



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Μελέτη και προσομοίωση της χρήσης αυτόνομων εναέριων
οχημάτων για τη βελτίωση της επίδοσης των ασύρματων
κινητών δικτύων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Ιωάννη Μανώλη

Επιβλέπων : Βουγιούκας Δημοσθένης

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Σκούτας Δημήτριος
Μαλιάτσος Κωνσταντίνος

Σάμος, Σεπτέμβριος 2022

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα τελειώματα των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου στα πλαίσια του προπτυχιακού επιπέδου.

Θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Δημοσθένη Βουγιούκα, επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής, για την εμπιστοσύνη που έδειξε απέναντι μου και την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα απαιτητικό και ενδιαφέρον θέμα.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον Μιχαήλ Καραβόλο για την ασταμάτητη υποστήριξη του και την πολύτιμη βοήθεια του στην εκπόνηση της διπλωματικής καθώς επίσης και για την καθοδήγηση του και τον χρόνο που αφιέρωσε σε όλη την διάρκεια της προσπάθειας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους συγγενείς μου καθώς και τους φίλους μου για την αδιάκοπη στήριξη τους σε όλο αυτό το μεγάλο ταξίδι των σπουδών μου.

© 2022

του

Ιωάννη Μανώλη

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ορισμοί, ταξινόμηση και κανονισμοί UAV.....	1
1.2	Απαιτήσεις επικοινωνίας και φάσματος UAV.....	4
1.3	Υπάρχουσες τεχνολογίες για επικοινωνίες UAV.....	6
1.3.1	Απευθείας σύνδεση	7
1.3.2	Δορυφόρος	7
1.3.3	Δίκτυο Ad-Hoc	8
1.3.4	Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.....	9
1.4	Τύποι και χαρακτηριστικά UAV.....	10
1.4.1	Ωφέλιμο φορτίο	11
1.4.2	Μηχανισμός πτήσης.....	11
1.4.3	Εμβέλεια και υψόμετρο	11
1.4.4	Ταχύτητα και χρόνος πτήσης	12
1.4.5	Τροφοδοσία.....	13
1.5	Εναέριοι σταθμοί βάσης: Προκλήσεις και δυνατότητες.....	13
1.5.1	Βελτιστοποίηση τοποθέτησης για εναέριους σταθμούς βάσης.....	13
1.5.2	Βελτιστοποίηση κινητικότητας για εναέριους σταθμούς βάσης.....	15
1.5.3	Ενεργειακά αποδοτικοί σταθμοί βάσης.....	16
1.5.4	Επαναφόρτιση εναέριων σταθμών βάσης.....	18
1.5.5	Fronthauling και συνδέσεις πρόσβασης επικοινωνίας	18
1.5.6	Παράδειγμα μοντέλου κόστους μετατόπισης εναέριων σταθμών βάσης.....	19
1.6	Ασύρματη Δικτύωση με UAV:Περιπτώσεις χρήσης εφαρμογής	21
1.6.1	Εναέριοι σταθμοί βάσης UAV για 5G και ύστερων γενεών	28
1.6.2	Κινητά drones ως εξοπλισμός χρήστη	28
1.6.3	Εναέρια δίκτυα Ad-Hoc με UAV	28
1.6.4	Άλλες πιθανές περιπτώσεις χρήσης UAV.....	29
2	Ανάλυση επιδόσεων για UAV κινητών επικοινωνιών.....	31
2.1	Εισαγωγή.....	31
2.2	Προκαταρκτικά μοντελοποίησης.....	31
2.2.1	Στοχαστική γεωμετρία	32
2.2.2	Αρχιτεκτονική δικτύου	33
2.2.3	Μοντέλο καναλιού.....	34

2.2.4	Μοντελοποίηση αποκλεισμού και πιθανότητα LoS	35
2.2.5	Στρατηγική συσχέτισης χρήστη και σύνδεση με βάση τον λόγο SINR.....	35
2.3	Ανάλυση απόδοσης.....	36
2.3.1	Ακριβής πιθανότητα κάλυψης.....	37
2.3.2	Προσεγγίσεις για πιθανότητες κάλυψης UAV	38
2.3.2.1	Απόρριψη NLoS και εφέ θορύβου.....	38
2.3.2.2	Ταίριασμα στιγμής.....	39
2.3.3	Ανάλυση επιτεύξιμης απόδοσης και φασματικής απόδοσης περιοχής	40
2.4	Σχεδιασμός Συστήματος: Περιπτώσεις μελέτης	42
2.4.1	Ανάλυση Ακρίβειας.....	42
2.4.2	Παράμετροι σχεδίασης	43
2.4.2.1	Επίδραση του υψομέτρου του UAV.....	44
2.4.2.2	Επίδραση του πλάτους δέσμης της κεραίας του UAV.....	45
2.4.2.3	Επίδραση της κλίσης κεραίας του UAV	46
2.4.2.4	Επιπτώσεις διαφορετικών τύπων περιβάλλοντος.....	47
2.4.3	Ετερογενή δίκτυα – Επιλογή επιπέδων	48
2.4.4	Πύκνωση δικτύου	50
3	Βελτίωση των επιδόσεων σε LTE-συνδεδεμένα UAV.....	53
3.1	Εισαγωγή.....	53
3.2	Μετρήσεις δικτύων LTE.....	55
3.2.1	Πειράματα κατερχόμενης ζεύξης	56
3.2.2	Χαρακτηρισμός μοντέλου απώλειας διαδρομής	60
3.2.3	Πειράματα ανερχόμενης ζεύξης.....	61
3.3	Επιδόσεις σε δίκτυα LTE.....	64
3.4	Βελτιώσεις αξιοπιστίας.....	66
3.4.1	Ακύρωση παρεμβολών.....	67
3.4.2	Έλεγχος παρεμβολών μεταξύ κυψελών.....	68
3.4.3	CoMP.....	69
3.4.4	Επιλογή δέσμης κεραίας	71
3.4.5	Διπλή πρόσβαση LTE	73
3.4.6	Αποκλειστικό φάσμα.....	76
4	Μη-ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση για επικοινωνίες UAV	77
4.1	Εισαγωγή.....	77
4.1.1	Κίνητρο	78
4.2	Στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη για επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης.....	79
4.2.1	Μοντέλο συστήματος	80

4.2.1.1	Περίπτωση του μακρινού χρήστη.....	81
4.2.1.2	Περίπτωση του κοντινού χρήστη.....	82
4.2.2	Πιθανότητα κάλυψης της στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη.....	83
4.3	Στρατηγική με επίκεντρο το UAV για εκφόρτωση ενεργειών.....	84
4.3.1	Ανάλυση SINR.....	85
4.3.2	Πιθανότητα κάλυψης της στρατηγικής με επίκεντρο το UAV.....	86
4.4	Αριθμητικά αποτελέσματα.....	88
4.4.1	Στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη	88
4.4.2	Στρατηγική με επίκεντρο το UAV.....	92
5	Προσομοίωση	94
6	Επίλογος	119
	Βιβλιογραφία	122

Λίστα Σχημάτων

Εικόνα 1.1 UAV επικοινωνίες με μια ενσωματωμένη αρχιτεκτονική δικτύου [12].....	9
Εικόνα 1.2 Εικόνες διαφορετικών τύπων UAV. (a) Parrot Swing. (b) Kogan Nano Drone. (c) Parrot Disco. (d) DJI Spreading Wings S900. (e) Scout B-330 UAV helicopter. (f) Predator B [112].....	10
Εικόνα 1.3 CAPEX/OPEX στις ανεπτυγμένες χώρες. (a) CAPEX. (b) OPEX [56].....	20
Εικόνα 1.4 Drone για σενάριο δημόσιας ασφάλειας [111].....	23
Εικόνα 1.5 Επίγειοι σταθμοί βασιζόμενοι σε UAV [111].....	24
Εικόνα 1.6 3D Beamforming με την χρήση drone [111].....	25
Εικόνα 2.1 Κατερχόμενη ζεύξη ενός UAV συνδεδεμένου με κυψέλη[113].	33
Εικόνα 2.2 Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση και τις αναλυτικές εκφράσεις αντιστοιχίζονται με ακρίβεια. [113].....	43
Εικόνα 2.3 Το εφικτό εύρος λειτουργίας UAV όταν είναι εξοπλισμένο με μια πανκατευθυντική κεραία είναι περιορισμένο λόγω της επιζήμιας επίδρασης των παρεμβολών LoS στους σταθμούς βάσης[113].....	44
Εικόνα 2.4 Υπάρχει ένα εξαρτώμενο από το υψόμετρο βέλτιστο πλάτος δέσμης κεραίας UAV για μέγιστη απόδοση [113].	45
Εικόνα 2.5 Σημαντική βελτίωση της απόδοσης παρατηρείται με τη αξιοποίηση της κλίσης της κεραίας UAV για δίκτυα αραιάς έως μεσαίας πυκνότητας. [113].....	46
Εικόνα 2.6 Πάνω από ένα συγκεκριμένο υψόμετρο, το UAV εξυπηρετείται καλύτερα από μακροκυψέλες [113].....	49
Εικόνα 2.7 Από την άποψη του UAV, η απόδοση του δικτύου συγκλίνει στο μηδέν καθώς γίνεται πυκνή, παρόλο που υιοθετείται η βέλτιστη γωνία κλίσης. [113].	50
Εικόνα 2.8 Η προσθήκη εναέριων χρηστών μπορεί να βελτιώσει τη φασματική απόδοση της περιοχής μέχρι μια συγκεκριμένη πυκνότητα των σταθμών βάσης βάσης.[113].....	51
Εικόνα 3.1 Πειραματική μεθοδολογία μέτρησης για έρευνες ραδιοφωνικών καναλιών σε δίκτυα LTE [113].	56
Εικόνα 3.2 (αριστερά) Πανκατευθυντική κεραία τοποθετημένη πάνω από την άτρακτο του εξακοπτέρου. (δεξιά) Εξοπλισμός μέτρησης τοποθετημένος σε ένα προσαρμοσμένο πλαίσιο από ανθρακονήματα κάτω από το drone (ο σαρωτής βρίσκεται κάτω από τον υπολογιστή μικρού μεγέθους) [113].	57

Εικόνα 3.3 Εκτιμώμενη απώλεια διαδρομής σε σχέση με την απόσταση για το επίπεδο του εδάφους (1,5 m) και 120 m ύψος σε αγροτικό περιβάλλον (800 MHz) [113].....	58
Εικόνα 3.4 Αριθμός γειτονικών κελιών που εντοπίστηκαν ανά δείγμα αναφοράς για διαφορετικά ύψη στο αγροτικό σενάριο μετρήσεων [113].	59
Εικόνα 3.5 Παράμετροι παλινδρόμησης που εξαρτώνται από το ύψος για το μοντέλο στην Εξίσωση (3.1) για το αγροτικό περιβάλλον. [113].	60
Εικόνα 3.6 Πειραματική ρύθμιση μέτρησης UAV για έρευνες παρεμβολών άνω ζεύξης σε δίκτυα LTE [113].....	61
Εικόνα 3.7 Παρεμβολή από θερμικό θόρυβο που παρατηρήθηκε στις κυψέλες IVC για τη μετάδοση UAV (αγροτικό σενάριο). Το UAV πετά σε ύψος 100 μ [113].....	62
Εικόνα 3.8 Η CDF απεικονίζει τη διαφορά μεταξύ της παρεμβολής στο θερμικό θόρυβο που προκαλείται από τη μετάδοση UAV στα 100 m σε σύγκριση με μια επίγεια μετάδοση στις κυψέλες του θύματος παρεμβολής για τα τρία σενάρια. [113].	63
Εικόνα 3.9 Μέσος όρος SINR κατερχόμενης ζεύξης για τον επίγειο εξοπλισμό χρήστη (TUE) και για τα drones (UAV) σε δύο διαφορετικά ύψη για αγροτικά και αστικά σενάρια σε μεσαίο και υψηλό φορτίο [113].....	65
Εικόνα 3.10 Μέσες πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για πτήσεις UAV στα 120 μέτρα σε αστικά και αγροτικά δίκτυα ραδιοφώνου, όταν δεν χρησιμοποιείται IC και όταν χρησιμοποιείται IC στο UAV UE [113].....	67
Εικόνα 3.11 Πιθανότητα διακοπής drone για drone στα 120 m σε αστικά και αγροτικά περιβάλλοντα υπό υψηλό φορτίο με αφαίρεση διαφορετικού αριθμού παρεμβολέων [113].....	68
Εικόνα 3.12 Επισκόπηση της πιθανότητας κέρδους SIR κατερχόμενης ζεύξης JT-CoMP 3 dB, σε ένα αγροτικό σενάριο με ISD = 2,8 km [113].....	70
Εικόνα 3.13 Επισκόπηση της πιθανότητας κέρδους ανερχόμενης ζεύξης JR-CoMP 3 dB, σε ένα αγροτικό σενάριο με ISD = 2,8 km [113].....	71
Εικόνα 3.14 Διαμορφώσεις UAV GoB με δύο, τέσσερις και έξι δέσμες (το πλάτος δέσμης δεν είναι σε κλίμακα) [113].....	72
Εικόνα 3.15 Μέσες πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για πτήσεις UAV στα 120 μέτρα σε αστικά και αγροτικά ραδιοφωνικά δίκτυα, όταν χρησιμοποιείται μια πανκατευθυντική κεραία (αναφορά) και GoB με έξι δέσμες στο UAV εξοπλισμού χρήστη [113].....	72
Εικόνα 3.16 Πειραματική ρύθμιση μέτρησης UAV για συνδεσιμότητα διπλού δικτύου σε δίκτυα LTE [113].....	74
Εικόνα 3.17 Η μέτρηση UAV έχει ως αποτέλεσμα τις καθυστερήσεις πακέτων που επιτυγχάνονται για διαφορετικά ύψη πτήσης όταν θεωρείται υβριδική πρόσβαση [113].....	75

Εικόνα 4.1 Απεικόνιση του μοντέλου στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη NOMA[113].....	79
Εικόνα 4.2 Παράδειγμα της στρατηγικής με επίκεντρο των UAV σε δικτύα κινητής τηλεφωνίας [113].	84
Εικόνα 4.3 Πιθανότητα κάλυψης των ζευγαρωμένων χρηστών NOMA έναντι της ισχύος του UAV στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη, με ρυθμό στόχο $R_t = 1$ BPCU και $R_f = 0,5$ BPCU. (a) Πιθανότητα κάλυψης στο σενάριο NLoS με διαφορετικούς εκθέτες απωλειών διαδρομής, όπου οι παράμετροι εξασθένησης ορίζονται σε $m = 1$ και $mI = 1$. (b) Πιθανότητα κάλυψης και στα δύο σενάρια NLoS και LoS, όπου οι παράμετροι εξασθένησης είναι $m = 2$ και $mI = 1$. Ο εκθέτης απώλειας διαδρομής του επιθυμητού συνδέσμου έχει οριστεί σε $\alpha = 3$ [113].....	89
Εικόνα 4.4 Πιθανότητα κάλυψης της στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη έναντι της απόστασης σταθερών χρηστών, με ρυθμό στόχο $R_t = 1$ BPCU και $R_f = 0,5$ BPCU. Ο εκθέτης απώλειας διαδρομής είναι σταθερός στο $\alpha = 3$ και η ισχύς του UAV ορίζεται στα -30 dBm [113].....	90
Εικόνα 4.5 Πιθανότητα κάλυψης τυπικών χρηστών έναντι του στοχευόμενου ρυθμού $R_t = R$ BPCU και του συντελεστή κατανομής ισχύος α , με τον ατελή συντελεστή SIC $\beta = 0$ και 0,15. Ο ρυθμός στόχος των σταθερών χρηστών $R_f = 0,5$ BPCU και η οριζόντια απόσταση του σταθερού χρήστη είναι 300 m. Η ισχύς εκπομπής των UAV είναι σταθερή στα -30 dBm με εκθέτη απώλειας διαδρομής $\alpha = 3$. Οι παράμετροι εξασθένησης ορίζονται σε $m = 3$ και $mI = 2$ [113].....	91
Εικόνα 4.6 Πιθανότητα κάλυψης των ζευγαρωμένων χρηστών NOMA στη στρατηγική με επίκεντρο τα UAV έναντι της ισχύος εκπομπής, με ρυθμούς στόχου $R_w = 1,5$ BPCU και $R_v = 1$ BPCU, αντίστοιχα. (a) Πιθανότητα κάλυψης στο σενάριο NLoS, όπου οι παράμετροι εξασθένησης ορίζονται σε $m = 1$ και $mI = 1$. Ο εκθέτης απώλειας διαδρομής ορίζεται σε $\alpha = 3$. (b) Πιθανότητα κάλυψης και στα δύο σενάρια NLoS και LoS με διαδρομή- εκθέτης απώλειας $\alpha = 3,5$, όπου οι παράμετροι διαλείψεων ορίζονται σε $m = 2$ και $mI = 1$ [113].....	92
Εικόνα 4.7 Πιθανότητα κάλυψης του κοντινού χρήστη έναντι του στοχευόμενου ρυθμού. Η ισχύς μετάδοσης των UAV είναι σταθερή στα -40 dBm. Οι παράμετροι διαλείψεων ορίζονται σε $m = 3$ και $mI = 2$ [113].....	93
Εικόνα 5.1 Απεικόνιση του BS-NOMA σεναρίου για τους 2 χρήστες.....	95
Εικόνα 5.2 Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης για το σενάριο BS-NOMA για ισχύ εκπομπής 30 dBm για κοντινό χρήστη και για μακρινό χρήστη.....	96
Εικόνα 5.3 Απεικόνιση των παραμέτρων του block για τον Bernoulli Binary Generator (BS-NOMA).....	97
Εικόνα 5.4 Απεικόνιση των παραμέτρων του block για τον QPSK Modulator.....	97
Εικόνα 5.5 Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον Transmitter.....	98
Εικόνα 5.6 Απεικόνιση της παραμετροποίησης του OFDM Modulator.	99

<u>Εικόνα 5.7</u> Απεικόνιση της παραμετροποίησης του Rayleigh fading channel (Επίγειος σταθμός βάσης).	99
<u>Εικόνα 5.8</u> Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης <code>terrestrial_pathloss()</code>	100
<u>Εικόνα 5.9</u> Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον Receiver.	100
<u>Εικόνα 5.10</u> Απεικόνιση της παραμετροποίησης για το block του AGWN θορύβου.	101
<u>Εικόνα 5.11</u> Απεικόνιση της παραμετροποίησης για το block του OFDM Demodulator.....	101
<u>Εικόνα 5.12</u> Απεικόνιση της παραμετροποίησης για το block του QPSK Demodulator.....	102
<u>Εικόνα 5.13</u> Απεικόνιση της παραμετροποίησης για το block του Error rate calculation.....	102
<u>Εικόνα 5.14</u> Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον υπολογισμό του data rate..	103
<u>Εικόνα 5.15</u> Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον υπολογισμό του data rate..	103
<u>Εικόνα 5.16</u> Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον υπολογισμό του average data rate και του sum rate.....	103
<u>Εικόνα 5.17</u> Απεικόνιση του BS-OMA σεναρίου για τους 2 χρήστες.....	104
<u>Εικόνα 5.18</u> Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης για το σενάριο BS-OMA για ισχύ εκπομπής 30 dBm για κοντινό χρήστη και για μακρινό χρήστη.....	105
<u>Εικόνα 5.19</u> Απεικόνιση των παραμέτρων του block για τον Bernoulli Binary Generator (OMA).....	106
<u>Εικόνα 5.20</u> Απεικόνιση των παραμέτρων στους OFDM Modulators/Demodulators (OMA).....	106
<u>Εικόνα 5.21</u> Απεικόνιση του UAV-NOMA σεναρίου για τους 2 χρήστες.....	107
<u>Εικόνα 5.22</u> Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης για το σενάριο UAV-NOMA για ισχύ εκπομπής 30 dBm για κοντινό χρήστη και για μακρινό χρήστη.....	107
<u>Εικόνα 5.23</u> Απεικόνιση της παραμετροποίησης του Rayleigh fading channel (Εναέριος σταθμός βάσης).....	108
<u>Εικόνα 5.24</u> Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης <code>airtoground_pathloss()</code>	108
<u>Εικόνα 5.25</u> Απεικόνιση του UAV-OMA σεναρίου για τους 2 χρήστες.....	109
<u>Εικόνα 5.26</u> Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης για το σενάριο UAV-OMA για ισχύ λήψης 30 dBm για κοντινό χρήστη και για μακρινό χρήστη.....	109
<u>Εικόνα 5.27</u> Απεικόνιση του UAV μοντέλου για προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο.....	110
<u>Εικόνα 5.28</u> Ορισμός του ύψους στο UAV μοντέλο.....	110

<u>Εικόνα 5.29</u>	Προσομοίωση UAV πραγματικού χρόνου σε φωτορεαλιστικό περιβάλλον.....	111
<u>Εικόνα 5.30</u>	Σύγκριση BER ως προς την ισχύ εκπομπής μεταξύ κοντινού χρήστη και μακρινού χρήστη.....	111
<u>Εικόνα 5.31</u>	Σύγκριση BER ως προς την ισχύ εκπομπής μεταξύ κοντινού χρήστη και μακρινού χρήστη σε UAV-OMA.....	112
<u>Εικόνα 5.32</u>	Σύγκριση BER ως προς την ισχύ εκπομπής μεταξύ κοντινού χρήστη και μακρινού χρήστη.....	113
<u>Εικόνα 5.33</u>	Σύγκριση BER ως προς την ισχύ εκπομπής μεταξύ κοντινού χρήστη και μακρινού χρήστη για την τεχνική μετάδοσης BS-OMA.....	114
<u>Εικόνα 5.34</u>	Σύγκριση BER μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής για την περίπτωση του κοντινού χρήστη.....	115
<u>Εικόνα 5.35</u>	Σύγκριση BER μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής για την περίπτωση του μακρινού χρήστη.....	115
<u>Εικόνα 5.36</u>	Σύγκριση του ενδιάμεσου BER μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής.....	116
<u>Εικόνα 5.37</u>	Σύγκριση του μέσου data rate μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής της εκάστοτε πηγής (BS ή UAV).....	117
<u>Εικόνα 5.38</u>	Σύγκριση του sum rate μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής. .	118

Λίστα Πινάκων

<u>Πίνακας 1.1</u>	Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων UAV [6].....	2
<u>Πίνακας 1.2</u>	Οι απαιτήσεις επικοινωνιών των UAV, προκαθορισμένες από το 3GPP [8].....	5
<u>Πίνακας 1.3</u>	Οι απαιτήσεις επικοινωνιών των τυπικών εφαρμογών UAV [9].....	5
<u>Πίνακας 1.4</u>	Σύγκριση των ασύρματων τεχνολογιών για επικοινωνίες UAV [113].....	6
<u>Πίνακας 2.1</u>	Παράμετροι και ορολογίες [113].....	36
<u>Πίνακας 2.2</u>	Προκαθορισμένες τιμές για προσομείωση και αριθμητική εκτίμηση [113].....	42
<u>Πίνακας 2.3</u>	Κάλυψη σύνδεσης ενός UAV συνδεδεμένου με κυψελοειδές δίκτυο με μια πανκατευθυντική κεραία σε δύο τύπους αστικών περιοχών. Ένας ρυθμός $R_t = 100$ kbps θεωρείται για την αξιολόγηση κάλυψης [113].....	48
<u>Πίνακας 3.1</u>	Τεχνική σύγκριση των δυνατοτήτων συγκέντρωσης [113].....	54
<u>Πίνακας 3.2</u>	Σύνοψη της διαμόρφωσης δικτύου για αστική περιοχή. Το ύψος της κεραίας είναι πάνω από το επίπεδο του εδάφους [113].....	55
<u>Πίνακας 3.3</u>	Πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για επίγειους χρήστες και drones σε διαφορετικά ύψη για διαφορετικά σενάρια [113].....	66

Ακρωνύμια

3GPP	3rd/third Generation Partnership Project
5G	5th/fifth generation
A2A	Air-to-Air
ATC	Aerial Traffic Control
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BVLoS	Beyond-Visual-Line-of-Sight
C&C / C2	Command and Control
CAPEX	Capital Expenditure
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
CDF	Cumulative Distribution Function
CNPC	Control and Non-Payload Communications
CoMP	Coordinated Multipoint
CSI	Channel State Information
D2D	Device-to-Device
DL	Downlink
DRX	Discontinuous reception
E2E	End-to-End
eICIC	Enhanced Inter-cell Interference Coordination
FANET	Flying Ad-hoc Network
feICIC	Further Enhanced Inter-cell Interference Coordination
GCQ	Gauss-Chebyshev Quadrature
GDC	Geometrical Disc Cover
GNSS	Global Navigation Satellite System
GoB	Grid of fixed Beams
G-UE	Ground Base Station User Equipment
HAP	High-Altitude Platform
HPPP	Homogeneous Point Poisson Process
IC	Interference Cancelation
ICIC	Inter-cell Interference Coordination

IRC	Interference Rejection Combining
ISD	Inter-Site Distance
ITU	International Telecommunication Union
IVC	Interference Victim Cell
JR-CoMP	Joint Coordinated Multipoint Reception
JT-CoMP	Joint Coordinated Multipoint Transmission
KPI	Key Performance Indicator
LAP	Low-altitude Platform
LoS	Line-of-Sight
LTE	Long-Term Evolution
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MBS	Macro Base Station
MIMO	Multiple Input–Multiple Output
mmW	Millimeter Wave
NLoS	Non-Line-of-Sight
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OMA	Orthogonal Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
PCP	Poisson Cluster Process
PRB	Physical Resource Block
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RRH	Remote Radio Head
RSRQ	Reference Signal Receive Quality
SBS	Small Base Station
SIC	Successive Interference Cancellation
SINR	Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio
SIR	Signal-to-Interference Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
U-UE	Unmanned Aerial Base Station User Equipment
V2V	Vehicle-to-Vehicle
VANET	Vehicle Ad-hoc Network
VLoS	Visual-Line-of-Sight

Περίληψη

Η χρήση των αυτόνομων εναέριων οχημάτων έχει προταθεί ως μια καινοτόμα προσέγγιση για τη βελτίωση της επίδοσης των ασύρματων επικοινωνιών. Στα πλαίσια των δικτύων 5ης γενιάς (5G - 5th/fifth generation) και του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT - Internet of Things) αναμένεται ο αριθμός των αυτόνομων εναέριων οχημάτων να αυξηθεί σε αρκετά σημαντικό βαθμό. Με αυτόν τον τρόπο, η αποδοτική ενσωμάτωση αυτόνομων εναέριων οχημάτων αυξάνει την ευελιξία των ασύρματων δικτύων τα οποία μπορούν να προσαρμοστούνε καλύτερα στην κινητικότητα των χρηστών καθώς και στις αυξημένες ανάγκες κάλυψης και συνδεσιμότητας. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία κατηγοριοποιούνται οι τύποι των αυτόνομων εναέριων οχημάτων και οι εφαρμογές τους βάσει των μετρικών της ασύρματης τεχνολογίας και της δικτύωσης. Επιπλέον, αναδεικνύονται τα κυριότερα προβλήματα που προκύπτουν από την συνύπαρξη επίγειων και εναέριων σταθμών βάσης και προτείνονται λύσεις για την καλύτερη χρήση και λειτουργία των εναέριων οχημάτων. Ακόμη, παρουσιάζεται η υλοποίηση μιας προσομοίωσης για σενάρια χρήσης μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV - Unmanned Aerial Vehicles) και σταθμών βάσεων (BS - Base Station) και γίνεται μια σύγκριση όσον αφορά τις επιδόσεις μεταξύ των υβριδικών σχημάτων των τεχνικών ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (OMA - Orthogonal Multiple Access) και μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA - Non Orthogonal Multiple Access) σε όρους ρυθμού εσφαλμένων ψηφίων και αθροιστικού ρυθμού μετάδοσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια εισαγωγή για τα UAV, τις κατηγορίες τους και τα χαρακτηριστικά τους και γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες και στις προδιαγραφές τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η δομή των UAV δικτύων καθώς οι επιδόσεις τους σύμφωνα με συγκεκριμένα μαθηματικά εργαλεία.

