα με της ανάγκες του κάθε συστήματος για μια δοθείσα κατάσταση. Ο τύπος υπολογισμού του pathloss του Hata [11]:

$$\begin{aligned} L(urban) &= 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{te} - a(h_{re}) \\ &+ (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{te}) \log_{10} d, \end{aligned} \quad (10)$$

για τον οποίο, f_c είναι η συχνότητα (σε MHz), h_{te} είναι το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης, h_{re} το ύψος της κεραίας του δέκτη, d η χιλιομετρική απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και δέκτη και τέλος $a(h_{re})$ ο συντελεστής διόρθωσης του αποτελεσματικού ύψους της κεραίας του δέκτη. Ο συντελεστής διόρθωσης είναι συνάρτηση του μεγέθους της περιοχής κάλυψης και ο υπολογισμός του διαφέρει ανάλογα με την περιοχή αναφοράς. Συγκεκριμένα υπάρχουν τρεις διαφορετικές παραδοχές του υπολογισμού του συντελεστή διόρθωσης ανάλογα με το μέγεθος της πόλης στην οποία θέλουμε να υπολογίσουμε το pathloss μιας σύνδεσης. Για μια πόλη μικρού έως μεσαίου μεγέθους ο συντελεστής υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση [15]:

$$a(h_{re}) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) h_{re} - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8) \text{ dB}, \quad (11)$$

ενώ, από την άλλη μεριά για ένα μεγάλο αστικό κέντρο λαμβάνουμε υπόψιν και τη συχνότητα του συστήματος. Συγκεκριμένα η επιλογή του κατάλληλου τύπου υπολογισμού για τον συντελεστή διόρθωσης γίνεται ανάλογα με το αν η συχνότητα ξεπερνάει τα 400MHz ή είναι μικρότερη από 200 MHz, όπως και φαίνεται παρακάτω [15]:

$$a(h_{re}) = 8.29(\log_{10} 1.54 h_{re})^2 - 1.1 \text{ dB για } f_c \leq 200 \text{ MHz}, \quad (12)$$

$$a(h_{re}) = 3.2(\log_{10} 11.75 h_{re})^2 - 4.97 \text{ dB για } f_c \geq 400 \text{ MHz}, \quad (13)$$

Μπορούμε με σιγουριά να καταλήξουμε στο συμπέρασμα, πως η παραπάνω μορφή του μοντέλου του Hata είναι η καταλληλότερη για μεγάλα δίκτυα κινητών επικοινωνιών σε αστικά κέντρα καθώς τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε είναι όμοια με αυτά του μοντέλου Okumura. Προϋπόθεση όμως, αποτελεί η μελέτη συνδέσεων πομπού-δέκτη, στις οποίες η μεταξύ τους απόσταση ξεπερνάει το ένα χιλιόμετρο. Το γεγονός ότι το μοντέλο του Hata αποδίδει σε συγκεκριμένο όριο χιλιομετρικής απόστασης σύνδεσης, οδήγησε τον Ευρωπαϊκό Συνεταιρισμό Επιστημονικής και Τεχνικής Έρευνας (European Cooperation in Science and Technology -COST) στην δημιουργία μιας επιτροπής, η οποία θα ήταν υπεύθυνη για την ανάπτυξη βελτιωμένων εκδόσεων των μοντέλων διάδοσης ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή εφαρμογής τους, με την ονομασία «COST-231 Models» [15] έχοντας ως απώτερο σκοπό την καλύτερη απόδοση των συστημάτων με “μικρό” μέγεθος κυψελών. Όσον αφορά το μοντέλο του Hata, η βελτιωμένη έκδοση του ονομάστηκε «COST-231 Hata Model» και ως απώτερο σκοπό είχε την δημιουργία ενός βέλτιστου τρόπου υπολογισμού του προβλεπόμενου pathloss συνδέσεων σε ένα αστικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Μετά από μελέτη, η επιτροπή κατέληξε στον παρακάτω τύπο για τον υπολογισμό του pathloss

$$\begin{aligned}
 &L(\text{urban}) \\
 &= 46.3 + 33.9 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{te} - a(h_{re}) \\
 &+ (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{te}) \log_{10} d + C_M,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

ο οποίος, αποτελείται από όμοιες παραμέτρους με αυτόν του βασικού «Hata» μοντέλου, όπου αναφέρθηκε παραπάνω. Μια παράμετρος που προστίθεται στις COST-231 εκδόσεις των μοντέλων διάδοσης, είναι ο συντελεστής μετατόπισης C_M ο οποίος έχει μονάδα μέτρησης τα decibel (dB). Αυτός ο συντελεστής παίρνει δυο διακριτές τιμές ανάλογα με το είδος της πόλης που το παρών μοντέλο εφαρμόζεται και πιο συγκεκριμένα ισούται με μηδέν για πόλεις μικρού/μεσαίου ή ισούται με 3 αν το μοντέλο εφαρμόζεται σε ένα μητροπολιτικό κέντρο.

Τα μοντέλα του Hata και η βελτιωμένη COST-231 έκδοση του, για τον υπολογισμό του προβλεπόμενου pathloss σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα επικοινωνίας πομπού-δέκτη έχουν συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων με τις οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σωστά. Αυτές οι παράμετροι φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, ο οποίος μας βοηθάει στο να κατανοήσουμε πλήρως τις διαφορές μεταξύ του βασικού Hata μοντέλου σε σχέση με τις βελτιωμένες COST-231 εκδόσεις των μοντέλων διάδοσης.

Πίνακας 1: Παράμετροι μοντέλων [15]

Παράμετροι	Hata Model	COST-231 Hata
Συχνότητα: f_c (MHz)	150-1500	1500-2000
Ύψος κεραίας σταθμού βάσης: h_{te} (meters)	30-200	30-200
Ύψος κεραίας δέκτη: h_{re} (meters)	1-10	1-10
Απόσταση σταθμού βάσης – δέκτη: d (killometers)	>1	1-20

2.4 Σήματα πολλαπλών διαδρομών και η εξασθένηση τους.

2.4.1 Ορισμός σημάτων πολλαπλών διαδρομών

Σε προηγούμενη ενότητα της παρούσας διπλωματικής αναλύθηκαν οι τρόποι διάδοσης ενός τηλεπικοινωνιακού σήματος στον χώρο και πως αυτό φτάνει από τον πομπό στον δέκτη. Μετά την εκπομπή του, ένα σήμα ανακλάται σε επιφάνειες του χώρου και έτσι δημιουργούνται πολλές όμοιες εκδοχές του, οι οποίες θα φτάσουν στον δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Καθώς όλα αυτά τα σήματα που θα φτάσουν στον δέκτη μοιράζονται κοινή πληροφορία, τα ονομάζουμε σήματα πολλαπλών διαδρομών. Ο συνδυασμός όλων αυτών των σημάτων, στην κεραία του δέκτη θα μας δώσει όλη την πληροφορία του εκπεμπόμενου σήματος, με την διαφορά ότι το εκπεμπόμενο και το λαμβανόμενο σήμα θα διαφέρουν στην φάση και το πλάτος τους.

2.4.2 Εξασθένηση σημάτων κατά την διάδοση τους στον χώρο

Τα τηλεπικοινωνιακά σήματα εξασθενούν με διάφορους τρόπους οι οποίοι προκύπτουν από τον τρόπο διάδοσης, αλλά και από την μορφή της περιοχής στην οποία διαδίδονται. Σαν ένα απλό παράδειγμα, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ένα σήμα το οποίο εκπέμπεται από έναν σταθμό βάσης ενός αστικού κέντρου το οποίο ανακλάται σε επιφάνειες. Στην περίπτωση που η κεραία του δέκτη επικαλύπτεται από τα τριγύρω κτήρια, τα σήματα που θα ληφθούν, θα έχουν υποστεί εξασθένηση. Αξίζει όμως να σημειωθεί πως ένα σήμα μπορεί να υποστεί εξασθένηση ακόμα και σε μια σύνδεση πομπού-δέκτη όπου υπάρχει απευθείας συνιστώσα (LoS) καθώς και πάλι λόγω των ανακλάσεων, σήματα πολλαπλών διαδρομών πριν φτάσουν στον δέκτη, είναι πιθανό να παρεμβάλλονται μεταξύ τους οδηγώντας έτσι σε καθυστερήσεις και κενά (echoes).

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί παράγοντες που υπαγορεύουν το μέγεθος της εξασθένησης ενός σήματος. Πολύ σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα κίνησης των αντικειμένων στον χώρο, είτε αυτά αποτελούν δέκτη του σήματος είτε όχι. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο δέκτης ενός σήματος κινείται από ή προς τον σταθμό βάσης με τον οποίο επικοινωνεί, το κάθε μέρος των σημάτων πολλαπλής διαδρομής υπόκειται σε μετατόπιση Doppler, δημιουργώντας έτσι εξασθενήσεις στο σήμα κατά την διάρκεια λήψης του στην μεριά του δέκτη. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και σε περιπτώσεις όπου αντικείμενα στον περιβάλλοντα χώρο του δέκτη κινούνται με μεγάλη ταχύτητα συγκριτικά με αυτή του δέκτη. Αυτά τα αντικείμενα, (για παράδειγμα οχήματα), όταν αντανακλούν τα σήματα πολλαπλών διαδρομών, προκαλούν μετατοπίσεις Doppler όπου αυτές με την σειρά τους έχουν ως αποτέλεσμα την εξασθένηση των σημάτων.

Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι, η εξασθένηση έχει άμεσα αποτελέσματα στο σήμα που μεταδίδεται. Τα πιο σημαντικά αποτελέσματα είναι, απότομες αλλαγές στην ισχύ των σημάτων, κενά στην λήψη των σημάτων λόγω καθυστερήσεων διάδοσης ενός μέρους των σημάτων πολλαπλής διαδρομής και μετατοπίσεις συχνότητας λόγω του φαινομένου Doppler.

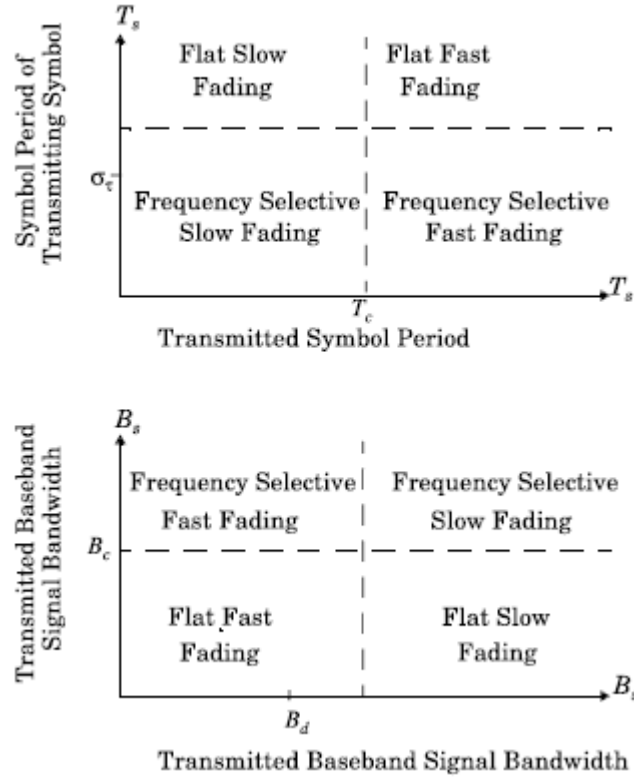
2.4.3 Τύποι εξασθένησης σημάτων - Διαλείψεις

Όλους τους τύπους διαλείψεων (fading) σημάτων που συναντάμε στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα τους κατηγοριοποιούμε βάση δυο μεγάλων διαφορών τους. Από την μια μεριά έχουμε τις διαλείψεις λόγω χρονικών καθυστερήσεων κατά την διάδοση και από την άλλη έχουμε τις διαλείψεις λόγω «Doppler» μετατοπίσεων κατά την διάδοση.

Οι διαλείψεις λόγω του φαινομένου «Doppler» με την σειρά τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις γρήγορες διαλείψεις και τις αργές διαλείψεις. Πιο συγκεκριμένα λόγω του φαινομένου «Doppler» η συχνότητα των σημάτων υπόκειται σε διαφοροποιήσεις, οι οποίες είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε παραμορφώσεις του σήματος. Συγκρίνοντας τον ρυθμό με τον οποίο ένα σήμα υπόκειται σε παραμορφώσεις και εξασθενίσεις όπως και τον ρυθμό συνοχής του καναλιού, μπορούμε να ορίσουμε την διάλειψη του καναλιού ως γρήγορη ή αργή αντίστοιχα. Με τον όρο διάλειψη, αναφερόμαστε στις χρονικές διαφοροποιήσεις κατά την λήψη σημάτων, οι οποίες είναι ανάλογες της πορείας μετάδοσης των σημάτων στον χώρο, όπως επίσης και των αντικειμένων τα οποία πιθανόν το κάθε σήμα θα συναντήσει (κτίρια ή δέντρα). Αξίζει να σημειωθεί, πως μιλώντας για γρήγορη ή αργή διάλειψη, λαμβάνουμε υπόψιν μόνο τον ρυθμό διαφοροποιήσεων του σήματος ενός καναλιού και όχι τον τρόπο υπολογισμού των απωλειών ελεύθερου χώρου.

Σε δυο κατηγορίες χωρίζουμε επίσης και τις διαλείψεις σημάτων λόγω χρονικών καθυστερήσεων. Η χρονική πολυδιαδρομική διάδοση των εκπεμπόμενων σημάτων, όσο αυτά ταξιδεύουν και αντανακλώνται στον χώρο οδηγούν σε εξασθενήσεις του σήματος λόγω διάλειψης, όταν δυο ή παραπάνω σήματα πολλαπλής διαδρομής (που μοιράζονται κοινό πομπό και πληροφορία) φτάσουν στον δέκτη ακολουθώντας διαφορετικές διαδρομές κατά τις οποίες πιθανόν να ανακλαστούν σε πολλαπλές διαφορετικές επιφάνειες (κτίρια ή δέντρα) και τουλάχιστον ένα έχει υποστεί διαφοροποιήσεις σε επίπεδο συχνότητας, λόγω της απορρόφησης ενός μέρους της ισχύς του από τα αντικείμενα του χώρου. Όσον αφορά τις δύο διαφορετικές κατηγορίες διαλείψεων λόγω χρονικών καθυστερήσεων, έχουμε αρχικά την επίπεδη διάλειψη, την οποία είναι το πιθανότερο να συναντήσουμε στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και την συναντάμε όταν το εύρος ζώνης της συνοχής του καναλιού είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος. Από την άλλη μεριά, έχουμε την επιλεκτική διάλειψη σε επίπεδο συχνότητας. Σε αυτή την κατηγορία το εύρος ζώνης της συνοχής του καναλιού είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος και έτσι το λαμβανόμενο σήμα θα εμπεριέχει πολλές διαφορετικές εκδόσεις του ίδιου εκπεμπόμενου σήματος. Όταν συμβαίνει αυτό ορίζουμε το λαμβανόμενο σήμα ως διαστρεβλωμένο ή εξασθενημένο σε σχέση με το εκπεμπόμενο σήμα.

Όλους τους παραπάνω τύπους διάλειψης των ασύρματων σημάτων πολλαπλών διαδρομών σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, μπορούμε να τους ορίζουμε ή ως συνάρτηση της συμβολικής περιόδου του εκπεμπόμενου σήματος ή ως συνάρτησή του εύρους ζώνης του σήματος βάσης, όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3: Τύποι διαλείψεων. Παραπομπή βιβλίου [5] της βιβλιογραφίας

όπου, T_s η περίοδος των μεταδιδόμενων συμβόλων, σ_τ η καθυστέρηση διάδοσης, B_s το εύρος ζώνης του σήματος και B_c το εύρος ζώνης της συνοχής του καναλιού.

2.4.4 Μοντέλο Διαλείψεων Rayleigh

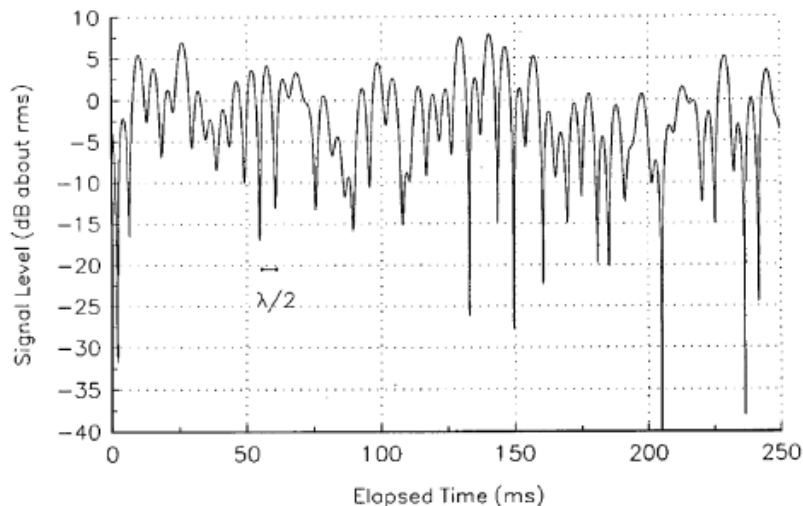
Το μοντέλο ερμηνείας διαλείψεων καναλιών του Rayleigh, αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο στατιστικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται επί το πλείστον στις σύγχρονες τηλεπικοινωνιακές συνδέσεις, καθώς δύναται να ερμηνεύσει το πως αστικές περιοχές επηρεάζουν την διάδοση και την εξασθένηση των τηλεπικοινωνιακών σημάτων που αποστέλλονται σε ένα κανάλι μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός δέκτη.

Το μοντέλο του Rayleigh, είναι ευρέως εφαρμόσιμο σε περιπτώσεις όπου στο κανάλι σύνδεσης δεν υπάρχει LoS μεταξύ πομπού και δέκτη και σκοπός του είναι η στατιστική ερμηνεία της ποιότητας της διάδοσης των σημάτων στον χώρο και πως αυτά διασκορπίζονται όταν αντανακλούν σε διάφορα αντικείμενα και επιφάνειες του περιβάλλοντα χώρου. Συχνά, σε συστήματα που εφαρμόζουν το μοντέλο Rayleigh το αποτέλεσμα της Rayleigh κατανομής (channel gain), ορίζεται ως ένας μιγαδικός αριθμός όπου το πραγματικό και φανταστικό του

μέρος αποτελούν ανεξάρτητες «Gauss» μεταβλητές του. Για τον τυχαίο υπολογισμό του φανταστικού και του πραγματικού μέρους αυτού του αριθμού, χρησιμοποιείται η τιμή του pathloss της σύνδεσης και η πρόσθεση των δυο μερών του μιγαδικού αριθμού που υπολογίζεται μας δίνει το «channel-gain», το οποίο όσο πιο κοντά στην μονάδα είναι τόσο καλύτερη ποιότητα σύνδεσης έχουμε επιτύχει.

Για την εφαρμογή του μοντέλου του Rayleigh, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω θα πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις τοπολογίας του χώρου γύρω από την σύνδεση πομπού-δέκτη και όχι μόνο. Συγκεκριμένα, είναι πολύ βασικό για την επιτυχή εφαρμογή του μοντέλου να μην υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (LoS). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω των κτήριων μιας αστικής περιοχής, τα οποία εκτός από το να μπλοκάρουν την οπτική επαφή του πομπού και του δέκτη, αντανακλούν ή απορροφούν μέρος των εκπεμπόμενων σημάτων, με αποτέλεσμα την αλλοίωση τους. Όπως είναι λογικό λοιπόν, το κανάλι μιας ασύρματης σύνδεσης μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο μιας πόλης, θα αλλάζει συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Στην περίπτωση όμως που το κανάλι παραμένει στατικό για ένα μικρό χρονικό διάστημα (πχ 100 milliseconds), το κατατάσσουμε στην κατηγορία των εγγύς στατικών καναλιών διάλειψης (Quasi-Static fading channel), κατά την οποία ο συντελεστής διάλειψης είναι πάρα πολύ μικρός. Για αυτό τον λόγο μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι, η ερμηνεία της διάλειψης των τηλεπικοινωνιακών σημάτων ενός δικτύου από το μοντέλο Rayleigh είναι σχετική, ανάλογα με τον χρόνο, την κίνηση και την διασκόρπιση του πομπού και του δέκτη στον χώρο.

Παρακάτω, είναι τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης εφαρμογής του μοντέλου διαλείψεων Rayleigh, σε επίπεδο συχνότητας 900MHz όπως παρουσιάζεται στην παραπομπή [5]



Σχήμα 4: Μοντέλο Rayleigh για συχνότητα 900 MHz, από παραπομπή [5]

3

Το πρότυπο LTE-A

3.1 Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα LTE-A

Τα κυψελωτά δίκτυα που κατατάσσουμε στην τέταρτη γενιά τηλεπικοινωνιών (4G) συμμορφώνονται με το πρότυπο LTE-A. Αποτελούν την 10^η αναβάθμιση των LTE δικτύων, προσφέροντας μεγαλύτερη και πιο αποδοτική ροή δεδομένων. Οι κύριες νέες λειτουργίες που εντάσσονται στα κυψελωτά δίκτυα με το LTE-A πρότυπο, είναι η συνάθροιση φορέων (carrier aggregation), η χρήση κόμβων αναμετάδοσης (Relay Nodes) και η χρήση συστημάτων Πολλαπλών εισόδων και εξόδων (Multiple-Input Multiple-Output-MIMO), κατά την οποία αναφερόμαστε στην ύπαρξη πολλαπλών κεραιών στην μεριά του πομπού και του δέκτη.

Χρήζει μεγάλης σημασίας η αύξηση του εύρους ζώνης της μετάδοσης πληροφοριών σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, καθώς μεγαλύτερο εύρος ζώνης μετάδοσης συνεπάγεται αύξηση της ροής δεδομένων και της χωρητικότητας του δικτύου. Στα δίκτυα LTE-A αυτό επιτυγχάνεται με την συνάθροιση φορέων (carrier aggregation). Συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα συνάθροισης έως και πέντε φορέων, κάτι που οδηγεί σε ένα εύρος ζώνης μετάδοσης 100 MHz (20 MHz ο κάθε φορέας). Μέσω αυτής της τεχνολογίας επιτυγχάνονται αυξημένες ταχύτητες ροής δεδομένων, επιτυγχάνοντας παράλληλα συμμόρφωση με τις απαιτήσεις όπου θέτει η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union-ITU) για τα δίκτυα LTE-A.

Μια ακόμη λειτουργία που εντάσσεται με το πρότυπο LTE-A είναι η χρήση κόμβων αναμετάδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση κόμβων αναμετάδοσης προϋπήρχε από την τρίτη γενιά τηλεπικοινωνιών. Στο πρότυπο που μελετάμε όμως, δεν γίνεται μια απλή αναμετάδοση του σήματος, αλλά μέσω τεχνικών απαλοιφής του θορύβου, επιτυγχάνεται η βελτίωση της ποιότητας του σήματος που φτάνει στον δέκτη.

Όλα τα παραπάνω, ενισχύονται από την χρήση MIMO κεραιών στον πομπό και στον δέκτη. Συγκεκριμένα, στην μεριά του πομπού και του δέκτη υπάρχουν πολλαπλές κεραίες, που εκπέμπουν ταυτόχρονα, δίνοντας έτσι την δυνατότητα σε μια χρονική στιγμή πολλαπλά σήματα να μπορούν να αποσταλούν από τον πομπό και να ληφθούν από τον δέκτη. Με αυτή την

λειτουργία τα δίκτυα LTE-A παρέχουν αποδοτικότερη επικοινωνία μεταξύ δύο ή περισσότερων στοιχείων του δικτύου.

Τέλος είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως στα LTE πρότυπα, χρησιμοποιούνται δύο σήματα κατερχόμενης ζεύξης (downlink) συγχρονισμού από την συσκευή ενός χρήστη (UE) έτσι ώστε να λάβει την ταυτοποίηση του κελιού σύνδεσης. Το βασικό το οποίο ονομάζουμε πρωτεύον σήμα συγχρονισμού (Primary Synchronization Signal-PSS) και το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού (Secondary Synchronization Signal-SSS).

3.2 Τεχνολογίες LTE-A Δικτύων

3.2.1 Συνάθροιση Φορέων

Η συνάθροιση φορέων, στα LTE-A δίκτυα έχει ως βασικούς σκοπούς, την επίτευξη μεγαλύτερων ρυθμού δεδομένων που μεταδίδονται στο σύστημα και την αύξηση της ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης των σημάτων (uplink/downlink), χωρίς να χρειάζονται συνεχής ανακατανομές των πόρων του συστήματος, κάτι που συνεπάγεται επίσης αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο μέγιστος αριθμός φορέων που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στην τεχνολογία της συνάθροισης είναι πέντε και έπειτα από επιλογή του σωστού πρωτεύοντος κελιού (Primary Cell-PCell) για το κάθε UE από το πρωτόκολλο ελέγχου επικοινωνιών (Radio Resource Control-RRC), λαμβάνοντας υπόψιν το threshold και την ισχύ των σημάτων, επιτυγχάνεται βέλτιστη αποδοτικότητα επικοινωνίας.

Οι τρεις κύριες κατηγορίες συνάθροισης φορέων είναι η συνάθροιση εντός εύρους ζώνης με συνεχείς φορείς (Intra-band Aggregation with Contiguous Carriers), η συνάθροιση εντός εύρους ζώνης με μη συνεχείς φορείς (Intra-Band Aggregation with Non-Contiguous Carriers) και τέλος η συνάθροιση μεταξύ φορέων που ανήκουν σε πολλαπλά εύρη ζώνης (Inter-Band Aggregation). Οι διαφορές μεταξύ των τριών αυτών κατηγοριών είναι σε επίπεδο συχνότητας. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση οι συχνότητες των φορέων ανήκουν στο ίδιο εύρος ζώνης με συνεχείς τιμές (contiguous), σε αντίθεση με την δεύτερη κατηγορία που οι συχνότητες παρόλο που ανήκουν στο ίδιο εύρος ζώνης δεν έχουν συνεχείς τιμές (non-contiguous). Στην τρίτη κατηγορία συνάθροισης, η οποία είναι και η πιο περίπλοκη, οι συχνότητες των φορέων ανήκουν σε διαφορετικά εύρη ζώνης.

Αφότου ένα UE έχει συνδεθεί στο δίκτυο βάση των πρωτοκόλλων του LTE-A, η σύνδεση επιτηρείται από το RRC του συστήματος το οποίο χειρίζεται όλους τους φορείς που είναι διαθέσιμοι για τη συσκευή και παρέχει το PCell και τα δευτερεύοντα κελιά (Secondary Cells-SCells) στο UE. Κατά την λειτουργία «connected» στην τεχνολογία της συνάθροισης, το RRC έχει την δυνατότητα ανάθεσης ή αφαίρεσης SCell για την συσκευή και επιπροσθέτως κάνει τις απαραίτητες ενέργειες ανάθεσης φορέων έτσι ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη ροή δεδομένων επικοινωνίας. Στην περίπτωση μετάθεσης σε νέο κελί, το RRC είναι υπεύθυνο να μεταβιβάσει την συσκευή σε νέα SCell που αντιστοιχούν σε διαφορετικό PCell και αντίστοιχα σε διαφορετικούς φορείς. Αυτή η αλληλεπίδραση RRC και UE αποτελεί τον βασικό τρόπο λειτουργίας της

συνάθροισης φορέων σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που συμμορφώνεται με το πρωτόκολλο LTE-A.

3.2.2 Κόμβοι Αναμετάδοσης

Η βασική λογική πίσω από αυτή την τεχνολογία είναι κάτι παραπάνω από μια απλή αναμετάδοση των τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Στην LTE αναμετάδοση, ο κόμβος αναμετάδοσης θα λάβει το σήμα και θα το αποδιαμορφώσει. Έπειτα, έχοντας τα απαραίτητα δεδομένα του σήματος εκπομπής, με την τεχνική αλγορίθμων θα διορθώσει τα σφάλματα και τους θορύβους που πιθανόν είχε το σήμα και θα το αναμεταδώσει σαν ένα νέο σήμα, καλύτερης ποιότητας αλλά με την ίδια πληροφορία. Καταλαβαίνουμε, λοιπόν πως ο δέκτης θα λάβει το σήμα που ο σταθμός βάσης είχε μεταδώσει (ή το ανάποδο) με την καλύτερη δυνατή ποιότητα. Στην τεχνολογία συναντάμε τρεις βασικούς ρόλους σε ένα σενάριο επικοινωνίας σταθμού βάσης-δέκτη. Αρχικά έχουμε τον σταθμό βάσης που τον ονομάζουμε εξελιγμένο κόμβο B (Evolved Node B-eNodeB), τις συσκευές των χρηστών UE και τους κόμβους αναμετάδοσης (Relay Nodes-RN).

Οι κόμβοι αναμετάδοσης που μελετάμε, λειτουργούν σε δύο σενάρια χρήσης. Στο πρώτο σενάριο, τα σήματα που ένας RN θα κληθεί να χειριστεί οργανώνονται σε μια σειρά βάσει timestamp και σωστού χρονοπρογραμματισμού. Σε αυτό το σενάριο ο RN είναι υπεύθυνος να δρομολογήσει το σήμα από μια συσκευή στο κατάλληλο κανάλι του σταθμού βάσης ανάλογα με το timestamp. Στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας ενός RN δίνεται η δυνατότητα χειρισμού πολλαπλών σημάτων κάθε δοθείσα χρονική στιγμή, με βασική προϋπόθεση τα σήματα να μοιράζονται κοινές συχνότητες. Αξίζει να σημειώσουμε πως η επιλογή μεταξύ των δύο λειτουργιών θα γίνει αφού αποφασίσουμε αν θέλουμε να επιτύχουμε καλύτερη επίδοση ή μικρότερο κόστος αναμετάδοσης στο σύστημα. Επίσης στα LTE-A δίκτυα συναντάμε δυο τύπους αναμετάδοσης, «Inband» και «OutBand». Στην περίπτωση της «Inband» αναμετάδοσης, η σύνδεση σταθμού βάσης -κόμβου αναμετάδοσης και η σύνδεση κόμβου αναμετάδοσης-UE, αντιστοιχούν στην ίδια συχνότητα φορέα, εν' αντιθέσει με την αναμετάδοση «Outband» όπου οι συνδέσεις αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες φορέων.

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω μας οδηγεί στον χωρισμό των κόμβων αναμετάδοσης σε δύο τύπους. Οι «type 1» κόμβοι αναμετάδοσης παραμετροποιούν τα κελιά που ανήκουν με το δικό τους «ID» και χειρίζονται τα σήματα συνδυάζοντας χρονοπρογραμματισμού με «Inband» μετάδοση, χειρισμό πολλαπλών σημάτων ταυτόχρονα με «Inband» μετάδοση ή χειρισμό πολλαπλών σημάτων ταυτόχρονα με «Outband» μετάδοση. Από την άλλη μεριά οι «type 2» κόμβοι αναμετάδοσης δεν παραμετροποιούν τα κελιά με το δικό τους «ID» και χειρίζονται σήματα μόνο με «Inband» μετάδοση και πολλαπλά σήματα ταυτόχρονα.

3.2.3 MIMO Τεχνικές Κεραιών

Με τον όρο MIMO, αναφερόμαστε στην χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής και πολλαπλών κεραιών λήψης σημάτων με απώτερο σκοπό μεγαλύτερες ροές δεδομένων στο σύστημα. Στα LTE δίκτυα υπάρχουν διάφορα ήδη MIMO τεχνικών και για τα UE και για τους

σταθμούς βάσης. Οι δύο κύριες τεχνικές που θα αναφέρουμε σε αυτό το κεφάλαιο είναι η τεχνική SU-MIMO (Single-User Multiple Input – Multiple Output) και η τεχνική MU-MIMO (Multiple-User Multiple Input- Multiple Output).

Βασική λειτουργία του SU-MIMO είναι η μετάδοση όλων των ροών δεδομένων προς έναν μόνο χρήστη κατά την διάρκεια εκπομπής σημάτων. Συγκεκριμένα, γίνεται ένας διαχωρισμός όλων των διαθέσιμων αναλογιών σήματος προς θόρυβο συν την παρεμβολή του ή αλλιώς «SINR» σε πολλαπλά επίπεδα δεδομένων τα οποία δρομολογούνται προς ένα μοναδικό UE, με απώτερο σκοπό μέγιστη απόδοση του λαμβανόμενου σήματος και την μέγιστη δυνατή χωρητικότητα του συστήματος. Σε αυτή την τεχνική κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε ένα μόνο χρήστη, παρέχοντας έτσι το πλεονέκτημα του εκμηδενισμού των παρεμβολών στα σήματα.

Από την άλλη μεριά ως MU-MIMO ορίζεται η τεχνική κατά την οποία, τα πολλαπλά επίπεδα δεδομένων που δημιουργούνται δρομολογούνε σήματα σε πολλαπλούς χρήστες κάθε φορά. Παρά του ότι η επικοινωνία με πολλαπλά UE γίνεται χρησιμοποιώντας κοινές συχνότητες, γίνεται ένας χωρικός διαχωρισμός των πόρων, ανάλογα δηλαδή με την διαθέσιμη χωρητικότητα και την θέση των UE στο σύστημα. Σαφώς η χωρητικότητα του συστήματος με την χρήση MU-MIMO κεραιών στον σταθμό βάσης αυξάνεται, αφού πολλοί περισσότεροι χρήστες εξυπηρετούνται από έναν σταθμό βάσης κάθε φορά. Αυτή την βελτίωση στην χωρητικότητα και κατ' επέκταση την απόδοση του συστήματος, ενισχύει η δυνατότητα ανακατανομής ισχύος, ανάλογα με την κατάσταση του εκάστοτε καναλιού ενός σταθμού βάσης. Βασικό πλεονέκτημα της MU-MIMO τεχνικής είναι το κέρδος σε επίπεδο ενέργειας που έχει το σύστημα, αφού κάθε χρονική στιγμή οι πόροι ανακατανέμονται στους χρήστες βάση των αναγκών τους.

3.2.4 Σχήματα Πολλαπλής Πρόσβασης στο Πρωτόκολλο LTE-A

Η μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων κατά το πρωτόκολλο LTE & LTE-A για την ανερχόμενη (UpLink) και κατερχόμενη (DownLink) ζεύξη, βασίζεται στις τεχνολογίες πολλαπλών προσβάσεων.

Οι τεχνολογίες πολλαπλών προσβάσεων επιτρέπουν σε χρήστες που κινούνται στον χώρο να χρησιμοποιούν και να μοιράζονται ταυτόχρονα τους πόρους του συστήματος (π.χ. τις κατανεμημένες συχνότητες στα κανάλια). Όπως είναι λογικό, σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα οι απαιτήσεις όλο και αυξάνονται ενώ οι πόροι παραμένουν περιορισμένοι, έτσι για να εξασφαλιστεί επαρκές χωρητικότητα στις περιοχές κάλυψης, είναι απαραίτητο οι χρήστες του συστήματος να μοιράζονται τους πόρους σε επίπεδο συχνότητας. Οι τεχνολογίες πολλαπλών προσβάσεων δίνουν λύση σε αυτές τις προκλήσεις, δίνοντας την δυνατότητα σε χρήστες να συνδέονται στο ίδιο μέσο πολλαπλών μεταδόσεων (π.χ. έναν σταθμό βάσης). Πιο συγκεκριμένα, στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα παρέχονται κανάλια επικοινωνίας με πεπερασμένο εύρος ζώνης και ο σκοπός των τεχνολογιών πολλαπλής πρόσβασης, είναι η επεξεργασία και ανάθεση όσο το δυνατόν περισσότερων κλήσεων σε κάθε κανάλι με ταυτόχρονη εξασφάλιση της βέλτιστης ποιότητας υπηρεσιών (QoS).

Στο πρωτόκολλο LTE-A, η κάθε ζεύξη έχει διαφορετική τεχνολογία ως βάση. Συγκεκριμένα, η ανερχόμενη ζεύξη βασίζεται στην πολλαπλή πρόσβαση μέσω διαίρεσης συχνότητας ενός μοναδικού φορέα (Single-carrier Frequency-Division Multiple Access-SC-FDMA), ενώ η

κατερχόμενη ζεύξη βασίζεται στην πολλαπλή πρόσβαση ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access-OFDMA).

3.2.4.1 Ανερχόμενη Ζεύξη Μεταδόσεων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ανερχόμενη ζεύξη στο πρωτόκολλο LTE-A έχει ως βάση την τεχνική πολλαπλών προσβάσεων SC-FDMA. Αυτή η τεχνική επιλέχθηκε στο πρωτόκολλο, πρώτον γιατί η απόδοση ισχύος είναι υψίστης σημασίας στην ανερχόμενη ζεύξη, και δεύτερον γιατί υπήρξε η ανάγκη συνδυασμού τεχνικών με χαμηλή Αναλογία κορυφής προς μέσο όρο ισχύος (PAPR) τις οποίες συναντάμε σε συστήματα GSM (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητής Επικοινωνίας) και Πολλαπλή πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα (Code Division Multiple Access-CDMA), με την ευέλικτη κατανομή συχνοτήτων που συναντάμε στην τεχνική Πολλαπλής Πρόσβασης Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDMA). Όσον αφορά την SC-FDMA για την ανερχόμενη ζεύξη, τα δεδομένα σε επίπεδο χρόνου, μετατάσσονται στο επίπεδο της συχνότητας μέσω του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform-DFT), δίνοντας έτσι την δυνατότητα αντιστοίχισης τους στο εύρος ζώνης ενός καναλιού και έπειτα μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (Inverse Fast Fourier Transform-IFFT) μετατάσσονται ξανά στο επίπεδο του χρόνου.

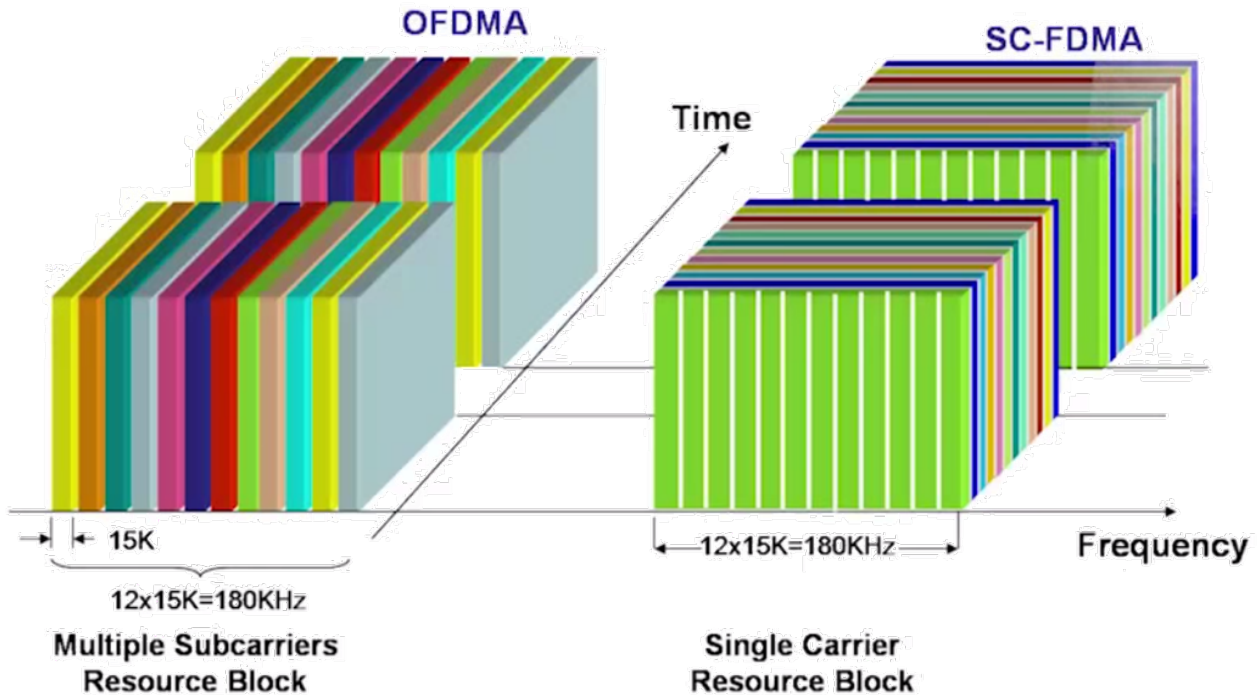
Μετά από κάθε ανάθεση δεδομένων στο κανάλι, το τελευταίο στοιχείο κάθε συμβόλου αντιγράφεται και τοποθετείται στην αρχή του συμβόλου, τεχνική που ονομάζουμε διάστημα διαφύλαξης και σκοπός της είναι να μην αφήσει τα δεδομένα να περιπλέκονται μέσα στο κανάλι.

3.2.4.2 Κατερχόμενη Ζεύξη Μεταδόσεων

Στο πρωτόκολλο LTE-A η κατερχόμενη ζεύξη (DownLink) βασίζεται στην τεχνική πολλαπλών προσβάσεων OFDMA. Η τεχνική αυτή αποτελεί μια ψηφιακή διαμόρφωση πολλαπλών φορέων και ορίζεται ως η παραλλαγή της Πολυπλεξίας Ορθογώνιας Διαίρεσης Συχνότητας (OFDM).

Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, υπάρχει μεγάλη ροή δεδομένων που μεταδίδεται μεταξύ πομπού και δέκτη, κάνοντας έτσι την χρήση ενός μοναδικού φορέα μη αποτελεσματική. Για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος, γίνεται χρήση πολλαπλών υποφορέων οι οποίοι μεταδίδουν παράλληλα. Για τους υποφορείς χρησιμοποιείται διαμόρφωση ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος και το μέγεθος των ροών δεδομένων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται είτε διαμόρφωση QPSK, 16-QAM, 64 QAM, 128 QAM, είτε 256 QAM και έτσι θέτοντας πολλαπλούς υποφορείς (έως και εκατοντάδες) ανά επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη, μπορούν να επιτευχθούν αποδοτικές ροές δεδομένων σε πεπερασμένο εύρος ζώνης βελτιώνοντας σημαντικά το QoS και τις αποδόσεις του συστήματος. Η OFDM τεχνική προσφέρει στο LTE-A σημαντικά προτερήματα, σε σχέση με παλαιότερες τεχνολογίες επικοινωνιών. Αρχικά, προσφέρει εύκολη μετατροπή των καναλιών σε κανάλια μεγαλύτερου εύρους ζώνης ελαττώνοντας την εξασθένιση των σημάτων και εντούτοις το QoS βελτιώνεται. Ακόμα, η καθυστέρηση ανάλυσης των σημάτων πολλαπλών διαδρομών με την τεχνική OFDM ελαττώνεται σημαντικά, καθώς αναλύοντας τα λαμβανόμενα σήματα την βέλτιστη χρονική στιγμή, ο δέκτης χρησιμοποιώντας διαστήματα διαφύλαξης, έχει την δυνατότητα να ελαττώσει τις παρεμβολές μεταξύ των συμβόλων των λαμβανόμενων σημάτων κατά την τοποθέτηση τους στο κανάλι. Τέλος, όπως αναλύθηκε

παραπάνω, μια πολλή σημαντική τεχνολογία που προσφέρει το πρωτόκολλο LTE-A είναι οι κεραίες MIMO. Η τεχνική OFDM επιτρέπει πολύ εύκολη αντιστοίχιση της συχνότητας και της φάσης για τα σήματα πολλαπλών διαδρομών, αποδεικνύοντας έτσι ότι είναι η κατάλληλη για την κατερχόμενη ζεύξη στο πρωτόκολλο LTE-A.