Στο τρίτο κεφάλαιο προτείνονται λύσεις για βελτίωση των επιδόσεων σχετικά με τη χρήση UAV σε δίκτυα μακροπρόθεσμης εξέλιξης (LTE - Long Term Evolution).

Στο τέταρτο κεφάλαιο προτείνεται η NOMA ως βασική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης για τον σχεδιασμό UAV δικτύων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση της προσομοίωσης και τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη από τα προηγούμενα κεφάλαια και αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Λέξεις Κλειδιά: UAV, IoT, QoS, HAP, LAP, 5G, MIMO, LTE, SINR, SIC, AGWN, OMA, NOMA

Abstract

The use of autonomous aerial vehicles has been proposed as an innovative approach to improve the performance of wireless communications. In the context of fifth generation networks (5G - 5th/fifth generation) and the Internet of Things (IoT - Internet of Things), the number of autonomous aerial vehicles is expected to increase significantly. In this way, the efficient integration of autonomous aerial vehicles increases the flexibility of wireless networks that can better adapt to user mobility as well as increased coverage and connectivity needs. This thesis categorizes the types of autonomous aerial vehicles and their applications based on wireless technology and networking metrics. In addition, the main problems arising from the coexistence of ground and aerial base stations are highlighted and solutions are proposed for the better use and operation of aerial vehicles. Furthermore, computer simulations for both (UAVs - Unmanned Aerial Vehicles) and (BSs - Base Stations) usage scenarios are performed. Finally, comparisons between Hybrid (OMA - Orthogonal Multiple Access) and (NOMA - Non Orthogonal Multiple Access) schemes are presented in terms of bit error rate and sum rate.

The first chapter presents an introduction to UAVs, their categories, and their characteristics, along with their technologies and specifications.

The second chapter analyzes the structure of UAV networks as well as their performance according to specific mathematical tools.

In the third chapter, solutions are proposed to improve the performance of (LTE - Long Term Evolution) UAV networks.

In the fourth chapter, NOMA is proposed as a technique for designing UAV networks.

The fifth chapter presents the implementation of the simulation and the results.

In the sixth and last chapter, a summary of the previous chapters is presented and the conclusions drawn from the simulation results are discussed.

Keywords: UAV, IoT, QoS, HAP, LAP, 5G, MIMO, LTE, SINR, SIC, AGWN, OMA, NOMA

1

Εισαγωγή

1.1 Ορισμοί, ταξινόμηση και κανονισμοί UAV

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV - Unmanned Aerial Vehicle), κοινώς γνωστά ως drones, είναι αεροσκάφη που οδηγούνται μέσω απομακρυσμένου ελέγχου ή μέσω ενσωματωμένων προγραμμάτων υπολογιστών χωρίς να συμπεριλαμβάνεται κάποιος άνθρωπος σε αυτά. Ιστορικά, τα UAV χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε στρατιωτικές εφαρμογές που αναπτύχθηκαν σε εχθρικό έδαφος για απομακρυσμένες επιτηρήσεις και ένοπλες επιθέσεις, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες των πιλότων. Τα τελευταία χρόνια, ο ενθουσιασμός για τη χρήση των UAV σε μη στρατιωτικές και εμπορικές εφαρμογές έχει εκτοξευθεί στα ύψη, χάρη στην πρόοδο των τεχνολογιών κατασκευής τους και στην μείωση του κόστους τους, καθιστώντας πιο εύκολη την πρόσβασή τους στο κοινό. Σήμερα, τα UAV έχουν βρει πολυάριθμες εφαρμογές σε πολλαπλά πεδία, όπως στις εναέριες επιθεωρήσεις, στις φωτογραφίες, στην γεωργία ακριβείας, στον έλεγχο κυκλοφορίας, στον εντοπισμό και τη διάσωση, στην παράδοση δεμάτων, καθώς και στις τηλεπικοινωνίες. Ως εκ τούτου, τα UAV έχουν αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που θα προσφέρει αρκετές επιχειρηματικές ευκαιρίες στο εγγύς μέλλον.

Υπάρχουν πολλοί τύποι UAV λόγω των πολυάριθμων και διαφοροποιημένων εφαρμογών τους. Τα UAV μπορούν πρακτικά να ταξινομηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες σύμφωνα με κριτήρια όπως η λειτουργικότητα, το βάρος/ωφέλιμο φορτίο, το μέγεθος, η αντοχή, η διαμόρφωση πτερυγίων, η μέθοδος ελέγχου, το εύρος πλεύσης, το ύψος πτήσης, η μέγιστη ταχύτητα και η μέθοδος παροχής ενέργειας. Για παράδειγμα, από την άποψη της διαμόρφωσης πτερυγίων, τα UAV με σταθερή και περιστροφική πτέρυγα είναι οι δύο κύριοι τύποι UAV που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην πράξη. Συνήθως, τα UAV με σταθερά φτερά έχουν υψηλότερη μέγιστη ταχύτητα πτήσης, μεγαλύτερα ωφέλιμα φορτία και μεγαλύτερη αντοχή σε σύγκριση με τα

UAV με περιστροφικά φτερά, ενώ τα μειονεκτήματά τους έγκεινται στην αδυναμία τους να αιωρούνται και στο γεγονός ότι απαιτείται ένας διάδρομος ή ένας εκτοξευτής για απογείωση/προσγείωση. Αντίθετα, τα UAV με περιστροφικά φτερά μπορούν να απογειώνονται/προσγειώνονται κάθετα και να αιωρούνται σε προκαθορισμένες θέσεις. Τέτοια διαφορετικά χαρακτηριστικά αυτών των δύο τύπων UAV έχουν επομένως μεγάλη επίδραση στις κατάλληλες περιπτώσεις χρήσης τους. Μια άλλη κοινή μέθοδος ταξινόμησης των UAV βασίζεται στο μέγεθος.

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων UAV [6].

	Micro	Small	Medium	Large
Παράδειγμα	Kogan Nano Drone	DJI Spreading Wings S900	Scout B-330 helicopter	Predator B
Βάρος	16 g	3.3 kg	90 kg	2223 kg
Payload	N/A	4.9 kg	50 kg	1700 kg
Μηχανισμός Πτήσης	Multi-rotor	Multi-rotor	Multi-rotor	Fixed wing
Έυρος	50–80 m	N/A	N/A	1852 km
Υψόμετρο	N/A	N/A	3 km	5 km
Αντοχή	6–8 min	18 min	180 min	1800 min
Μέγιστη Ταχύτητα	N/A	57.6 km h ⁻¹	100 km h ⁻¹	482 km h ⁻¹
Τροφοδοσία	160 mAh Li battery	12000 mAh LiPo battery	21 kW Βενζίνη	712 kW 950 shaft Στροβιλοκινητήρας ιπποδύναμης
Εφαρμογή	Αναψυχή	Επαγγελματική αεροφωτογράφιση Κατάλληλο για τη μεταφορά κυψελωτών σταθμών βάσης ή εξοπλισμού χρήστη	Απόκτηση δεδομένων, ζωντανή ροή βίντεο HD. Μπορεί να μεταφέρει κυψελοειδείς σταθμούς βάσης ή εξοπλισμό χρήστη	Αναγνώριση, αερομεταφερόμενη επιτήρηση, απόκτηση στόχων

Ο **Πίνακας 1.1** [6] συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά τεσσάρων τύπων UAV με βάση το μέγεθός τους. Γενικά, η επιλογή ενός κατάλληλου τύπου UAV είναι κρίσιμη για την εκπλήρωση της αποστολής τους αποτελεσματικά, η οποία πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις προδιαγραφές τους καθώς και τις απαιτήσεις των πρακτικών εφαρμογών. Ανάλογα με την εφαρμογή και τους αντικειμενικούς στόχους, χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ένας κατάλληλος τύπος UAV που να

ικανοποιεί τις διάφορες απαιτήσεις που επιβάλλονται από την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας (QoS - Quality of Service), τη φύση του περιβάλλοντος και τους ομοσπονδιακούς κανονισμούς. Στην πραγματικότητα, για τη σωστή χρήση των UAV σε οποιαδήποτε ασύρματης δικτύωσης, αρκετοί παράγοντες όπως οι δυνατότητες των UAV καθώς και τα υψόμετρα πτήσης τους πρέπει να ληφθούν υπόψη. Τα UAV μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τα υψόμετρα τους σε πλατφόρμες υψηλού υψομέτρου (HAPs - High Altitude Platforms) και σε πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου (LAPs - Low Altitude Platforms). Τα HAP τοποθετούνται σε υψόμετρα μεγαλύτερα από 17 km και είναι συνήθως σχεδόν ακίνητα [1]. Τα LAP μπορούν να ίπτανται σε υψόμετρα δεκάδων μέτρων, είναι ευέλικτα και μπορούν να κινούνται γρήγορα [2].

Το μέγιστο επιτρεπόμενο υψόμετρο των LAP-drones που μπορούν ελεύθερα να πετάξουν χωρίς άδεια είναι τα 400 πόδια [3]. Σε σύγκριση με τα HAP, η ανάπτυξη των LAP μπορεί να γίνει πιο γρήγορα, καθιστώντας τα έτσι πιο κατάλληλα για εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο (π.χ. καταστάσεις έκτακτης ανάγκης). Σε αντίθεση με τα HAP, τα LAP μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συλλογή δεδομένων από αισθητήρες εδάφους. Επιπλέον, τα LAP μπορούν εύκολα να επαναφορτιστούν ή να αντικατασταθούν εάν χρειάζεται. Αντίθετα, τα HAP έχουν μεγαλύτερη αντοχή και είναι σχεδιασμένα για μακροχρόνιες λειτουργίες έως και μερικούς μήνες. Επιπλέον, τα συστήματα HAP προτιμούνται συνήθως για την παροχή ευρείας κλίμακας ασύρματης κάλυψης σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Ωστόσο, τα HAP είναι δαπανηρά και ο χρόνος ανάπτυξής τους είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τα LAP.

Τα UAV μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα με τον τύπο, σε UAV σταθερής πτέρυγας και περιστροφικής πτέρυγας. Σε σύγκριση με τα UAV που έχουν περιστροφικά φτερά, τα UAV με σταθερές πτέρυγες όπως τα μικρά αεροσκάφη έχουν μεγαλύτερο βάρος και δεν δύνανται να ίπτανται σταθερά πάνω από μια περιοχή, αλλά να κινούνται ως προς μια κατεύθυνση. Αντίθετα, τα UAV με περιστροφικές πτέρυγες, όπως τα quadrotor drones, μπορούν να αιωρούνται και να παραμένουν ακίνητα πάνω από μια δεδομένη περιοχή. Ο χρόνος πτήσης ενός UAV εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η πηγή ενέργειας (π.χ. μπαταρία, καύσιμο κ.λπ.), ο τύπος, το βάρος, η ταχύτητα, και η τροχιά του UAV.

Τα ρυθμιστικά ζητήματα αποτελούν σημαντικούς περιοριστικούς παράγοντες για την ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας που βασίζονται σε UAV. Παρά τις πολλά υποσχόμενες εφαρμογές των UAV σε ασύρματα δίκτυα, υπάρχουν πολλές ανησυχίες όσον αφορά το απόρρητο, τη δημόσια ασφάλεια, την ασφάλεια, την αποφυγή συγκρούσεων και την προστασία δεδομένων. Από την άποψη αυτή, οι κανονισμοί για τα UAV αναπτύσσονται συνεχώς για τον έλεγχο των λειτουργιών των UAV, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος UAV, το φάσμα, το υψόμετρο και η ταχύτητα των UAV.

Γενικά, πέντε βασικά κριτήρια λαμβάνονται συχνά υπόψη κατά την ανάπτυξη κανονισμών για UAV [4] [5]:

- **Εφαρμογή:** Αφορά για τον καθορισμό του πεδίου εφαρμογής (λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο, το βάρος και τον ρόλο των UAV) όπου εφαρμόζονται οι κανονισμοί UAV
- **Λειτουργικοί περιορισμοί:** Σχετίζονται με περιορισμούς στις θέσεις των UAV
- **Διοικητικές διαδικασίες:** Συγκεκριμένες νομικές διαδικασίες που θα μπορούσαν να χρειαστούν για τη λειτουργία ενός UAV

- **Τεχνικές απαιτήσεις:** Περιλαμβάνουν επικοινωνίες, έλεγχο και μηχανικές δυνατότητες των drones
- **Εφαρμογή ηθικών περιορισμών:** Σχετίζονται με προστασία προσωπικών δεδομένων.

Οι κανονισμοί για τα UAV διαφέρουν μεταξύ διαφορετικών χωρών και τύπων γεωγραφικών περιοχών (π.χ. αστικές ή αγροτικές).

1.2 Απαιτήσεις επικοινωνίας και φάσματος UAV

Μια βασική τεχνολογία αξιοποίησης των UAV είναι η ασύρματη επικοινωνία. Από την μία, τα UAV πρέπει να ανταλλάσσουν κρίσιμες για την ασφάλεια πληροφορίες με διάφορα μέρη, όπως απομακρυσμένοι πιλότοι, κοντινά εναέρια οχήματα και ελεγκτές εναέριας κυκλοφορίας, για να διασφαλιστεί η ασφάλεια, η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα πτητικής λειτουργίας. Αυτό είναι κοινώς γνωστό ως επικοινωνία ελέγχου και μη ωφέλιμου φορτίου (**CNPC** - Control and Non-Payload Communications). Από την άλλη, ανάλογα με τις αποστολές τους, τα UAV μπορεί να χρειαστεί να εκπέμπουν ή και να λαμβάνουν έγκαιρα δεδομένα που σχετίζονται με την αποστολή, όπως αεροφωτογραφίες, υψηλής ρυθμαπόδοσης βίντεο και πακέτα δεδομένων για αναμετάδοση προς/από διάφορες επίγειες οντότητες όπως χειριστές UAV, τελικούς χρήστες ή πύλες εδάφους. Αυτή η διαδικασία αποκαλείται ως επικοινωνία ωφέλιμου φορτίου.

Η ενεργοποίηση αξιόπιστων και ασφαλών συνδέσεων CNPC είναι μια αναγκαιότητα για την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας και ευρείας χρήσης UAV. Η διεθνής ένωση τηλεπικοινωνιών (**ITU** – International Telecommunication Union) έχει ταξινομήσει [7] την απαιτούμενη CNPC έτσι ώστε να διασφαλίζει ασφαλείς λειτουργίες UAV σε τρεις κατηγορίες :

- **Επικοινωνία για εντολή και έλεγχο UAV:** Περιλαμβάνει την αναφορά τηλεμετρίας (π.χ. κατάσταση πτήσης) από το UAV στον πιλότο εδάφους, τη σηματοδότηση τηλεχειρισμού σε πραγματικό χρόνο από το έδαφος σε UAV για μη αυτόνομα UAV και την τακτική ενημέρωση εντολών πτήσης (όπως π.χ. ενημέρωση σημείου διαδρομής) για (ημι-)αυτόνομα UAV.
- **Επικοινωνία για αναμετάδοση ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (ATC - Aerial Traffic Control):** Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι τα UAV δεν προκαλούν καμία απειλή για την ασφάλεια στα παραδοσιακά επανδρωμένα αεροσκάφη, ειδικά για πτήσεις πλησιάζοντας περιοχές με μεγάλη πυκνότητα αεροσκαφών. Για το σκοπό αυτό, μια σύνδεση μεταξύ του ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας και του επίγειου σταθμού ελέγχου μέσω του UAV, που ονομάζεται αναμετάδοση ATC, είναι απαραίτητη.

- **Υποστήριξη της επικοινωνίας “αίσθηση και αποφυγή”:** Η ικανότητα υποστήριξης αίσθησης και αποφυγής διασφαλίζει ότι το UAV διατηρεί επαρκή απόσταση ασφαλείας από τα κοντινά εναέρια οχήματα, το έδαφος και τα εμπόδια.

Πίνακας 1.2 Οι απαιτήσεις επικοινωνιών των UAV, προκαθορισμένες από το 3GPP [8].

	Τύπος Δεδομένων	Ρυθμός Δεδομένων	Αξιοπιστία	Καθυστέρηση
DL (επίγειος σταθμός σε UAV)	Εντολή και Έλεγχος	60–100 kbps	10^{-3} ρυθμός εσφαλμένων πακέτων	50 ms
UL (UAV σε επίγειο σταθμό)	Εντολή και Έλεγχος	60–100 kbps	10^{-3} ρυθμός εσφαλμένων πακέτων	N/A
	Δεδομένα Εφαρμογής	Μέχρι 50 Mbps	N/A	Παρόμοια με τον επίγειο χρήστη

Η (3GPP - 3rd/third Generation Partnership Project) έχει καθορίσει τις απαιτήσεις επικοινωνίας για αυτούς τους δύο τύπους συνδέσεων, οι οποίοι συνοψίζονται στον **Πίνακα 1.2** [8]. Το CNPC είναι συνήθως χαμηλού ρυθμού δεδομένων, ας πούμε, της τάξης των kilobits ανά δευτερόλεπτο (kbps), αλλά έχει αυστηρές απαιτήσεις για υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 1.2** [8], η απαίτηση ρυθμού δεδομένων για την διαχείριση και τον έλεγχο του UAV είναι στο εύρος 60 έως 100 kbps τόσο για την κατερχόμενη ζεύξη (**DL** - Downlink) όσο και για την ανερχόμενη ζεύξη (**UL** - Uplink) η αξιοπιστία μικρότερη από 10^{-3} αναφορικά με τον ρυθμό εσφαλμένων πακέτων και η καθυστέρηση μικρότερη από 50 ms.

Πίνακας 1.3 Οι απαιτήσεις επικοινωνιών των τυπικών εφαρμογών UAV [9].

Εφαρμογή UAV	Κάλυψη σε ύψος (m)	Payload καθυστέρηση (ms)	Ωφέλιμο φορτίο (Payload) ρυθμός δεδομένων (DL/UL)
Παράδοση με drone	100	500	300 kbps/200 kbps
Γυρίσματα με drone	100	500	300 kbps/30 Mbps
Σημείο πρόσβασης	500	500	50 Mbps/50 Mbps

Επιτήρηση	100	3000	300 kbps/10 Mbps
Έλεγχος υποδομής	100	3000	300 kbps/10 Mbps
Επίδειξη στόλου drones	200	100	200 kbps/200 kbps
Γεωργία ακριβείας	300	500	300 kbps/200 kbps
Αναζήτηση και διάσωση	100	500	300 kbps/6 Mbps

Ενώ οι απαιτήσεις επικοινωνίας των συνδέσμων CNPC είναι παρόμοιες για διαφορετικούς τύπους UAV λόγω των κοινών θεμάτων ασφαλείας τους, εκείνες για δεδομένα ωφέλιμου φορτίου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή. Στον **Πίνακα 1.3** [9], παρατίθενται αρκετές τυπικές εφαρμογές UAV και οι αντίστοιχες απαιτήσεις επικοινωνίας δεδομένων τους.

1.3 Υπάρχουσες τεχνολογίες για επικοινωνίες UAV

Για την υποστήριξη της επικοινωνίας CNPC και ωφέλιμου φορτίου σε διάφορες εφαρμογές UAV για ασύρματες επικοινωνίες αέρα-αέρα και αέρα-εδάφους σε τρισδιάστατο χώρο, πρέπει να επιλεγούν οι κατάλληλες ασύρματες τεχνολογίες για την επίτευξη απρόσκοπτης συνδεσιμότητας και υψηλής αξιοπιστίας/απόδοσης. Για το σκοπό αυτό, στον **Πίνακα 1.4** [113] παρατίθενται τέσσερις υποψήφιες τεχνολογίες επικοινωνίας:

Πίνακας 1.4 Σύγκριση των ασύρματων τεχνολογιών για επικοινωνίες UAV [113].

Τεχνολογία	Περιγραφή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Απευθείας Σύνδεση	Άμεση επικοινωνία από σημείο σε σημείο με επίγειο κόμβο	Απλό, χαμηλό κόστος	Περιορισμένη εμβέλεια, χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, ευάλωτη σε παρεμβολές, μη επεκτάσιμη
Δορυφόρος	Επικοινωνία και πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου	Παγκόσμια κάλυψη	Δαπανηρός, βαρύς/ογκώδης/καταναλωτικός εξοπλισμός επικοινωνίας, υψηλή καθυστέρηση, μεγάλη εξασθένηση σήματος

<i>Ad-hoc</i> δίκτυο	Δυναμικά αυτοοργάνωμένο και χωρίς υποδομή δίκτυο	Στιβαρό και προσαρμόσιμο, υποστήριξη για υψηλή κινητικότητα	Δαπανηρό, χαμηλή απόδοση φάσματος, διακοπτόμενη συνδεσιμότητα, περίπλοκο πρωτόκολλο δρομολόγησης
Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας	Ενεργοποίηση επικοινωνιών UAV με χρήση κυψελωτής υποδομής και τεχνολογιών	Σχεδόν πανταχού παρούσα προσβασιμότητα, οικονομικά αποδοτική, ανώτερη απόδοση και επεκτασιμότητα	Μη διαθέσιμο σε απομακρυσμένες περιοχές, πιθανή παρεμβολή στις επίγειες επικοινωνίες

Στις επόμενες υπο-ενότητες αναλύεται η κάθε τεχνολογία ξεχωριστά.