Σχήμα 5: Διαμορφώσεις σημάτων με την τεχνική OFDMA (αριστερά) & SC-FDMA (δεξιά)

3.3 Εξέλιξη του Πρωτοκόλλου LTE-A

Μέσω του πρωτοκόλλου LTE-A, έχει καθιερωθεί η τέταρτη γενιά τηλεπικοινωνιών (4G) στις περισσότερες χώρες του κόσμου, προσφέροντας τα τελευταία χρόνια μεγάλες ροές δεδομένων στους χρήστες. Καθώς όμως τα δεδομένα που μεταδίδονται αναμένεται στο άμεσο μέλλον να ξεπερνάνε τις δυνατότητες των συστημάτων, θα φτάσουμε τελικά στο σημείο της πλήρους χωρητικότητας των σταθμών βάσης (eNodeB). Έτσι, για να αποφευχθεί αυτό το σενάριο και καθώς τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα βρίσκονται στην περίοδο μετάβασης προς την πέμπτη γενιά τηλεπικοινωνιών (5G), η 13^η έκδοση του 3GPP η οποία παρουσιάστηκε τον Μάρτιο του 2016, παρουσιάζει την βελτιωμένη έκδοση του πρωτοκόλλου LTE-A, η οποία συχνά αναφέρεται ως LTE-A Pro.

Το πρωτόκολλο LTE-A Pro, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να προσφέρει καλύτερες αποδόσεις και αυξημένη χωρητικότητα τηλεπικοινωνιών, κάτι που βελτιώνει το Quality of Service (QoS) των χρηστών του δικτύου ανά τον κόσμο. Παρακάτω, αναφέρονται οι κύριες λειτουργίες του πρωτοκόλλου LTE-A Pro, το πως βελτιώσαν και το πως ενσωματώθηκαν στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μετά την 13^η έκδοση του 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

3.3.1 Συνάθροιση Φορέων στο Πρωτόκολλο LTE-A Pro

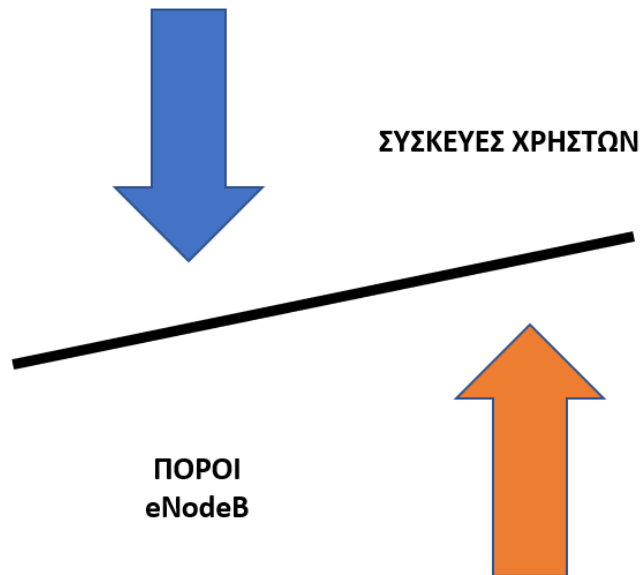
Η συνάθροιση φορέων μετά την 13^η έκδοση του 3GPP συνέχισε την εξέλιξη της, παρουσιάζοντας την τεχνολογία της ογκώδους συνάθροισης φορέων, αυξάνοντας δηλαδή τον αριθμό των διαθέσιμων φορέων σε 32. Σκοπός, είναι η αξιοποίηση του φυσικού καναλιού ελέγχου ανερχόμενης ζεύξης (Physical Uplink Control Channel-PUCCH) σε ένα δευτερεύον κελί (SCell), δίνοντας έτσι την δυνατότητα ULCA σε μια κινητή συσκευή του συστήματος. Ως ULCA, ορίζεται η συνένωση πολλαπλών σημάτων από την μεριά του χρήστη, τα οποία μεταδίδονται σαν ένα προς τον σταθμό βάσης, αυξάνοντας έτσι δραματικά την ταχύτητα με την οποία ο χρήστης μεταφορτώνει πληροφορίες ή αρχεία προς τον σταθμό βάσης (eNodeB) που είναι συνδεδεμένος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως, για κάθε χρήστη του συστήματος, το PUCCH ρυθμίζεται ταυτόχρονα στο βασικό (PCell) και στο δευτερεύον (SCell) κελί, με απώτερο σκοπό την μεγαλύτερη ευρωστία και βελτίωση των σημάτων, αποφεύγοντας έτσι τις συχνές μεταβιβάσεις σε νέα κελιά. Ως μεταπομπή (Handover-HO), στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, ορίζουμε την μεταφορά της σύνδεσης μιας συσκευής σε κάποιο νέο κοντινό κελί και εντούτοις νέο κοντινό σταθμό βάσης, με απώτερο σκοπό την βελτίωση των επικοινωνιών του χρήστη με το σύστημα. Αποφεύγοντας αυτές τις μεταβιβάσεις, το σύστημα μειώνει σημαντικά τις περιπτώσεις αποτυχίας σύνδεσης που μπορεί να συμβούν λόγω εξασθενήσεων ή λόγω pathloss.

Η βελτιωμένη μορφή της συνάθροισης φορέων μετά την 13^η έκδοση του 3GPP, προσέφερε βελτιωμένες επικοινωνίες μεταξύ των συσκευών των χρηστών με τους σταθμούς βάσης, αυξάνοντας παράλληλα και την χωρητικότητα των συστημάτων.

3.3.2 Κατανομή Φόρτου Μεταξύ Φορέων στο LTE-A Pro

Η ισορροπία του ανατεθειμένου φόρτου σε κάθε φορέα είναι υψίστης σημασίας σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, καθώς συνδράμει στην αποτελεσματική χρήση όλου του φάσματος των πόρων, αποφεύγοντας με μεγάλη επιτυχία μεταβιβάσεις σε νέα κελιά που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποτυχίες συνδέσεων. Η τεχνική της ισορροπίας φορτίου των φορέων, βασίζεται στην ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των σταθμών βάσης, τα οποία περιέχουν πληροφορίες για το κάθε κελιού και τον αριθμό χρηστών που εξυπηρετεί. Υπάρχουν δύο είδη ισορροπίας φόρτου, με την πρώτη να είναι η ενεργή λειτουργία ισορροπίας, κατά την οποία το σύστημα πρώτου αναθέσει μια συσκευή σε ένα κελί, λαμβάνει γνώση των απαιτήσεων της από το σύστημα και της κατάστασης της σύνδεσης της. Με την χρήση δρομολογητών και διεπαφών επιτυγχάνεται η βέλτιστη ανάθεση των συσκευών στα κελιά του συστήματος, σιγουρεύοντας έτσι την ισορροπία στους πόρους. Από την άλλη μεριά, έχουμε την αδρανή λειτουργία ισορροπίας κατά την οποία, το σύστημα όταν αναγνωρίσει μεγάλο φορτίο σε έναν συγκεκριμένο κελί σε σχέση με τα γειτονικά του, περνάει άμεσα σε μια διαδικασία ανακατανομής των πόρων, ανακτώντας έτσι μια ισορροπία

στις επικοινωνίες και ελαττώνοντας παράλληλα την πιθανότητα συμφορήσεων. Αυτή η τεχνική ισορροπίας, έχει το μειονέκτημα ότι δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί κάποια ανισορροπία στο φόρτο των κελιών, καθώς πρέπει πρώτα οι συσκευές να έχουν συνδεθεί στους σταθμούς βάσης και μετά να εκτιμηθεί αν υπάρχουν τυχόν ανισορροπίες.



Σχήμα 6: Απεικόνιση Ισορροπίας Φόρτου

3.3.3 Κοινόχρηστες Αδειοδοτημένες Προσβάσεις στο LTE-A Pro

Μια ακόμα μέθοδος που παρουσιάστηκε στην 13^η έκδοση του 3GPP, είναι η αδειοδότηση φάσματος. Παρά το γεγονός ότι, κάθε υπηρεσία επικοινωνιών έχει αποκλειστική χρήση μιας ζώνης συχνοτήτων, μελέτες έδειξαν ότι μεγάλο κομμάτι του φάσματος συχνοτήτων δεσμεύεται για μια υπηρεσία χωρίς όμως να αξιοποιείται εξ' ολοκλήρου. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως πάνω από 75% του δεσμευμένου φάσματος παραμένει αχρησιμοποίητο. Καθώς οι απαιτήσεις των σύγχρονων επικοινωνιών όλο και αυξάνονται, είναι υψίστης σημασίας η εύρεση τρόπων και μεθόδων αξιοποίησης ολόκληρου του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων.

Στο LTE-A Pro η μέθοδος που παρουσιάστηκε ονομάζεται License and Service Agreement (LSA) και παρέχει την δυνατότητα σε χρήστες να “μισθώνουν” ζώνες συχνοτήτων οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται και τις οποίες το σύστημα έχει ορίσει ως κοινόχρηστες, μέσω συγκεκριμένων αδειών (LSA Licence). Σημαντικό, για το LSA είναι να διαφυλάξει τις επικοινωνίες από ανεπιθύμητες παρεμβολές, κάτι που επιτυγχάνεται πολύ εύκολα, καθώς η κάθε άδεια παρέχει πρόσβαση σε μια πεπερασμένες συχνότητες, αποκλειστικές για κάθε χρήστη.

3.3.4 Αυτό-Οργάνωση Δικτύου LTE-A Pro

Αυτό-οργάνωση δικτύων, είναι μια τεχνική που αφορά συστήματα με προσαρμοστικές κεραίες (AAS), η οποία εισήχθη στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα με την 13^η έκδοση του 3GPP.

Όπως προαναφέρθηκε, κύριος σκοπός του LTE-A Pro είναι η αντιμετώπιση του μεγάλου φόρτου και των αυξανόμενων παρεμβολών στα κελιά των τηλεπικοινωνιακών δικτύων ανά τον κόσμο. Έτσι, με τον όρο αυτό-οργάνωση του δικτύου, αναφερόμαστε στην τεχνική που αναπτύχθηκε για να δώσει την δυνατότητα στα συστήματα επικοινωνιών να ανασχηματίζουν “on demand” τα κελιά τους, με απώτερο σκοπό την ανακατανομή των πόρων για βέλτιστη διαχείριση του αυξανόμενου φόρτου. Συγκεκριμένα, μέσω αυτής της τεχνικής δίνεται η δυνατότητα διαίρεσης ενός κελιού σε μικρότερα ή εν αντιθέσει, η δυνατότητα συγχώνευσης πολλών κελιών σε ένα, στις κάθετες ή στις οριζόντιες διαστάσεις. Η διαδικασία του ανασχηματισμού ενός κελιού, ενεργοποιείται μέσω διεπαφών, οι οποίες είναι υπεύθυνες να ελέγχουν το φόρτο και τις παρεμβολές που αντιμετωπίζει το κάθε κελί και να προχωρούν στους απαραίτητους ανασχηματισμούς (διαιρέσεις ή συγχωνεύσεις κελιών).

Η αναβάθμιση των κελιών του δικτύου σε κελιά αυτό-οργάνωσης με το πρωτόκολλο LTE-A Pro, βελτίωσε τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά σε θέματα διαχείρισης του φόρτου και έφερε τις επικοινωνίες ένα βήμα πιο κοντά στην 5^η γενιά τηλεπικοινωνιών (5G).

Πίνακας 2: Επιδόσεις τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ανα διαφορετική έκδοση του 3GPP [9]

Παράμετροι	Έκδοση 3GPP – Γενιά Τηλεπικοινωνιών		
	9 ^η Έκδοση 3GPP (3G)	10 ^η -12 ^η Έκδοση 3GPP (LTE-A /4G)	13 ^η Έκδοση 3GPP (LTE-A Pro 4.5G)
Μέγιστο BitRate	100 MHz	1 Gbps	> 3 Gbps
Εύρος ζώνης Φορέων	20 MHz	100 MHz	640 MHz
Καθυστέρηση	-	10 ms	2 ms

4

Παροχή Κάλυψης μέσω μη

Επανδρωμένων Αεροσκαφών και οι Τεχνικές της.

4.1 Σύγχρονα Μη επανδρωμένα αεροσκάφη

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό, όπου είναι δυνατόν να προσφέρουν ένα μεγάλο φάσμα υπηρεσιών, σε τομείς όπως ο αγροτικός, ο στρατιωτικός, ο ψυχαγωγικός ή ακόμα και ο τηλεπικοινωνιακός. Ανάλογα με το ποιόν των υπηρεσιών όπου μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι δυνατόν να προσφέρουν, χρίζουν απαραίτητες διαφοροποιήσεις στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες ανάπτυξης τους. Καθώς υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί χαρακτηριστικών, δυνατοτήτων ανάπτυξης και χρήσης τους, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το υψόμετρο ανάπτυξης τους και τον σχεδιασμό των φτερών τους.

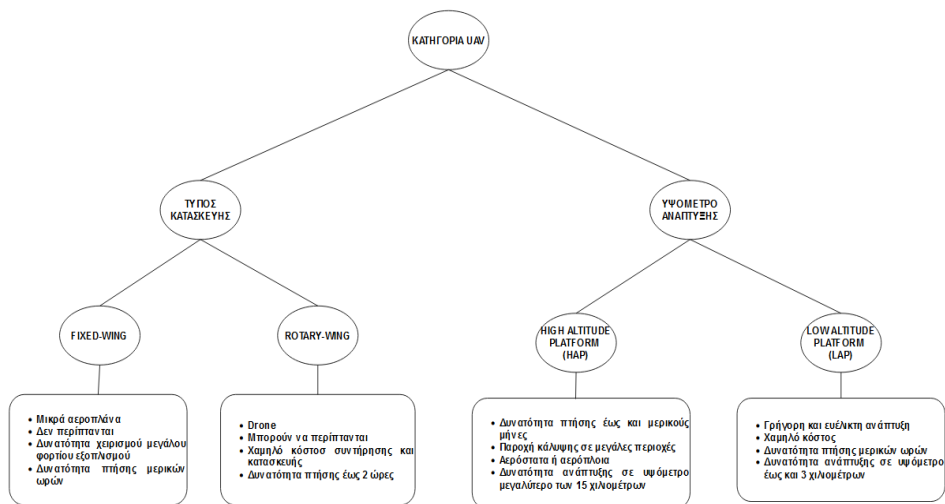
Όσων αφορά το υψόμετρο τοποθέτησης, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη χωρίζονται στις πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (High Altitude Platform-HAP) και στις πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου (Low Altitude Platform-LAP).

- **High Altitude Platform (HAP):** Σε αυτή την κατηγορία, το υψόμετρο ανάπτυξης ξεπερνάει τα 15 χιλιόμετρα και η περιοχή που τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι δυνατόν να καλύψουν είναι μεγάλη. Σε αυτό το υψόμετρο, ο τύπος των μη επανδρωμένων αεροσκαφών που χρησιμοποιείται είναι τα αερόστατα ή αερόπλοια, τα οποία μπορούν να παραμείνουν ανεπτυγμένα για πολλές μέρες ή μήνες, με μικρές αλλαγές θέσης.
- **Low Altitude Platform (LAP):** Ως LAP, αναφερόμαστε στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη τα οποία έχουν την δυνατότητα να αναπτυχθούν σε χαμηλότερα υψόμετρα, που δεν ξεπερνάνε τα 3 χιλιόμετρα. Τα προτερήματα των LAP, είναι η γρήγορη και οικονομική ανάπτυξη τους στον χώρο, ενώ είναι ευέλικτα κατά την μετακίνησή τους από περιοχή σε περιοχή. Στο επίπεδο του χρόνου, ανάλογα με τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά (μπαταρία, δομή των φτερών) τα LAP μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι δυνατόν να παρέχουν υπηρεσίες για κάποιες ώρες.

Η δεύτερη κατηγοριοποίηση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, γίνεται ανάλογα τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά σε επίπεδο διαθέσιμης ενέργειας και δομής των φτερών τους, ενώ κυρίως αφορά LAP αεροσκάφη.

- **Fixed-Wing:** Τέτοιου είδους αεροσκάφη, υπάγονται στην κατηγορία των μικρών αεροπλάνων. Συγκεκριμένα, έχουν την δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλων ταχυτήτων, με την κάλυψη περιοχών να γίνεται άμεσα και αποδοτικά, καθώς είναι δυνατόν να μεταφέρουν μεγάλα φορτία και εξοπλισμό (πχ τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό), ενώ στο επίπεδο του χρόνου, είναι δυνατόν να παραμείνουν ανεπτυγμένα για αρκετές ώρες. Αξίζει να σημειωθεί πως τέτοιου είδους αεροσκάφη, λόγω της κατασκευής τους δεν μπορούν να υπερίπτανται σταθερά πάνω από μια γεωγραφική περιοχή, κάτι που ανάλογα τις υπηρεσίες που χρειάζεται να προσφέρουν καταλήγει να είναι μειονέκτημα.
- **Rotary- Wing:** Σε αυτή την κατηγορία κατατάσσονται μη επανδρωμένα αεροσκάφη, τα οποία ονομάζουμε Drone. Η δυνατότητα να υπερίπτανται σταθερά πάνω από μια γεωγραφική περιοχή, παράλληλα με το χαμηλό κόστος συντήρησης, ανάπτυξης και κατασκευής, τα κάνει να είναι τα πλέον κατάλληλα για υπηρεσίες όπως η τηλεπικοινωνιακή κάλυψη περιοχών. Τα Drone, λόγω της μικρής μπαταρίας που διαθέτουν παρέχουν μικρό χρονικό διάστημα υπηρεσιών, το οποίο δεν ξεπερνά τις 2 ώρες, για αυτό τον λόγο, απαιτείται η δημιουργία στρατηγικών, έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται και να αναπτύσσονται με όσο το δυνατόν βέλτιστο τρόπο. Η σωστή διαχείριση και ανάπτυξη drone σε συστήματα όπως ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, εξασφαλίζουν μειωμένο κόστος σε επίπεδο συστήματος και βέλτιστη παροχή υπηρεσιών.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής, υλοποιεί την εξυπηρέτηση των χρηστών μέσω LAP Drones.



Σχήμα 7: Κατηγορίες Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

4.2 Μη επανδρωμένα Αεροσκάφη και τηλεπικοινωνιακά δίκτυα

Στις μέρες μας, οι απαιτήσεις των χρηστών σε ότι αφορά τα συστήματα τηλεπικοινωνιών όλο και αυξάνονται. Η χωρητικότητα των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, ακολουθεί με δυσκολία τον αυξανόμενο ρυθμό των χρηστών που χρίζουν κάλυψης, κάτι που απαιτεί αναζήτηση

τεχνικών βελτίωσης των συστημάτων αυτών, με παράλληλη εξασφάλιση όσο το δυνατόν χαμηλότερου κόστους. Πρέπει να αναφερθεί πως, μια άπληστη αύξηση του αριθμού των σταθμών βάσης για την παροχή κάλυψης εγείρει περισσότερα προβλήματα παρά λύσεις. Από την μία, αυξάνοντας τον αριθμό των σταθμών βάσης, το κόστος ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος θα εκτοξευόταν. Από την άλλη, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν πρότυπα αναγκών για τον εκάστοτε σταθμό βάσης, καθώς η κίνηση και η πυκνότητα των χρηστών μέσα σε ένα σύστημα είναι τυχαία και απρόβλεπτη. Έτσι, ακόμα και με την αύξηση των σταθμών βάσης, κάποιοι θα συνεχίζουν να έχουν μεγάλη συμφόρηση ενώ άλλοι να μην χρησιμοποιούνται καθόλου.

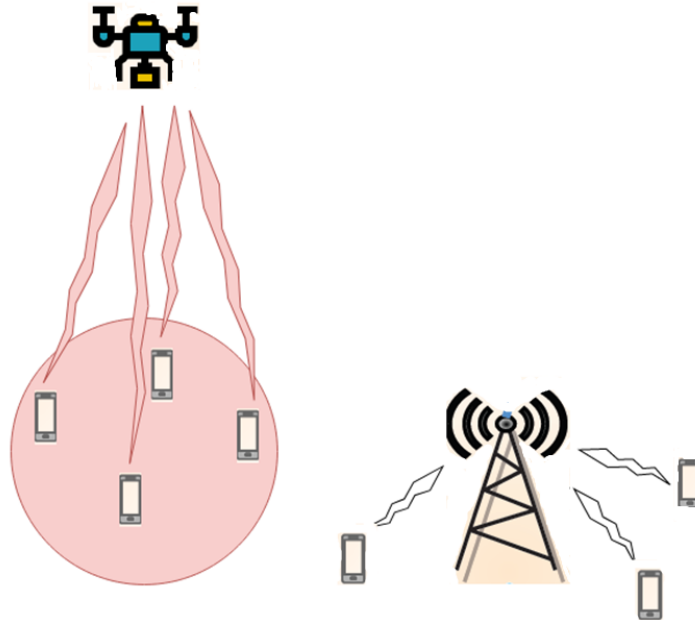
Όλα τα παραπάνω, μπορούν να αποφευχθούν αν η αποσυμφόρηση γίνεται «on-demand», ανάλογα με την κίνηση που ο εκάστοτε σταθμός βάσης έχει και την χωρητικότητα που απαιτείται να παρέχει σε περιοχές με μεγάλη και ξαφνική πυκνότητα χρηστών. Στην παρούσα διπλωματική μελετιούνται τεχνικές «on-demand» αποσυμφόρησης, με την χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε ρόλο σταθμών βάσης. Στο παρών κεφάλαιο, αναλύεται το LoS μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κάλυψης, τα προβλήματα βελτιστοποίησης που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν έτσι ώστε ένα τέτοιο σύστημα να ενσωματωθεί στον πραγματικό κόσμο, καθώς και τέσσερις αλγόριθμοι βέλτιστης τοποθέτησης, ένας UDP (UAV-BS Deployment Process), ένας KDP (K-Mean Deployment Process), ένας Mini-Batch K-Means και τέλος ένας Mean Shift. Οι παραπάνω, αποτελούν αλγόριθμους μηχανικής μάθησης όπου αναλύουν σύνολα δεδομένων μέσω τεχνικών ομαδοποίησης (Clustering)

4.3 Τηλεπικοινωνιακό μοντέλο κάλυψης χρηστών με μη επανδρωμένα αεροσκάφη

4.3.1 Υποδομή συστήματος εναέριας κάλυψης

Για να επιτευχθεί μια αποδοτική αναβάθμιση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, μέσω αποσυμφόρησης σε σημεία που είναι αναγκαία κάθε δοθείσα χρονική στιγμή, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη μέσω της κατασκευής τους προσφέρουν ευέλικτη ανάπτυξη και διαχείριση.

Τα μοντέλα που μελετάει η παρούσα διπλωματική, ενσωματώνουν τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη ως σταθμούς βάσης στο σύστημα, τα οποία αφότου αναπτυχθούν πάνω από μια περιοχή κάλυψης αναλαμβάνουν την τηλεπικοινωνιακή κάλυψη ενός πεπερασμένου αριθμού χρηστών, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αεροσκάφους, όπως η διάρκεια συνεχόμενης πτήσης, η ισχύς της μπαταρίας και η κατασκευή των φτερών, μαζί με τα χαρακτηριστικά που παραμετροποιούνται από το σύστημα, όπως ο τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός και το υψόμετρο τοποθέτησης, πρέπει να χρησιμοποιηθούν με βέλτιστο τρόπο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ποιότητα των επικοινωνιών (QoS), η εκφόρτωση των επίμαχων περιοχών και η εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχήμα 8: Μοντέλο Τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών ως σταθμούς βάσης

4.3.2 Προβλήματα και Προκλήσεις Βελτιστοποίησης

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών με σκοπό την αποσυμφόρηση τηλεπικοινωνιακών δικτύων, είναι η καθιέρωση μιας ατζέντας αποφάσεων για τους τρόπους χρήσης, ενσωμάτωσης και τοποθέτησης τους στο σύστημα. Η αρμονική εφαρμογή αυτών των τριών λειτουργιών, θα ορίσει την βέλτιστη χρήση των αεροσκαφών στο σύστημα, μέσω των οποίων οι χρήστες που είναι μέρος περιοχών με μεγάλο φόρτο θα εξυπηρετούνται με τον καλύτερο τρόπο.

Αρχικά, η απόφαση που πρέπει να παρθεί για ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, είναι ο καθορισμός του αριθμού των αεροσκαφών που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε γεωγραφική περιοχή.

Η πρώτη περίπτωση χρήσης, είναι η τοποθέτηση ενός μοναδικού μη επανδρωμένου αεροσκάφους πάνω από κάθε περιοχή που χρίζει αποσυμφόρησης. Αυτή η περίπτωση χρήσης, αποτελείται από τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες χρήζουν μελέτης έτσι ώστε να βελτιώνεται η απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, ανάλογα με την τοπολογία του εδάφους και της διασκόρπισης των χρηστών στον χώρο, η πρώτη προσέγγιση είναι ο υπολογισμός του βέλτιστου ύψους τοποθέτησης του μη επανδρωμένου αεροσκάφους, ανάλογα με την κάθε δοθείσα

περίπτωση, έτσι ώστε να πληρείται μέγιστη δυνατή ακτίνα κάλυψης στην περιοχή. Αυτή η προσέγγιση εγείρει προβλήματα κόστους στο σύστημα, καθώς η ισχύς εκπομπής του αεροσκάφους χρειάζεται να διαφέρει σε κάθε περίπτωση έτσι ώστε να μπορεί το αεροσκάφος να εξυπηρετεί τους χρήστες σε όλες τις περιπτώσεις ακτίνας κάλυψης. Για αυτό τον λόγο, η δεύτερη προσέγγιση αφορά την μείωση του κόστους στην τοποθέτηση ενός μοναδικού αεροσκάφους πάνω από κάθε περιοχή ενδιαφέροντος, κρατώντας σταθερή την ακτίνα κάλυψης και το ύψος τοποθέτησης του μη επανδρωμένου αεροσκάφους και εντούτοις μειώνοντας όσο το δυνατόν περισσότερο την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής των σημάτων προς τους χρήστες. Καθώς το μείζον πρόβλημα είναι η βελτίωση της ποιότητας των επικοινωνιών με όσο το δυνατόν λιγότερο κόστος στο σύστημα, η τρίτη προσέγγιση τοποθέτησης ενός μοναδικού μη επανδρωμένου αεροσκάφους σε κάθε γεωγραφική περιοχή αποτελείται από την αύξηση του αριθμού των χρηστών που το κάθε αεροσκάφος μπορεί να καλύψει. Αυξάνοντας τον αριθμό των χρηστών που θα εξυπηρετούνται από το αεροσκάφος, το φόρτο του κοντινότερου σταθμού βάσης μειώνεται δραματικά. Έτσι, παρόλο που οι απαιτήσεις για αναζήτηση βέλτιστου ύψους τοποθέτησης και ακτίνας κάλυψης θα αυξανόντουσαν, το συνολικό φόρτο του συστήματος μειώνεται, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του συνολικά.

Από την άλλη μεριά, υπάρχει η περίπτωση χρήσης πολλαπλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών για κάλυψη κάθε γεωγραφικής περιοχής που χρίζει αποσυμφόρησης. Με σκοπό να ελαττωθεί σημαντικά το φόρτο των σταθμών βάσης του συστήματος, ειδικά σε περιπτώσεις αστικών κέντρων, αυτή η προσέγγιση προσφέρει κάλυψη μεγαλύτερου αριθμού χρηστών και μεγαλύτερης ακτίνας εξυπηρέτησης, μειώνοντας παράλληλα την ισχύ εκπομπής του κάθε αεροσκάφους, ενώ η συνεχής ποιοτική εξυπηρέτηση των χρηστών αποτελεί εγγύηση. Αξίζει να σημειωθεί, πως η ανάπτυξη πολλαπλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών ανά περιοχή κάλυψης, χρίζει δημιουργίας μιας στρατηγικής, η οποία θα πρέπει να καλύπτει την απαίτηση της βέλτιστης χρήσης των πόρων του συστήματος. Μια τέτοια στρατηγική τοποθέτησης, είναι ικανή να χωρίζει τα κελιά του συστήματος σε πολλαπλά μικρότερα μακροκελιά (macrocells) τα οποία θα καλύπτονται είτε από σταθμούς βάσης, είτε από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, αυξάνοντας έτσι το QoS προς τους χρήστες και την εκφόρτωση του δικτύου.

Με την εξέλιξη των συστημάτων και την συνεχόμενη μελέτη των προκλήσεων και προβλημάτων που εγείρουν οι τεχνικές αποσυμφόρησης μέσω μη επανδρωμένων αεροσκαφών, είναι επιτρεπτό να συμπεράνουμε πως τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα θα βελτιώνονται όλο και περισσότερο. Μια πολύ σημαντική πτυχή τέτοιου είδους τεχνικών που δεν έχει μελετηθεί εκτεταμένα, είναι ο ρόλος των χειριστών του δικτύου, οι οποίοι θα είναι υπεύθυνοι για την σωστή χρήση των στρατηγικών τοποθέτησης των αεροσκαφών στο σύστημα. Παρότι αλγόριθμοι βασισμένοι στην μηχανική μάθηση είναι ευρέως μελετημένοι και ανεπτυγμένοι, δίνοντας την δυνατότητα σε ένα σύστημα σαν αυτό που μελετάμε να πάρει μορφή στον πραγματικό κόσμο, είναι σημαντικό οι χειριστές να μην λειτουργούν άπληστα, αναπτύσσοντας αεροσκάφη προς κάλυψη χρηστών αδιαφορώντας για την γενική εικόνα και απόδοση του δικτύου σαν σύνολο. Η ανάπτυξη αεροσκαφών σε οπουδήποτε κομμάτι του δικτύου, είναι σημαντικό να γίνεται αφότου υποδεικνύεται σθεναρά από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των αλγορίθμων του συστήματος σε επίπεδο φόρτου και κόστους. Για αυτό τον λόγο είναι σημαντική η ένταξη ενός διαχειριστή στο σύστημα σε μορφή αλγορίθμου τύπου υπεύθυνου προγράμματος («scheduler»), του οποίου μοναδικός στόχος είναι η ανάπτυξη των μη επανδρωμένων αεροσκαφών να γίνεται από τους

χειριστές σε περιοχές όπου υποδεικνύονται από τα αποτελέσματα μετρήσεων του δικτύου. Ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση, ένα μοντέλο ανάπτυξης μη επανδρωμένων αεροσκαφών όπως αυτό που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι σίγουρο πως θα βελτιώσει την ποιότητα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων στα οποία θα ενταχθεί και την ποιότητα των υπηρεσιών που θα προσφέρεται στους χρήστες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, ακολουθεί την προσέγγιση ανάπτυξης πολλαπλών μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε κάθε γεωγραφική περιοχή που χρίζει αποσυμφόρησης, με σταθερό αριθμό χρηστών που μπορούν να καλυφθούν από κάθε αεροσκάφος και σταθερό ύψος τοποθέτησης. Η βέλτιστη αξιοποίηση των παραπάνω πόρων, γίνεται μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης που είναι υπεύθυνοι να υποδείξουν τις βέλτιστες θέσεις ανάπτυξης των αεροσκαφών προς βελτίωση της συνολικής εικόνας του δικτύου. Ο παρακάτω πίνακας αποτελεί τις παραμέτρους εισόδου του δικτύου μη επανδρωμένων αεροσκαφών, οι οποίες επιλέχθηκαν με βασικό σκοπό την βελτίωση των αποτελεσμάτων

Πίνακας 3: Παράμετροι Εισόδου δικτύου UAV

Παράμετροι	Τιμές
Αριθμός UAV στο σύστημα	1-10
Αριθμός Χρηστών όπου ένα UAV μπορεί να εξυπηρετήσει	1-10
Συχνότητα	2000 MHz
Ύψος Τοποθέτησης	200 m

4.3.3 Μοντέλο Καναλιού

4.3.3.1 Pathloss συστήματος εναέριας κάλυψης

Το «Air-To-Ground» μοντέλο που υλοποιείται για τα κανάλια, αφορά την επικοινωνία του μη επανδρωμένου αεροσκάφους με τις συσκευές των χρηστών στο έδαφος και λαμβάνει υπόψιν διαφορετικές παραμέτρους υπολογισμού του pathloss, από αυτές των συστημάτων επίγειων σταθμών βάσης. Αυτές οι παράμετροι, είναι η γωνία ανύψωσης και το LoS μεταξύ του αεροσκάφους και των χρηστών (το οποίο διατηρείται για το μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων).

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει ένα μοντέλο υπολογισμού του pathloss που βασίζεται στις γωνίες ανύψωσης για τον υπολογισμό των LoS και μη ύπαρξης απευθείας συνιστώσας (Non-Line of Sight-NLoS) συνδέσεων. Ο αρχικός υπολογισμός του μοντέλου, αφορά τον υπολογισμό του pathloss ελεύθερου χώρου:

$$L_{FS} = 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(d) - 147.55,$$

(15)

όπου f η συχνότητα φορέα και d η απόσταση της ζεύξης. Έπειτα υπολογίζεται το pathloss με και χωρίς LoS [6]:

$$PL_{LoS} = L_{FS} + 20 \log_{10}(d) + \eta_{LoS} \text{ και } PL_{NLoS} = L_{FS} + 20 \log_{10}(d) + \eta_{NLoS}, \quad (16)$$

όπου d η απόσταση ζεύξης και η_{LoS} - η_{NLoS} οι παράγοντες εξασθένησης. Το μέσο pathloss της κάθε σύνδεσης για το παρών μοντέλο απαιτεί τον υπολογισμό των πιθανοτήτων LoS και NLoS συνιστωσών. Για την πιθανότητα που υπάρχει LoS ο υπολογισμός γίνεται [6]:

$$P_{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp(-b(\theta - a))}, \quad (17)$$

όπου a και b σταθερές που εξαρτώνται από το περιβάλλον που εγκαθίσταται το σύστημα και θ η γωνία ανύψωσης. Αντίστοιχα η πιθανότητα NLoS υπολογίζεται ως [6]:

$$P_{NLoS} = 1 - P_{LoS}. \quad (18)$$

Μετά τον υπολογισμό όλων των παραπάνω, στο βασισμένο στην γωνία ανύψωσης μοντέλο, το pathloss υπολογίζεται ως [6]:

$$PL_{aug} = P_{LoS} PL_{LoS} + P_{NLoS} PL_{NLoS}. \quad (19)$$

Το υπολογισμένο pathloss χρησιμοποιείται από το Rician μοντέλο διαλείψεων για τον υπολογισμό του καναλιού.

4.3.3.2 Μοντέλο Διαλείψεων Rician

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα η διάδοση των τηλεπικοινωνιακών σημάτων στον χώρο ερμηνεύεται από στατιστικά μοντέλα τα οποία ερμηνεύουν τα κανάλια επικοινωνιών ως «Gauss» μεταβλητές. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφερθήκαμε, στο μοντέλο του Rayleigh και πως αυτό αποδίδει και εφαρμόζεται σε αστικά περιβάλλοντα, εκεί δηλαδή που ο πομπός και ο δέκτης δεν διατηρούν οπτική επαφή (LoS). Όπως είναι λογικό, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες θέλουμε να υλοποιήσουμε μοντέλα συνδέσεων με οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Παραδείγματα, τέτοιων μοντέλων είναι τα εδάφους-αέρος (A₂G) τηλεπικοινωνιών, όπως αυτό που μελετάει η παρούσα διπλωματική και τα μοντέλα δορυφορικών συνδέσεων, στα οποία το μοντέλο του Rayleigh δεν θα μας έφερνε τα βέλτιστα στατιστικά αποτελέσματα. Σε τέτοιου είδους συνδέσεις, τα στοιχεία των σημάτων είναι σταθερά και δεν συναντάμε διάλεια, έτσι το μοντέλο Rician εφαρμόζεται με πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης.

Σε καταστάσεις όπου υπάρχει LoS μεταξύ πομπού και δέκτη, σήματα πολλαπλών διαδρομών φτάνουν στην κεραία του δέκτη με διαφορετική γωνία άφιξης (AoA) και ισχύ. Όπως είναι λογικό, σε αυτές τις περιπτώσεις συναντάμε ένα σήμα το οποίο ορίζεται ως κυρίαρχο, έχοντας την μεγαλύτερη ισχύ και το οποίο επικαλύπτει τα υπόλοιπα σήματα πολλαπλών διαδρομών στην κεραία του δέκτη. Με το πέρασμα του χρόνου αυτό εξασθενεί και το μοντέλο Rician έρχεται να ερμηνεύσει αυτή την αλλαγή, στατιστικά με την μορφή «Gauss» μεταβλητών. Καθώς, το μοντέλο Rician ερμηνεύει την διάδοση των σημάτων πολλαπλής διαδρομής στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα με τρόπο παρόμοιο με αυτό της διανομής Rayleigh, ορίζουμε ως γενική μορφή μοντέλων διαλείψεων αυτή του Rician, με ειδική περίπτωση σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει LoS, αυτή του μοντέλου Rayleigh.

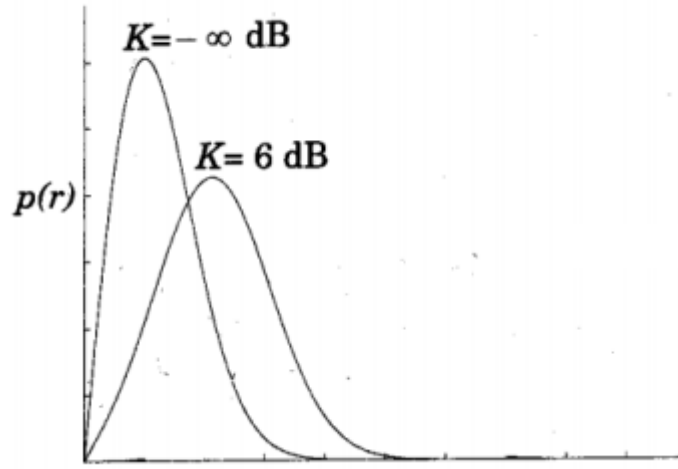
Όσον αφορά την ερμηνεία του μοντέλου, ο τύπος που μας δίνει την κατανομή Rician είναι:

$$f(x|v, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-(x^2 + v^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right), \quad (20)$$

όπου v είναι η απόσταση μεταξύ του σημείου αναφοράς και του κέντρου της κατανομής, το σ αποτελεί παράμετρο διαμόρφωσης/κλιμάκωσης και I_0 είναι η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης. Στο πλαίσιο μοντελοποίησης των διαλείψεων με τη χρήση της Rician κατανομής, θεωρώντας ύπαρξη απευθείας συνιστώσας επικοινωνίας (LoS), η κατανομή ξαναγράφεται με τη χρήση του Rician παράγοντα $K = \frac{v^2}{2\sigma^2}$, που ορίζεται ως ο λόγος των συνεισφορών ισχύος ανά διαδρομή οπτικής επαφής προς τις υπόλοιπες πολλαπλές διαδρομές και της παραμέτρου κλιμάκωσης $\Omega = v^2 + 2\sigma^2$, που ορίζεται ως η συνολική λαμβανόμενη ισχύς από όλα τα μονοπάτια. Στην περίπτωση αυτή, το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος r ακολουθεί την κατανομή Rice, με παραμέτρους $v^2 = \left[\frac{K}{(1+K)}\right] \Omega$ και $\sigma^2 = \frac{\Omega}{[2(1+K)]}$. Έτσι, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας διαμορφώνεται σε:

$$p(r) = \frac{2(K+1)r}{\Omega} \exp\left(-K - \frac{(K+1)r^2}{\Omega}\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}r\right). \quad (21)$$

Όταν ο παράγοντας K τείνει στο μηδέν, τότε η κατανομή Rice εκφυλίζεται σε Rayleigh και το κανάλι ακολουθεί την κατανομή Rayleigh με μη ύπαρξη απευθείας συνιστώσας επικοινωνίας (NLoS).



Σχήμα 9: Η κατανομή Rician, παραπομπή από [5]

4.4 Τεχνικές Βέλτιστης Τοποθέτησης

Στην παρούσα διπλωματική μελετώνται και συγκρίνονται ως προς την απόδοση τους τέσσερις αλγόριθμοι, οι οποίοι προσεγγίζουν τον υπολογισμό της βέλτιστης τοποθέτησης των μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο σύστημα μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης. Κατά την διάρκεια των υπολογισμών, οι αλγόριθμοι ξεκινούν με τυχαίες αρχικές θέσεις τοποθέτησης και με διαφορετική επαναληπτική προσέγγιση ο καθένας, υπολογίζουν τις τελικές βέλτιστες θέσεις. Έπειτα οι χρήστες που είναι στα κοντινότερα σημεία, αποσυνδέονται από τα αντίστοιχα κανάλια των σταθμών βάσης, με την τηλεπικοινωνιακή τους κάλυψη να γίνεται πλέον από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη.

4.4.1 Αλγόριθμός UDP

Ο αλγόριθμος UAV-BS Deployment Process (UDP) [10] χωρίζεται σε δυο μεγάλες φάσεις, με την πρώτη να αποτελεί την ομαδοποίηση όλων των χρηστών του συστήματος ανάλογα με την θέση τους στον χώρο. Ο αρχικός αριθμός των ομάδων, είναι το αποτέλεσμα της διαίρεσης των U χρηστών διά τον μέγιστο αριθμό χρηστών που ένα αεροσκάφος μπορεί να καλύψει N . Σε κάθε ομάδα ορίζεται ένα αρχικό σετ τυχαίων συντεταγμένων και ο κάθε χρήστης αντιστοιχείται στην

κοντινότερη ομάδα. Έπειτα υπολογίζεται η διαφορά των συντεταγμένων της κάθε ομάδας από τις συντεταγμένες του κάθε χρήστη, έτσι ώστε να διευκρινιστούν οι ανομοιομορφίες (dissimilarities) της κάθε ομάδας. Αυτός ο υπολογισμός θα μας δώσει το συνολικό κόστος C και ο υπολογισμός του είναι

$$c = \sum_{C_i} \sum_{P_i \in C_i} |P_i - C_i| \quad (21)$$

όπου C_i οι συντεταγμένες της ομάδας i και P_i οι συντεταγμένες του κάθε χρήστη που ανήκει στην i ομάδα.

Στο επόμενο βήμα ο αλγόριθμος ορίζει νέες συντεταγμένες στην κάθε ομάδα, οι οποίες θα είναι ίσες με αυτές της θέσης ενός τυχαίου χρήστη και επαναλαμβάνει τους παραπάνω υπολογισμούς, των κοντινότερων χρηστών και τον υπολογισμό του κόστους. Η αλλαγή στις συντεταγμένες της ομάδας κρατιέται μόνο εάν το νέο κόστος είναι χαμηλότερο σε τιμή από το προηγούμενο.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχόμενα μέχρι ο αλγόριθμος να συγκλίνει. Μέχρι δηλαδή η διαφορά του κόστους ενός υπολογισμού με το κόστος του ακριβός προηγούμενου υπολογισμού να τείνει στο μηδέν. Όταν αυτό συμβεί, ο αλγόριθμος μηχανικής μάθησης θα έχει με επιτυχία υπολογίσει τις συντεταγμένες που τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη θα πρέπει να τοποθετηθούν, έτσι ώστε να επιτευχθεί βέλτιστη κάλυψη και αποσυμφόρηση.