1.3.1 Απευθείας σύνδεση

Λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους, η άμεση επικοινωνία από σημείο σε σημείο μεταξύ ενός UAV και του συνδεδεμένο κόμβου πάνω από τη ζώνη χωρίς άδεια χρησιμοποιήθηκε πιο συχνά για εμπορικά UAV στο παρελθόν, όπου ο επίγειος κόμβος μπορεί να είναι ένα joystick ή ένας επίγειος σταθμός. Ωστόσο, συνήθως περιορίζεται στην επικοινωνία (**LoS** - Line-of-Sight), γεγονός που περιορίζει σημαντικά τη λειτουργία του εύρους και εμποδίζει τις εφαρμογές του σε πολύπλοκα περιβάλλοντα διάδοσης. Για παράδειγμα, σε αστικές περιοχές, η επικοινωνία μπορεί εύκολα να αποκλειστεί από, π.χ., δέντρα και πολυώροφα κτίρια, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλή αξιοπιστία και χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Επιπλέον, μια τόσο απλή λύση είναι συνήθως μη ασφαλής και ευάλωτη σε παρεμβολές και εμπλοκές. Λόγω των παραπάνω περιορισμών, η απλή επικοινωνία απευθείας σύνδεσης δεν είναι μια επεκτάσιμη λύση για την υποστήριξη μεγάλης κλίμακας ανάπτυξης UAV στο μέλλον.

1.3.2 Δορυφόρος

Η αξιοποίηση των επικοινωνιών UAV μέσω της χρήσης δορυφόρων αποτελεί μια βιώσιμη επιλογή λόγω της παγκόσμιας κάλυψης που προσφέρουν. Συγκεκριμένα, οι δορυφόροι μπορούν να βοηθήσουν στην αναμετάδοση δεδομένων που μεταδίδονται ευρέως μεταξύ των UAV, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για UAV πάνω από τους ωκεανούς και σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η κάλυψη του επίγειου δικτύου (WiFi ή κινητής τηλεφωνίας) δεν είναι διαθέσιμη. Επιπλέον, τα δορυφορικά σήματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για πλοήγηση και εντοπισμό από τα UAV.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα των επικοινωνιών UAV με δυνατότητα δορυφόρου. Πρώτον, η απώλεια και η καθυστέρηση διάδοσης είναι αρκετά σημαντικές λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των δορυφόρων και UAV/σταθμούς εδάφους χαμηλού υψομέτρου. Αυτό δημιουργεί μεγάλες προκλήσεις για την εμφάνιση εξαιρετικά αξιόπιστης και ευαίσθητης σε καθυστέρηση CNPC για UAV. Δεύτερον, τα UAV συνήθως έχουν αυστηρούς περιορισμούς μεγέθους, βάρους και ισχύος και, ως εκ τούτου, ενδέχεται να μην είναι σε θέση να μεταφέρουν τους βαρείς, ογκώδεις και ενεργοβόρους εξοπλισμούς δορυφορικής επικοινωνίας (π.χ. κεραία ανακλαστήρα / δορυφορικό πιάτο) που απαιτούνται. Τρίτον, το υψηλό λειτουργικό κόστος της δορυφορικής επικοινωνίας εμποδίζει επίσης το εύρος της χρήσης για πυκνοανεπτυγμένα UAV σε εφαρμογές.

1.3.3 Δίκτυο Ad-Hoc

Το (MANET - Mobile Ad-hoc Network) είναι ένα δίκτυο χωρίς υποδομές και δυναμικά αυτο-οργανωμένο για την ενεργοποίηση της peer-to-peer επικοινωνίας μεταξύ κινητών συσκευών όπως οι φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα και τα walkie-talkie. Τέτοιες συσκευές συνήθως επικοινωνούν μέσω ασύρματων συνδέσεων περιορισμένου εύρους ζώνης, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα, το IEEE 802.11 a/b/g/n πρωτόκολλο. Κάθε συσκευή σε ένα MANET μπορεί να κινηθεί τυχαία με την πάροδο του χρόνου. Ως αποτέλεσμα, οι συνθήκες σύνδεσής της με άλλες συσκευές ενδέχεται να αλλάζουν συχνά. Επιπλέον, για την υποστήριξη των επικοινωνιών μεταξύ δύο κόμβων ο ένας μακριά από τον άλλο, κάποιοι άλλοι κόμβοι μεταξύ τους πρέπει να βοηθήσουν στην προώθηση των δεδομένων μέσω πολλαπλών αλμάτων αναμετάδοσης, έχοντας ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, χαμηλή απόδοση φάσματος και μεγάλη διάρκεια καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Το ad-hoc δίκτυο οχημάτων (VANET - Vehicle Ad-hoc Network) και το ιπτάμενο ad-hoc δίκτυο (FANET - Flying Ad-hoc Network) είναι δύο εφαρμογές του MANET, για την υποστήριξη επικοινωνίας μεταξύ υψηλής κινητικότητας επίγειων οχημάτων και UAV σε δίκτυα 2D και 3D, αντίστοιχα [10].

Η τοπολογία ή η διαμόρφωση ενός FANET για UAV μπορεί να λάβει διαφορετικές μορφές, όπως πλέγματος, δαχτυλιδιού, αστέρα ή ακόμα και ευθείας γραμμής, ανάλογα με το σενάριο εφαρμογής. Για παράδειγμα, μια τοπολογία δικτύου αστέρα είναι κατάλληλη για εφαρμογές σμήνους UAV, για τις οποίες τα UAV σε ένα σμήνος όλα επικοινωνούν μέσω ενός UAV κεντρικού διανομέα που είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με τους επίγειους σταθμούς. Αν και το FANET είναι μια στιβαρή και ευέλικτη αρχιτεκτονική για την υποστήριξη UAV επικοινωνιών σε ένα μικρό δίκτυο, δεν είναι σε θέση να παρέχει μια επεκτάσιμη λύση εξυπηρετώντας μαζικά UAV που αναπτύσσονται σε μια ευρεία περιοχή, λόγω της πολυπλοκότητας και των δυσκολιών για την υλοποίηση ενός αξιόπιστου πρωτοκόλλου δρομολόγησης σε όλο το δίκτυο με δυναμικές και διακοπτόμενες συνδέσεις μεταξύ των ιπτάμενων UAV.

1.3.4 Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας

Είναι προφανές ότι οι προαναφερθείσες τεχνολογίες γενικά δεν μπορούν να υποστηρίξουν UAV επικοινωνίες μεγάλης κλίμακας με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Από την άλλη είναι και οικονομικά μη βιώσιμο για την κατασκευή νέων και αποκλειστικών επίγειων δικτύων για την επίτευξη αυτού του στόχου. Ως εκ τούτου, έχει αυξηθεί σημαντικά το ενδιαφέρον στην αξιοποίηση των υπαρχόντων κυψελωτών δικτύων μελλοντικής γενιάς καθιστώντας εφικτές τις επικοινωνίες UAV-εδάφους [11].

Χάρη στη σχεδόν πανταχού παρούσα κάλυψη του κυψελοειδούς δικτύου σε όλο τον κόσμο, καθώς και στην οπτική οπισθόζευξη (**backhaul**) υψηλής ταχύτητας και τις προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας, οι απαιτήσεις επικοινωνίας CNPC και ωφέλιμου φορτίου για UAV μπορούν ενδεχομένως να ικανοποιηθούν, ανεξάρτητα από την πυκνότητα των UAV καθώς και τις αποστάσεις τους από τους αντίστοιχους επίγειους κόμβους. Για παράδειγμα, το κυψελωτό δίκτυο πέμπτης γενιάς (5G) αναμένεται να υποστηρίξει μέγιστο ρυθμό δεδομένων 10 Gbps με καθυστέρηση μόνο 1 ms μετ' επιστροφής, ο οποίος είναι επαρκής για εφαρμογές επικοινωνιών UAV υψηλής ταχύτητας και με ευαισθησία στην καθυστέρηση, όπως ροή βίντεο σε πραγματικό χρόνο και αναμετάδοση δεδομένων.



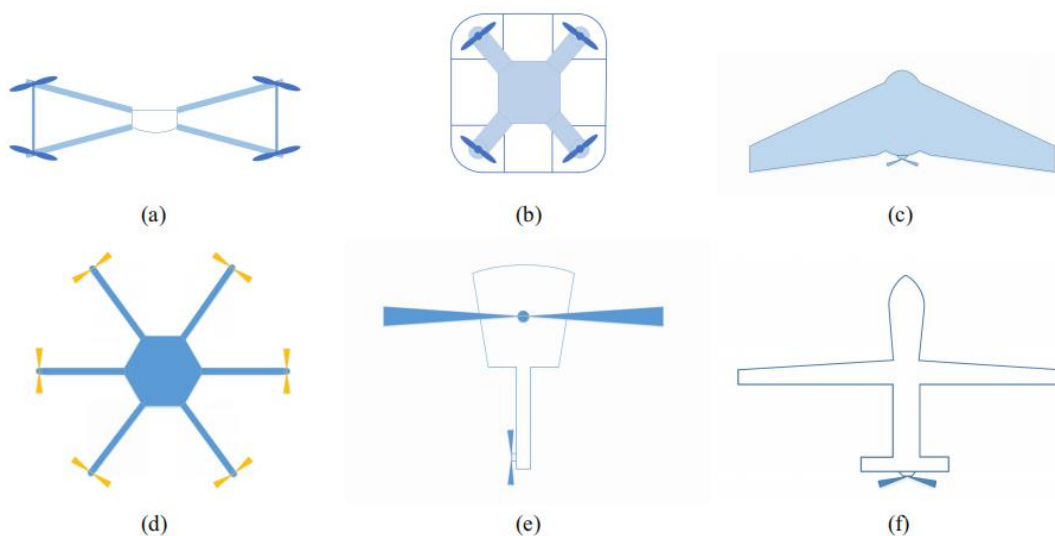
Εικόνα 1.1 UAV επικοινωνίες με μια ενσωματωμένη αρχιτεκτονική δικτύου [12].

Παρά τα πολλά υποσχόμενα πλεονεκτήματα των κινητών επικοινωνιών UAV, εξακολουθούν να υπάρχουν σενάρια όπου οι υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας δεν είναι διαθέσιμες, π.χ. σε απομακρυσμένες περιοχές όπως η θάλασσα, η έρημος και το δάσος. Σε τέτοια σενάρια, άλλες τεχνολογίες όπως η απευθείας σύνδεση, ο δορυφόρος, και το FANET μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη επικοινωνιών UAV πέρα από την επίγεια κάλυψη των κυψελωτών δικτύων. Ως εκ τούτου, προβλέπεται ότι το μελλοντικό ασύρματο δίκτυο για την υποστήριξη επικοινωνιών UAV μεγάλης κλίμακας θα έχει μια ολοκληρωμένη τρισδιάστατη αρχιτεκτονική που θα αποτελείται από επικοινωνίες UAV-σε-UAV, UAV-σε-δορυφόρους και UAV-σε-έδαφος, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.1** [12], όπου κάθε UAV μπορεί να ενεργοποιηθεί

με μία ή περισσότερες τεχνολογίες επικοινωνίας για να εκμεταλλευτεί την πλούσια ποικιλομορφία συνδεσιμότητας σε ένα τέτοιο υβριδικό δίκτυο.

1.4 Τύποι και χαρακτηριστικά UAV

Τα UAV, κοινώς γνωστά ως drones, είναι διαθέσιμα σε διαφορετικά μεγέθη και προδιαγραφές, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.2** [112]. Σε αυτή την ενότητα, τα χαρακτηριστικά μερικών τυπικών drones συνοψίζονται και επεξηγούνται, με ιδιαίτερη έμφαση στον αντίκτυπό τους στις κινητές επικοινωνίες που υποστηρίζονται από UAV.



Εικόνα 1.2 Εικόνες διαφορετικών τύπων UAV. (a) Parrot Swing. (b) Kogan Nano Drone. (c) Parrot Disco. (d) DJI Spreading Wings S900. (e) Scout B-330 UAV helicopter. (f) Predator B [112].

1.4.1 Ωφέλιμο φορτίο

Το ωφέλιμο φορτίο αναφέρεται στο μέγιστο βάρος που μπορεί ένα drone να μεταφέρει. Τα ωφέλιμα φορτία των drones ποικίλλουν από δεκάδες γραμμάρια έως εκατοντάδες κιλά [13]. Όσο μεγαλύτερο είναι το ωφέλιμο φορτίο, τόσο περισσότερος εξοπλισμός και αξεσουάρ μπορούν να μεταφερθούν σε βάρος ενός μεγαλύτερου μεγέθους drone, υψηλότερης χωρητικότητας μπαταρίας και μικρότερης διάρκειας στον αέρα. Τα τυπικά πληρωμένα φορτία περιλαμβάνουν βιντεοκάμερες και κάθε είδους αισθητήρες, οι οποίοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για αναγνώριση, επιτήρηση και εμπορικούς σκοπούς [14]. Κατά την υποβοήθηση των κινητών επικοινωνιών, τα drones μπορούν να μεταφέρουν κυψελοειδείς εξοπλισμούς χρήστη, όπως κινητά τηλέφωνα ή tablet, του οποίου το βάρος είναι συνήθως λιγότερο από 1 κιλό [15]. Οι σταθμοί βάσης ή οι

απομακρυσμένες ραδιοφωνικές κεφαλές (**RRH** - Remote Radio Headers) μπορούν επίσης να μεταφερθούν ή να τοποθετηθούν σε drones για την παροχή υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας. Σε αυτή την περίπτωση, το ωφέλιμο φορτίο των drones θα πρέπει να είναι τουλάχιστον μερικά κιλά.

1.4.2 Μηχανισμός πτήσης

Ανάλογα με τους μηχανισμούς πτήσης τους, τα drones μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τύπους:

- Μη επανδρωμένα αεροσκάφη με πολλαπλούς ρότορες (γνωστά και ως drones με περιστροφικά πτερύγια), τα οποία επιτρέπουν την κατακόρυφη απογείωση και προσγείωση και μπορούν να αιωρούνται πάνω από μια σταθερή θέση για την παροχή συνεχούς κυψελοειδούς κάλυψης σε συγκεκριμένες περιοχές. Αυτή η υψηλή ευελιξία τα καθιστά κατάλληλα για την υποβοήθηση των κυψελοειδών επικοινωνιών, αφού μπορούν να αναπτύξουν εναέριους σταθμούς βάσης στις επιθυμητές θέσεις με υψηλή ακρίβεια, ή να πετάξουν σε μια καθορισμένη τροχιά ενώ μεταφέρουν σταθμούς βάσης. Ωστόσο, τα drones με πολλαπλούς ρότορες έχουν περιορισμένη κινητικότητα και καταναλώνουν σημαντική ενέργεια για την αντιμετώπιση της βαρύτητας καθ' όλη την διάρκεια της πτήσης.
- Τα drones με σταθερά πτερύγια μπορούν να γλιστρήσουν πάνω από τον αέρα, γεγονός που τα καθιστά ενεργειακά αποδοτικά και ικανά να μεταφέρουν βαρύ ωφέλιμο φορτίο. Η ολίσθηση βοηθά επίσης τα drones με σταθερά πτερύγια να ταξιδεύουν με μεγαλύτερη ταχύτητα. Τα μειονεκτήματα των drones σταθερής πτέρυγας είναι ότι (i) απαιτούν διάδρομο για να απογειωθούν και να προσγειωθούν καθώς η κατακόρυφη απογείωση και προσγείωση δεν είναι δυνατή [16] και (ii) δεν μπορούν να αιωρούνται πάνω από μια σταθερή θέση. Τα drones με σταθερά πτερύγια είναι επίσης ακριβότερα από τα multi-rotor drones.
- Τα υβριδικά drones σταθερής/περιστροφικής πτέρυγας έφτασαν στην αγορά για την παροχή συμβιβασμού μεταξύ των δύο προαναφερθέντων τύπων drone. Ενδεικτικό παράδειγμα ενός υβριδικού drone σταθερής/περιστροφικής πτέρυγας είναι το Parrot Swing που φαίνεται (**Εικόνα 1.2(α)**) [112], το οποίο μπορεί να απογειωθεί κατακόρυφα, να φτάσει γρήγορα στον προορισμό του γλιστρώντας στον αέρα και μετά να μεταβεί σε αιώρηση χρησιμοποιώντας τέσσερις ρότορες.

1.4.3 Εμβέλεια και υψόμετρο

Η εμβέλεια ενός drone αναφέρεται στην απόσταση από την οποία μπορεί να ελεγχθεί απομακρυσμένα. Το εύρος ποικίλλει από δεκάδες μέτρα για μικρά drones έως εκατοντάδες

χιλιόμετρα για μεγάλα drones. Το υψόμετρο αναφέρεται στο μέγιστο ύψος που μπορεί ένα drone να φθάσει ανεξάρτητα από τους ειδικούς κανονισμούς της χώρας. Το μέγιστο υψόμετρο πτήσης ενός συγκεκριμένου drone είναι μια κρίσιμη παράμετρος για τις κινητές επικοινωνίες με τη χρήση UAV, αφού ένας σταθμός βάσης UAV χρειάζεται να μεταβάλλει το υψόμετρο του για να μεγιστοποιήσει την κάλυψη του εδάφους και να ικανοποιήσει διαφορετικές απαιτήσεις της QoS [17]. Συνολικά, οι εναέριες πλατφόρμες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους ανάλογα με το υψόμετρο τους:

- **Πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου (LAPs)**, που συνήθως χρησιμοποιούνται για να υποστηρίξουν τις κυψελοειδείς επικοινωνίες, δεδομένου ότι είναι πιο οικονομικές και επιτρέπουν γρήγορη ανάπτυξη. Εξάλλου, τα LAP συνήθως παρέχουν οπτική επαφή μικρής εμβέλειας LoS συνδέσεις που μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την απόδοση της επικοινωνίας [17] [18] [19].
- **Πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (HAPs)**, όπως τα μπαλόνια μπορούν επίσης να παρέχουν κινητή συνδεσιμότητα. Σε σύγκριση με τα LAP, τα HAP έχουν ευρύτερη κάλυψη και μπορούν να παραμείνουν πολύ περισσότερο στον αέρα. Ωστόσο, η ανάπτυξη των HAP είναι πιο περίπλοκη και θεωρούνται κυρίως ως όχημα για την παροχή σύνδεσης στο διαδίκτυο σε μεγάλα τμήματα του κόσμου τα οποία επί του παρόντος δεν εξυπηρετούνται από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Το πιο σημαντικό είναι ότι η χρήση HAP σε επικοινωνίες κινητής τηλεφωνίας μπορεί να προκαλέσει πλήρη διακοπή δικτύου λόγω εξαιρετικά μεγάλων παρεμβολών μεταξύ των κελιών [20] [21].

1.4.4 Ταχύτητα και χρόνος πτήσης

Τα μικρά drones ίπτανται συνήθως με ταχύτητες κάτω των 15 m/s [22], ενώ τα μεγάλα drones μπορούν να φτάσουν την εντυπωσιακή ταχύτητα των 100 m/s. Όταν ένας σταθμός βάσης/αναμεταδότης UAV πετά σε καθορισμένη τροχιά για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής και φασματικής του απόδοσης, η ταχύτητα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά εάν η τροχιά απαιτεί συχνές μανούβρες. Ο μέγιστος χρόνος ενός drone που μπορεί να πετάξει στον αέρα χωρίς επαναφόρτιση ή ανεφοδιασμό αναφέρεται ως προς τον χρόνο πτήσης ή την αντοχή του. Τα μικρά εμπορικά drones έχουν συνήθως χρόνο πτήσης 20-30 λεπτά, ενώ μερικά μεγάλα drones μπορούν να διαρκέσουν για ώρες [23]. Με την χρήση διάφορων τεχνολογιών έχει βελτιωθεί η αντοχή των μικρών drones. Παράδειγμα αποτελεί το Skyfront Tailwind drone, το οποίο μπορεί να αντέξει έως και 4,5 ώρες με την χρήση υβριδικών-ηλεκτρικών πηγών ενέργειας [24]. Ωστόσο, ο περιορισμένος χρόνος πτήσης των υπάρχοντων UAV παραμένει ένας από τους κύριους παράγοντες που καθιστά δυσκολότερη την πλήρη ανάπτυξή τους σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

1.4.5 Τροφοδοσία

Η τροφοδοσία ενός drone καθορίζει σε σημαντικό βαθμό τον χρόνο πτήσης του. Ενώ οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες τροφοδοτούν τα περισσότερα εμπορικά drones, ορισμένα μεγάλα drones μπορούν να τροφοδοτηθούν με καύσιμα όπως η βενζίνη για μεγαλύτερους χρόνους πτήσης [25]. Χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια για την τροφοδοσία των drones είναι επίσης μια πολλά υποσχόμενη τεχνική [26]. Για σταθμό βάσης που είναι τοποθετημένος σε drone, η τροφοδοσία πρέπει να υποστηρίζει τη λειτουργικότητα τόσο του drone όσο και του εσωτερικού εξοπλισμού του, όπως η συστοιχία κεραίας, ο ενισχυτής, τα κυκλώματα κ.λπ. Για παράδειγμα, μια τυπική κεραία ενός σταθμού βάσης απαιτεί 5 W ως μέγιστη ισχύ εκπομπής, η οποία θα πρέπει να τροφοδοτείται από την ενσωματωμένη πηγή ενέργειας.

1.5 Εναέριοι σταθμοί βάσης: Προκλήσεις και δυνατότητες

Το μειωμένο κόστος και η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των UAV σε συνδυασμό με τη σμίκρυνση των ηλεκτρονικών σταθμών βάσης έχουν καταστήσει τεχνικά εφικτή την ανάπτυξη σταθμών βάσης σε UAV. Επειδή οι σταθμοί βάσης των UAV μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα στις βέλτιστες τοποθεσίες στον τρισδιάστατο χώρο, μπορούν ενδεχομένως να παρέχουν πολύ καλύτερη απόδοση όσον αφορά την κάλυψη, την εξισορρόπηση φορτίου, τη φασματική απόδοση και την εμπειρία χρήστη σε σύγκριση με τα υπάρχουσες επίγειες λύσεις. Η ανάπτυξη εναέριων σταθμών βάσης ωστόσο, αντιμετωπίζει αρκετά πρακτικά ζητήματα. Ειδικότερα, η βελτιστοποίηση τοποθέτησης και κινητικότητας αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για τους εναέριους σταθμούς βάσης, οι οποίοι έχουν προσελκύσει σημαντική προσοχή από την ερευνητική κοινότητα. Η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας UAV και η ανάπτυξη των πρακτικών λύσεων επαναφόρτισης για UAV είναι επίσης σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για τη διατήρηση της λειτουργίας των εναέριων σταθμών βάσης. Τέλος, η βελτιστοποίηση της σύνδεσης από άκρο σε άκρο όταν το κινούμενο UAV συνδέει έναν επίγειο χρήστη με την ενσύρματη ραχοκοκαλιά του δικτύου είναι ένα μη τετριμμένο πρόβλημα.

1.5.1 Βελτιστοποίηση τοποθέτησης για εναέριους σταθμούς βάσης

Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης είναι πιο δύσκολο για εναέριους σταθμούς βάσης σε σύγκριση με τους συμβατικούς επίγειους σταθμούς γιατί μια κεραία σταθμού βάσης μπορεί να τοποθετηθεί σε πολλά διαφορετικά ύψη στον ουρανό [27] [28]. Ωστόσο, η κάλυψη καθώς και τα κανάλια UL και DL αλλάζουν ανάλογα με το υψόμετρο του σταθμού βάσης. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος διάφοροι ερευνητές υλοποίησαν συγκεκριμένους αλγόριθμους. Κάποιοι ερευνητές θεώρησαν το ύψος του εναέριου σταθμού βάσης ως καθοριστική μεταβλητή στη διατύπωση βελτιστοποίησής τους, αντιμετωπίζοντάς το ως πρόβλημα τοποθέτησης 3D, ενώ άλλοι ουσιαστικά έλυσαν προβλήματα 2D τοποθέτησης για σταθερά ύψη. Οι βελτιστοποιήσεις διέφεραν επίσης ως προς το εάν η οπισθόζευξη, οι παρεμβολές από άλλους

σταθμούς βάσης και η ύπαρξη επίγειων σταθμών βάσης στην ίδια περιοχή κάλυψης θεωρήθηκαν στη διατύπωση του προβλήματος. Τέλος, οι στόχοι αυτών των βελτιστοποιήσεων ποικίλουν από τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του συστήματος έως την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αριθμού των εναέριων σταθμών βάσης, καθώς και την ελαχιστοποίηση της συνολικής ισχύος εκπομπής ολόκληρου του εναέριου συστήματος.