Η δεύτερη φάση του αλγορίθμου, αποτελεί την επιλογή των τελικών ομάδων χρηστών που θα πρέπει τελικά να καλυφθούν από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, μαζί με τις αντίστοιχες συντεταγμένες που το κάθε αεροσκάφος θα πρέπει να αναπτυχθεί, για την επίτευξη της βέλτιστης τοποθέτησης. Σε αυτή την φάση ο αλγόριθμος υπολογίζει το βάρος της κάθε ομάδας

$$WS_k = an_k + (1 - a)d_k \quad (22)$$

όπου, a ένας συντελεστής στάθμισης από 0 έως 1, n_k ο αριθμός των χρηστών που αποτελούν την ομάδα k και d_k η απόσταση του κέντρου της ομάδας k από το κοντινότερο κελί του συστήματος. Τα υπολογισμένα βάρη ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά και από αυτά επιλέγονται τα D πρώτα, όπου D ο αριθμός των διαθέσιμων μη επανδρωμένων αεροσκαφών που το σύστημα έχει στην διάθεση σου την χρονική στιγμή μελέτης.

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, αναπτύσσονται στις συντεταγμένες των πρώτων D ομάδων και παρέχουν τηλεπικοινωνιακή κάλυψη στον μέγιστο αριθμό N χρηστών της κάθε ομάδας που είναι δυνατόν να καλύψουν. Παρακάτω παρατίθεται η αναλυτική μορφή UDP αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

Algorithm II [10] : UAV-BS Deployment Process

1. **Input:** Number of UEs U , N Number of maximum users that a single UAV can serve.
2. Calculate the number of initial clusters $K = U/N$.
3. **For each** cluster K **do**
4. Choose random initial medoids for each cluster.
5. **End for**
6. **For each** UE U **do**
7. Assert each user to the closer cluster.
8. **End for**
9. Calculate the initial within each cluster dissimilarities.
10. Calculate the cost based on the dissimilarities and summarize to $C[1]$.
11. **Repeat**
12. $C[0] = C[1]$.
13. **For each** cluster K **do**
14. **For each** UE U **do**
15. Swap the UE coordinates with the medoids of the cluster.
16. **For each** UE U **do**
17. Assert each user to the closer cluster.
18. **End for**
19. Calculate the within cluster dissimilarities.
20. Calculate the new cost and store it to A .
21. **If** $C < C[1]$ **then**
22. Keep the swap.
23. $C[1] = C$.
24. **End if**
25. **End for**
26. **End for**
27. **Until** $C[0] - C[1] < 10^{-6}$
28. **For each** cluster K **do**
29. Calculate the weight score W_{SK} of each cluster.
30. **End for**
31. Sort the weight scores in descending order.
32. Get the D number of available UAV-BS that are ready to be deployed.
33. From the sorted weight scores pick the first D .
34. **Output** the D clusters with their medoids where the available UAV-BS should be deployed, along with the UEs of each cluster that must be offloaded based on N .

4.4.2 Αλγόριθμος KDP

Ο δεύτερος αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι ο K-Means Deployment Process (KDP). Όπως και ο UDP, χωρίζεται σε δύο φάσεις με την πρώτη να ξεκινάει με τον χωρισμό των χρηστών σε ομάδες.

Αρχικά υπολογίζεται ο K αριθμός των ομάδων που θα χωριστούν όλοι οι χρήστες του συστήματος (ομοίως με τον UDP, αριθμός χρηστών διά τον αριθμό χρηστών που μπορεί να καλύψει ένα αεροσκάφος) και στην κάθε ομάδα ορίζεται τυχαίο σεντ συντεταγμένων. Έπειτα οι χρήστες κατανέμονται στις κοντινότερες ομάδες και υπολογίζεται η μέση τιμή των συντεταγμένων τους. Η μέση αυτή τιμή, αποτελεί το νέο σεντ συντεταγμένων για το κεντρικό σημείο της ομάδας και υπολογίζεται

$$C_i = \frac{\sum_{x_i \in S_i} x_i}{S_i} \quad (23)$$

όπου S_i ο αριθμός των χρηστών που ανήκουν στην ομάδα. Έχοντας πλέον η κάθε ομάδα νέες συντεταγμένες, επιλέγεται εκ νέου για τον κάθε χρήστη η κοντινότερη ομάδα στην οποία και κατανέμεται. Ο υπολογισμός της μέσης τιμής των συντεταγμένων των χρηστών επαναλαμβάνεται και υπολογίζεται εκ νέου το νέο κέντρο της ομάδας.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να μην γίνονται αλλαγές και ο αλγόριθμος να συγκλίνει. Συγκεκριμένα η επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου σταματάει όταν η κάθε ομάδα δεν αλλάζει κεντρικό σημείο και έτσι οι αντίστοιχοι ομαδοποιημένοι χρήστες της παραμένουν οι ίδιοι.

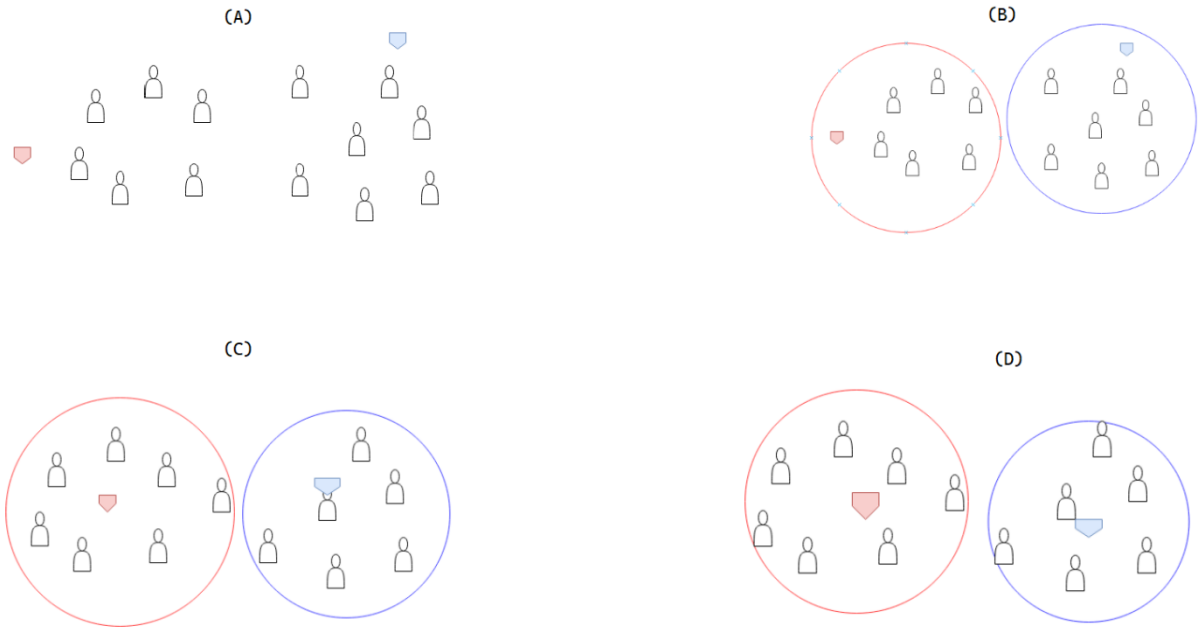
Στην δεύτερη φάση του KDP υπολογίζεται το βάρος της κάθε ομάδας (ομοίως με τον UDP)

$$WS_k = an_k + (1 - a)d_k \quad (24)$$

όπου, a ένας συντελεστής στάθμισης από 0 έως 1, n_k ο αριθμός των χρηστών που αποτελούν την ομάδα k και d_k η απόσταση του κέντρου της ομάδας k από το κοντινότερο κελί του συστήματος. Όπως με τον UDP, ο αλγόριθμος ταξινομεί σε φθίνουσα σειρά τα υπολογισμένα βάρη και επιλέγει τα D με το μεγαλύτερο βάρος, όπου D ο αριθμός των διαθέσιμων αεροσκαφών του δικτύου. Εν κατακλείδι, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη αναπτύσσονται στις βέλτιστες υπολογισμένες συντεταγμένες της κάθε ομάδας, προσφέροντας παράλληλα κάλυψη στον μέγιστο αριθμό N χρηστών της κάθε ομάδας. Η αναλυτική μορφή του αλγορίθμου KDP που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας φαίνεται παρακάτω.

Algorithm III: K-Mean Deployment Process

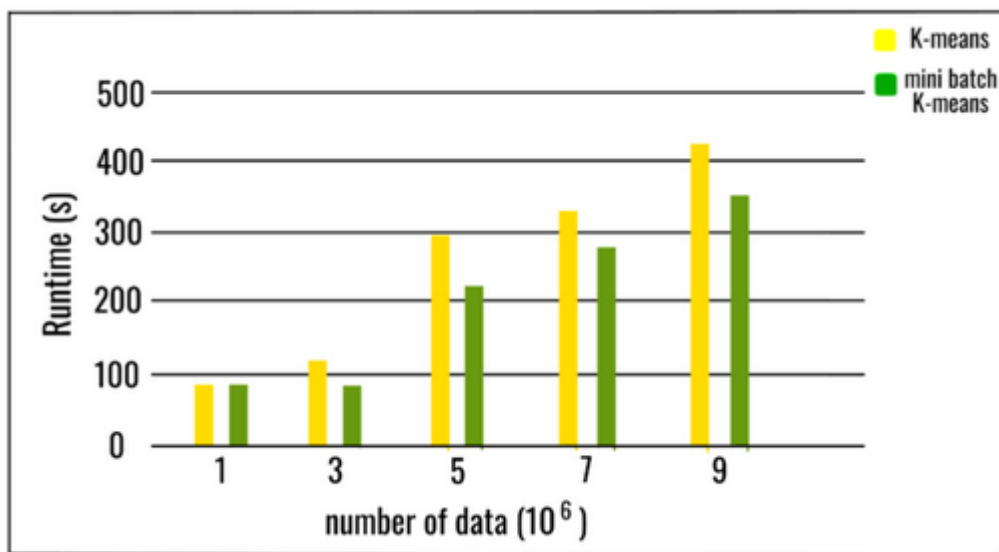
1. **Input:** Number of UEs U , N Number of maximum users that a single UAV can serve.
2. Calculate the number of initial clusters $K = U/N$.
3. Choose random initial medoids for each cluster.
4. **Repeat**
5. **For each UE U do**
6. Assert each user to the closest cluster.
7. **End for**
8. **For each cluster K do**
9. Calculate the mean medoids from the locations of assigned UEs.
10. Set them as new medoids for the cluster.
11. **End for**
12. **For each UE U do**
13. Assert each user to the closest cluster.
14. **End for**
15. **Until** Convergence
16. **For each cluster K do**
17. Calculate the weight score W_{SK} of each cluster.
18. **End for**
19. Sort the weight scores in descending order.
20. Get the D number of available UAV-BS that are ready to be deployed.
21. From the sorted weight scores pick the first D .
22. **Output** the D clusters with their medoids where the available UAV-BS should be deployed, along with the UEs of each cluster that must be offloaded based on N .



Σχήμα 10: (A) Υπολογισμός τυχαίων θέσεων, (B) Ομαδοποίηση χρηστών, (C) Υπολογισμός κεντρικού σημείου και εκ νέου ομαδοποίηση χρηστών, (D) Υπολογισμός κεντρικού σημείου

4.4.3 Αλγόριθμος Mini Batch K-Means

Σε συστήματα που υλοποιούν διαδικασίες μέσω του K-Means αλγόριθμου μηχανικής μάθησης, παρατηρείται μείωση της απόδοσης στο επίπεδο του χρόνου, όσο ο αριθμός των δεδομένων που αναλύονται αυξάνεται. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης μιας βελτιωμένης μορφής του K-Means με σκοπό την μείωση του χρονικού κόστους. Η πιο διαδεδομένη βελτιωμένη μορφή του K-Means είναι ο αλγόριθμος μηχανικής μάθησης Mini Batch K-Means, ο οποίος δοθέντος ενός συνόλου, χωρίζει τα δεδομένα σε δέσμες σταθερού μεγέθους για την πιο άμεση ανάλυση τους. Συγκεκριμένα, κατά την επαναληπτική διαδικασία, λαμβάνεται ένα νέο δείγμα δεδομένων κάθε φορά, πετυχαίνοντας έτσι πιο γρήγορη διαμόρφωση των ομάδων (clusters). Η ανάλυση, ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία με αυτή του K-Means, με το κεντρικό σημείο της κάθε ομάδας να υπολογίζεται από την μέση τιμή των συντεταγμένων των δεδομένων, με την βασική διαφορά ότι λαμβάνονται υπόψιν μόνο τα δεδομένα της εκάστοτε δέσμης ανά επανάληψη. Αξίζει να σημειωθεί πως, καθώς το σύνολο των δεδομένων που ένα σύστημα καλείται να αναλύσει αυξάνεται, αναλύσεις έχουν δείξει πως ο Mini Batch K-Means παρέχει χρόνο εκτέλεσης 6.6667% μικρότερο από τον χρόνο εκτέλεσης του K-Means στο ίδιο σύνολο δεδομένων.



Σχήμα 11: Χρονική Σύγκριση K-Means & Mini-Batch K-Means βάση συνόλου δεδομένων από [2]

Ο Mini Batch K-Means επιλέχθηκε, με σκοπό την σύγκριση και την ανάλυση του βελτιωμένου χρόνου εκτέλεσης του, με τον K-Means αλγόριθμο μηχανικής μάθησης, καθώς και κατά πόσο είναι εφικτή η δημιουργία βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης UAV-BS. Η αναλυτική μορφή του αλγορίθμου Mini Batch K-Means όπου αναπτύχθηκε για τον προσομοιωτή, φαίνεται παρακάτω

Algorithm IV [2] : Mini Batch K-Means Deployment Process

1. **Input:** Number of UEs U , N Number of maximum users that a single UAV can serve, Number I of iterations, Batch Size.
2. Choose random initial medoids for each cluster in D .
3. Assert each UE to the closest cluster.
4. **For Each** I in Iterations **do**
5. **For each** until batch size **do**
6. Take random UEs and assert them to the batch.
7. **End for**
8. **For each** UE in Batch **do**
9. Assert each UE to the closest cluster.
10. **End for**
11. **For each** cluster K **do**
12. Calculate the mean from all the coordinates and update the medoid.
13. **End for**
14. **End for**
15. **Output** the D clusters with their medoids where the available UAV-BS should be deployed, along with the UEs of each cluster that must be offloaded based on N .

4.4.4 Αλγόριθμος *Mean Shift*

Ο τελευταίος αλγόριθμος μηχανικής μάθησης που αναπτύχθηκε, είναι ο «Mean-Shift», ο οποίος υλοποιεί επίσης ανάλυση δεδομένων μέσω τεχνικών «Clustering». Είναι γνωστός, ως αλγόριθμος αναζήτησης πυκνότητας καθώς βασίζεται στην ομαδοποίηση των δεδομένων ανάλογα με την πυκνότητα τους στον χώρο. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος επαναληπτικά δημιουργεί ένα τυχαίο σημείο, στο οποίο ανάλογα με την θέση τους στον χώρο, αναθέτονται τα κοντινότερα δεδομένα. Βάση ενός συγκεκριμένου ορίου απόστασης το οποίο ονομάζεται παράθυρο, το κεντρικό σημείο μετακινείται προς την κατεύθυνση με την μεγαλύτερη πυκνότητα δεδομένων. Αξίζει να επισημανθεί, πως η μεγαλύτερη διαφορά του Mean-Shift από τον K-Means, είναι ότι ο Mean-Shift δεν απαιτεί στην αρχικοποίηση των παραμέτρων του, να προσδιοριστεί ο ακριβής αριθμός των επιθυμητών Cluster που χρειάζεται να δημιουργηθούν καθώς υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί ο βέλτιστος αριθμός τους κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Algorithm V [1] : Mean Shift Deployment Process

1. **Input:** Number of UEs U , N Number of maximum users that a single UAV can serve and the window size (dimensions).
2. Initialize an empty container of clusters K .
3. **Repeat**
4. Initialize a cluster with a random medoid.
5. Find the UEs that are inside the window of the cluster and assert them to the cluster.
6. Calculate the mean from all the coordinates of UEs and update the medoid of the cluster.
7. Find the UEs that are inside the window under the new medoid of the cluster.
8. Calculate the mean from all the coordinates and update the medoid.
9. **For each** cluster K **do**
10. **If** new medoid equals K medoid **then**
11. Set flag as not accepted
12. **End If**
13. **End For**
14. **If** accepted **then**
15. Keep the new cluster.
16. **End if**
17. **Until** Clusters $K=10$
18. **Output** the 10 clusters with their medoids where the available UAV-BS should be deployed, along with the UEs of each cluster that must be offloaded based on N .

5

Προσομοιώσεις και

αποτελέσματα

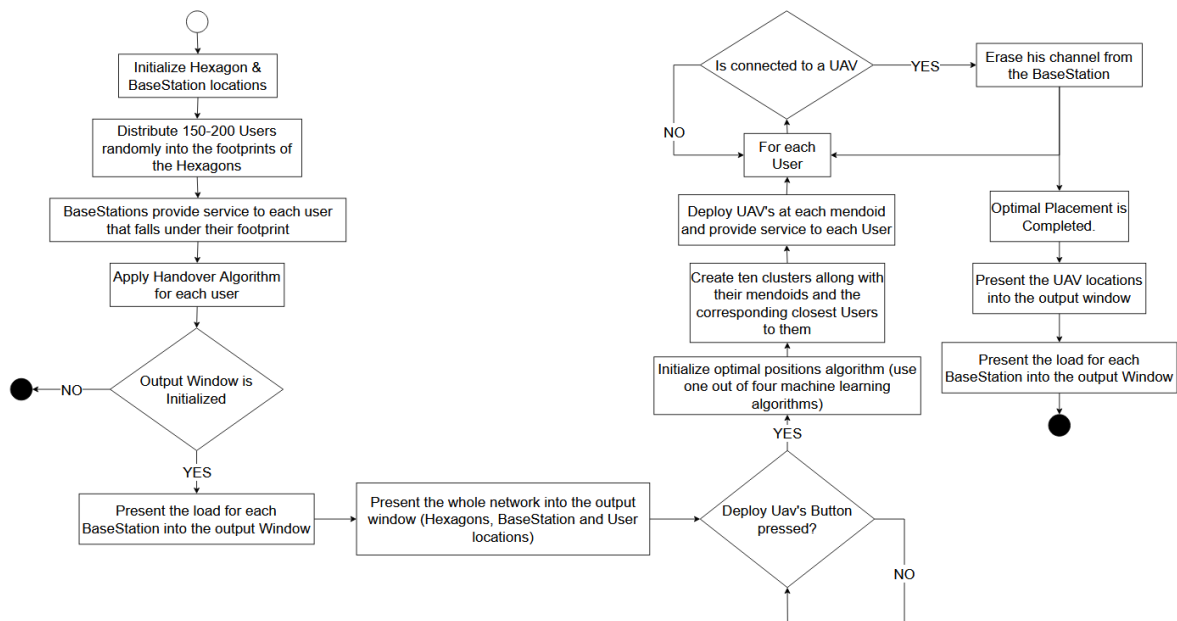
5.1 Προσομοιωτής Τηλεπικοινωνιακού Δικτύου

Για τον σκοπό της εκτεταμένης μελέτης των τεχνικών βέλτιστης τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών, υλοποιήθηκε ένας προσομοιωτής τηλεπικοινωνιακού δικτύου με δέκα μακροκυσέλες. Το περιβάλλον της προσομοίωσης υλοποιεί μια μεσαίου μεγέθους πόλη με 500 κτήρια ανά μονάδα επιφάνειας.

Ακολουθώντας το πρότυπο LTE-A, στο κέντρο κάθε κυψέλης τοποθετήθηκαν σταθμοί βάσης, με το ύψος των κεραιών τους (h_B) να είναι 35 μέτρα, η συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης τους (f_B) στα 2000MHz, ενώ για τον υπολογισμό των καναλιών, το pathloss υλοποιήθηκε με το COST-231 μοντέλο του HATA και η διάλεια με το μοντέλο του Rayleigh. Οι σταθμοί βάσης της προσομοίωσης, προσέφεραν τηλεπικοινωνιακή κάλυψη στους 150-200 τυχαία καταναμεμένους στον χώρο χρήστες, των οποίων οι κεραιές έχουν ύψους h_{UE} από 1 έως 10 μέτρα. Ακόμα οι πιθανές μεταβιβάσεις των χρηστών από έναν σταθμό σε έναν άλλο, υλοποιήθηκαν με ένα Interference-Aware μοντέλο, κατάλληλο για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα LTE-A που προσφέρει μεγάλη ενεργειακή απόδοση στο σύστημα. Για το μοντέλο των μεταβιβάσεων και τον υπολογισμό του SINR, χρησιμοποιήθηκε κέρδος κεραίας λήψης χρηστών (G_r) στα 0 dBi, κέρδος κεραίας εκπομπής σταθμού βάσης (G_t^B) στα 15 dBi, θόρυβος (N) 4 και κατώφλι ισχύος λαμβανόμενου σήματος αναφοράς $RSRP_{th}$ -100 dBm.

Όσον αφορά τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, ο αριθμός που το σύστημα έχει στην διάθεση του για ανάπτυξη είναι από 1 έως 10, ενώ το κάθε αεροσκάφος μπορεί να καλύψει από 1 έως 10 χρήστες. Για τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, υλοποιήθηκε ένα A2G LAP μοντέλο, όπου ο υπολογισμός του pathloss βασίζεται σε ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψιν την γωνία ανύψωσης, ενώ η διάλεια ενσωματώνει το μοντέλο του Rician, ιδανικό για LoS συνδέσεις. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη υλοποιούν συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης (f_{UAV}) στα 2000 MHz, ενώ σαν σταθερό υψόμετρο τοποθέτησης (h_{UAV}) έχουν τα 200 μέτρα.

Για τους σκοπούς της σύγκρισης και της μελέτης, υλοποιήθηκαν οι τέσσερις αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για την βέλτιστη τοποθέτηση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ένα διάγραμμα ροής και οι παράμετροι εισόδου του προσομοιωτή αθροιστικά παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.