Με την χρήση αναζήτησης Brute-force για τη μεγιστοποίηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος από τους ερευνητές, βελτιστοποιήθηκαν οι 2D τοποθετήσεις ενός μικρού αριθμού εναέριων σταθμών βάσης για να βελτιωθεί η κάλυψη μιας μεγάλης περιοχής εξυπηρέτησης, όπου ορισμένοι από τους επίγειους σταθμούς βάσης έχουν καταστραφεί από φυσικές καταστροφές ή κακόβουλες επιθέσεις [29]. Οι βέλτιστες θέσεις για τους εναέριους σταθμούς βάσης προτάθηκαν να είναι κατά μήκος των άκρων των κυψελών, κάτι που έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην απόδοση. Μια λιγότερο διαισθητική παρατήρηση ήταν ότι το ύψος είχε μικρή επίδραση στη συνολική απόδοση, αλλά μειώνοντας το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης βελτιώθηκε σημαντικά η απόδοση. Αυτό αποδόθηκε σε περιβάλλοντα μάλλον οπτικής επαφής στις προσομοιώσεις, τα οποία προκάλεσαν καλύτερο (SNR - Signal-to-Noise Ratio) για τους χρήστες ακμής κυψέλης λόγω της μικρότερης απόστασης από τους εναέριους σταθμούς βάσης.

Στην εργασία [30] προτάθηκε από τους συγγραφείς βελτιστοποίηση 3D τοποθέτησης για εναέριους σταθμούς βάσης στο πλαίσιο ετερογενών δικτύων (οι εναέριοι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τους επίγειους σταθμούς βάσης), αλλά παρατηρήθηκαν ότι υπάρχουν τετραγωνικοί, εκθετικοί και δυαδικοί όροι στη διατύπωση του προβλήματος, γεγονός που καθιστά έναν μεικτό ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα. Οι συγγραφείς έδειξαν ότι το πρόβλημα μπορεί να λυθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό του βελτιστοποιητή εσωτερικού σημείου και της αναζήτησης διχοτόμησης. Οι συγγραφείς [31] μελέτησαν επίσης βελτιστοποιήσεις τοποθέτησης 3D, αλλά προσπάθησαν να ελαχιστοποιήσουν την συνολική ισχύ εκπομπής ενός ομοιογενούς δικτύου εναέριων σταθμών βάσης. Για τέτοια σενάρια, οι συγγραφείς έλυσαν το πρόβλημα βελτιστοποίησης 3D τοποθέτησης διαιρώντας το πρόβλημα σε δύο υποπροβλήματα που επιλύονται επαναληπτικά. Δεδομένου του ύψους των εναέριων σταθμών βάσης, το πρώτο υποπρόβλημα λαμβάνει τις βέλτιστες θέσεις των UAV χρησιμοποιώντας το πλαίσιο εγκατάστασης των θέσεων. Στο δεύτερο υποπρόβλημα, οι θέσεις των εναέριων σταθμών βάσης είναι σταθερές και τα βέλτιστα ύψη λαμβάνονται χρησιμοποιώντας εργαλεία από τη θεωρία βέλτιστης μεταφοράς [31].

Οι ερευνητές [29] [30] [31] [32] [33] προσπάθησαν είτε να μεγιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος είτε να ελαχιστοποιήσουν τη συνολική ισχύ μετάδοσης του δικτύου. Σε άλλες ερευνητικές προσπάθειες, αναλύθηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης της τοποθέτησης με στόχο την απόκτηση του ελάχιστου αριθμού εναέριων σταθμών βάσης που μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των χρηστών-στόχων σε μια συγκεκριμένη περιοχή εξυπηρέτησης [34][35]. Με την χρήση προηγμένων υπολογισμών για την επίλυση του προβλήματος [34], οι ερευνητές [35] παρατήρησαν ότι μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα κάλυψης του γεωμετρικού δίσκου (GDC - Geometrical Disc Cover), στόχος του οποίου είναι να καλυφθεί ένα σύνολο επίγειων χρηστών σε μια περιοχή με τον ελάχιστο αριθμό δίσκων, με δεδομένες ακτίνες οι οποίες επηρεάζονται από το ύψος των UAV. Δεδομένου ότι το πρόβλημα GDC είναι NP-hard, προτάθηκε ένας ευρετικός αλγόριθμος πολυωνυμικού χρόνου, που ονομάζεται αλγόριθμος σπειροειδούς τοποθέτησης, για να λύσει το πρόβλημα κατά προσέγγιση. Αποδείχθηκε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος σπειροειδούς τοποθέτησης πέτυχε σχεδόν βέλτιστες λύσεις με σημαντικά μικρότερη πολυπλοκότητα σε σύγκριση με τη βέλτιστη λύση.

Όταν ένας επίγειος χρήστης συνδέεται με έναν εναέριο σταθμό βάσης, επιτυγχάνεται λήψη ή αποστολή δεδομένων με την χρήση δύο διακριτών ασύρματων συνδέσεων, τη σύνδεση πρόσβασης που συνδέει τον χρήστη με το UAV και τη σύνδεση οπισθόζευξης που συνδέει το UAV με το κεντρικό δίκτυο. Η τοποθέτηση του UAV επηρεάζει και τις δύο αυτές συνδέσεις. Σε μια άλλη έρευνα βελτιστοποιήθηκε η κατακόρυφη τοποθέτηση του εναέριου σταθμού βάσης εξετάζοντας από κοινού τη φασματική απόδοση της σύνδεσης οπισθόζευξης καθώς και της σύνδεσης πρόσβασης [36].

1.5.2 Βελτιστοποίηση κινητικότητας για εναέριους σταθμούς βάσης

Οι μελέτες βελτιστοποίησης τοποθέτησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως δεν περιλαμβάνουν την κινητικότητα των εναέριων σταθμών βάσης στην διατύπωση προβλημάτων. Η κινητικότητα, ωστόσο, είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό και ικανότητα των εναέριων σταθμών βάσης, οι οποίοι παρέχουν πρόσθετες ευκαιρίες για δυναμική βελτίωση των θέσεων τους ως απάντηση στις κινήσεις των επίγειων χρηστών.

Με βάση τις μεθόδους μεταφοράς των εναέριων σταθμών βάσης, υπάρχουν δύο τύποι κινητικότητας:

- Τα UAV χρησιμοποιούνται μόνο για τη μεταφορά ενός σταθμού βάσης σε μια συγκεκριμένη επίγεια τοποθεσία όπου ο σταθμός βάσης ξεκινά αυτόματα να εξυπηρετεί τους χρήστες. Εάν ο σταθμός βάσης πρέπει να μεταφερθεί, πρέπει να απενεργοποιηθεί πρώτα πριν μεταφερθούν στη νέα τοποθεσία. Επομένως, αυτός ο τύπος εναέριου σταθμού βάσης δεν μπορεί να εξυπηρετήσει όσο είναι σε κίνηση, αλλά μπορεί να ξαναρχίσει την υπηρεσία του μόλις αυτός φτάσει σε μια τοποθεσία στόχο.
- Τα UAV συνεχίζουν να μεταφέρουν τους σταθμούς βάσης και οι σταθμοί βάσης μπορούν να εξυπηρετούν συνεχώς τους επίγειους χρήστες ενώ αυτοί πετούν.

Λαμβάνοντας υπόψη τον πρώτο τύπο εναέριων σταθμών βάσης, μελετήθηκε ένας μηχανισμός τοποθέτησης σταθμών βάσης όπου οι επίγειοι χρήστες δεν εξυπηρετούνται από τον σταθμό βάσης όταν μεταφέρεται σε νέα τοποθεσία [37]. Η απώλεια χρόνου εξυπηρέτησης λόγω της κινητικότητας του σταθμού βάσης γίνεται επομένως κρίσιμη παράμετρος για τη βελτιστοποίηση. Ένας εναέριος σταθμός βάσης σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο την πυκνότητα χρήστη της θέσης στόχου όσο και τον χρόνο μετακίνησης στη νέα θέση όταν αποφασίζει τη θέση στόχου του. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως πρόβλημα τοποθεσίας εγκατάστασης, όπου το κόστος μεταφοράς αντιπροσωπεύει την απώλεια χρόνου εξυπηρέτησης λόγω της μετακίνησης του σταθμού βάσης από την προηγούμενη θέση στη νέα τοποθεσία.

Ο δεύτερος τύπος εναέριας κινητικότητας σταθμών βάσης ανοίγει νέες ευκαιρίες για τη χρήση των εναέριων σταθμών βάσης λόγω της ικανότητάς τους να εξυπηρετούν τους επίγειους χρήστες

ενώ βρίσκονται σε κίνηση. Ειδικότερα, σύμφωνα με αυτό το σενάριο, το κόστος της κινητικότητας σταθμών βάσης γίνεται αμελητέο. Είναι δυνατό να σχεδιαστούν πιο προηγμένες λύσεις όπου οι εναέριοι σταθμοί βάσης μπορούν να ταξιδεύουν συνεχώς στην περιοχή εξυπηρέτησης για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του δικτύου υπό γεωχωρική διακύμανση των απαιτήσεων θέσης.

Και στους δύο τύπους, αν και ένα μόνο UAV μπορεί να εκτελέσει πολλά καθήκοντα, πολλαπλά UAV μπορούν να σχηματίσουν μια συνεργατική ομάδα για να επιτύχουν έναν στόχο πιο αποτελεσματικά και να αυξηθεί η πιθανότητα επιτυχούς λειτουργίας του συστήματος. Η διατήρηση της συνδεσιμότητας καθώς και ο έλεγχος της απόστασης μεταξύ των UAV, αποτελούν κύριες προκλήσεις στην χρήση των συνεργαζόμενων UAV [38]. Μεγιστοποιώντας την περιοχή κάλυψης [39], η συνεργαζόμενη εργασία μεταφοράς [40] [41], η αναζήτηση και ο εντοπισμός ενός στόχου [42] είναι μεταξύ των εργασιών που μπορούν να γίνονται από πολλαπλά UAV.

Ο σχεδιασμός των εναέριων σταθμών βάσης απαιτεί αυτόνομους αλγόριθμους ελέγχου κινητικότητας που μπορούν να προσαρμόσουν συνεχώς την κατεύθυνση κίνησης ή την κατεύθυνση του σταθμού βάσης με τρόπο που μεγιστοποιεί την απόδοση του συστήματος. Αυτοί οι αλγόριθμοι πρέπει επίσης να διασφαλίζουν ότι οι πολλαπλοί εναέριοι σταθμοί βάσης που ταξιδεύουν σε μια περιοχή μπορούν να διατηρήσουν μια ασφαλή απόσταση μεταξύ τους για την αποφυγή συγκρούσεων. Έτσι, στην βιβλιογραφία έχουν προταθεί καταναεμημένοι αλγόριθμοι [43] που λαμβάνουν υπόψη τα σήματα παρεμβολών, τις θέσεις των χρηστών κινητής τηλεφωνίας και την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος στους χρήστες για να βρουν την καλύτερη κατεύθυνση κίνησης των σταθμών βάσης σε οποιαδήποτε στιγμή. Από σχετικές έρευνες, προτάθηκαν αλγόριθμοι ελέγχου κινητικότητας με χρήση της θεωρίας παιγνίων για πολλαπλούς εναέριους σταθμούς βάσης που κινούνται ελεύθερα σε μια μεγάλη περιοχή εξυπηρέτησης [44]. Ο έλεγχος κινητικότητας με χρήση της θεωρίας παιγνίων όχι μόνο αύξησε τη διεκπεραίωση πακέτων κατά 4 φορές σε σύγκριση με τους αιωρούμενους σταθμούς βάσης, αλλά βοήθησε επίσης στην αποφυγή συγκρούσεων καθώς οι σταθμοί βάσης είχαν έμμεσα κίνητρα να κινηθούν προς διαφορετικές κατευθύνσεις για να μεγιστοποιήσουν την κάλυψη και την απόδοση. Η τροχιά ενός μόνο UAV μπορεί επίσης να βελτιστοποιηθεί για να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος. Με την χρήση ενός UAV και τη βελτιστοποίηση της τροχιάς του, η απόδοση βελτιώνεται σημαντικά σε σύγκριση με το συμβατικό σχήμα βελτίωσης της απόδοσης στην άκρη της κυψέλης με πολλαπλές μικροκυψέλες.

1.5.3 Ενεργειακά αποδοτικοί εναέριοι σταθμοί βάσης

Ένα κρίσιμο πρόβλημα των εναέριων σταθμών βάσης είναι η σύντομη διάρκεια ζωής τους λόγω του προβλήματος εξάντλησης της μπαταρίας τους. Επομένως, η ενεργειακά αποδοτική λειτουργία είναι απαραίτητη για την παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Η ισχύς καταναλώνεται τόσο στις επικοινωνίες (ηλεκτρονικά) όσο και για την κινητικότητα του UAV (μηχανικά).

Σύμφωνα με έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, προτάθηκαν δύο τύποι εξοικονόμησης ενέργειας:

- **Μείωση της ενέργειας της επικοινωνίας:**

Μία εναλλακτική για την μείωση της ενέργειας της επικοινωνίας των εναέριων σταθμών βάσης είναι η ελαχιστοποίηση της ισχύος μετάδοσης. Μια άλλη λύση για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης της επικοινωνίας είναι η ανάπτυξη βέλτιστου προγράμματος μετάδοσης UAV, ειδικά όταν τα UAV πετούν σε μια προκαθορισμένη τροχιά.

Σύμφωνα με τους ερευνητές προτάθηκε ως μια άλλη λύση ο βέλτιστος προγραμματισμός για σήμανση μηνυμάτων προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση δύο συνεργαζόμενων UAV [45]. Σε αυτό το σενάριο, δύο UAV κινούνται τυχαία σε περιοχές που περιλαμβάνουν χρήστες κινητής τηλεφωνίας και στέλνουν περιοδικά μηνύματα σήμανσης στους χρήστες για να ανακοινώσουν την παρουσία τους. Προτείνεται μια μη συνεργατική θεωρία παιγνίων για την εύρεση της καλύτερης περιόδου σήμανσης για UAV. Στην ενεργειακά αποδοτική μετάδοση άνω ζεύξης μεταξύ μιας επίγειας ζεύξης και ενός ενιαίου εναέριου προορισμού LAP, οι επίγειοι κόμβοι μπορούν να επιλέξουν είτε να επικοινωνούν απευθείας με το LAP είτε να χρησιμοποιούν άλλους επίγειους κόμβους ως αναμεταδότες για τη μείωση του ενεργειακού κόστους [46]. Προτάθηκε η ενημέρωση του δικτύου, όπου στους κόμβους του εφαρμόζονται οι απαραίτητοι παράμετροι μετάδοσης και καναλιού.

Αν και οι προτεινόμενες μέθοδοι μειώνουν επιτυχώς την κατανάλωση ενέργειας επικοινωνίας για τα UAV, ένα μειονέκτημα αυτών των εναλλακτικών λύσεων είναι ότι η αναλογία της κατανάλωσης ενέργειας επικοινωνίας προς τη συνολική κατανάλωση ενέργειας των UAV είναι γενικά αμελητέα [47]. Αυτό το ζήτημα, κινητοποιεί τις προσπάθειες για τη μείωση της μηχανικής ενέργειας που καταναλώνουν τα UAV.

- **Μείωση της Μηχανικής Ενέργειας:**

Για την μείωση της μηχανικής ενέργειας των UAV, πρώτα, χρειάζεται ένα μοντέλο κατανάλωσης ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας του UAV μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$E = (\beta + \alpha \cdot h) t + P_{\max} (h / v) \quad (1.1)$$

,όπου β είναι η ελάχιστη ισχύς που χρειάζεται για να αιωρηθεί πάνω από το έδαφος (όταν το υψόμετρο είναι σχεδόν μηδέν), και το α είναι ένας πολλαπλασιαστής ταχύτητας του κινητήρα [48] [49]. Τόσο το β όσο και το α εξαρτώνται από το βάρος και τα χαρακτηριστικά κινητήρα/έλικα. Ως $P_{\max}$ ορίζεται είναι η μέγιστη ισχύς του κινητήρα, το v ως η ταχύτητα και t ως ο χρόνος λειτουργίας. Ο όρος $P_{\max} (v/h)$ αναφέρεται στην κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται ανύψωση στο ύψος h με ταχύτητα v .

Ένα άλλο μοντέλο για την κατανάλωση ενέργειας προτάθηκε επίσης, όπου η κατανάλωση ενέργειας του drone σχετίζεται με το υψόμετρο του. Η κατανάλωση ενέργειας του drone μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$m \cdot g \cdot h \quad (1.2)$$

,όπου m είναι η μάζα του drone, g είναι η βαρυτική επιτάχυνση και h το υψόμετρο του.

Σύμφωνα με αυτά τα μοντέλα, μια λύση για τον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας των UAV είναι η ρύθμιση του ύψους τους. Ωστόσο, η αλλαγή του ύψους μπορεί να μειώσει

την απόδοση των UAV. Για παράδειγμα, στην κάλυψη στόχου, υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της ακτίνας κάλυψης. Πιο υψηλό υψόμετρο σημαίνει μεγαλύτερη ακτίνα παρατήρησης αλλά και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Ως λύση προτείνεται η βελτιστοποίηση της ακτίνας πτήσης και της ταχύτητας για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης [50]. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι ότι έχουν στοχεύσει τη μηχανική κατανάλωση ενέργειας των UAV, που θεωρείται ως η κύρια πηγή κατανάλωσης ενέργειας.

Δεδομένου ότι οι μηχανικές δραστηριότητες καταναλώνουν πολύ περισσότερη ισχύ σε σύγκριση με τις ηλεκτρικές δραστηριότητες, οι ελιγμοί των εναέριων σταθμών βάσης πρέπει να ελέγχονται με τρόπο εξοικονόμησης ενέργειας. Ως λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, προτάθηκαν αλγόριθμοι που λαμβάνουν υπόψη την μπαταρία και την κατανάλωση ενέργειας των UAV.

1.5.4 Επαναφόρτιση εναέριων σταθμών βάσης

Ξεχωριστά από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των UAV, άλλη μια ελκυστική λύση για την καταπολέμηση της μικρής διάρκειας ζωής των UAV είναι να εξεταστούν τοποθεσίες φόρτισης για αυτά και να αντικαταστήσουν τα εξαντλημένα UAV με τα πλήρως φορτισμένα. Συγκρίνοντας με τις μεθόδους που εστιάζουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αυτή η λύση είναι δαπανηρή και πολύπλοκη, καθώς τα σημεία αντικατάστασης/φόρτισης πρέπει να σχεδιάζονται σε αστικές περιοχές [51] [52]. Επιπλέον, η κατανάλωση μπαταρίας των UAV πρέπει να παρακολουθείται τακτικά.

Ως λύση προτάθηκε η παρακολούθηση της στάθμης της μπαταρίας των UAV από (MBS - Macro Base Station) σταθμούς βάσης. Όταν η μπαταρία φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή, επιστρέφονται στον MBS και τα ήδη φορτισμένα UAV αντικαθιστούν τα εξαντλημένα UAV, από άποψη διαθέσιμης ενέργειας.

1.5.5 Fronthauling και συνδέσεις πρόσβασης επικοινωνίας

Υποθέτοντας ότι είναι εφικτό να ίπταται αποτελεσματικά ένας σταθμός βάσης που είναι συνδεδεμένος σε ένα UAV όσον αφορά το φορτίο, τη δυναμική τοποθέτηση και την κατανάλωση ενέργειας, μια κρίσιμη πτυχή που απομένει είναι η δημιουργία μιας σύνδεσης επικοινωνίας μεταξύ του UAV και του επίγειου δικτύου. Αυτή η σύνδεση, που συμβατικά αναφέρεται ως εμπρόσθια ζεύξη (fronthaul), είναι ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση επαρκούς εύρους ζώνης και αξιοπιστίας στη σύνδεση πρόσβασης μεταξύ του UAV και των τερματικών των χρηστών.

Λόγω της ανάγκης να διατηρηθεί η υπολογιστική πολυπλοκότητα και η σχετική κατανάλωση ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα, προβλέπεται ότι ο εναέριος σταθμός βάσης θα λειτουργεί γενικά ως

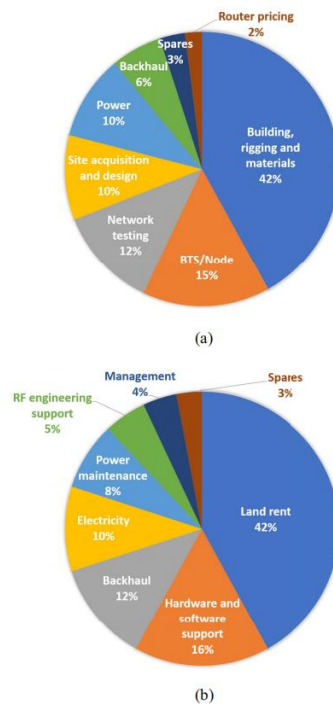
κόμβος αναμετάδοσης που απαιτεί την εφαρμογή μειωμένου αριθμού στρωμάτων της στοίβας πρωτοκόλλων, με την απλούστερη διαμόρφωση που περιλαμβάνει μόνο στρώμα-1 και ουσιαστικά λειτουργεί ως κόμβος ενίσχυσης και προώθησης. Επιπλέον, μια άλλη κρίσιμη πτυχή για την ελαχιστοποίηση της χρήσης του φάσματος είναι η δυνατότητα του εναέριου σταθμού βάσης να επιτρέπει την επικοινωνία και την πρόσβαση στις ίδιες συχνότητες.

Λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες πτυχές, η επικύρωση της απόδοσης από άκρο σε άκρο ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί θεμελιώδη πυλώνα για την αιτιολόγηση της υιοθέτησης εναέριων σταθμών βάσης στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Οι εναέριοι σταθμοί βάσης υποδεικνύονται ως μια σημαντική αναβάθμιση για την αύξηση της απαιτούμενης ευελιξίας ανάπτυξης για την από κοινού μεγιστοποίηση των συνθηκών διάδοσης της εμπρόσθιας ζεύξης και της πρόσβασης.

Οι ερευνητές ανέλυσαν την επιτεύξιμη απόδοση του συστήματος από άκρο σε άκρο με διαφορετική ανάπτυξη αναμεταδοτών μικρών κυψελών που εξυπηρετούνται από τις δυνατότητες χωρικής πολυπλεξίας μιας ασύρματης εμπρόσθιας ζεύξης massive (MIMO – Multiple Input Multiple Output) [53]. Οι εναέριοι σταθμοί βάσης υποδεικνύονται ως μια σημαντική αναβάθμιση για την αύξηση της απαιτούμενης ευελιξίας ανάπτυξης για από κοινού μεγιστοποίηση της εμπρόσθιας ζεύξης και της απόκτησης πρόσβασης στις συνθήκες διάδοσης. Σύμφωνα με αυτό το συμπέρασμα, και εστιάζοντας περισσότερο στην περίπτωση των εναέριων σταθμών βάσης, μελετήθηκε η χρήση πολλαπλών UAV για επικοινωνίες αναμετάδοσης πολλαπλών βημάτων [54]. Η τοποθέτηση των UAV έχει βελτιστοποιηθεί για να μεγιστοποιήσει την αναλογία σήματος προς θόρυβο από άκρο σε άκρο κατά την εφαρμογή διαφορετικών σχημάτων αναμετάδοσης. Επιπλέον, διερευνήθηκε ένα σενάριο 5G πολλαπλών επιπέδων, το οποίο περιλαμβάνει τεράστιους επίγειους σταθμούς βάσης MIMO και μικρές κυψέλες drone πλήρους διπλεξίας [55]. Οι επιτεύξιμες επιδόσεις παρουσιάζονται για σενάρια με μόνο ένα επίγειο macro σταθμό βάσης και ένα ή περισσότερους αιωρούμενους εναέριους σταθμούς βάσης.

1.5.6 Παράδειγμα μοντέλου κόστους μετατόπισης εναέριων σταθμών βάσης

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας επόμενης γενιάς αναμένονται να είναι 50 φορές πιο αποδοτικά σε κόστος από την ήδη υπάρχουσα γενιά. Επομένως, η εξοικονόμηση του κόστους έχει γίνει μια σημαντική πρόκληση για τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Το κόστος των συμβατικών φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας συνήθως περιλαμβάνουν τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX - CAPital EXpenditure) και τις λειτουργικές δαπάνες (OPEX - OPerational EXpenditure). Το CAPEX περιλαμβάνει την απόκτηση, τον σχεδιασμό και την κατασκευή εργοταξίου, την αγορά και την υλοποίηση εξοπλισμού, κ.λπ. Το OPEX αποτελείται από επαναλαμβανόμενα κόστη όπως το εργοτάξιο, η συντήρηση και η ενοικίαση, τα έξοδα προσωπικού, το ρεύμα κ.λπ.



Εικόνα 1.3 CAPEX/OPEX στις ανεπτυγμένες χώρες. (a) CAPEX. (b) OPEX [56].

Η **Εικόνα 1.3** [56] απεικονίζει την ανάλυση CAPEX/OPEX σε ανεπτυγμένες χώρες. Μπορεί να παρατηρηθεί από την **Εικόνα 1.3** [56] ότι οι χειριστές κινητής τηλεφωνίας ξοδεύουν περισσότερο από το ήμισυ (52 %) του CAPEX τους επί τόπου απόκτησης και κατασκευής, την οποία ακολουθούν τα έξοδα των σταθμών βάσης, οι δοκιμές του δικτύου, η ισχύς και η οπισθόζευξη. Ωστόσο, η ανάλυση CAPEX για τα κελιά των drones αναμένεται να είναι αρκετά διαφορετική. Με ιπτάμενα drones μεταφέροντας κινητούς σταθμούς βάσης, το κόστος που σχετίζεται με την τοποθεσία θα μπορούσε να είχε μειωθεί σημαντικά ή και να αφαιρεθεί τελείως. Ενώ τα έξοδα των σταθμών βάσης και οι δοκιμές δικτύου για κυψέλες drone θα πρέπει να αυξηθούν σε σύγκριση στην απασχόληση επίγειων σταθμών βάσης λόγω αγοράς και λειτουργίας drones. Συνολικά, οι εναέριοι σταθμοί που είναι τοποθετημένοι σε drone έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά το CAPEX των φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας μειώνοντας το κόστος που σχετίζεται με την τοποθεσία.

Όσον αφορά το OPEX, το κόστος που σχετίζεται με την τοποθεσία καταλαμβάνει επίσης σημαντικό μέρος του ποσοστού [57]. Όπως φαίνεται από την **Εικόνα 1.3** [56], το ενοίκιο γης αποτελεί έως και το 42% της κινητής τηλεφωνίας OPEX των χειριστών στις ανεπτυγμένες χώρες. Η ενοικίαση τοποθεσίας κυριαρχεί στο OPEX των φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας [58]. Επιπλέον, λόγω της έλλειψης τοποθεσίας και των αυστηρότερων περιβαλλοντικών κανονισμών, η ενοικίαση της τοποθεσίας γίνεται όλο και περισσότερο ακριβή [59]. Επιπλέον, πολλά υποσχόμενες τεχνικές όπως η εξαιρετικά πυκνή ανάπτυξη κυψελών καθιστά το κόστος της ενοικίασης της τοποθεσίας ακόμη υψηλότερο, αφού θα απαιτηθεί μεγάλος αριθμός σταθμών βάσεων. Όταν χρησιμοποιούνται εναέριοι σταθμοί βάσης, το πιο ακριβό μέρος του OPEX θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά, με κόστος δυνητικά υψηλότερων δαπανών για ηλεκτρισμό και την οπισθόζευξη. Στο συνολικό κόστος αναμένεται να προστεθούν επιπρόσθετες δαπάνες, συμπεριλαμβανομένων των ετήσιων τελών εγγραφής για drones, το κόστος της ασφάλειας πτήσης και το κόστος της αντικατάστασης της μπαταρίας τους.

Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κελιά που είναι εξοπλισμένα με επίγειους σταθμούς βάσης, το μοντέλο κόστους των κυψελών drone διαφοροποιείται. Με σταθμούς βάσης τοποθετημένους σε drones, τόσο το CAPEX όσο και το OPEX των συμβατικών φορέων εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας θα μπορούσαν να μειωθούν σημαντικά με την εξοικονόμηση δαπανών που σχετίζεται με την τοποθεσία, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση της αποδοτικότητας κόστους για τους συμβατικούς φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, όταν χρησιμοποιούνται επίγειοι σταθμοί βάσης ή αναμεταδότες για επέκταση της κάλυψης των κελιών, η αναδιοργάνωση τους είναι απαραίτητη και θα μπορούσε να είναι ακριβή. Αυτό το κόστος θα μπορούσε να εξοικονομηθεί με την ανάπτυξη ιπτάμενων σταθμών βάσης/αναμεταδοτών. Επιπλέον, ενδέχεται να εμφανιστούν νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη εναέριων σταθμών βάσης σε drone θα μπορούσε να ακολουθήσει το σενάριο της χρονικής μετακίνησης του χρήστη, που θα μπορούσε να επιτευχθεί με εύκολα και φθηνά μέσα μεταφοράς πλοίων, όπως συστήματα δημόσιων μεταφορών (π.χ. τρένα και λεωφορεία). Ένα άλλο παράδειγμα τέτοιου μοντέλου κόστους μετατόπισης παραδείγματος επιτρέπει επίσης σε ορισμένους νέους φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας να παρέχουν υπηρεσίες επικοινωνίας. Για ιδιοκτήτες στόλων drone όπως η Google και η Amazon, τα αγαθά και τα δεδομένα θα μπορούσαν να παραδοθούν ταυτόχρονα με ιπτάμενα drones ακολουθώντας τις καθορισμένες διαδρομές.

1.6 Ασύρματη Δικτύωση με UAV: Περιπτώσεις χρήσης εφαρμογής

Για να δοθεί μια σαφή εικόνα για το πώς μπορούν τα UAV να χρησιμοποιηθούν ως εναέριοι ασύρματοι σταθμοί βάσης, σε αυτήν την υπο-ενότητα γίνεται επισκόπηση ορισμένων εφαρμογών για τέτοιου είδους ανάπτυξης UAV. Οι εφαρμογές τους επιλέγονται από μια ποικιλία σεναρίων, που περιλαμβάνουν επικείμενες περιπτώσεις χρήσης, όπως επίσης για σεναρία δημόσιας ασφάλειας ή κάλυψης hotspot, έως και πιο εντυπωσιακές εφαρμογές όπως η χρήση UAV ως συσκευή προσωρινής αποθήκευσης ή ως βασικό εργαλείο του IoT.

1.6.1 Εναέριοι σταθμοί βάσης UAV για δίκτυα 5G και ύστερων γενεών

Σε αυτή την υπο-ενότητα, αναφέρονται οι βασικές εφαρμογές των εναέριων σταθμών βάσης που τοποθετούνται σε UAV υπό το πλαίσιο των δικτύων 5^{ης} γενιάς (5G).

- **Κάλυψη και βελτίωση χωρητικότητας για περαιτέρω από το 5G ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας:** Η ανάγκη για ασύρματη πρόσβαση υψηλής ταχύτητας αυξάνεται συνεχώς, τροφοδοτούμενη από τον ταχύ πολλαπλασιασμό αρκετά ικανών κινητών συσκευών όπως τα smartphones, τα tablets και των πιο πρόσφατων εξοπλισμών χρήστη drone και IoT-gadgets. Ως εκ τούτου, η χωρητικότητα και η κάλυψη των υφιστάμενων ασύρματων κινητών δικτύων έχει καταπονηθεί εκτενώς, που οδήγησε στην εμφάνιση μιας πληθώρας ασύρματων τεχνολογιών που επιδιώκουν να ξεπεράσουν αυτήν την πρόκληση.

Σε αυτές τις τεχνολογίες περιλαμβάνονται η επικοινωνία (**D2D** - Device-to-Device), αρκετά πυκνά δίκτυα μικρών κυψελών και οι χιλιοστομετρικές επικοινωνίες (**mmW** – millimeter wave) που θεωρούνται συλλογικά ως ο σύνδεσμος των κυψελοειδών συστημάτων επόμενης γενιάς 5G. Ωστόσο, παρά τα ανεκτίμητα οφέλη τους, αυτές οι λύσεις έχουν τους δικούς τους περιορισμούς. Για παράδειγμα, η επικοινωνία D2D θα απαιτήσει αναμφίβολα καλύτερο σχεδιασμό συχνότητας και χρήση πόρων δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Εν τω μεταξύ, τα αρκετά πυκνά δίκτυα μικρών κελιών αντιμετωπίζουν πολλές προκλήσεις όσον αφορά την οπισθόζευξη, τις παρεμβολές και τη συνολική μοντελοποίηση του δικτύου. Ομοίως, η επικοινωνία mmW περιορίζεται από την απόρριψη και την υψηλή εξάρτηση από την επικοινωνία LoS για να εκπληρώσει αποτελεσματικά την υπόσχεση υψηλής ταχύτητας και χαμηλών καθυστερήσεων στις επικοινωνίες. Αυτές οι προκλήσεις θα επιδεινωθούν περαιτέρω σε σενάρια επικοινωνίας UAV-εξοπλισμού χρήστη.

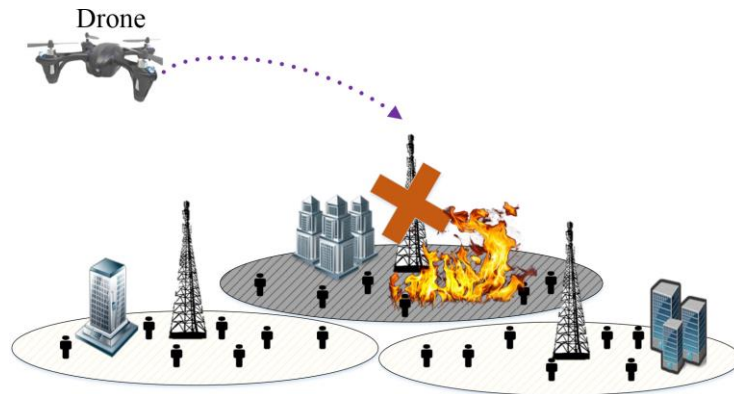
Η ανάπτυξη των LAP-UAV μπορεί να είναι μια οικονομικά αποδοτική προσέγγιση για την παροχή ασύρματης συνδεσιμότητας σε γεωγραφικές περιοχές με περιορισμένη κυψελωτή υποδομή. Επιπλέον, η χρήση σταθμών βάσης UAV γίνεται πολλά υποσχόμενη κατά την ανάπτυξη μικρών κυψελών με αποκλειστικό σκοπό την εξυπηρέτηση προσωρινών εκδηλώσεων (π.χ. αθλητικές εκδηλώσεις και φεστιβάλ). Όμως, δεν είναι οικονομικά βιώσιμη, δεδομένου του σύντομου χρονικού διαστήματος κατά την διάρκεια όπου αυτά τα συμβάντα απαιτούν ασύρματη πρόσβαση. Εν τω μεταξύ, τα HAP-UAV μπορούν να προσφέρουν μια πιο μακροπρόθεσμη βιώσιμη λύση για την κάλυψη σε τέτοια περιβάλλοντα. Τα κινητά UAV μπορούν να παρέχουν συνδεσιμότητα κατ' απαίτηση, ασύρματη υπηρεσία υψηλής ταχύτητας δεδομένων και διαχείριση της κυκλοφορίας σε hotspot κατά τη διάρκεια προσωρινών εκδηλώσεων όπως ποδοσφαιρικοί αγώνες ή προεδρικά εγκαίνια.

Οι επικοινωνίες mmW με χρήση UAV είναι μια χρήσιμη εφαρμογή που μπορεί να δημιουργήσει συνδέσεις επικοινωνίας LoS με τους χρήστες. Αυτό, με τη σειρά του, μπορεί να είναι μια ελκυστική λύση για παροχή ασύρματης μετάδοσης υψηλής χωρητικότητας, αξιοποιώντας παράλληλα τα πλεονεκτήματα τόσο των UAV όσο και των συνδέσεων mmW. Εξάλλου, συνδυάζοντας UAV με mmW συνδέσεις και τεχνικές MIMO μπορούν να δημιουργήσουν ένα νέο είδος δυναμικού, εναέριου κυψελοειδούς δικτύου για παροχή ασύρματων υπηρεσιών υψηλής χωρητικότητας, εφόσον έχει σχεδιαστεί και λειτουργήσει σωστά.

Τα UAV μπορούν επίσης να βοηθήσουν διάφορα επίγεια δίκτυα όπως τα δίκτυα D2D και τα δίκτυα οχημάτων. Για παράδειγμα, λόγω της κινητικότητας τους και τις επικοινωνίες LoS, τα drones μπορούν να διευκολύνουν την ταχεία διάδοση πληροφοριών μεταξύ των επίγειων συσκευών. Επιπλέον, τα drones μπορούν ενδεχομένως να βελτιώσουν την αξιοπιστία ασύρματων συνδέσεων σε επικοινωνίες D2D και (**V2V** - Vehicle-to-Vehicle) ενώ εκμεταλλεύονται την ποικιλομορφία μετάδοσης. Ακόμη, τα drones μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάδοση κοινών πληροφοριών σε επίγειες συσκευές μειώνοντας έτσι τις παρεμβολές στα επίγεια δίκτυα και ταυτόχρονα μειώνοντας τον αριθμό των μεταδόσεων μεταξύ των συσκευών. Επιπλέον, οι εναέριοι σταθμοί βάσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν συνδέσεις (**A2A** – Air-to-Air) για την εξυπηρέτηση άλλων κινητών UAV χρηστών.

Για τα προαναφερθέντα σενάρια δικτύωσης κινητής τηλεφωνίας, η χρήση των UAV καθίσταται δυνατή λόγω των χαρακτηριστικών τους όπως η ευκινησία, η κινητικότητα, η ευελιξία και το προσαρμοζόμενο υψόμετρο. Με την εκμετάλλευση αυτών των μοναδικών χαρακτηριστικών καθώς και της δημιουργίας συνδέσεων LoS επικοινωνίας, τα UAV μπορούν να ενισχύσουν την απόδοση των υπάρχοντων επίγειων ασύρματων δικτύων όσον αφορά την κάλυψη, τη χωρητικότητα, την καθυστέρηση και τη συνολική ποιότητα των υπηρεσιών.

- **Τα UAV ως εναέριοι σταθμοί βάσης για σενάρια δημόσιας ασφάλειας:** Φυσικές καταστροφές όπως πλημμύρες, τυφώνες, ανεμοστρόβιλοι και σφοδρές χιονοθύελλες συχνά έχουν καταστροφικές συνέπειες σε πολλές χώρες. Κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών μεγάλης κλίμακας και απροσδόκητων γεγονότων, τα υπάρχοντα επίγεια δίκτυα επικοινωνιών μπορεί να υποστούν ζημιά ή και να καταστραφούν εντελώς [60]. Ειδικότερα, οι σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας και οι υποδομές επίγειων επικοινωνιών μπορούν συχνά να τεθούν σε κίνδυνο κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών. Σε τέτοια σενάρια, υπάρχει ζωτική ανάγκη για επικοινωνίες δημόσιας ασφάλειας μεταξύ των πρώτων ανταποκριτών και των θυμάτων για αναζήτηση και επιχειρήσεις διάσωσης. Κατά συνέπεια, απαιτείται ένα στιβαρό, γρήγορο και ικανό σύστημα επικοινωνίας έκτακτης ανάγκης για να επιτραπεί η αποτελεσματική επικοινωνία κατά τη διάρκεια εργασιών δημόσιας ασφάλειας. Σε σενάρια δημόσιας ασφάλειας, ένα τόσο αξιόπιστο σύστημα επικοινωνίας όχι μόνο θα συμβάλλει στη βελτίωση της συνδεσιμότητας, αλλά θα σώσει και ζωές.

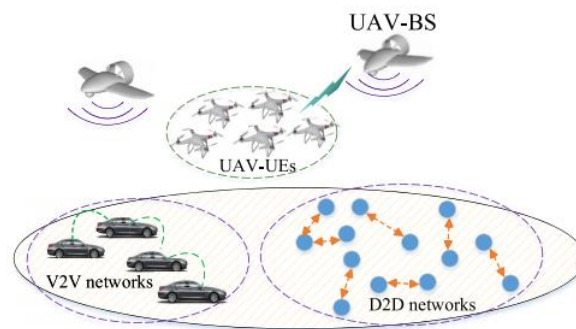


Εικόνα 1.4 Drone για σενάριο δημόσιας ασφάλειας [111].

Από αυτή την άποψη, ιδρύθηκε η FirstNet στις Ηνωμένες Πολιτείες για να δημιουργήσει ένα υψηλής ταχύτητας ευρυζωνικό ασύρματο δίκτυο για επικοινωνίες δημόσιας ασφάλειας. Οι ευρυζωνικές ασύρματες τεχνολογίες για σενάρια δημόσιας ασφάλειας περιλαμβάνουν τεχνολογίες όπως το 4G (LTE - Long Term Evolution), το WiFi, τις δορυφορικές επικοινωνίες και ειδικά τα συστήματα δημόσιας ασφάλειας [61]. Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες ενδέχεται να μην παρέχουν ευελιξία, υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης και ταχεία προσαρμογή στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών. Από αυτή την άποψη, η χρήση των εναέριων δικτύων που βασίζονται σε UAV, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.4** [111], είναι πολλά υποσχόμενη λύση για γρήγορη, ευέλικτη και αξιόπιστη ασύρματη σύνδεση επικοινωνίας σε σενάρια δημόσιας ασφάλειας

[62]. Αφού τα UAV δεν απαιτούν πολύ περιορισμένες και δαπανηρές υποδομές (π.χ. καλώδια), μπορούν εύκολα να πετάξουν και να αλλάξουν δυναμικά τις θέσεις τους για να παρέχουν κατ' απαίτηση επικοινωνίες σε επίγειους χρήστες σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Στην πραγματικότητα, λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών των UAV όπως η κινητικότητα, η ευέλικτη ανάπτυξη και η ταχεία αναδιαμόρφωση, μπορούν να δημιουργήσουν αποτελεσματικά κατ'απαίτηση δίκτυα επικοινωνιών για την δημόσια ασφάλεια. Για παράδειγμα, μπορούν να αναπτυχθούν UAV ως κινητοί εναέριοι σταθμοί βάσης για την παροχή ευρυζωνικής συνδεσιμότητας σε περιοχές με κατεστραμμένες επίγειες ασύρματες υποδομές. Επιπλέον, τα ιπτάμενα UAV μπορούν να μετακινούνται συνεχώς και να παρέχουν πλήρη κάλυψη σε μια δεδομένη περιοχή εντός του ελάχιστου δυνατού χρόνου. Ως εκ τούτου, η χρήση εναέριων σταθμών βάσης πάνω σε UAV είναι η κατάλληλη λύση για την παροχή γρήγορης και πανταχού παρούσας συνδεσιμότητας σε σενάρια δημόσιας ασφάλειας.

- **Επίγεια δίκτυα με υποβοήθηση UAV για διάδοση πληροφορίας:** Με την κινητικότητά τους και τις ευκαιρίες LoS, τα UAV μπορούν να υποστηρίξουν επίγεια δίκτυα για τη διάδοση πληροφοριών και τη βελτίωση της συνδεσιμότητας [63].



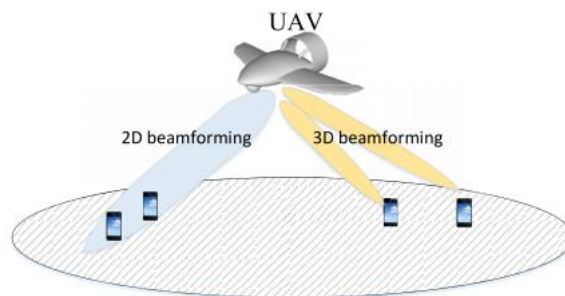
Εικόνα 1.5 Επίγειοι σταθμοί βασισμένοι σε UAV [111].

Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.5** [111], τα UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ιπτάμενοι σταθμοί βάσης για να βοηθήσουν ένα δίκτυο D2D ή ένα ad-hoc δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για διάδοση πληροφοριών μεταξύ επίγειων συσκευών. Ενώ τα δίκτυα D2D μπορούν να παρέχουν μια αποτελεσματική λύση για την εκφόρτωση της κίνησης των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας και τη βελτίωση της χωρητικότητας και της κάλυψης του δικτύου, η απόδοσή τους είναι περιορισμένη λόγω της περιορισμένης γκάμας συσκευών επικοινωνίας καθώς και των αυξανόμενων παρεμβολών.

Σε αυτή την περίπτωση, τα ιπτάμενα UAV μπορούν να διευκολύνουν την ταχεία διάδοση πληροφοριών με έξυπνη μετάδοση κοινών αρχείων μεταξύ των επίγειων συσκευών. Για παράδειγμα, τα δίκτυα D2D που υποστηρίζονται από UAV επιτρέπουν την ταχεία διάδοση μηνυμάτων έκτακτης ανάγκης ή εκκένωσης σε καταστάσεις δημόσιας ασφάλειας. Ομοίως, τα drones μπορούν να παίξουν βασικό ρόλο στα δίκτυα οχημάτων (δηλαδή, επικοινωνίες V2V) με τη διάδοση πληροφοριών ασφάλειας κατά μήκος των οχημάτων. Τα drones μπορούν επίσης να ενισχύσουν την αξιοπιστία και συνδεσιμότητα των συνδέσεων επικοινωνίας D2D και V2V. Από τη μία πλευρά, η χρήση drones μπορεί να μειώσει τις παρεμβολές μειώνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων συνδέσεων μετάδοσης μεταξύ των επίγειων συσκευών. Από την άλλη πλευρά, τα κινητά drones μπορούν να ενισχύσουν την

αξιοπιστία και τη συνδεσιμότητα σε δίκτυα D2D, ad-hoc και V2V. Μια αποτελεσματική προσέγγιση για τη χρήση τέτοιων επίγειων δικτύων που υποστηρίζονται από UAV είναι η ομαδοποίηση των επίγειων χρηστών. Στη συνέχεια, ένα UAV μπορεί επικοινωνήσει άμεσα με τον επικεφαλής του σμήνους και οι επικοινωνίες πολλαπλών βημάτων εκτελούνται εντός του σμήνους. Σε αυτή την περίπτωση, η συνδεσιμότητα των επίγειων δικτύων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την υιοθέτηση αποτελεσματικών προσεγγίσεων ομαδοποίησης και την εκμετάλλευση της κινητικότητας των UAV.

- **3D MIMO και επικοινωνίες mmWave:** Χάρη στις εναέριες θέσεις τους και στην ικανότητά τους να αναπτύσσονται κατόπιν ζήτησης σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, τα UAV μπορούν να θεωρηθούν ως εναέριες κεραίες συστημάτων που μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκτέλεση επικοινωνιών μαζικού MIMO, 3D MIMO και mmW.



Εικόνα 1.6 3D Beamforming με την χρήση drone [111].

Για παράδειγμα, τα τελευταία χρόνια, υπήρξε σημαντικό ενδιαφέρον για την χρήση του 3D MIMO, γνωστό και ως MIMO πλήρους διάστασης, αξιοποιώντας τόσο την κατακόρυφη όσο και την οριζόντια διάσταση στα κεντρικά κυψελωτά δίκτυα. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.6** [111], η 3D διαμόρφωση δέσμης (**Beamforming**) επιτρέπει τη δημιουργία ξεχωριστών ακτίνων στον τρισδιάστατο χώρο ταυτόχρονα, συνεισφέροντας στην μείωση της δια-κυψελικής παρεμβολής [64]. Σε σύγκριση με το συμβατικό δισδιάστατο MIMO, οι λύσεις 3D MIMO μπορούν να αποδώσουν υψηλότερη συνολική απόδοση συστήματος και μπορούν να υποστηρίξουν υψηλότερο αριθμό χρηστών. Γενικά, το 3D MIMO είναι πιο κατάλληλο για σενάρια στα οποία ο αριθμός των χρηστών είναι υψηλός και είναι καταναμεμημένα σε τρεις διαστάσεις με διαφορετικές γωνίες ανύψωσης σε σχέση με τον σταθμό βάσης που εξυπηρετούν [65].

Λόγω του μεγάλου υψόμετρου των εναέριων σταθμών βάσης που μεταφέρονται με UAV, οι επίγειοι χρήστες μπορούν εύκολα να διακριθούν σε διαφορετικά υψόμετρα και υψόμετρα γωνιών που μετρώνται σε σχέση με το UAV. Επιπλέον, οι LoS συνθήκες καναλιού στις επικοινωνίες UAV προς έδαφος ενεργοποιούν αποτελεσματική διαμόρφωση δέσμης τόσο στο αζιμούθιο όσο και στο υψόμετρο (δηλαδή σε 3D). Επομένως, οι σταθμοί βάσης των UAV είναι κατάλληλοι για την χρήση 3D MIMO.