Σχήμα 12: Διάγραμμα Ροής Προσομοιωτή

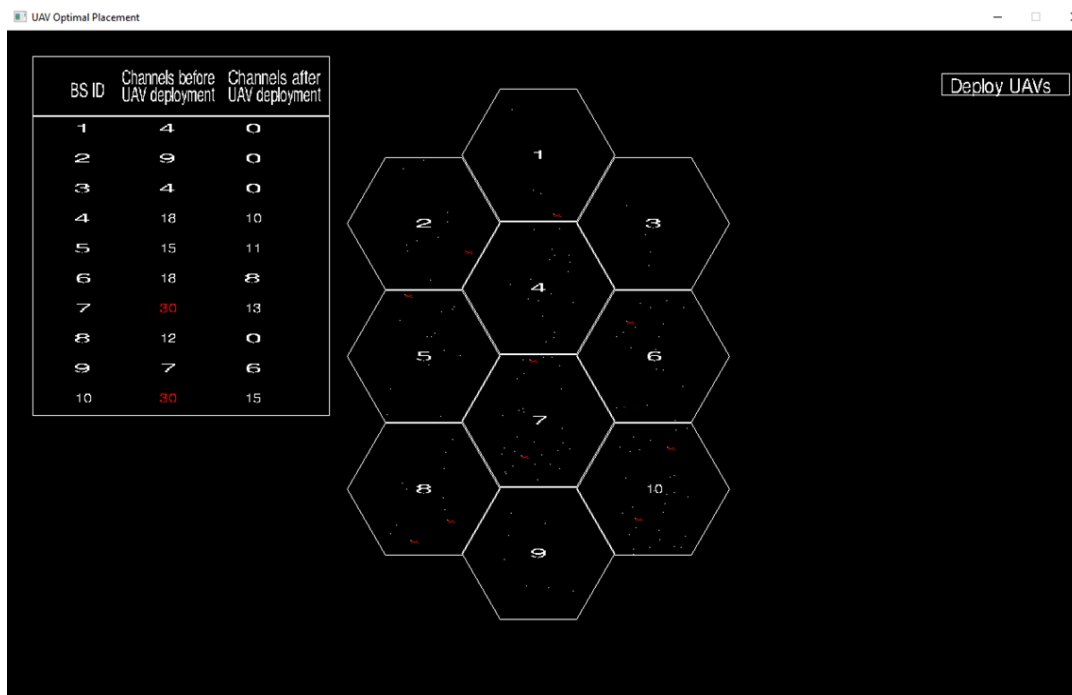
Πίνακας 4: Παράμετροι Προσομοιωτή

<u>Παράμετροι</u>	<u>Τιμές</u>
Αριθμός Μακροκυψελών (M_B)	10
Συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης Σταθμού βάσης (f_B)	2000 MHz
Ύψος Κεραίας Σταθμού Βάσης (h_B)	35 m
Παράγοντας του COST231-HATA pathloss (C)	0
Αριθμός Χρηστών	150-200
Ύψος Κεραίας Χρήστη h_{UE}	1-10 m
Αριθμός μη επανδρωμένων αεροσκαφών UAV	1-10
Αριθμός χρηστών που ένα UAV μπορεί να καλύψει	1-10
Συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης UAV (f_{UAV})	2000 MHz
Ύψος τοποθέτησης UAV (h_{UAV})	200 m
Αναλογία Δομών Περιβάλλοντος	0.5
Κτήρια ανά μονάδα επιφάνειας	500
Σταθερά περιβάλλοντος α	250
Σταθερά περιβάλλοντος β	50
Παράγοντας εξασθένησης με LoS n_{LoS}	1
Παράγοντας εξασθένησης χωρίς LoS n_{NLoS}	20
Περιβάλλον Προσομοίωσης	Αστικό Περιβάλλον
Ισχύς εκπομπής Σταθμού Βάσης P_{rs}^B	43 dBm
Ισχύς εκπομπής UAV P_{rs}^{UAV}	23 dBm
Pathloss Μοντέλο Σταθμού Βάσης	Μοντέλο COST-231 HATA
Pathloss Μοντέλο UAV	Μοντέλο γωνίας ανύψωσης
Handover Μοντέλο	Βασισμένο στις παρεμβολές
Κέρδος Κεραίας Λήψης Χρήστη UE G_r	0 dBi
Κέρδος Κεραίας Εκπομπής Σταθμού Βάσης G_t^B	15 dBi
Κέρδος Κεραίας Εκπομπής UAV G_t^{UAV}	0 dBi
Θόρυβος N	4
Κατώφλι Ισχύος Λαμβανόμενου Σήματος Αναφοράς $RSRP_{th}$	-100 dBm

5.2 Προσομοιώσεις και Αλγοριθμικά αποτελέσματα

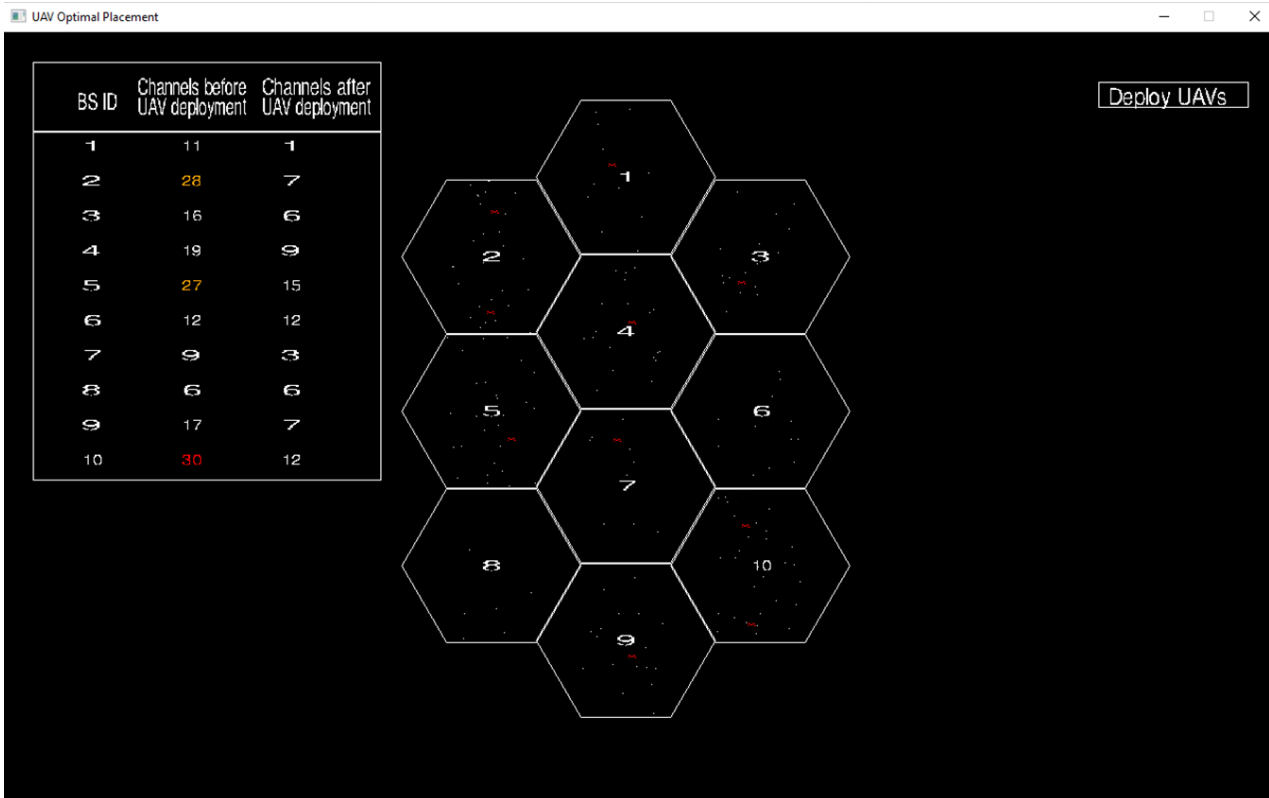
Σε αυτή την παράγραφο αναλύονται τα αποτελέσματα που παράξε ο προσομοιωτής της διπλωματικής εργασίας με την χρήση των τεσσάρων ξεχωριστών αλγορίθμων βέλτιστης τοποθέτησης που υλοποιήθηκαν. Οι προσομοιώσεις που τα αποτελέσματα τους φαίνονται και αναλύονται παρακάτω, από μεριάς σύνδεσης μεταξύ σταθμών βάσης και χρηστών, χρησιμοποιούν τον προκαθορισμένο αλγόριθμο μεταπομπής χρηστών ανά τα κανάλια του δικτύου εφόσον αυτό χρειάζεται (μοντέλο με προσοχή στις παρεμβολές), όπως και τα προκαθορισμένα μοντέλα υπολογισμού καναλιού και Pathloss (διάλεια Rayleigh & COST-231 HATA μοντέλο για το pathloss). Ακόμα για την σύνδεση των αεροσκαφών με τους χρήστες, χρησιμοποιούνται τα προκαθορισμένα μοντέλα καναλιού και Pathloss (διάλεια Rician & Μοντέλο υπολογισμού του pathloss βασισμένο στην γωνία ανύψωσης).

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης δέκα μακροκυψελών, με 150 τυχαία κατανομημένους χρήστες (άσπρες θέσεις). Ο πίνακας, υποδηλώνει το φόρτο του κάθε σταθμού βάσης πριν και μετά την ανάπτυξη μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο περιβάλλον προσομοίωσης. Παρατηρούμε, πως τα κελιά νούμερο 7 και 10 είναι κατά πολύ επιμορφωμένα σε σχέση με τους υπόλοιπους. Συγκεκριμένα, τα κανάλια που προσφέρουν οι σταθμοί βάσης των κυψελών 7 και 10 είναι από 12 έως και 26 περισσότερα σε σύνολο, σε σχέση με τον αριθμό καναλιών των υπόλοιπων 8 κυψελών (και εντούτοις σταθμών βάσης) του δικτύου. Για την αποσυμφόρηση του δικτύου της παρακάτω προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε UDP αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης, ο οποίος ανέπτυξε δέκα μη επανδρωμένα αεροσκάφη με σκοπό την αποσυμφόρηση των κυψελών. Μελετώντας τις θέσεις των αεροσκαφών που όρισε ο UDP (κόκκινες θέσεις), παρατηρούμε την τοποθέτηση να βελτιώνει την γενική εικόνα του δικτύου, ορίζοντας τις θέσεις των αεροσκαφών είτε πάνω από σημεία με πολλούς χρήστες είτε στα σύνορα των κυψελών δίνοντας μας έτσι την πραγματική μορφή βέλτιστης τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών και αποσυμφόρησης ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου.



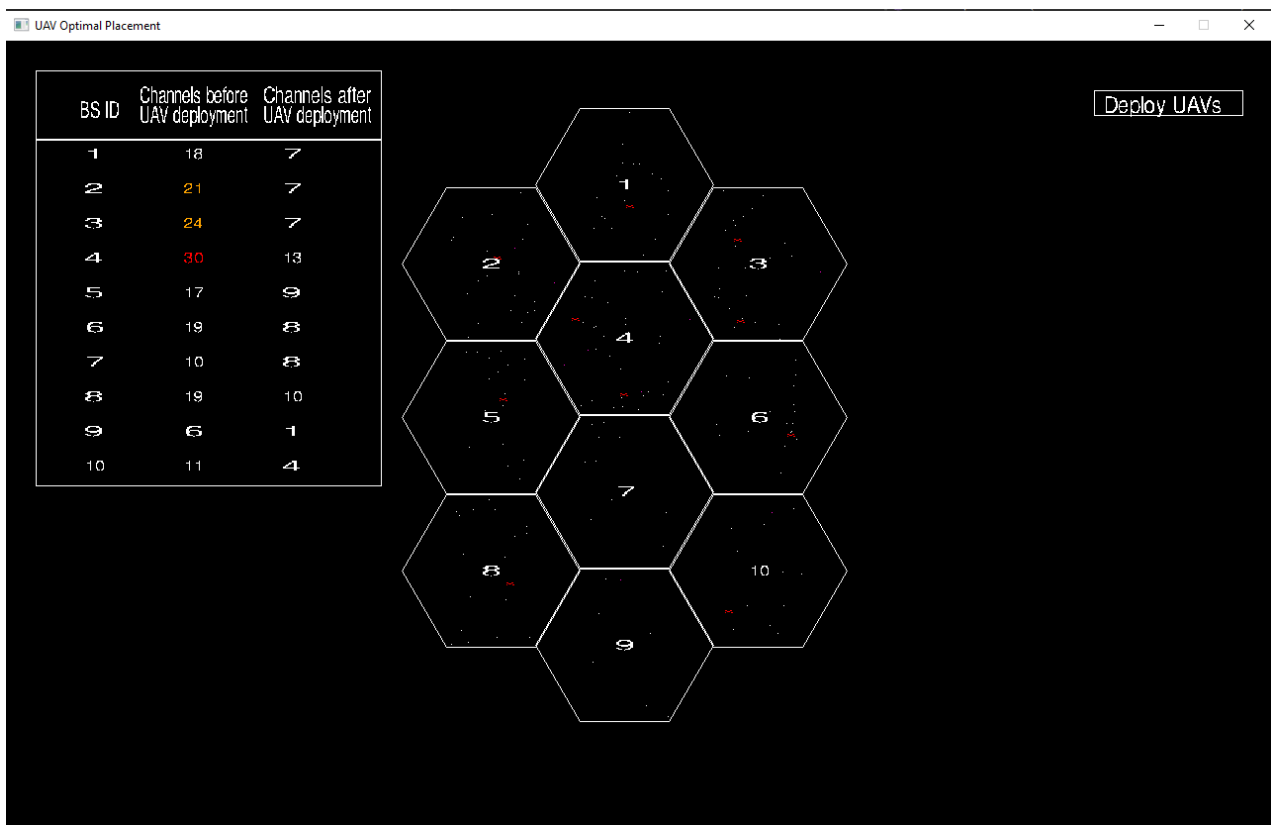
Σχήμα 13: Αποτελέσματα προσομοίωσης με UDP τοποθέτηση

Η δεύτερη προσομοίωση που παρατίθενται με σκοπό την μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή υλοποιείται με KDP αλγόριθμο τοποθέτησης, στην οποία παράχθηκε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο δέκα μακροκυψελών, με 175 τυχαία κατανομημένους χρήστες στις άσπρες θέσεις του δικτύου. Μελετώντας τον πίνακα φόρτου των κυψελών, παρατηρείται μεγάλη συμφόρηση σε τρεις από τις 10 κυψέλες (2, 5 και 10). Η παρακάτω προσομοίωση υλοποιεί τον αλγόριθμο βέλτιστης τοποθέτησης KDP, ο οποίος ανέπτυξε 10 μη επανδρωμένα αεροσκάφη στις κόκκινες θέσεις του δικτύου. Παρατηρούμε μια σημαντική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα του KDP από τον UDP. Συγκεκριμένα, λόγω του τρόπου υπολογισμού των βέλτιστων θέσεων, δηλαδή με την μέση τιμή των συντεταγμένων κάθε ομάδας χρηστών, παρατηρούμε την τοποθέτηση των αεροσκαφών να γίνεται κατά κύριο λόγο πάνω από σημεία με πυκνό αριθμό χρηστών. Μπορούμε λοιπόν να καταλάβουμε πως ο KDP είναι λίγο πιο άπληστος αλγόριθμος μηχανικής μάθησης, καθώς από την μια αποσυμφορίζει επιτυχώς τα φορτωμένα κελιά του δικτύου, άλλα οι θέσεις που τελικά επιλέγονται εξαρτώνται περισσότερο από την θέση των χρηστών στην τοπολογία του δικτύου και λιγότερο από την γενική βελτίωση της εικόνας του δικτύου (επιλογή θέσεων σε συννοριακές περιοχές των κελιών).



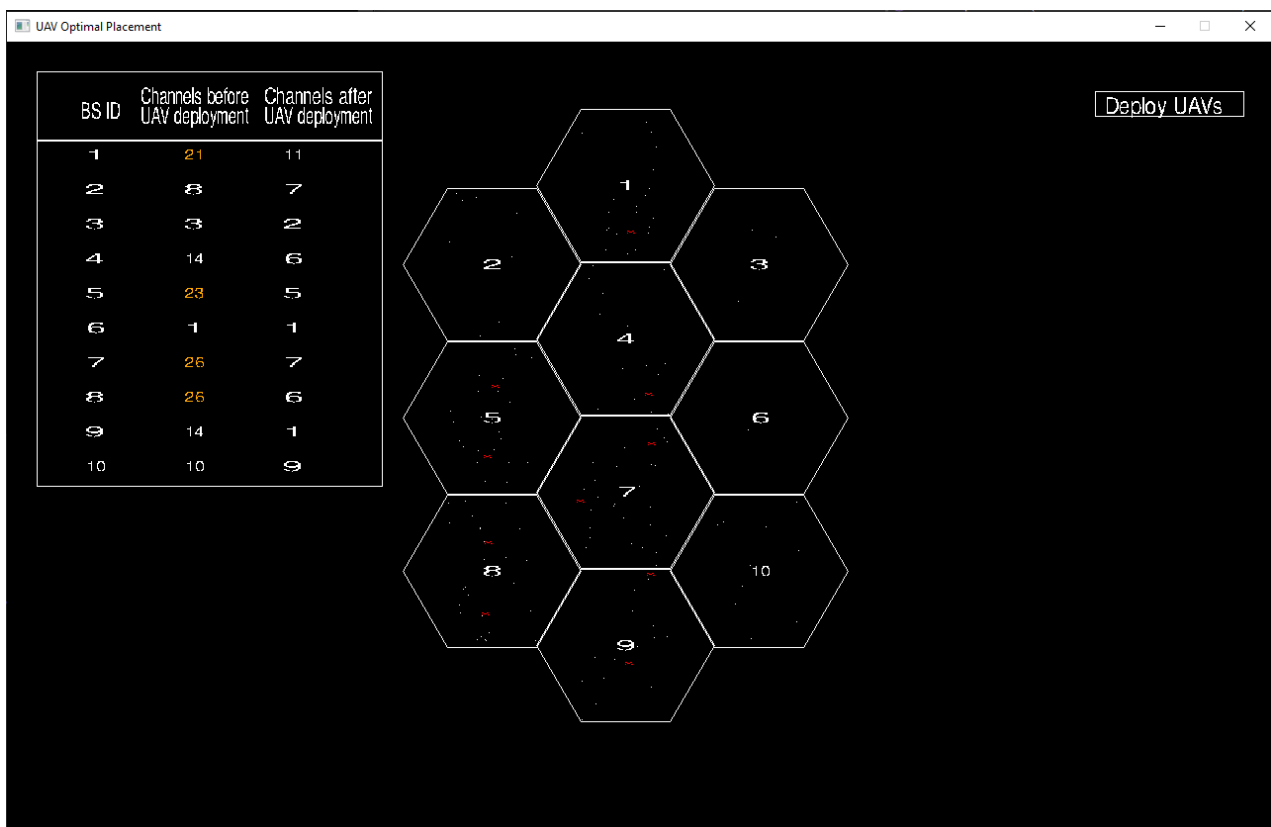
Σχήμα 14: Αποτελέσματα προσομοίωσης με KDP τοποθέτηση

Παρακάτω, φαίνεται η τρίτη προσομοίωση που παρατίθενται με σκοπό την μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή, η οποία υλοποιεί την βέλτιστη τοποθέτηση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο σύστημα μέσω του Mini-Batch K-Means αλγόριθμου, κατά την οποία παράχθηκε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο δέκα μακροκυψελών, με 175 τυχαία καταναμημένους χρήστες στις άσπρες θέσεις του δικτύου. Μελετώντας τον πίνακα φόρτου των κυψελών, παρατηρείται μεγάλη συμφόρηση σε 3 από τις 10 κυψέλες (2, 3 και 4). Η παρακάτω προσομοίωση υλοποιεί τον αλγόριθμο βέλτιστης τοποθέτησης Mini Batch K-means, ο οποίος ανέπτυξε 10 μη επανδρωμένα αεροσκάφη στις κόκκινες θέσεις του δικτύου. Δεν παρατηρούμε μια σημαντική διαφοροποίηση στα αποτελέσματα του Mini Batch K-means από τον KDP, όμως αυτό που παρατηρήθηκε και θα παρουσιαστεί παρακάτω μέσω της ανάλυσης των αποτελεσμάτων είναι η χρονική βελτίωση του χρόνου υπολογισμού των βέλτιστων θέσεων. Αυτό γίνεται λόγω του τρόπου υπολογισμού των βέλτιστων θέσεων, κατά τον οποίο ο Mini Batch K-Means, χρησιμοποιεί ένα πεπερασμένο αριθμό χρηστών σε κάθε επανάληψη του για την ομαδοποίηση των χρηστών και έτσι παρατηρούμε βελτίωση του χρόνου που χρειάστηκε για να ολοκληρώσει επιτυχώς την διαδικασία. Μπορούμε λοιπόν να καταλάβουμε πως ο Mini Batch K-Means είναι το ίδιο άπληστος αλγόριθμος μηχανικής μάθησης με τον KDP, με βασική διαφορά την χρονική βελτίωση των υπολογισμών.