Επιπλέον, η χρήση ασύρματης κεραίας που βασίζεται σε drone παρέχει μια μοναδική ευκαιρία για εναέριο beamforming[66]. Μια συστοιχία κεραιών drone, μπορεί να παρέχει

δυνατότητες MIMO και διαμόρφωσης δέσμης για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των επίγειων χρηστών σε σενάρια downlink και uplink. Σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα συστοιχίας κεραιών, μια συστοιχία κεραιών που βασίζεται σε drone έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Δεν υπάρχουνε χωρικοί περιορισμοί όσον αφορά τον αριθμό των στοιχείων της κεραίας.
- Τα κέρδη του beamforming μπορούν να αυξηθούν ρυθμίζοντας δυναμικά την απόσταση των στοιχείων της διάταξης.
- Η κινητικότητα και η ευελιξία των drones επιτρέπουν την αποτελεσματική μηχανική διεύθυνση δέσμης σε οποιαδήποτε τρισδιάστατη κατεύθυνση.

Τα UAV αποτελούν βασικό παράγοντα για επικοινωνίες mmW. Από τη μια, τα UAV που είναι εξοπλισμένα με δυνατότητες mmW μπορούν να δημιουργήσουν συνδέσεις LoS με χρήστες εδάφους, μειώνοντας έτσι την απώλεια διάδοσης ενώ λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες. Από την άλλη, με τη χρήση κεραιών μικρού μεγέθους (σε συχνότητες mmW) σε UAV, μπορεί κανείς να εκμεταλλευτεί προηγμένες τεχνικές MIMO όπως το μαζικό MIMO για τη λειτουργία επικοινωνιών mmW.

- **UAV για επικοινωνίες IoT:** Οι τεχνολογίες της ασύρματης δικτύωσης εξελίσσονται γρήγορα σε ένα τεράστιο περιβάλλον IoT που πρέπει να ενσωματώσει ένα ετερογενές μείγμα συσκευών που κυμαίνονται από συμβατικά smartphone και tablet έως οχήματα, αισθητήρες, φορητές συσκευές και φυσικά drones. Πολλές εφαρμογές του IoT όπως η διαχείριση υποδομών έξυπνων πόλεων, η υγειονομική περίθαλψη, οι μεταφορές και η διαχείριση ενέργειας, απαιτούν αποτελεσματική ασύρματη σύνδεση μεταξύ ενός τεράστιου αριθμού συσκευών IoT που πρέπει να παραδίδουν αξιόπιστα τα δεδομένα τους, συνήθως σε υψηλούς ρυθμούς ή σε εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση [67] [68] [69]. Η μαζική φύση του IoT απαιτεί επανεξέταση του τρόπου με τον οποίο τα συμβατικά ασύρματα δίκτυα (π.χ. κυψελωτά συστήματα) λειτουργούν. Για παράδειγμα, σε περιβάλλον IoT, η ενεργειακή απόδοση, η χαμηλή καθυστέρηση, η αξιοπιστία και οι επικοινωνίες ανερχόμενης ζεύξης υψηλής ταχύτητας αποτελούν σημαντικές προκλήσεις. Ειδικότερα, στο IoT οι συσκευές έχουν πολύ περιορισμένη μπαταρία και συνήθως δεν μπορούν να μεταδίδουν σε μεγάλη απόσταση λόγω των ενεργειακών τους περιορισμών.

Για παράδειγμα, σε περιοχές που παρουσιάζουν μια διαλείπουσα ή φτωχή κάλυψη από επίγεια ασύρματα δίκτυα, οι συσκευές IoT με περιορισμένη μπαταρία ενδέχεται να μην μπορούν να μεταδώσουν τα δεδομένα τους σε απομακρυσμένους σταθμούς βάσης λόγω των περιορισμών ισχύος τους. Επιπλέον, λόγω των διάφορων εφαρμογών των συσκευών IoT, ενδέχεται να αναπτυχθούν σε περιβάλλοντα χωρίς επίγεια ασύρματη υποδομή όπως βουνά και ερημικές περιοχές.

Από αυτή την άποψη, η χρήση κινητών UAV είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση σε μια σειρά από προκλήσεις που σχετίζονται με τα δίκτυα IoT. Σε σενάρια με επίκεντρο το IoT, τα UAV μπορούν να αναπτυχθούν ως εναέριοι σταθμοί βάσης για να παρέχουν αξιόπιστες και ενεργειακά αποδοτικές επικοινωνίες στην ανερχόμενη ζεύξη. Μάλιστα, λόγω της εναέριας φύσης των UAV και τος μεγάλου υψόμετρου τους, μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά για να μειωθεί η σκίαση και τα φαινόμενα μπλοκαρίσματος που είναι η κύρια αιτία εξασθένησης του σήματος στις ασύρματες συνδέσεις. Ως αποτέλεσμα μιας

τέτοιας αποτελεσματικής τοποθέτησης UAV, το κανάλι επικοινωνίας μεταξύ συσκευών IoT και UAV μπορεί να βελτιωθεί σε αρκετά σημαντικό βαθμό. Στη συνέχεια, οι συσκευές IoT περιορισμένης μπαταρίας θα χρειαστούν σημαντικά χαμηλότερη ισχύ για τη μετάδοση των δεδομένων τους σε UAV. Με άλλα λόγια, τα UAV μπορούν να τοποθετηθούν με βάση τις θέσεις των συσκευών IoT που επιτρέπουν σε αυτές τις συσκευές να συνδεθούν επιτυχώς στο δίκτυο χρησιμοποιώντας ελάχιστη ισχύ μετάδοσης. Επιπλέον, τα UAV μπορούν επίσης να εξυπηρετήσουν τεράστια συστήματα IoT ενημερώνοντας δυναμικά τις τοποθεσίες τους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη χρήση επίγειων σταθμών βάσης μικρών κυψελών που μπορεί να χρειαστεί να επεκταθούν ουσιαστικά για να εξυπηρετήσουν τον αναμενόμενο αριθμό συσκευών στο IoT. Ως εκ τούτου, με την εκμετάλλευση των μοναδικών χαρακτηριστικών των UAV, η συνδεσιμότητα και η ενεργειακή απόδοση των δικτύων IoT μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά.

- **UAV με ενεργοποιημένη προσωρινή μνήμη:**

Η προσωρινή αποθήκευση σε μικρούς σταθμούς βάσης (SBS – Small Base Station) έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη βελτίωση της απόδοσης των χρηστών και για τη μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης. Ωστόσο, η προσωρινή αποθήκευση σε στατικούς επίγειους σταθμούς βάσης μπορεί να μην είναι αποτελεσματική στην εξυπηρέτηση των κινητών χρηστών σε περίπτωση συχνών μεταπομπών (π.χ., όπως σε εξαιρετικά πυκνά δίκτυα με κινούμενους χρήστες). Σε αυτή τη περίπτωση, όταν ένας χρήστης μετακινείται σε ένα νέο κελί, το ζητούμενο περιεχόμενό του μπορεί να μην είναι διαθέσιμο στο νέο σταθμό βάσης και, ως εκ τούτου, οι χρήστες δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν σωστά. Για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση του κινητού χρήστη σε τέτοια σενάρια, κάθε ζητούμενο περιεχόμενο πρέπει να είναι αποθηκευμένο σε μια κρυφή μνήμη σε πολλούς σταθμούς βάσης, κάτι το οποίο δεν είναι αποτελεσματικό λόγω των γενικών εξόδων σηματοδότησης και των πρόσθετων χρήσεων αποθήκευσης. Ως εκ τούτου, για την βελτίωση της αποτελεσματικότητας της προσωρινής αποθήκευσης, υπάρχει ανάγκη για ανάπτυξη ευέλικτων σταθμών βάσης που να μπορούν να παρακολουθούν την κινητικότητα των χρηστών και να παραδίδουν αποτελεσματικά το απαιτούμενο περιεχόμενο.

Στην πραγματικότητα, η χρήση UAV με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την κυκλοφορία εκφόρτωσης στα ασύρματα δίκτυα. Αξιοποιώντας πληροφορίες σχετικές με τον χρήστη, όπως η διανομή αιτημάτων περιεχομένου και η κινητικότητα, τα UAV με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης μπορούν να μετακινηθούν βέλτιστα και αναπτυχθούν για την παροχή των επιθυμητών υπηρεσιών στους χρήστες. Ένα άλλο πλεονέκτημα της ανάπτυξης UAV με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης είναι ότι η πολυπλοκότητα μπορεί να μειωθεί σε σύγκριση με την περίπτωση ενός SBS. Για παράδειγμα, κάθε φορά που ένας χρήστης κινητού μετακινείται σε ένα νέο κελί, το ζητούμενο περιεχόμενό του πρέπει να αποθηκευτεί στο νέο σταθμό βάσης. Ωστόσο, τα drones με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης μπορούν να παρακολουθούν το μοτίβο κινητικότητας των χρηστών και κατά συνέπεια, δεν θα απαιτείται πλέον τέτοια πρόσθετη αποθήκευση στο SBS. Σε ένα σύστημα UAV με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης, η κεντρική μονάδα επεξεργασίας του cloud μπορεί να χρησιμοποιήσει διάφορες πληροφορίες με επίκεντρο τον χρήστη συμπεριλαμβανομένων των προτύπων κινητικότητας των χρηστών και του αιτήματός διανομής περιεχομένου διαχείρισης των UAV. Τέτοιες πληροφορίες μπορούν να

παρέχονται από ένα κεντρικό cloud χρησιμοποιώντας τυχόν προηγούμενα διαθέσιμα δεδομένα χρηστών. Στη συνέχεια, το κεντρικό cloud μπορεί να καθορίσει αποτελεσματικά τις τοποθεσίες και τις διαδρομές κινητικότητας του UAV με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης για την εξυπηρέτηση των επίγειων χρηστών. Αυτό, με τη σειρά του, μπορεί να μειώσει το συνολικό κόστος με την ενημέρωση του περιεχομένου της προσωρινής μνήμης.

Κατά την εκτέλεση προσωρινής αποθήκευσης με SBS, τα αιτήματα περιεχομένου του κινητού χρήστη μπορεί να χρειαστεί να αποθηκευτούν δυναμικά σε διαφορετικό SBS. Ωστόσο, τα UAV με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης μπορούν να παρακολουθούν το μοτίβο κινητικότητας των χρηστών και να αποφεύγουν τη συχνή ενημέρωση του περιεχομένου των αιτημάτων των χρηστών κινητής τηλεφωνίας. Επομένως, οι επίγειοι χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν αποτελεσματικά με την χρήση UAV που παρέχουν κινητή μνήμη τα οποία προβλέπουν τα μοτίβα κινητικότητας και τις πληροφορίες αιτημάτων περιεχομένου των χρηστών.

1.6.2 Κινητά drones ως εξοπλισμός χρήστη

Τα drones μπορούν να λειτουργήσουν ως χρήστες της ασύρματης υποδομής. Συγκεκριμένα, οι χρήστες drone μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές παράδοσης πακέτων, επιτήρησης, τηλεπισκόπησης και εικονικής πραγματικότητας. Πράγματι, τα UAV που είναι συνδεδεμένα με κυψέλη αποτελούν βασικό μέρος του IoT.

Το βασικό πλεονέκτημα των drones που μπορεί να αξιοποιήσει ο χρήστης, είναι η ικανότητά τους να κινούνται γρήγορα και να βελτιστοποιούν τη διαδρομή τους για να ολοκληρώσουν γρήγορα τις αποστολές τους. Για να χρησιμοποιηθούν σωστά τα drones ως εξοπλισμός χρήστη, υπάρχει ανάγκη για αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ drones και επίγειων σταθμών βάσης. Για να υποστηριχθεί μια μεγάλη κλίμακα ανάπτυξης drones, απαιτείται μια αξιόπιστη υποδομή ασύρματης επικοινωνίας για να ελέγχει αποτελεσματικά τις επιχειρήσεις των drones ενώ παράλληλα θα υποστηρίζει την κίνηση που προέρχεται από τις υπηρεσίες τους.

1.6.3 Εναέρια δίκτυα Ad-Hoc με UAV

Μία από τις βασικές περιπτώσεις χρήσης UAV είναι τα εναέρια δίκτυα ad-hoc. Με την κινητικότητά τους, την έλλειψη κεντρικού ελέγχου, και την φύση τους, τα FANET μπορούν να επεκτείνουν το εύρος συνδεσιμότητας και επικοινωνίας σε γεωγραφικές περιοχές με περιορισμένη κυψελοειδή υποδομή [70]. Εν τω μεταξύ, τα FANET έχουν κομβικό ρόλο σε διάφορες εφαρμογές όπως η παρακολούθηση της κυκλοφορίας, η τηλεπισκόπηση, η επιτήρηση των συνόρων, η διαχείριση καταστροφών, η γεωργική διαχείριση, η διαχείριση πυρκαγιών και τα δίκτυα αναμεταδοτών. Συγκεκριμένα, ένα UAV δίκτυο αναμεταδότη διατηρεί αξιόπιστες συνδέσεις επικοινωνίας μεταξύ απομακρυσμένου πομπού και δέκτη που δεν μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας λόγω εμποδίων ή της μεγάλης απόστασης διαχωρισμού τους.

Σε σύγκριση με ένα μόνο UAV, ένα FANET με πολλαπλά μικρά UAV έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα [71]:

- **Επεκτασιμότητα:** Η λειτουργική κάλυψη των FANET μπορεί να αυξηθεί εύκολα με την προσθήκη νέων UAV και την υιοθέτηση αποτελεσματικών δυναμικών σχημάτων δρομολόγησης.
- **Κόστος:** Το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των μικρών UAV είναι χαμηλότερο από το κόστος ενός μεγάλου UAV με σύνθετο υλικό και βαρύ ωφέλιμο φορτίο.
- **Επιβίωση:** Στα FANET, εάν ένα UAV τεθεί εκτός λειτουργίας (λόγω καιρικών συνθηκών ή οποιασδήποτε αστοχίας στο σύστημα), οι αποστολές των FANET μπορούν ακόμα να συνεχιστούν μαζί με τα υπόλοιπα UAV. Τέτοιου είδους ευελιξία δεν υπάρχει σε ένα απλό σύστημα UAV.

1.6.4 Άλλες πιθανές περιπτώσεις χρήσης των UAV

Στην προηγούμενη υπο-ενότητα αναφέρθηκαν πιθανά σενάρια όσον αφορά την χρήση των UAV στην ασύρματη δικτύωση. Στην συνέχεια, σε αυτή την υποενότητα αναφέρονται διάφορες εφαρμογές των UAV στο πλαίσιο των δικτύων και του IoT.

- **Τα UAV ως εναέρια οπισθόζευξη στα επίγεια δίκτυα:** Το ενσύρματο backhauling είναι μια κοινή προσέγγιση για τη σύνδεση των σταθμών βάσης στα επίγεια δίκτυα. Ωστόσο, οι ενσύρματες συνδέσεις μπορεί να είναι δαπανηρές και ανέφικτες λόγω γεωγραφικών περιορισμών, ειδικά όταν πρόκειται για εξαιρετικά πυκνά κυψελωτά δίκτυα. Ενώ η ασύρματη οπισθόζευξη είναι βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική λύση, πάσχει από παρεμβολές που υποβαθμίζουν την απόδοση του δικτύου πρόσβασης [72]. Σε αυτή την περίπτωση, τα UAV μπορούν να παίξουν βασικό ρόλο για την παροχή οικονομικής, αξιόπιστης και ασύρματης οπισθόζευξης υψηλής ταχύτητας για τα επίγεια δίκτυα [73]. Συγκεκριμένα, τα UAV μπορούν να τοποθετηθούν βέλτιστα για να αποφύγουν εμπόδια και να δημιουργήσουν LoS και αξιόπιστες συνδέσεις επικοινωνίας. Επιπλέον, η χρήση των UAV με δυνατότητες mmW μπορούν να δημιουργήσουν υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και ασύρματες οπισθοζεύξεις που απαιτούνται για την αντιμετώπιση υψηλών απαιτήσεων κυκλοφορίας σε περιοχές με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Σαφώς, τέτοιου είδους δίκτυα μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αξιοπιστία, τη χωρητικότητα και το κόστος λειτουργίας των επίγειων δικτύων οπισθόζευξης.
- **Έξυπνες πόλεις:** Οι έξυπνες πόλεις θα πρέπει ουσιαστικά να ενσωματώσουν πολλές από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες και υπηρεσίες συμπεριλαμβανομένου ενός περιβάλλοντος IoT (με τις πολυάριθμες υπηρεσίες του), ένα αξιόπιστο ασύρματο κυψελοειδές δίκτυο, την ανθεκτικότητα σε καταστροφές και σε τεράστιες ποσότητες δεδομένων [74]. Για το σκοπό αυτό, τα UAV μπορούν να παρέχουν αρκετές περιπτώσεις χρήσης ασύρματων εφαρμογών σε έξυπνες πόλεις. Από τη μία πλευρά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές συλλογής δεδομένων που μπορούν να συγκεντρώσουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές μέσα σε μια πόλη και

να τα παραδώσουν σε κεντρικές μονάδες cloud για σκοπούς ανάλυσης μεγάλων δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, οι σταθμοί βάσης UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν απλώς την κάλυψη του ασύρματου δικτύου σε μια πόλη ή για να ανταποκριθούν σε συγκεκριμένες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Τα UAV μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση των χαρτών ραδιοφωνικού περιβάλλοντος σε μια πόλη, προκειμένου να βοηθηθούν οι φορείς στο δίκτυο και στις προσπάθειες σχεδιασμού της συχνότητας [75]. Μια άλλη βασική εφαρμογή των UAV σε έξυπνες πόλεις είναι η ικανότητά τους να λειτουργούν ως κινητά υπολογιστικά συστήματα νέφους [76]. Από αυτή την άποψη, ένα cloudlet τοποθετημένο σε UAV μπορεί να παρέχει ευκαιρίες υπολογισμού ομίχλης και εκφόρτωσης για συσκευές που δεν μπορούν να λειτουργήσουν βαριές υπολογιστικές εργασίες. Συνολικά, τα UAV αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των έξυπνων πόλεων, τόσο από ασύρματες όσο και από λειτουργικές προοπτικές.

2

Ανάλυση επιδόσεων για UAV κινητών επικοινωνιών

2.1 Εισαγωγή

Η αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία είναι ένα βασικό κλειδί για εφαρμογές βασισμένες σε UAV, επιτρέποντας τον έλεγχο της εκάστοτε αποστολής, τον έλεγχο της πτήσης σε πραγματικό χρόνο ή ακόμα και την πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο στα δεδομένα των UAV. Σε αυτό το κεφάλαιο, προτείνεται ένα μαθηματικό πλαίσιο βασισμένο στη στοχαστική γεωμετρία για την ανάλυση της απόδοσης συστημάτων UAV που βασίζονται στο κυψελοειδές δίκτυο για την ασύρματη επικοινωνία τους. Χρησιμοποιώντας αυτό το πλαίσιο, αναλύεται ο αντίκτυπος διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού, όπως η πυκνότητα των επίγειων σταθμών βάσης, το υψόμετρο και την κλίση της κεραίας των UAV. Επίσης, διερευνάται η συνύπαρξη επίγειων και εναέριων χρηστών, κάνοντας χρήση της ίδιας κυψελοειδούς υποδομής και φάσματος. Τα κύρια συμπεράσματα είναι ότι οι παρεμβολές είναι σημαντικές για τους εναέριους χρήστες και ότι είναι σημαντικό να διαμορφωθούν σωστά οι παράμετροι του δικτύου και της κεραίας για να αποφευχθούν παρεμβολές στους εναέριους χρήστες.

2.2 Προκαταρκτικά μοντελοποίησης

Αυτή η ενότητα εισάγει τις κύριες υποθέσεις μοντελοποίησης. Αρχικά, μια γενική επισκόπηση της στοχαστικής γεωμετρίας παρουσιάζεται στην **Ενότητα 2.2.1**. Στη συνέχεια, στην **Ενότητα 2.2.2** παρουσιάζονται σκέψεις σχετικά με την αρχιτεκτονική του δικτύου. Στη συνέχεια, το μοντέλο

καναλιού αναλύεται στην **Ενότητα 2.2.3** και η **Ενότητα 2.2.4** περιγράφει τη μοντελοποίηση των αστικών απορρίψεων και την προκύπτουσα πιθανότητα LoS. Τέλος, η μέθοδος συσχέτισης χρήστη και ο ορισμός του (**SINR** – Signal-to-interference-plus-noise ratio) αναφέρονται στην **Ενότητα 2.2.5**.

2.2.1 Στοχαστική γεωμετρία

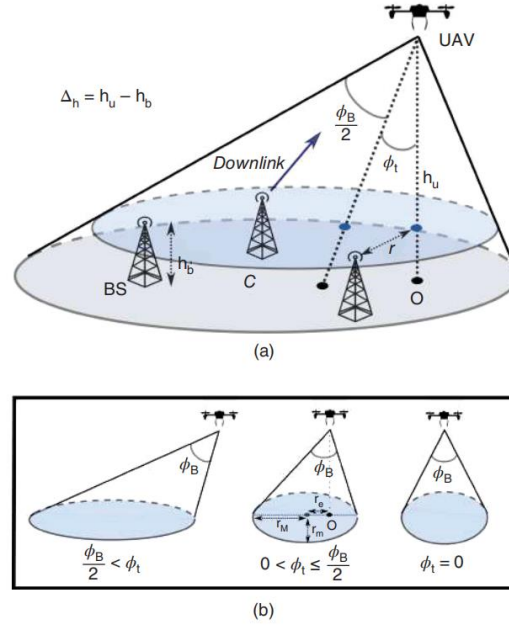
Ένα ασύρματο δίκτυο είναι μια συλλογή κόμβων κατανεμημένων στο χώρο, οι οποίοι διαδοχικά λειτουργούν ως πομποί ή δέκτες. Λόγω της φύσης εκπομπής των ασύρματων μέσων, το σήμα που στάλθηκε σε έναν επιδιωκόμενο δέκτη μπορεί να δημιουργήσει ταυτόχρονα παρεμβολές σε γειτονικούς κόμβους των οποίων οι τοποθεσίες μπορεί να είναι ντετερμινιστικές ή άγνωστες. Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη μπορεί επίσης να είναι άγνωστη κατά την πραγματοποίηση μιας επικοινωνίας. Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη μπορεί επίσης να είναι άγνωστη κατά τη δημιουργία μιας σύνδεσης επικοινωνίας.

Είναι απολύτως φυσιολογικό να μοντελοποιείται η γεωμετρία των ασύρματων δικτύων χρησιμοποιώντας στοχαστικά στοιχεία, τα οποία με τη σειρά τους παρέχουν στατιστικές εκτιμήσεις διαφορετικών ποσοτήτων ενδιαφέροντος συμπεριλαμβανομένου του SINR και άλλων βασικών μετρήσεων ή δεικτών απόδοσης (**KPI** - Key Performance Indicator). Συγκεκριμένα, η στοχαστική γεωμετρία είναι ένας αποτελεσματικός φορμαλισμός για την αποτύπωση κρίσιμων συλλογικών ιδιοτήτων των ασύρματων δικτύων που σχετίζονται με τη χωρική κατανομή των κόμβων τους [77]. Εξάλλου, οι κατάλληλες επιλογές μοντελοποίησης επιτρέπουν στη στοχαστική γεωμετρία να παρέχουν ελαστικές, συμπαγείς, ακόμη και εκφράσεις κλειστής μορφής KPI. Αυτές οι εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εμβαθύνουν την κατανόηση της συμπεριφοράς των ασύρματων δικτύων, με πιο ολοκληρωμένο τρόπο από ότι οι απλές αριθμητικές προσομοιώσεις brute-force.

Μια προσέγγιση στοχαστικής γεωμετρίας είναι χρήσιμη για τη μοντελοποίηση των τυχαίων θέσεων των ασυρμάτων κόμβων. Χρησιμοποιώντας την στοχαστική γεωμετρία, οι θέσεις των ασύρματων κόμβων μοντελοποιούνται σύμφωνα με τις ιδιότητες μιας δεδομένης στοχαστικής διαδικασίας. Με την εκμετάλλευση αυτών των ιδιοτήτων, μπορεί κανείς συνήθως να αποκτήσει στατιστικές ιδιότητες για KPI, οι οποίοι καταγράφουν κρίσιμες εξαρτήσεις μεταξύ της απόδοσης και διάφορων παραμέτρων συστήματος. Αν και οι βασικές προσεγγίσεις στοχαστικής γεωμετρίας επικεντρώνονται στις θέσεις των κόμβων, οι πιο προηγμένες εφαρμογές μπορούν να περιλαμβάνουν άλλες πηγές αβεβαιότητας σε ασύρματα δίκτυα, συμπεριλαμβανομένης της σκίασης μεγάλης κλίμακας, των διαλείψεων μικρής κλίμακας, καθώς και των επιπτώσεων του ελέγχου ισχύος [78].

2.2.2 Αρχιτεκτονική δικτύου

Ας εξετάσουμε ένα επίγειο κυψελωτό δίκτυο που περιλαμβάνει σταθμό βάσης με ύψος h_b που εξυπηρετεί χρήστες σε κατερχόμενη ζεύξη. Οι θέσεις των σταθμών βάσης ακολουθούν μια διαδικασία Poisson ομοιογενούς σημείου (**HPPP** - Homogeneous Point Poisson Process) με σταθερή πυκνότητα λ_b σταθμών βάσης ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (BSs/km^2). Οι χρήστες βρίσκονται στο υψόμετρο h_u , το οποίο μπορεί να είναι είτε εξοπλισμός επίγειου χρήστη (**G-UE** - Ground Base Station User Equipment) σε ύψος 1,5 m είτε UAV εξοπλισμός χρήστη (**U-UE** - Unmanned Aerial Base Station User Equipment) σε μεγαλύτερο ύψος.



Εικόνα 2.1 Κατερχόμενη ζεύξη ενός UAV συνδεδεμένου με κυψέλη. [113].

Δηλώνεται ως r η απόσταση γείωσης μεταξύ ενός σταθμού βάσης και ενός τυπικού χρήστη, του οποίου η θέση 2D στο έδαφος συμβολίζεται με O (Εικόνα 2.1 [113]). Η απόσταση 3D μεταξύ τους συμβολίζεται με

$$d = \sqrt{r^2 + \Delta_h^2} \quad (2.1)$$

, όπου $\Delta_h \triangleq h_u - h_b$.

Εστιάζουμε στην περίπτωση που η πυκνότητα των χρηστών είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την πυκνότητα λ_b των σταθμών βάσης, έτσι ώστε κάθε σταθμός βάσης να μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ενεργός σε ένα δεδομένο μπλοκ πόρων χρόνου/συχνότητας. Υποτίθεται ότι έχει προγραμματιστεί το πολύ ένας εξοπλισμός χρήστη για κάθε πόρο χρόνου/συχνότητας μπλοκ εντός κάθε κυψέλης, έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής.

Το κέρδος της κεραίας του σταθμού βάσης συμβολίζεται με G_b όπου τα g_m και g_u αντιπροσωπεύουν τα κέρδη του κύριου και του πλευρικού λοβού, αντίστοιχα.

Τα UAV θεωρείται ότι χρησιμοποιούν κατευθυντικές κεραίες, ενώ οι επίγειοι χρήστες είναι εξοπλισμένοι με πανκατευθυντικές κεραίες. Τα πλάτη δέσμης και οι γωνίες κλίσης της κεραίας των UAV συμβολίζονται με ϕ_B και ϕ_b , αντίστοιχα, και τα κέρδη του κύριου λοβού και του πλευρικού λοβού προσεγγίζονται κατά $G_u = 29000/\phi_B^2$ και 0, αντίστοιχα. Λόγω των κεκλιμένων κεραιών, ένα UAV μπορεί να ανιχνεύσει μόνο σταθμούς βάσης που βρίσκονται μέσα στον κύριο λοβό του, ο οποίος σχηματίζει ένα ελλειπτικό περίγραμμα στο έδαφος (**Εικόνα 2.1** [113]). Η ελλειπτική περιοχή συμβολίζεται με C και η θέση των σταθμών βάσης εντός αυτής της περιοχής σχηματίζει μια HPPP που αντιπροσωπεύεται από Φ_C της ίδιας πυκνότητας με το λ_b .

2.2.3 Μοντέλο καναλιού

Η ασύρματη σύνδεση μεταξύ δύο δεδομένων κόμβων θεωρείται ότι υφίσταται απώλειες διαδρομής μεγάλης κλίμακας και διαλείψεις μικρής κλίμακας. Για το καθένα, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί παραμέτροι για στοιχεία LoS και (NLoS - Non-Line-of-Sight). Η απώλεια διαδρομής σε μια σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων που χωρίζονται από μια απόσταση εδάφους r και η διαφορά ύψους Δ_h μπορεί να δηλωθεί ως:

$$\zeta_v(r) = A_v d^{-\alpha_v} = A_v (r^2 + \Delta_h^2)^{-\alpha_v/2}, v \in \{L, N\} \quad (2.2)$$

,όπου $v \in \{L, N\}$ αντιπροσωπεύει τον τύπο της σύνδεσης, ο οποίος είναι είτε LoS ($v = L$) είτε NLoS ($v = N$), α_v είναι ο εκθέτης απώλειας διαδρομής και A_v είναι η απώλεια διαδρομής αναφοράς στην απόσταση d=1.

Για τη μοντελοποίηση των επιπτώσεων των διαλείψεων μικρής κλίμακας, θα χρησιμοποιηθεί το γνωστό Nakagami-m μοντέλο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση διαφόρων τύπων περιβαλλόντων διαλείψεων, συμπεριλαμβανομένων των καναλιών Rayleigh ή Ricean.

Κάτω υπό τις διαλείψεις Nakagami-m, η δύναμη διάλειψεων Ω_v ακολουθεί μια κατανομή γάμμα, της οποίας η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF - Cumulative Distribution Function) είναι:

$$F_{\Omega_v}(\omega) \triangleq \mathbb{P}[\Omega_v < \omega] = 1 - \sum_{k=0}^{m_v-1} \frac{(m_v \omega)^k}{k!} e^{-m_v \omega}, v \in \{L, N\} \quad (2.3)$$

Το m_v είναι η παράμετρος διάλειψης, η οποία θεωρείται θετικός ακέραιος. Σημειώνεται ότι ένα μεγαλύτερο m_v αντιστοιχεί σε ελαφρύτερες διαλείψεις, με το όριο να είναι ισοδύναμο με ένα πρόσθετο κανάλι λευκού προσθετικού θορύβου (AWGN - Additive White Gaussian Noise). Συνεπώς, $m_L > m_N$.

Τέλος, η λαμβανόμενη ισχύς σε έναν εξοπλισμό χρήστη από έναν σταθμό βάσης με ισχύ εκπομπής P_{tx} υπολογίζεται ως:

$$P_{rx}(r) = P_{tx} G_{tot} \zeta_v(r) \Omega_v \quad (2.4)$$

όπου $G_{\text{tot}} = G_b G_u$ υποδηλώνει το συνολικό κέρδος των κεραιών πομπού και δέκτη και το ν υποδεικνύει τον τύπο της σύνδεσης που είναι LoS ή NLoS.

2.2.4 Μοντελοποίηση αποκλεισμού και πιθανότητα LoS

Η πιθανότητα LoS μοντελοποιείται ως:

$$\mathcal{P}_L(r) = \prod_{n=0}^M \left[1 - \exp \left(- \frac{\left[h_b - \left(n + \frac{1}{2} \right) (h_b - h_u) / (M + 1) \right]^2}{2c^2} \right) \right] \quad (2.5)$$

όπου (a, b, c) είναι οι παράμετροι που καθορίζουν το είδος των αστικών περιοχών (π.χ. προαστιακές, αστικές, πυκνοαστικές ή πολυώροφες αστικές) και $M = \left\lceil (r\sqrt{ab}/1000) - 1 \right\rceil$.

Αντίθετα, η πιθανότητα NLoS είναι $P_N(r) = 1 - P_L(r)$.

Στη μοντελοποίησή υποθέτουμε ότι οι πιθανότητες LoS διαφορετικών συνδέσεων είναι στατιστικά ανεξάρτητες ή μια από την άλλη, και ως εκ τούτου το Φ_c μπορεί να αποσυντεθεί σε δύο ανεξάρτητες μη ομοιογενείς διαδικασίες Poisson:

- Φ_C^L των LoS σταθμών βάσης σε σχέση με την τυπικό εξοπλισμό χρήστη, και
- Φ_C^N των NLoS σταθμών βάσης.

Οι πυκνότητες των Φ_C^L και Φ_C^N μπορεί να μην είναι σταθερές και συμβολίζονται με $\lambda_L(r) = \lambda P_L(r)$ και $\lambda_N(r) = \lambda P_N(r)$, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, $\lambda = \lambda_L + \lambda_N$ και $\Phi_C = \Phi_C^L \cup \Phi_C^N$.

2.2.5 Στρατηγική σύνδεσης χρηστών και σύνδεση με βάση το λόγο SINR

Για τη στρατηγική συσχέτισης, εξετάζεται η περίπτωση όπου ένας εξοπλισμός χρήστη εξυπηρετείται από τον καλύτερο σταθμό βάσης που προσφέρει την υψηλότερη ισχύ σήματος και το SINR στον δέκτη του εξοπλισμού χρήστη. Αντίστοιχα, λόγω της επίδρασης των μπλοκαρισμάτων, ένας εξοπλισμός χρήστη μπορεί να συσχετιστεί με ένα σταθμό βάσης LoS που δεν είναι ο πλησιέστερος αλλά εξακολουθεί να παρέχει υψηλότερο SINR από ένα άλλον NLoS σταθμό βάσης που θα μπορούσε να είναι πιο κοντά. Δηλώνοντας την απόσταση του σταθμού βάσης ως R_s , το συνολικά λαμβανόμενη παρεμβολή από τα άλλα κελιά του ίδιου καναλιού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I = \sum_{r \in \Phi_C^L \setminus R_s} P_{tx} G_{\text{tot}} \zeta_L(r) \Omega_L + \sum_{r \in \Phi_C^N \setminus R_s} P_{tx} G_{\text{tot}} \zeta_N(r) \Omega_N \quad (2.6)$$

Παραπάνω, ο πρώτος όρος άθροισης αντιστοιχεί σε σταθμό βάσης με παρεμβολές LoS και ο δεύτερος όρος άθροισης αντιστοιχεί σε σταθμό βάσης με παρεμβολές NLoS. Δηλώνοντας τη λαμβανόμενη χρήσιμη ισχύ σήματος ως $P_{rx}(R_s) = P_{tx}G_{tot}\zeta_v(R_s)\Omega_v$, το στιγμιαίο SINR στον εξοπλισμό του χρήστη μπορεί επομένως να εκφραστεί ως:

$$SINR = \frac{P_{rx}(R_s)}{I + N_0} \quad (2.7)$$

όπου το N_0 αντιπροσωπεύει την ισχύ του θορύβου στον δέκτη του εξοπλισμού του χρήστη.

2.3 Ανάλυση απόδοσης

Σε αυτήν την ενότητα, οι βασικές μετρήσεις απόδοσης που αντιστοιχούν στις προοπτικές του χρήστη και του δικτύου αξιολογούνται. Η ανάλυση παρέχει μια σειρά από ακριβείς τυπικές εκφράσεις, οι οποίες για τη διευκόλυνση των αριθμητικών αξιολογήσεων απλοποιούνται αργότερα σε αναλυτικές προσεγγίσεις. Στη συνέχεια, η **Ενότητα 2.3.1** παρουσιάζει τις ακριβείς εκφράσεις για την πιθανότητα κάλυψης της σύνδεσης (δηλαδή, τη συμπληρωματική συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (**CCDF** - Complementary Cumulative Distribution Function) του SINR) και η **Ενότητα 2.3.2** περιλαμβάνει τις κατά προσέγγιση εκφράσεις. Μελετάμε περαιτέρω τη φασματική απόδοση σε επίπεδο χρήστη και δικτύου στην **Ενότητα 2.3.3**.

Πίνακας 2.1 Παράμετροι και ορολογίες [113].

Παράμετρος	Ορολογία
λ_b	Πυκνότητα σταθμού βάσης
h_u, h_b	Ύψη χρήστη και σταθμού βάσης αντίστοιχα
g_M, g_m	Κέρδη του κύριου και του δευτερεύοντος λοβού της κεραίας του σταθμού βάσης αντίστοιχα
G_b, G_u	Κέρδη των κεραιών του σταθμού βάσης και του UAV αντίστοιχα
$G_{tot} = G_b G_u$	Ολική επίδραση των κερδών των κεραιών του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα
ϕ_B, ϕ_t	Άνοιγμα κεραίας UAV και γωνία κλίσης, αντίστοιχα
ζ_v, A_v	Συνολική απώλεια διαδρομής και αναφοράς, $v \in \{L, N\}$

r, d	Οι 2D και 3D αποστάσεις, αντίστοιχα
α_v	Εκθέτης της απώλειας διαδρομής, $v \in \{L, N\}$
Ω_v	Ισχύς διαλείψεων μικρής κλίμακας
m_v	Παράμετρος διαλείψεων Nakagami-m
P_{tx}	Ισχύς μετάδοσης του σταθμού βάσης
P_L, P_N	Πιθανότητες LoS και NLoS
(a, b, c)	Παράμετροι του αστικού περιβάλλοντος
λ_L, λ_N	Πυκνότητες των LoS και NLoS των ενεργών σταθμών βάσης
I	Συνολική Παρεμβολή
N_0	Ισχύς θορύβου
R_S	Απόσταση εδάφους μεταξύ του εξοπλισμού χρήστη και του σταθμού βάσης
P_{cov}	Πιθανότητα Κάλυψης
R	Επιτεύξιμη απόδοση
A	Απόδοση περιοχής φάσματος
T	Κατώφλι SINR
ρ	Αναλογία των εναέριων εξοπλισμών χρηστών προς το σύνολο των εναέριων και επίγειων εξοπλισμών χρηστών

Μια λίστα με παραμέτρους και ορολογίες παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2.1** [\[113\]](#).

2.3.1 Ακριβής πιθανότητα κάλυψης

Η πιθανότητα κάλυψης, η οποία συμβολίζεται με P_{cov} , είναι η πιθανότητα όπου το στιγμιαίο SINR είναι μεγαλύτερο από ένα δεδομένο όριο T που εξαρτάται από την απαίτηση του συστήματος.

Η πιθανότητα κάλυψης ενός τυπικού κινητού UAV σε κατερχόμενη ζεύξη μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mathcal{P}_{cov} = 2 \sum_{v \in \{L, N\}} \int_{r_0}^{r_e + r_M} r_S \mathcal{P}_{cov|R_S}^v(r_S) f_{R_S}^v(r_S) [\pi + \varphi_1(r_S) - \varphi_2(r_S)] dr_S \quad (2.8)$$

Προκειμένου να ληφθεί η πιθανότητα κάλυψης ενός εξοπλισμού χρήστη που χρησιμοποιεί μια πανκατευθυντική κεραία, πρέπει: $r_e = 0$, $r_0 = 0$, $r_M = \infty$ και $\varphi_1(r) = \varphi_2(r)$.

2.3.2 Προσεγγίσεις για πιθανότητες κάλυψης UAV

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται δύο προσεγγίσεις που μειώνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα στον αριθμητικό υπολογισμό της απόδοσης κάλυψης των UAV.

2.3.2.1 Απόρριψη NLoS και επιπτώσεις θορύβου

Ο αριθμός των ανιχνευόμενων και των LoS σταθμών βάσης αυξάνεται με το υψόμετρο των UAV. Τα UAV που πετάνε ψηλότερα από το ύψος των σταθμών βάσης βρίσκουν πολλούς σταθμούς βάσης σε κατάσταση LoS. Οι θέσεις τέτοιων σταθμών βάσης είναι πιθανό να είναι πιο κοντά στο UAV καθώς η πιθανότητα LoS αυξάνεται όταν η απόσταση του εδάφους μειώνεται. Αντίστοιχα, οι LoS σταθμοί βάσης μπορούν να εισάγουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ σήματος σε δέκτη UAV συγκριτικά με τους NLoS σταθμούς βάσης λόγω ευνοϊκότερων συνθηκών διάδοσης. Επιπλέον, οι σταθμοί βάσης με παρεμβολές LoS επιβάλλουν συνήθως υψηλή ποσότητα παρεμβολών συγκεντρωτικών στοιχείων πολύ υψηλότερη από την ισχύ του θορύβου. Παρουσιάζονται οι ακόλουθες προσεγγίσεις για εξοπλισμούς χρήστη στον ουρανό, εξαλείφοντας τις επιπτώσεις του θορύβου, μέσω μαθηματικών υπολογισμών.

Η απόδοση της κάλυψης του UAV εξοπλισμού χρήστη P_{cov} μπορεί να προσεγγιστεί και να απλοποιηθεί απορρίπτοντας τους σταθμούς βάσης NLoS και τα εφέ θορύβου ως εξής:

$$\mathcal{P}_{\text{cov}} \approx 2 \int_0^{r_s + r_m} \mathcal{P}_{\text{cov}|R_s}^L(r_s) f_{R_s}^L(r_s) [\pi + \varphi_1(r_s) - \varphi_2(r_s)] r_s dr \quad (2.9)$$

,όπου

$$f_{R_s}^L(r_s) \approx \lambda_b \mathcal{P}_L(r_s) e^{-2\lambda_b r_{1L}^L} \quad (2.10)$$

και

$$\mathcal{L}_{\Pi R_s}^L(y_L) \approx e^{-2\lambda_{1L}^L} \quad (2.11)$$

Η αύξηση του ύψους του UAV h_u από το μηδέν έχει ως αποτέλεσμα περισσότερες παρεμβολές LoS σε σταθμούς βάσης, και επομένως μεγαλύτερη τιμή I_{1L}^L . Αυτό, με τη σειρά του, υποβαθμίζει την απόδοση κάλυψης όταν τα $L_{\Pi R_s}^L(y_L)$ και τα $f_{R_s}^L$ μειώνονται.

Από την άλλη πλευρά, σε υψηλότερο υψόμετρο UAV, το UAV έχει υψηλότερη πιθανότητα LoS με τον εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης, που οδηγεί σε καλύτερη συνολική απόδοση λόγω της μεγαλύτερης τιμής του $f_{R_s}^L(r_s)$ στην **Εξίσωση (2.8)**.

2.3.2.2 Ταίριασμα στιγμής

Για να απλοποιηθούν περαιτέρω οι εκφράσεις της απόδοσης του εξοπλισμού χρήστη, υλοποιείται κατά προσέγγιση η αθροιστική παρεμβολή χρησιμοποιώντας μια κατανομή Γάμμα, η οποία δίνει τη δυνατότητα να εκφραστεί ο τελεστής Laplace της παρέμβασης σε κλειστή μορφή. Για αυτό, χρησιμοποιείται μια μέθοδος ταιριάσματος στιγμών, προκειμένου να εκτιμηθεί η κατανομή παρεμβολών. Συγκεκριμένα, οι πρώτες και οι δεύτερες στιγμές της παρεμβολής υπολογίζονται και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατανομής Γάμμα. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο μέσος όρος και η διακύμανση της συγκεντρωτικής παρεμβολής.

Ο μέσος όρος και η διακύμανση της συγκεντρωτικής παρεμβολής μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$\mu_{\Pi R_s} = 2\lambda P_{tx} G_{tot} \int_{r_s}^{r_e + r_M} r \mathcal{P}_L(r) \zeta_L(r) [\pi + \varphi_1(r) - \varphi_2(r)] dr \quad (2.12)$$

και

$$\sigma_{\Pi R_s}^2 = 2\lambda (P_{tx} G_{tot})^2 \left(\frac{m_L + 1}{m_L} \right) \int_{r_s}^{r_e + r_M} r \mathcal{P}_L(r) \zeta_L^2(r) [\pi + \varphi_1(r) - \varphi_2(r)] dr \quad (2.13)$$

Αν $\phi t = 0$, η πρώτη και η δεύτερη στιγμή της αθροιστικής παρεμβολής υπολογίζονται ως:

$$\mu_{IRR_s} = \begin{cases} \frac{\pi \lambda P_{tx} G_{tot} A_L}{0.5\alpha_L - 1} \sum_{k=i}^j p_k \left[(r_k^2 + \Delta_h^2)^{1-0.5\alpha_L} - (r_{k+1}^2 + \Delta_h^2)^{1-0.5\alpha_L} \right], & \text{εάν } \alpha_L > 2 \\ \pi \lambda P_{tx} G_{tot} A_L \sum_{k=i}^j p_k \ln \left(\frac{r_{k+1}^2 + \Delta_h^2}{r_k^2 + \Delta_h^2} \right), & \text{εάν } \alpha_L = 2 \end{cases}$$

και

$$\sigma_{\Pi R_s}^2 = \frac{\lambda (P_{tx} G_{tot} A_L)^2}{\alpha_L - 1} \left(\frac{m_L + 1}{m_L} \right) \sum_{k=i}^j p_k \left[(r_k^2 + \Delta_h^2)^{1-\alpha_L} - (r_{k+1}^2 + \Delta_h^2)^{1-\alpha_L} \right]$$

Εξετάζοντας τη μέση παρεμβολή, η αύξηση του ύψους του σταθμού βάσης, οδηγεί σε:

- μια αύξηση στο p_k (καθώς η πιθανότητα LoS είναι μια αυξανόμενη συνάρτηση του h_b) και
- μια αύξηση στον δεύτερο όρο της άθροισης (καθώς αυτός ο όρος είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του $\Delta_h = h_u - h_b$, και επομένως μια αύξουσα συνάρτηση του h_b).

Αντίστοιχα, συνολικά, η μέση παρεμβολή αυξάνεται, όσο αυξάνεται η τιμή του h_b . Ωστόσο, η πιθανότητα LoS και η λαμβανόμενη χρήσιμη ισχύς σήματος είναι υψηλότερες όταν το h_b είναι μεγαλύτερο. Όλα αυτά προτείνουν ότι μπορεί να υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του ύψους του σταθμού βάσης, στην οποία η αυξημένη παρεμβολή και τα επίπεδα του σήματος είναι βέλτιστα ισορροπημένα, καταλήγοντας στη μέγιστη απόδοση του UAV.

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους κλίμακας και σχήματος μιας κατανομής Γάμμα, που συμβολίζεται ως β_1 και β_2 , αντίστοιχα, χαρακτηρίζεται κατά προσέγγιση η κατανομή της παρεμβολής.

Εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση μεταξύ αυτών των παραμέτρων και των μέσων όρων των παρεμβολών και διακύμανσης ως εξής:

$$\beta_1 = \frac{\sigma_{\Pi R_S}^2}{\mu_{\Pi R_S}}, \beta_2 = \frac{\mu_{\Pi R_S}^2}{\sigma_{\Pi R_S}^2} \quad (2.14)$$

Επιπλέον, ο μετασχηματισμός της κατανομής Γάμμα είναι:

$$\mathcal{L}_{\Pi R_S}^L(y_L) = (1 + \beta_1 y_L)^{-\beta_2} \quad (2.15)$$

Προσεγγίζοντας τα στατιστικά του I με κατανομή Γάμμα της κλίμακας και με παραμέτρους σχήματος β_1 και β_2 , εκφράζεται η απόδοση της κάλυψης ενός UAV του εξοπλισμού χρήστη ως:

$$\mathcal{P}_{\text{covl } R_S}^L \approx \frac{1}{\Gamma(\beta_2)} \sum_{k=0}^{m_L-1} \frac{(\beta_1 y_L)^k}{k!} \Gamma(\beta_2 + k) (1 + \beta_1 y_L)^{-\beta_2 - k} \quad (2.16)$$

όπου $\Gamma(\cdot)$ είναι η πλήρης συνάρτηση Γάμμα.

2.3.3 Ανάλυση επιτεύξιμης απόδοσης και φασματικής απόδοσης

Η επιτεύξιμη απόδοση, που συμβολίζεται με R , είναι ο υψηλότερος ρυθμός bit που μπορεί να λάβει ένας εξοπλισμός χρήστη από το δίκτυο. Αυτή η μέτρηση υπολογίζεται (σε bit ανά δευτερόλεπτο ανά Hz) ως:

$$\mathcal{R} \triangleq \mathbb{E}[\log_2(1 + \text{SINR})](b/s/Hz) \quad (2.17)$$

Το R μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{\mathcal{P}_{\text{cov}}(h_u, t)}{1+t} dt$$

$$\approx \frac{1}{\ln 2} \sum_{n=1}^K \frac{\mathcal{P}_{\text{cov}}(h_u, t_n)}{1+t_n} \frac{\pi^2 \sin\left(\frac{2n-1}{2K} \pi\right)}{4K \cos^2\left[\frac{\pi}{4} \cos\left(\frac{2n-1}{2K} \pi\right) + \frac{\pi}{4}\right]}$$

Η τελευταία προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για να διευκολυνθεί ο αριθμητικός υπολογισμός της κύριας εξίσωσης εξαλείφοντας ένα ολοκλήρωμα. Αυτή η προσέγγιση ακολουθεί τον κανόνα τετραγωνισμού (**GCQ** - Gauss-Chebyshev Quadrature), των Gauss-Chebyshev με ελεύθερη παράμετρο K που επιλέγεται αρκετά μεγάλη για να ενεργοποιηθεί η υψηλή ακρίβεια.