Σχήμα 15: Αποτελέσματα Προσομοιωτή με Mini-Batch K-Means τοποθέτηση

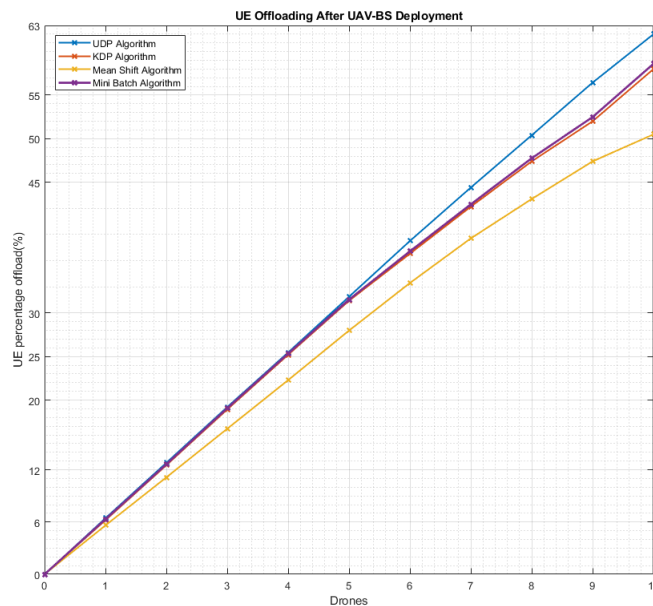
Η τελευταία προσομοίωση που παρατίθεται, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Mean Shift μηχανικής μάθησης για την αναζήτηση των βέλτιστων σημείων τοποθέτησης των αεροσκαφών. παράχθηκε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο δέκα μακροκυψελών, με 146 τυχαία κατανομημένους χρήστες στις άσπρες θέσεις του δικτύου. Μελετώντας τον πίνακα φόρτου των κυψελών, παρατηρείται μεσαία συμφόρηση σε 4 από τις 10 κυψέλες (1, 5, 7 και 8). Η παρακάτω προσομοίωση υλοποιεί τον αλγόριθμο βέλτιστης τοποθέτησης Mean Shift, ο οποίος ανέπτυξε 10 μη επανδρωμένα αεροσκάφη στις κόκκινες θέσεις του δικτύου.



Σχήμα 16: Αποτελέσματα Προσομοιωτή με Mean-Shift τοποθέτηση

5.3 Ανάλυση και Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων.

Με σκοπό την σύγκριση της απόδοσης των τεσσάρων αλγορίθμων βέλτιστης τοποθέτησης σε επίπεδο εκφόρτωσης (offloading) του δικτύου, υλοποιήθηκαν προσομοιώσεις με ακριβώς 150 χρήστες. Η επί τοις εκατό (%) εκφόρτωση του δικτύου κατά την ανάπτυξη των αεροσκαφών φαίνεται παρακάτω.

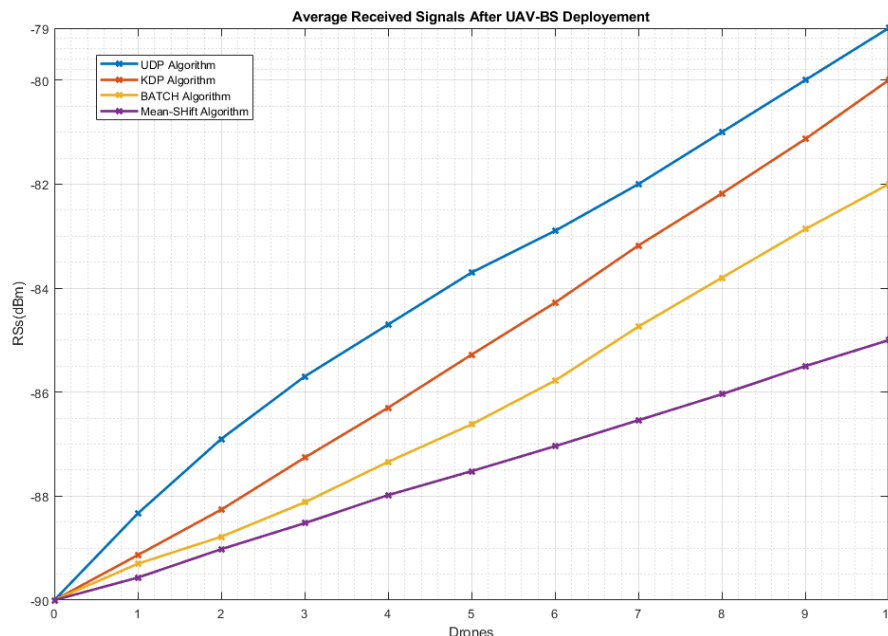


Σχήμα 17: Αποτελέσματα Αποσυμφόρησης Δικτύου

Είναι ξεκάθαρο, πως όσο αυξάνεται ο αριθμός των διαθέσιμων για ανάπτυξη μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο σύστημα, τόσο βελτιώνεται το ποσοστό εκφόρτωσης του δικτύου από τον UDP σε σχέση με τους υπόλοιπους τρεις αλγόριθμους βέλτιστης τοποθέτησης. Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε για ένα ανεπτυγμένο αεροσκάφος και οι τέσσερις αλγόριθμοι μειώνουν όμοια το φορτίο στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει καθώς με μόνο ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος, δεν μπορούν να αποτυπωθούν στα δεδομένα, οι διαφορετικές αποδόσεις και προοπτικές στον υπολογισμό των βέλτιστων θέσεων του κάθε αλγόριθμου στο σύστημα. Παρατηρούμε πως ο αλγόριθμος Mean-Shift δεν αποδίδει το ίδιο με τους υπόλοιπους τρεις, καθώς από ό,τι φαίνεται από τα αποτελέσματα, αφότου ο αριθμός των ανεπτυγμένων αεροσκαφών ξεπεράσει τα τρία, δεν είναι δυνατόν ο Mean-Shift να δώσει τα ίδια επίπεδα αποσυμφόρησης στο δίκτυο. Αξίζει να παρατηρήσουμε πως για >7 διαθέσιμα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, ο UDP προσφέρει από 5% έως 10% μεγαλύτερη εκφόρτωση χρηστών από το δίκτυο, σε σχέση με τους KDP και Mini-Batch K-Means. Έτσι, μπορούμε με σιγουριά να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως ο βέλτιστος εκ των τεσσάρων μελετημένων αλγορίθμων τοποθέτησης σε επίπεδο εκφόρτωσης του δικτύου, είναι ο UDP.

Συνεχίζοντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή με 150 χρήστες τοποθετημένους στο δίκτυο, στα πλαίσια σύγκρισης των αλγορίθμων, συλλέχθηκαν επίσης δεδομένα για την μέση ισχύ λαμβανόμενου σήματος που οι τέσσερις αλγόριθμοι βέλτιστης

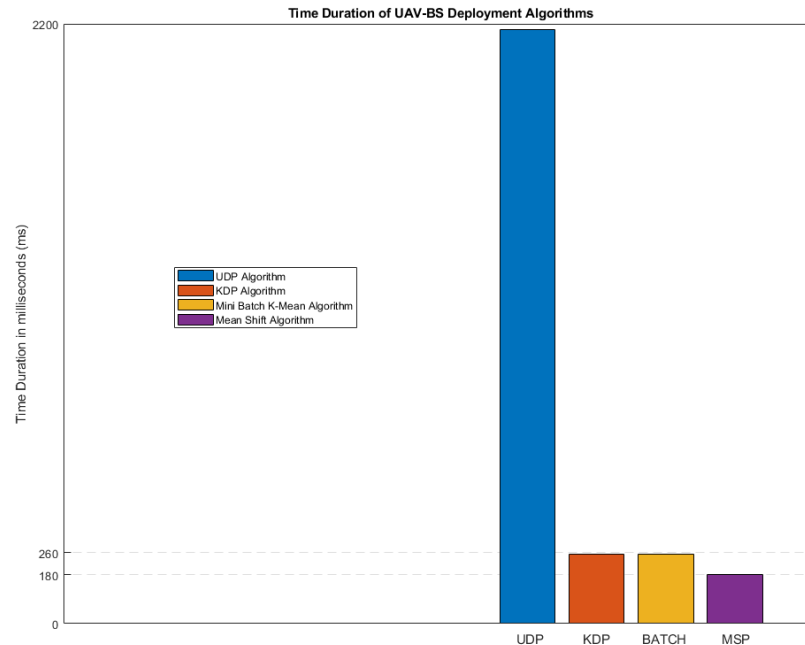
τοποθέτησης προσφέρουν. Το παρακάτω γράφημα μας δείχνει πως ο UDP αποδίδει καλύτερα σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, σε επίπεδο μέσης ισχύος λαμβανόμενου σήματος των χρηστών. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαφορετικής προσέγγισης υπολογισμού των σημείων τοποθέτησης των μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, ο UDP επιστρέφει καλύτερα σημεία τοποθέτησης και ομαδοποιήσεις χρηστών. Ο συνδυασμός των θέσεων των χρηστών στον χώρο, με την σωστή ομαδοποίηση τους και την βέλτιστη υπολογισμένη θέση που θα αναπτυχθούν τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, στον UDP αλγόριθμο καταλήγει σε μεγαλύτερη μέση τιμή λαμβανόμενων σημάτων (RSs). Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω γράφημα ο UDP επιστρέφει έως και 7 dBm μεγαλύτερη μέση ισχύ λαμβανόμενου σήματος από τον Mean-Shift, ενώ σε σχέση με τον KDP για παραπάνω από δύο ανεπτυγμένα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, ο UDP επιστρέφει 0.5 dBm μεγαλύτερη μέση τιμή λαμβανόμενη ισχύ σήματος.



Σχήμα 18: Μέση Τιμή Λαμβανόμενου Σήματος

Έτσι ώστε να υπολογιστούν βέλτιστα αποτελέσματα υπολογισμών μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, χρειάζεται μια επαναληπτική διαδικασία εκτίμησης υπολογισμών και αποφάσεων. Υλοποιώντας μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων με χρήση και των τεσσάρων αλγορίθμων καλύτερης δυνατής τοποθέτησης, παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά στον χρόνο που οι αλγόριθμοι χρειάζονται για να υπολογίσουν τις βέλτιστες θέσεις των μη επανδρωμένων αεροσκαφών στο δίκτυο. Είναι πολύ σημαντικό για την ανάλυση και εξόρυξη συμπερασμάτων να αναφερθούμε σε αυτή την διαφορά σε επίπεδο χρόνου, καθώς αποτελεί σημαντικό κομμάτι μελέτης, πρώτου μια τεχνολογία σαν αυτή που μελετάει η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι έτοιμη να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα πραγματικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ενός

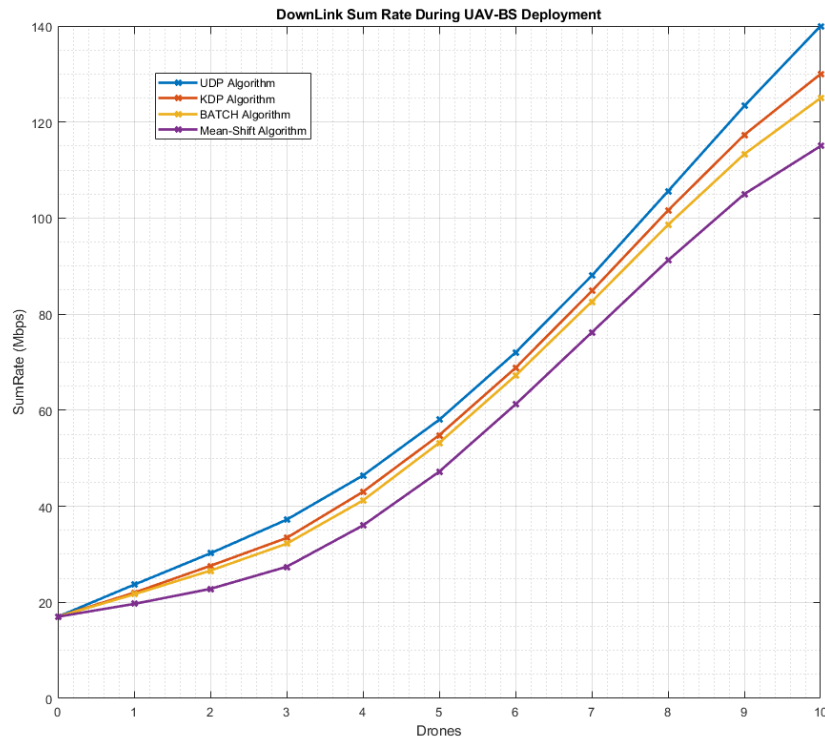
αστικού κέντρου κάνοντας χρήση του αλγορίθμου UDP βέλτιστης τοποθέτησης. Παρακάτω φαίνεται το ραβδόγραμμα του χρόνου, στην αρχή και στο τέλος των αλγορίθμων



Σχήμα 19: Χρονική Σύγκριση Αλγορίθμων

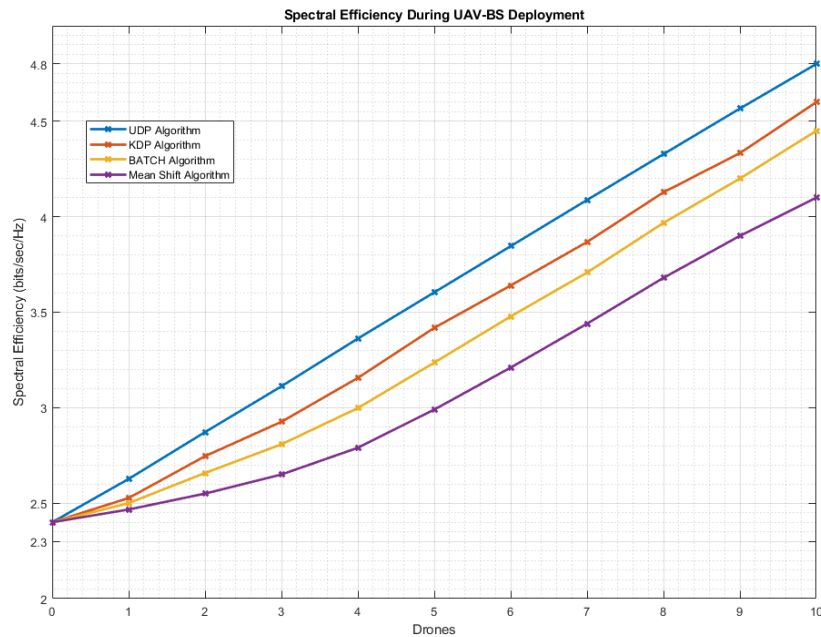
στο οποίο βλέπουμε πως σε millisecond (ms) ο αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης UDP χρειάστηκε 2178 ms για τον υπολογισμό των βέλτιστων σημείων τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών, σε ένα δίκτυο 150 χρηστών και 10 μακροκυψελών. Αυτός ο χρόνος είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τα 256 ms που χρειάστηκε ο KDP να υπολογίσει τα δικά του βέλτιστα σημεία τοποθέτησης σε ένα όμοιο δίκτυο χρηστών και μακροκυψελών. Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να επίσης να παρατηρήσουμε την χρονική βελτίωση που προσφέρει ο Mini-Batch K-Means (254 ms) σε σχέση με τον KDP, καθώς για το ίδιο σύνολο 150 δεδομένων (χρηστών, στην περίπτωση αυτού του προσομοιωτή) τα 2 ms λιγότερου χρόνου που χρειάστηκε ο Mini-Batch K-Means αποδεικνύουν ότι, όσο το σύνολο των δεδομένων που χρήζουν επεξεργασία αυξάνεται εκθετικά, η χρονική διάρκεια του Mini-Batch K-Means θα είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του KDP. Πρέπει να σημειωθεί πως αυτές οι χρονικές διάρκειες των αλγορίθμων, είναι ενδεικτικές και είναι ανάλογες με την υπολογιστική ισχύ που έχουν στην διάθεση τους τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που θα κληθούν να τους υλοποιήσουν. Μπορούμε λοιπόν να καταλήξουμε στο συμπέρασμα, πως για να λάβουμε όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα θα πρέπει να υλοποιήσουμε συστήματα τα οποία μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις σε επίπεδο χρόνου, ενός πολύ καλού αλγορίθμου μηχανικής μάθησης, όπως είναι ο UDP έτσι ώστε το κόστος να μην αυξάνεται και η απόδοση του συστήματος να μειώνεται.

Παρακάτω φαίνεται το γράφημα επιδόσεων σε επίπεδο SumRate κατερχόμενης ζεύξης, στο οποίο μπορούμε να παρατηρήσουμε πως ο Mean-Shift είναι κατά $\cong 8.5\%$ χειρότερος σε επίπεδο Mbps από τον UDP για περισσότερα από δυο ανεπτυγμένα αεροσκάφη, ενώ η απόδοση του Mini-Batch K-Means είναι σε όμοια επίπεδα με αυτή του KDP.



Σχήμα 20: Αποτελέσματα SumRate Αλγορίθμων

Συνεχίζοντας, μελετήθηκε η απόδοση των αλγορίθμων σε επίπεδο Spectral Efficiency. Παρατηρούμε γρήγορα, πως ο UDP ακολουθεί μια σταθερή αύξουσα σειρά τιμών όσο ο αριθμός των ανεπτυγμένων μη επανδρωμένων αεροσκαφών αυξάνεται. Συγκεκριμένα, μέσω του αλγορίθμου UDP μετά από την ανάπτυξη 10 μη επανδρωμένων αεροσκαφών το συνολικό Spectral Efficiency του συστήματος σχεδόν διπλασιάζεται. Παρατηρούμε επίσης, όπως και στις υπόλοιπες μετρήσεις, το κοινό επίπεδο απόδοσης των KDP και Mini-Batch K-Means αλγορίθμων, με τον KDP από δύο ανεπτυγμένα αεροσκάφη και πάνω, να ξεπερνά σε επίπεδο Spectral Efficiency τον Mini-Batch μονίμως με ποσοστό 4%, αλλά πάντοτε να αποδίδει $\cong 2\%$ λιγότερο σε σχέση με τον UDP. Τέλος, όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις, έτσι και στην παρακάτω φαίνεται η αδυναμία του Mean-Shift, να αποδώσει το ίδιο με τους υπόλοιπους τρεις αλγόριθμους βέλτιστης τοποθέτησης, με το Spectral Efficiency του να είναι μονίμως μικρότερο σε ποσοστό 10% σε σχέση με τον UDP.



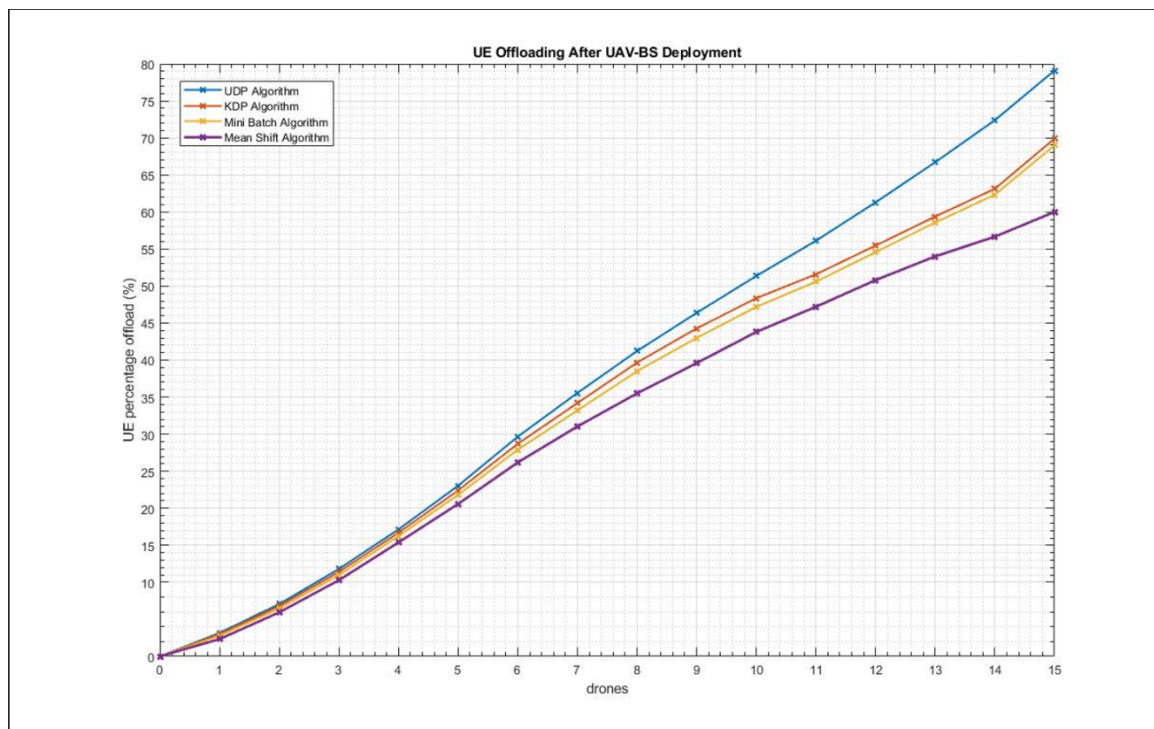
Σχήμα 21: Αποτελέσματα Spectral Efficiency Αλγορίθμων

Αναλύοντας και μελετώντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, που ο προσομοιωτής της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξόρυξε με την υλοποίηση των UDP, KDP, Mini Batch K-means και Mean Shift αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, μπορούμε να καταλήξουμε πως για ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο LTE-A στο οποίο είναι δυνατή η ένταξη της τεχνολογίας των μη επανδρωμένων αεροσκαφών με σκοπό την αποσυμφόρηση, ένας UDP αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης είναι ο κατάλληλος για την αποδοτική ενσωμάτωση και βελτίωση της συνολικής εικόνας του δικτύου σε επίπεδο κόστους και ποιότητας υπηρεσιών προς τους χρήστες. Ακόμα, φαίνεται πως η χρήση ενός τύπου K-Means αλγορίθμου βέλτιστης τοποθέτησης, μπορεί να προσφέρει αποτελέσματα υψηλού επιπέδου στο επίπεδο της απόδοσης συστήματος, ειδικά μέσω της βελτιωμένης μορφής του Mini-Batch K-Means σε περιπτώσεις που ο αριθμός των χρηστών του συστήματος είναι αρκετά μεγάλος.

5.4 Διαφορετικές Τιμές Εισόδου και Ανάλυση Αποτελεσμάτων.

Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης είναι πολύ εύχρηστοι στην τεχνική χρήσης μη επανδρωμένων αεροσκαφών με σκοπό την αποσυμφόρηση τηλεπικοινωνιακών δικτύων, με τον UDP clustering αλγόριθμο να αποδίδει καλύτερα από τους KDP, Mini-Batch K-Means και Mean Shift. Καθώς το κάθε τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που πιθανόν θα χρησιμοποιήσει τις τεχνικές που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία, θα διαφέρει σε επίπεδο φόρτου ή μεγέθους, είναι σημαντικό να τονιστεί πως η βέλτιστη απόδοση του μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τις κατάλληλες τιμές εισόδου. Αυτές οι τιμές, αφορούν το σύνολο των αεροσκαφών που είναι διαθέσιμα ή το εύρος ζώνης των πόρων του συστήματος. Έτσι, παρακάτω παρουσιάζεται πως η απόδοση του δικτύου αλλάζει δραματικά, αλλάζοντας ένα πεπερασμένο αριθμό τιμών εισόδου στο ίδιο σύνολο χρηστών και σταθμών βάσης.

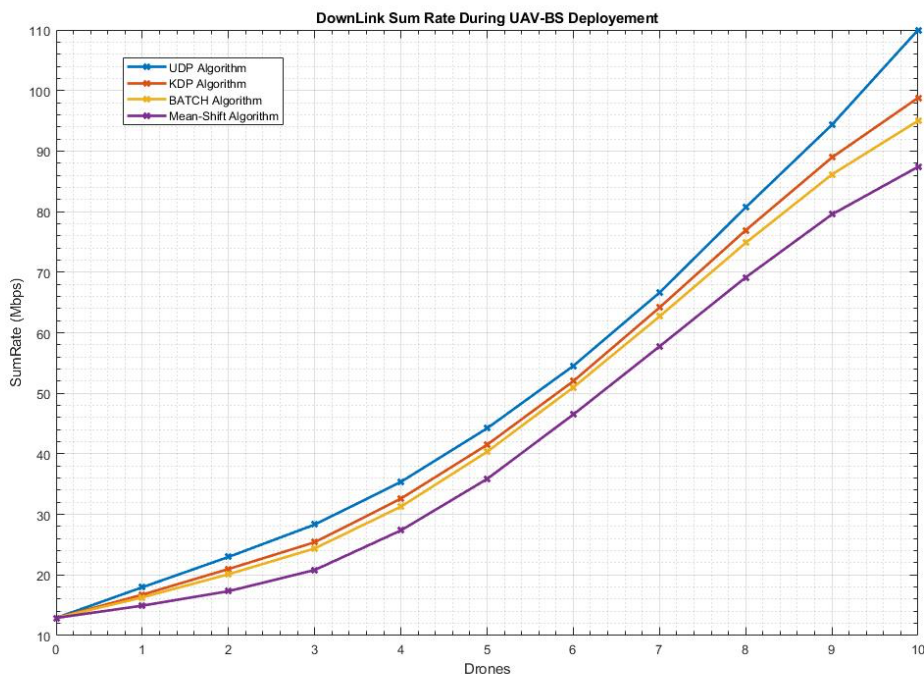
Από την μία μεριά, μια πολύ σημαντική παράμετρος η οποία θα καθορίσει σημαντικά το ποσοστό αποσυμφόρησης του δικτύου, είναι ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Παρακάτω σε μια προσομοίωση με εκατό πενήντα τυχαία κατανομημένους χρήστες σε ένα δίκτυο δέκα μακροκυψελών (όμοιο με την προσομοίωση της παραγράφου 5.3), αλλάζοντας τον αριθμό των μη επανδρωμένων αεροσκαφών από δέκα σε δεκαπέντε, φαίνεται η δραματική αύξηση της αποσυμφόρησης.



Σχήμα 22: Αποσυμφόρηση δικτύου μετά από ανάπτυξη δεκαπέντε αεροσκαφών

Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως το συνολικό ποσοστό αποσυμφόρησης και για τους τέσσερις αλγόριθμους ξεπερνάει το 60%, το οποίο ήταν το μέγιστο που επιτεύχθηκε από τον αλγόριθμο UDP όταν ο διαθέσιμος αριθμός αεροσκαφών ήταν μόνο δέκα. Ακόμα, για τον αλγόριθμο UDP παρατηρούμε πως από επτά ανεπτυγμένα αεροσκάφη έως δεκαπέντε, έχουμε μια αύξηση 36.36%, η οποία είναι μεγαλύτερη από την προσομοίωση της παραγράφου 5.3 (με μόνο δέκα αεροσκάφη) όπου από πέντε, έως δέκα ανεπτυγμένα αεροσκάφη η αύξηση ήταν μόνο 33.33%. Έτσι όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο αριθμός των αεροσκαφών που ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο απαιτείται να έχει στην διάθεση του, είναι ανάλογος με το ποσοστό αποσυμφόρησης το οποίο χρειάζεται να επιτευχθεί.

Από την άλλη μεριά, παρακάτω φαίνονται το SumRate κατερχόμενης ζεύξης για εύρος ζώνης 3MHz των κατερχόμενων ζεύξεων συνδέσεων (σε αντίθεση με την προσομοίωση της παραγράφου 5.3, όπου χρησιμοποιήθηκε εύρος ζώνης συχνοτήτων ίσο με 5MHz).



Σχήμα 23: Αποτελέσματα SumRate για Εύρος Ζώνης 3MHz

Παρατηρούμε πως οι αλγόριθμοι επιστρέφουν όμοια αποτελέσματα σε επίπεδο SumRate, με βασική διαφορά μικρότερο SumRate κατά $\cong 13\%$ σε σχέση με την προσομοίωση της παραγράφου 5.3, ασχέτως με τον συνολικό αριθμό ανεπτυγμένων αεροσκαφών στο σύστημα.

6

Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα

Με την πάροδο των χρόνων, οι απαιτήσεις απέναντι στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα όλο και θα αυξάνονται. Καθώς διανύουμε την μετάβαση στην 5^η γενιά τηλεπικοινωνιών, είναι σημαντικό να έχουμε στα χέρια μας εργαλεία και λειτουργίες που θα επιτρέψουν στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα να ακολουθήσουν την ραγδαία αύξηση του φόρτου και να προσφέρουν ποιοτικές συνδέσεις στους χρήστες.

Με την παρούσα διπλωματική εργασία, τονίζεται η δυνατότητα βελτίωσης των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, μέσω υβριδικών τεχνικών αποσυμφόρησης. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη που πλέον έχουμε στα χέρια μας, μέσω του απαραίτητου τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού μπορούν να μετατραπούν σε έναν δυνατό σύμμαχο βελτίωσης των επικοινωνιών μας, προσφέροντας παράλληλα εγγύηση χαμηλού κόστους συνδέσεων, μαζί με άριστη ποιότητα σύνδεσης.

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, που ολοένα εξελίσσονται, είναι αυτές που θα ξεκλειδώσουν όλες τις δυνατότητες της βέλτιστης τοποθέτησης αεροσκαφών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης UDP, KDP, Mini-Batch K-Means και Mean Shift που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι μια τρανή απόδειξη των προοπτικών εξέλιξης της τεχνολογίας της τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών και της εύκολης ενσωμάτωσης της σε ένα σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο πεπερασμένων πόρων, με τον UDP να είναι ο πιο βέλτιστος εκ των τεσσάρων.

6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία και ο προσομοιωτής που δημιουργήθηκε, πλαισιώνουν την τεχνολογία της βέλτιστης τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα LTE-A.

Καθώς μεταβαίνουμε στην 5^η γενιά τηλεπικοινωνιών (5G), ο προσομοιωτής της εργασίας, μελλοντικά θα μπορούσε να προσομοιώνει ένα 5^{ης} γενιάς κυψελωτό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, με μια βελτιωμένη μορφή των αλγορίθμων τοποθέτησης αεροσκαφών και μεταπομπής χρηστών σε

νέα κελιά, ακολουθώντας πάντα το πρότυπο και τις απαιτήσεις των 5G δικτύων. Μια τέτοια μετάβαση είναι σαφώς εφικτή, καθώς ο προσομοιωτής της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μπορεί να εξελίσσεται και να αναβαθμίζεται παράλληλα με τις γενιές των τηλεπικοινωνιακών δικτύων.

Ακόμα, με τις κατάλληλες επεμβάσεις ο προσομοιωτής μπορεί στο μέλλον να ενταχθεί σε ένα πιο ισχυρό υπολογιστικό σύστημα, από αυτό που εξ'αρχής δημιουργήθηκε, προσομοιώνοντας πολύ μεγαλύτερων διαστάσεων δίκτυα χρηστών και μακροκυψελών, με σκοπό την εξόρυξη δεδομένων μεγαλύτερης κλίμακας που θα βοηθήσουν ένταξη της τεχνολογίας τοποθέτησης μη επανδρωμένων αεροσκαφών, σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα του πραγματικού επιφορτισμένου από δεδομένα και χρήστες τηλεπικοινωνιακού κόσμου.

Βιβλιογραφία

- [1] Prutor, “Intelligent Tutoring System For Programming - Mean-Shift Clustering,” <https://prutor.ai/mean-shift-clustering/>. <https://prutor.ai/mean-shift-clustering/> (accessed Jul. 13, 2022).
- [2] Prutor, “Intelligent Tutoring System For Programming - Mini Batch K-means clustering algorithm,” <https://prutor.ai/mini-batch-k-means-clustering-algorithm/>. <https://prutor.ai/mini-batch-k-means-clustering-algorithm/> (accessed Jul. 13, 2022).
- [3] Lazy Foo, “Lazy Foo’ Productions,” *Beginning Game Programming v2.0*. <http://lazyfoo.net/tutorials/SDL/> (accessed Jul. 13, 2022).
- [4] Teltonika, “Mobile Signal Strength Recommendations.” https://wiki.teltonika-networks.com/view/Mobile_Signal_Strength_Recommendations (accessed Jul. 13, 2022).
- [5] T. S. Rappaport, *Wireless communications : principles and practice*. Prentice Hall PTR, 2002.
- [6] H. Zhang, L. Song, and Z. Han, “Wireless Networks Unmanned Aerial Vehicle Applications over Cellular Networks for 5G and Beyond.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/14180>
- [7] N. A-Mapat and P. Moungnoul, “Impact of LTE-Pro on LTE-A Network,” Jul. 2020. doi: 10.1109/ICEAST50382.2020.9165532.
- [8] D. Zorbas, L. di Puglia Pugliese, T. Razafindralambo, and F. Guerriero, “Optimal drone placement and cost-efficient target coverage Optimal drone placement and cost-efficient target coverage Optimal drone placement and cost-efficient target coverage,” *Journal of Network and Computer Applications (JNCA)*, p. 75, 2016, doi: 10.1016/j.jnca.2016.08.009i.
- [9] A. Haidine and S. el Hassani, “LTE-a pro (4.5G) as pre-phase for 5G deployment: Closing the gap between technical requirements and network performance,” Feb. 2017. doi: 10.1109/ACOSIS.2016.7843933.
- [10] L. Tsipi, M. Karavolos, and D. Vouyioukas, “An Unsupervised Machine Learning Approach for UAV-Aided Offloading of 5G Cellular Networks,” *Telecom*, vol. 3, no. 1, pp. 86–102, Jan. 2022, doi: 10.3390/telecom3010005.
- [11] A. Deme, D. Dajab, and D. C. Nyap, “Computer Analysis of the COST 231 Hata Model and Least Squares Approximation for Path Loss Estimation at 900MHz on the Mountain Terrains of the Jos-Plateau, Nigeria,” 2013. [Online]. Available: www.iiste.org

- [12] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, “Optimal LAP altitude for maximum coverage,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 6, pp. 569–572, Dec. 2014, doi: 10.1109/LWC.2014.2342736.
- [13] S. Jimaa, K. K. Chai, Y. Chen, and Y. Alfadhl, “LTE-A an overview and future research areas,” in *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, 2011, pp. 395–399. doi: 10.1109/WiMOB.2011.6085370.
- [14] D. Aziz and R. Sigle, “Improvement of LTE handover performance through interference coordination,” 2009. doi: 10.1109/VETECS.2009.5073597.
- [15] Y. Singh, “Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength,” 2012.
- [16] D. Xenakis, N. Passas, L. Merakos, and C. Verikoukis, “Energy-efficient and interference-aware handover decision for the LTE-Advanced femtocell network,” in *IEEE International Conference on Communications*, 2013, pp. 2464–2468. doi: 10.1109/ICC.2013.6654902.
- [17] *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC Spring) : proceedings : Antwerp, Belgium, 25-28 May 2020*.
- [18] M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum, and H. Yanikomeroglu, “3-D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) for Energy-Efficient Maximal Coverage,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 434–437, Aug. 2017, doi: 10.1109/LWC.2017.2700840.
- [19] E. Kalantari, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, “On the Number and 3D Placement of Drone Base Stations in Wireless Cellular Networks.”
- [20] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Region 8, Institute of Electrical and Electronics Engineers., and Vysoké učení technické v Brně. Faculty of Electrical Engineering and Communication, *2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) : July 7-9, 2020, Milan, Italy*.

Παράρτημα Ι: Κώδικας Προσομοιωτή

```
97 //COST 231 Hata model for pathloss
98 double BaseStation::calculatePathLoss(User& user)
99 {
100     /* Reference
101     International Journal of Computer Applications (0975 - 8887)
102     Volume 59- No.11, December 2012
103     Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on
104     the Basis of Path Loss and Signal Strength
105     Yuvraj Singh
106     https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.303.4057&rep=rep1&type=pdf */
107
108     int xOfUser = user.getX();
109     int yOfUser = user.getY();
110     int distX = abs(x_axis - xOfUser);
111     int distY = abs(y_axis - yOfUser);
112     int linkDistance = sqrt((distX ^ 2) + (distY ^ 2));
113     int hR = user.getAntennaHeight();
114
115     //in this simulator we assume we are in an urban area thus we calculate the mobile antenna correction as follows
116     double aHR = (3.20 * (log10(11.75 * hR)) * 2) - 4.97;
117     // C = 0 we are not simulating a metropolitan area
118
119     double A = 46.3 + (33.9 * log10(frequency)) - (13.28 * log10(heightOfStationAntenna)) - aHR;
120     double B = 44.9 - (6.55 * log10(heightOfStationAntenna));
121     double pathloss = A + (B * log10(linkDistance));
122     return pathloss;
123 }
124
```

Σχήμα 24: COST-231 Hata Μοντέλο

```
126 double BaseStation::rayleigh_fading(long double variance)
127 {
128     std::default_random_engine eng;
129     std::normal_distribution<double> distr(0, 1);
130     double randomRealSide = distr(eng);
131
132     std::default_random_engine eng1;
133     std::normal_distribution<double> distr1(0, 1);
134     double channelImaginarySide = distr1(eng1);
135
136     long double channelRealSide = sqrt(variance/2)*randomRealSide;
137     std::complex<double> complexNumberForChannel (channelRealSide, channelImaginarySide);
138
139     double absoluteofComplexNumber = std::abs(complexNumberForChannel);
140     double channel = absoluteofComplexNumber * absoluteofComplexNumber;
141
142     return channel;
143 }
144
```

Σχήμα 25: Διάλειψη Rayleigh

```
--
69 double Drone::calculatePathLoss(User& user)
70 {
71     /* Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage
72        Akram Al-Hourani, Student Member, IEEE, Sithamparanathan Kandeepan, Senior Member,
73        IEEE, and Simon Lardner
74        IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 3, NO. 6, DECEMBER 2014
75        &&
76        Unmanned Aerial Vehicle Applications over Cellular Networks for 5G and Beyond
77        Hongliang Zhang Lingyang Song Zhu Han
78
79        Elevation Angle-Based Model Pathloss Calculation
80        */
81
82
83     double light_spd = 2.99792458e8; // The speed of light in vacuum in meters per second
84     double pi = 3.1415926535897932385; // Pi
85     int xOfUser = user.getX();
86     int yOfUser = user.getY();
87     int distX = abs(x_axis - xOfUser);
88     int distY = abs(y_axis - yOfUser);
89     int linkDistance = sqrt((distX ^ 2) + (distY ^ 2));
90     //In this simulation we assume we are in an urban enviroment thus we define the following parameters based on the thesis references
91     // (buildUpRatio,buildingsPerUnitArea,heightDestribution) Urban(0.5,500,50)
92     //(nLos, nNlos) | Urban (1.0,20)
93     double buildUpRatio = 0.5;
94     int buildingsPerUnitArea = 500;
95     int a = buildUpRatio * buildingsPerUnitArea;
96     int b = 50;
97     double nLos = 1.0;
98     double nNlos = 20;
99     double freeSpacePathloss = (20 * log10(frequency)) + (20 * log10( (4 * pi) / light_spd ));
100
101     double lineOfSightPL = freeSpacePathloss + (20 * log10(linkDistance)) + nLos;
102     double nonLineOfSightPL = freeSpacePathloss + (20 * log10(linkDistance)) + nNlos;
103
104     double angleOfElevation = height_Drone / linkDistance;
105     double lineOfSightProbability = 1 / ( 1+ (a * exp(-b * (angleOfElevation-a) ) ) );
106     double nonLineOfSightProbability = 1 - lineOfSightProbability;
107
108     double pathloss = (lineOfSightPL * lineOfSightProbability) + (nonLineOfSightPL * nonLineOfSightProbability);
109
110     return abs(pathloss);
111 }
```

Σχήμα 26: LAP Pathloss Μοντέλο

```
263 //USER CLUSTERING PROCESS
264 do
265 {
266     A0 = A1;
267     for (Cluster& clr : clusters)
268     {
269         int i = rand() % users.size();
270         int Xbackup = clr.mendoidX;
271         int Ybackup = clr.mendoidY;
272         clr.setX(users.at(i).getX());
273         clr.setY(users.at(i).getY());
274
275         std::vector<int> calculatedDissims;
276         for (User& usr : users)
277         {
278             std::map<int, int> dissimilarities;
279             int clusterid = findCloser(usr, clusters);
280             clusters.at(clusterid - 1).addCurrentUserToCluster(usr);
281
282             for (Cluster& c : clusters)
283             {
284                 int dissiX = abs(usr.getX() - c.mendoidX);
285                 int dissiY = abs(usr.getY() - c.mendoidY);
286                 int totalDissim = dissiX + dissiY;
287                 dissimilarities.insert({ c.clusterNum, totalDissim });
288             }
289             auto it = std::min_element(dissimilarities.begin(), dissimilarities.end(),
290                                     [](const auto& l, const auto& r) { return l.second < r.second; });
291
292             reallocateUserToCluster(usr, clusters, it->first, 1);
293             calculatedDissims.push_back(it->second);
294         }
295         int B = 0;
296         for (auto& d : calculatedDissims)
297         {
298             B += d;
299         }
300         if (B < A1)
301         {
302             A1 = B;
303             for (Cluster& c : clusters)
304             {
305                 c.initialNearUsers.clear();
306                 for (auto it = c.currentNearUsers.begin(); it != c.currentNearUsers.end(); ++it)
307                 {
308                     c.initialNearUsers.insert({ it->first, it->second });
309                 }
310             }
311         }
312         else
313         {
314             clr.setX(Xbackup);
315             clr.setY(Ybackup);
316             for (Cluster& c : clusters)
317             {
318                 c.currentNearUsers.clear();
319             }
320         }
321     }
322 } while (A0 - A1 > 0.000001);
```

Σχήμα 27: Πρώτη φάση UDP αλγορίθμου

```
391 }
392
393 bool convergence = false;
394 do
395 {
396     int convergencecounter = 0;
397     //find the closest medoid to each user as an initial calculation
398     for (User& usr : users)
399     {
400         int clusterid = findCloser(usr, clusters);
401         bool check = checkIfAlreadyIntoCluster(usr, clusters);
402         if (check)
403         {
404             clusters.at(static_cast<std::vector<Cluster, std::allocator<Cluster>>::size_type>(clusterid) - 1).addInitialUserToCluster(usr);
405         }
406     }
407
408     //find the mean of all assigned users and calculate the new medoids
409     for (Cluster& clu : clusters)
410     {
411         double meanX = 0.0;
412         double meanY = 0.0;
413         int newX = 0;
414         int newY = 0;
415         for (auto& clusterUsr : clu.initialNearUsers)
416         {
417             meanX = meanX + clusterUsr.second.getX();
418             meanY = meanY + clusterUsr.second.getY();
419         }
420         newX = meanX / clu.initialNearUsers.size();
421         newY = meanY / clu.initialNearUsers.size();
422         clu.setOldX(clu.mendoidX);
423         clu.setOldY(clu.mendoidY);
424         clu.setX(newX);
425         clu.setY(newY);
426     }
427
428     //find the closest medoid to each user as a new calculation
429     for (User& usr : users)
430     {
431         int clusterid = findCloser(usr, clusters);
432         bool check = checkIfAlreadyIntoCluster(usr, clusters);
433         if (check)
434         {
435             clusters.at(static_cast<std::vector<Cluster, std::allocator<Cluster>>::size_type>(clusterid) - 1).addCurrentUserToCluster(usr);
436         }
437     }
438
439     //check if none cluster assignments change
440     for (Cluster& clu : clusters)
441     {
442         if ((clu.oldX == clu.mendoidX) && (clu.oldY == clu.mendoidY))
443         {
444             convergencecounter++;
445         }
446     }
447
448     //check if every cluster reached convergence. If true ,stop the calculations, the clusters are final
449     if (convergencecounter == clusters.size())
450     {
451         convergence = true;
452         for (Cluster& clu : clusters)
453         {
454             clu.initialNearUsers.clear();
455         }
456     }
457     else
458     {
459         convergence = false;
460         for (Cluster& clu : clusters)
461         {
462             clu.initialNearUsers.clear();
463             clu.currentNearUsers.clear();
464         }
465     }
466 } while (!convergence);
```

Σχήμα 28: Πρώτη φάση KDP Αλγορίθμου