Επιπλέον, το t_n δίνεται ως εξής:

$$t_n = \tan\left[\frac{\pi}{4} \cos\left(\frac{2n-1}{2K} \pi\right) + \frac{\pi}{4}\right] \quad (2.18)$$

Για την αξιολόγηση της απόδοσης σε επίπεδο δικτύου όσον αφορά την χρήση των UAV, η φασματική απόδοση της περιοχής που συμβολίζεται με A , είναι μια επαρκής μέτρηση που καθορίζει τον εφικτό ρυθμό δικτύου ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο (σε bit ανά δευτερόλεπτο ανά hertz ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο). Έστω ρ ως ο λόγος των εναέριων εξοπλισμών των χρηστών ως προς το σύνολο των εναέριων και των επίγειων εξοπλισμών χρηστών. Επομένως, η φασματική απόδοση της περιοχής μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\mathcal{A} \triangleq \lambda \left[(1-\rho) \mathcal{R}(1.5, \lambda) + \rho \mathcal{R}(h_u, \lambda) \right] (\text{b/s/Hz/km}^2) \quad (2.19)$$

,όπου τα $\mathcal{R}(1.5, \lambda)$ και $\mathcal{R}(h_u, \lambda)$ αντίστοιχα, σχετίζονται με επίγειους χρήστες σε υψόμετρο 1,5 μέτρου και σε εναέριους χρήστες σε υψόμετρο $0h_u$.

Η φασματική απόδοση της περιοχής μας επιτρέπει να μελετήσουμε τον αντίκτυπο της προσθήκης εναέριων χρηστών στο δίκτυο όταν το φάσμα μοιράζεται με επίγειους χρήστες.

2.4 Σχεδιασμός Συστήματος: Περιπτώσεις μελέτης

Σε αυτήν την ενότητα, με τη χρήση των θεωρητικών εργαλείων που παρουσιάστηκαν στην **Ενότητα 2.3**, γίνεται ποιοτική και ποσοτική κατανόηση σημαντικών παραμέτρων σχεδιασμού των κινητών UAV.

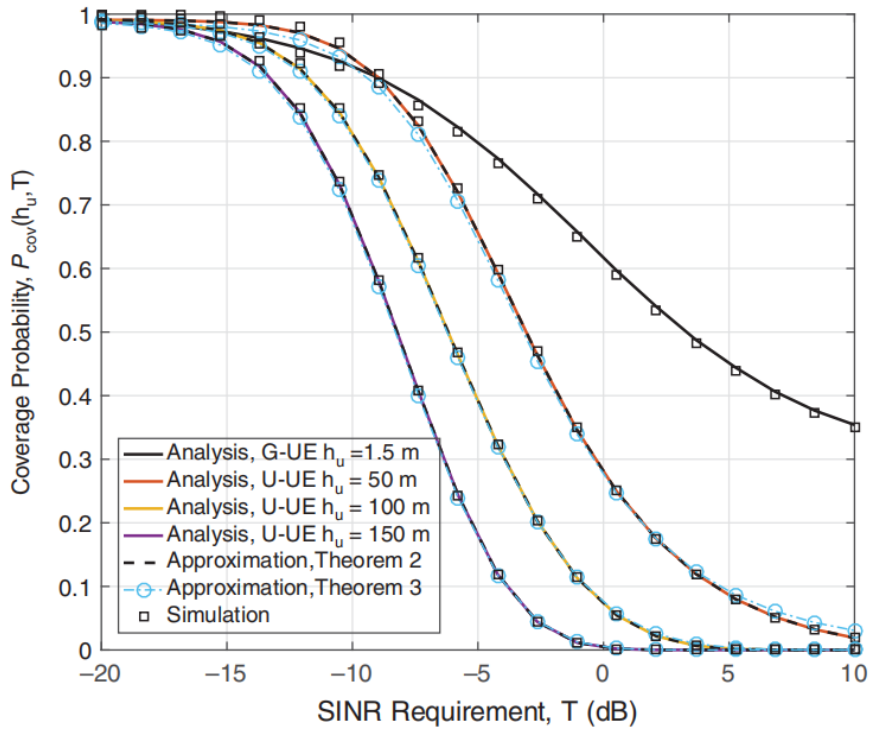
Πίνακας 2.2 Προκαθορισμένες τιμές για προσομείωση και αριθμητική εκτίμηση [113].

Παράμετρος	Τιμή
$(\alpha_L, \alpha_N, m_L, m_N)$	(2.09, 3.75, 3, 1)
(A_L, A_N)	(−41.1, −32.9) dB
P_{tx}	46 dBm
(a, b, c)	(0.3, 500, 15) for urban
λ_b	10BSs/km ²
(g_M, g_m)	(10, 0.5)
(h_u, h_b)	(100, 25) m
BW	200kHz
R_t	100kbps
T	$2^{R_t BW} - 1 = -3.8$ dB

Οι προεπιλεγμένες τιμές των παραμέτρων του συστήματος για αριθμητικές αξιολογήσεις και προσομοιώσεις παρατίθενται στον **Πίνακα 2.2** [113].

2.4.1 Ανάλυση Ακρίβειας

Η **Εικόνα 2.2** [113] αποκαλύπτει την ακρίβεια της ανάλυσης και τις προτεινόμενες προσεγγίσεις. Σε αυτή την εικόνα, η CCDF του SINR εμφανίζεται τόσο για επίγειους όσο και για εναέριους χρήστες εξοπλισμένους με πανκατευθυντικές κεραίες. Οι προσομοιώσεις είναι το αποτέλεσμα 10^5 υλοποιήσεων δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προσεγγίσεις για χρήστες εδάφους δεν ισχύουν, καθώς οι συνδέσεις επικοινωνίας τους δεν είναι LoS κυριαρχούμενες. Με άλλα λόγια, οι σύνδεσμοι επίγειων χρηστών προς τους σταθμούς βάσης είναι λιγότερο πιθανό να βρίσκονται σε LoS συνθήκες και ως εκ τούτου οι σύνδεσμοι NLoS δεν μπορούν να αγνοηθούν στις αξιολογήσεις απόδοσης.



Εικόνα 2.2 Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση και τις αναλυτικές εκφράσεις αντιστοιχίζονται με ακρίβεια. [113].

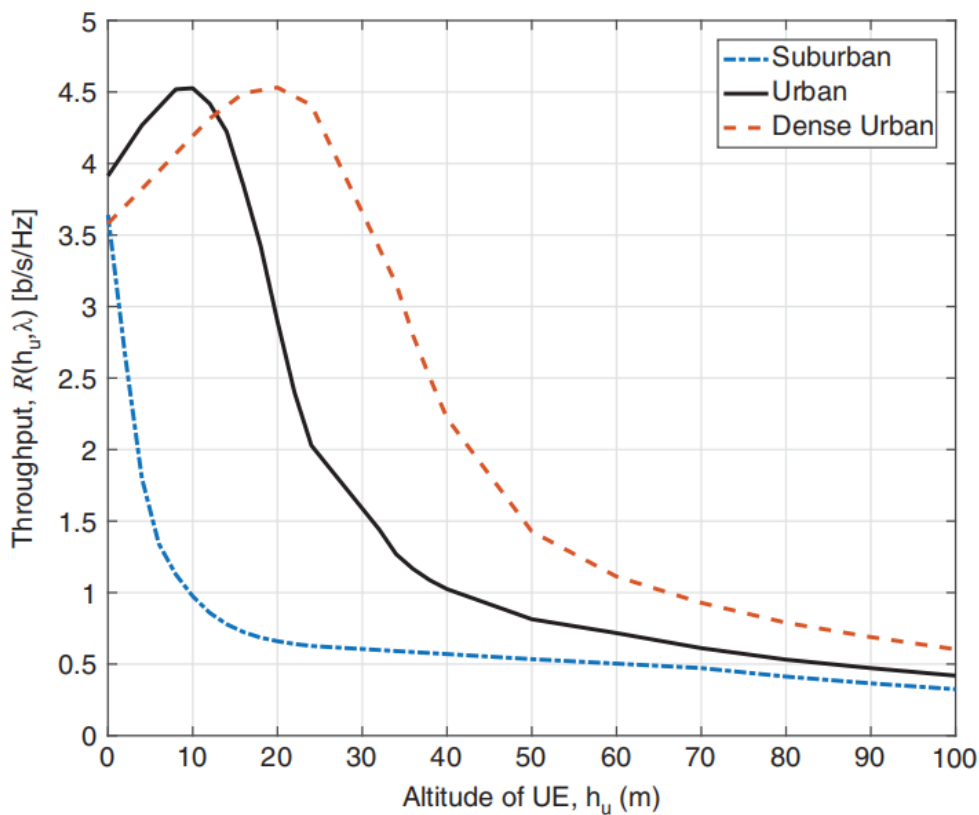
Γενικά, η απόδοση επικοινωνίας των πανκατευθυντικών UAV είναι χαμηλή. Η μείωση της επίδοσης σε αυξανόμενα υψόμετρα είναι μεγαλύτερη όταν το όριο SINR είναι μεγαλύτερο. Όπως φαίνεται, η κατανομή SINR των εναέριων χρηστών είναι πιο συγκεντρωμένη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διασπορές πολλαπλών διαδρομών εμπλέκονται λιγότερο στις συνδέσεις επικοινωνίας LoS των UAV. Ωστόσο, η επίδραση της πολλαπλής διαδρομής για τους επίγειους χρήστες είναι σημαντική και ως εκ τούτου δεν μπορεί να αποφευχθεί.

2.4.2 Παράμετροι σχεδίασης

Αυτή η υποενότητα παρέχει μια εις βάθος ανάλυση των επιπτώσεων των διαφόρων παραμέτρων σχεδιασμού σχετικά με την ποιότητα της σύνδεσης επικοινωνίας UAV με σταθμούς βάσης. Μελετάται πώς κάθε παράμετρος επηρεάζει τις επιδόσεις σε επίπεδο χρήστη, δηλαδή την πιθανότητα κάλυψης και την επιτεύξιμη απόδοση. Στη συνέχεια, αναλύεται ο ρόλος του ύψους του UAV, του πλάτους δέσμης της κεραίας και της γωνίας κλίσης κατά μήκος με το εφέ φόρτωσης του δικτύου. Τέλος, μελετάται πώς επηρεάζει το είδος του περιβάλλοντος στην απόδοση των επίγειων χρηστών και των χρηστών UAV.

2.4.2.1 Επίδραση του υψόμετρου του UAV

Γενικά, υπάρχει ένα βέλτιστο υψόμετρο στο οποίο η απόδοση των UAV είναι η υψηλότερη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.3** [113]. Όταν το υψόμετρο UAV αυξάνεται από το μηδέν, οι συνδέσεις στους σταθμούς βάσης μεταβιβάζονται από την κατάσταση NLoS στην κατάσταση LoS. Αυτό είναι ωφέλιμο μέχρι ένα ορισμένο σημείο, καθώς ο σταθμός βάσης που εξυπηρετεί βρίσκεται σε κατάσταση LoS με τον εξοπλισμό του χρήστη. Ωστόσο, όσο αυξάνεται το υψόμετρο, οι παρεμβαλλόμενες ζεύξεις γίνονται επίσης περισσότερες στο LoS και ως εκ τούτου η απόδοση υποβαθμίζεται. Τέτοια αποτελέσματα δείχνουν ότι η μείωση του κέρδους της κεραίας του σταθμού βάσης αντισταθμίζεται πλήρως από την ευνοϊκότερη συνθήκη διάδοσης LoS για τον ουρανό.



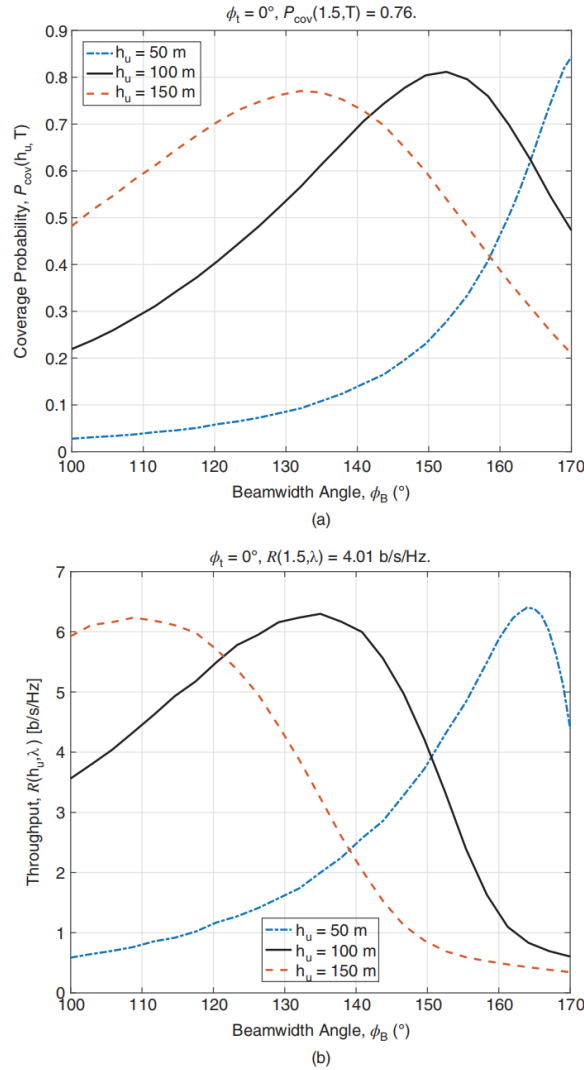
Εικόνα 2.3 Το εφικτό εύρος λειτουργίας UAV όταν είναι εξοπλισμένο με μια πανκατευθυντική κεραία είναι περιορισμένο λόγω της επιζήμιας επίδρασης των παρεμβολών LoS στους σταθμούς βάσης [113].

Η **Εικόνα 2.3** απεικονίζει επίσης δύο σημαντικά αποτελέσματα: Πρώτον, ο εξοπλισμός χρήστη του UAV στο βέλτιστο υψόμετρο εξυπηρετείται καλύτερα σε σύγκριση με έναν εξοπλισμό επίγειου χρήστη, αν και το βέλτιστο υψόμετρο είναι γενικά πολύ χαμηλό. Δεύτερον, το βέλτιστο υψόμετρο είναι υψηλότερο σε πιο πυκνά περιβάλλοντα, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη περισσότερων παρεμβαλλόμενων σταθμών βάσης στην κατάσταση NLoS. Επιπλέον, όπως μπορεί

να φανεί, στις προαστιακές περιοχές το UAV πρέπει να πετάει όσο πιο χαμηλά γίνεται για να μειώσει τις επιζήμιες επιπτώσεις της LoS παρεμβολής.

2.4.2.2 Επίδραση του πλάτους δέσμης της κεραίας του UAV

Η διακύμανση της απόδοσης του UAV με το πλάτος δέσμης κεραίας ϕ_B στην **Εικόνα 2.4** [113] δείχνει ότι μια κατάλληλη τιμή του ϕ_B βελτιώνει σημαντικά την απόδοση ενός UAV, ακόμη υψηλότερα από την απόδοση ενός επίγειου χρήστη. Κατά την αύξηση του ϕ_B , ο υποψήφιος σταθμοί βάσης που εξυπηρετούν αυξάνονται εντός του κύριου λοβού του UAV, κάτι που είναι επιθυμητό για την απόδοση του UAV. Ωστόσο, περαιτέρω αύξηση της τιμής του ϕ_B έχει ως αποτέλεσμα τη συμπερίληψη περισσότερων παρεμβαλλόμενων σταθμών βάσης, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Αυτοί οι δύο αντίθετοι παράγοντες βρίσκονται σε ισορροπία σε ένα βέλτιστο πλάτος δέσμης κεραίας.



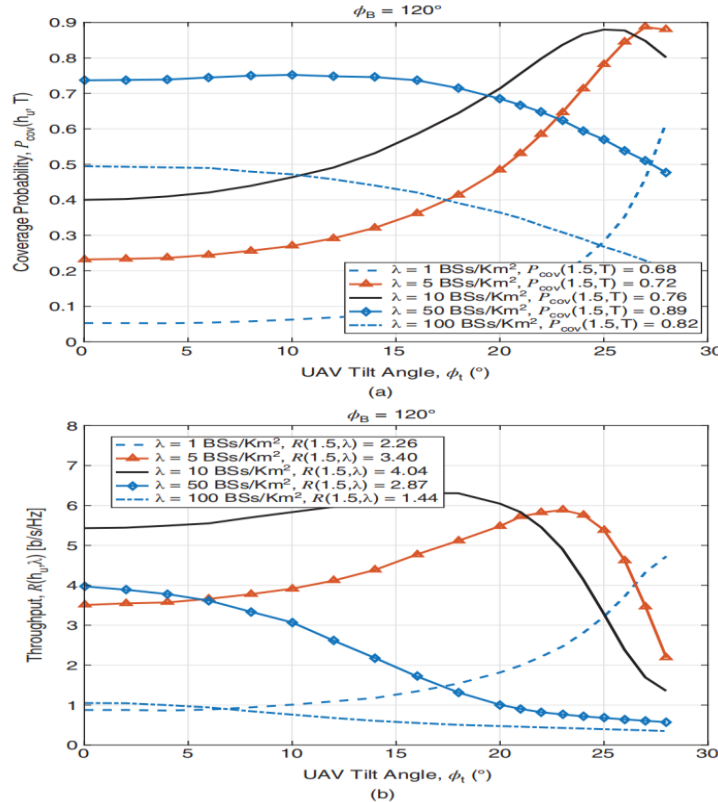
Εικόνα 2.4 Υπάρχει ένα εξαρτώμενο από το υψόμετρο βέλτιστο πλάτος δέσμης κεραίας UAV για μέγιστη απόδοση [113].

Σημειώνεται ότι, η αύξηση της τιμής του ϕ_B μειώνει το κέρδος της κεραίας, όπως αναφέρεται στο μοντέλο του συστήματος. Ωστόσο, η διακύμανση του κέρδους της κεραίας του UAV έχει την ίδια επίδραση στο χρήσιμο σήμα και στην ισχύ της παρεμβολής. Αυτό βασικά σημαίνει ότι, εάν ένα δίκτυο είναι περιορισμένο σε παρεμβολές, όπως συμβαίνει σε αυτή τη περίπτωση, η αλλαγή της τιμής του ϕ_B δεν αλλάζει την κατανομή του SINR και ως εκ τούτου τη πιθανότητα κάλυψης.

Επιπλέον, σημειώνεται ότι η βέλτιστη τιμή του ϕ_B είναι διαφορετική για την πιθανότητα κάλυψης και την επίτευξη ικανής απόδοσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η απόδοση είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος για όλες τις πραγματοποιήσεις της κατανομής SINR. Ωστόσο, η πιθανότητα κάλυψης αφορά μόνο ένα συγκεκριμένο κατώφλι SINR. Επομένως, ένας επαρκής σχεδιασμός θα πρέπει να λάβει υπόψη τόσο διαφορετικούς βέλτιστους παράγοντες συστήματος, στοχεύοντας σε μια κατάλληλη κάλυψη και αντιστάθμιση απόδοσης.

2.4.2.3 Επίδραση της κλίσης της κεραίας του UAV

Η Εικόνα 2.5 [113] αποκαλύπτει την επίδραση της κλίσης της κεραίας του UAV. Αυξάνοντας τη γωνία κλίσης ϕ_i , αυξάνεται ο αριθμός των σταθμών βάσης εντός του κύριου λοβού και οι σταθμοί βάσης διέρχονται από LoS σε συνθήκες NLoS. Καθεμιά από αυτές τις δύο περιπτώσεις μπορεί να επιφέρει επιθυμητά ή μη επιθυμητά αποτελέσματα.



Εικόνα 2.5 Σημαντική βελτίωση της απόδοσης παρατηρείται με την αξιοποίηση της κλίσης της κεραίας UAV για δίκτυα αραιάς έως μεσαίας πυκνότητας. [113].

Η πρώτη περίπτωση μπορεί να είναι επωφελής καθώς ο αριθμός των υποψηφίων σταθμών βάσης αυξάνεται και μπορεί να είναι επιζήμια καθώς αυξάνεται και ο αριθμός των παρεμβαλλόμενων σταθμών βάσης. Η δεύτερη περίπτωση μπορεί να είναι εποικοδομητική, καθώς οι παρεμβαλλόμενοι σταθμοί βάσης οδεύουν σε κατάσταση NLoS. Ωστόσο, μπορεί να οδηγήσει σε μη επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς οι υποψήφιοι σταθμοί βάσης πηγαίνουν στην κατάσταση NLoS. Όλα αυτά τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι, σε μια ορισμένη βέλτιστη γωνία, αυτά τα εφέ είναι ισορροπημένα και η απόδοση του UAV μεγιστοποιείται. Η βέλτιστη κλίση της γωνίας είναι μη μηδενική για μη πυκνά δίκτυα. Ωστόσο, η προσέγγιση της κλίσης δεν είναι χρήσιμη για πολύ πυκνά δίκτυα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κλίση της κεραίας μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα εσφαλμένης ανίχνευσης σταθμών βάσης, δηλαδή λήψη σήματος πολύ χαμηλής αναφοράς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αποστάσεις των σταθμών βάσης γίνονται μεγαλύτερες και είναι πιο πιθανό να βρίσκονται σε κατάσταση NLoS. Σημειώνεται όμως ότι η πιθανότητα κάλυψης λαμβάνει υπόψη τόσο τον εσφαλμένο εντοπισμό όσο και τα ζητήματα διακοπών που προκαλούνται από παρεμβολές. Επιπλέον, όταν οι γωνίες κλίσης και του πλάτους δέσμης είναι μικρές, μπορεί να μην υπάρχει σταθμός βάσης στον κύριο λοβό του UAV. Αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί σε μηδενική κάλυψη στο συγκεκριμένο πλαίσιο.

2.4.2.4 Επιπτώσεις διαφορετικών τύπων περιβάλλοντος

Ο Πίνακας 2.3 [113] αποκαλύπτει ότι η επίδραση του υψομέτρου του εξοπλισμού χρήστη στην απόδοση κάλυψης είναι χειρότερη από ότι σε περιβάλλοντα με λιγότερα εμπόδια. Για παράδειγμα, σε μια προαστιακή περιοχή, η κάλυψη της σύνδεσης κυμαίνεται από 90% στο έδαφος σε 4% στα 150 μέτρα, που είναι πιο σοβαρή από την αντίστοιχη πτώση από 76% σε 10% στο αστικό περιβάλλον. Επιπλέον, ένας επίγειος εξοπλισμός χρήστη έχει την υψηλότερη απόδοση κάλυψης σε προαστιακές περιοχές, ενώ ένας εξοπλισμός χρήστη UAV εξυπηρετείται καλύτερα σε αστικά περιβάλλοντα. Αντίστοιχα, οι στρατηγικές ανάπτυξης του δικτύου για επίγειους και εναέριους πρέπει να είναι διαφορετικές.

Καθώς η σύνδεση UAV είναι περιορισμένη σε παρεμβολές, η εφικτή ρυθμαπόδοση R αυξάνεται γραμμικά με το εκχωρημένο εύρος ζώνης. Αντίθετα, η πιθανότητα κάλυψης της ζεύξης επηρεάζεται από το εκχωρημένο εύρος ζώνης με μη τετριμμένο τρόπο. Ο Πίνακας 2.3 [113] απεικονίζει αυτή την εξάρτηση μέσω τεσσάρων δειγμάτων υψομέτρων σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα, εστιάζοντας σε ένα σταθερό ρυθμό στόχου $R_t = 100$ kbps για εντολή και έλεγχο UAV [79]. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα UAV με μονοκατευθυντικές κεραίες αντέχουν σημαντικά χαμηλότερη κάλυψη ζεύξης από έναν χρήστη εδάφους ιδιαίτερα σε περιοχές με λιγότερα εμπόδια. Ο διπλασιασμός του εύρους ζώνης για ένα δεδομένο ρυθμό στόχου μειώνει το κατώφλι του SINR και ως εκ τούτου βελτιώνεται η πιθανότητα κάλυψης σχεδόν τέσσερις φορές για ένα UAV στα 150 μέτρα σε αστικό περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, ο ίδιος διπλασιασμός του εύρους ζώνης επιτρέπει μια ανάπτυξη μόνο 8% για τον εξοπλισμό του χρήστη σε επίπεδο εδάφους. Επομένως, τα αποτελέσματά υποδηλώνουν ότι η αύξηση του εύρους ζώνης είναι πιο αποτελεσματική για εναέριους χρήστες παρά για επίγειους χρήστες.

Πίνακας 2.3 Κάλυψη σύνδεσης ενός UAV συνδεδεμένου με κυψελωτό δίκτυο με μια πανκατευθυντική κεραία σε δύο τύπους αστικών περιοχών. Ένας ρυθμός $R_t = 100$ kbps θεωρείται για την αξιολόγηση κάλυψης [113].

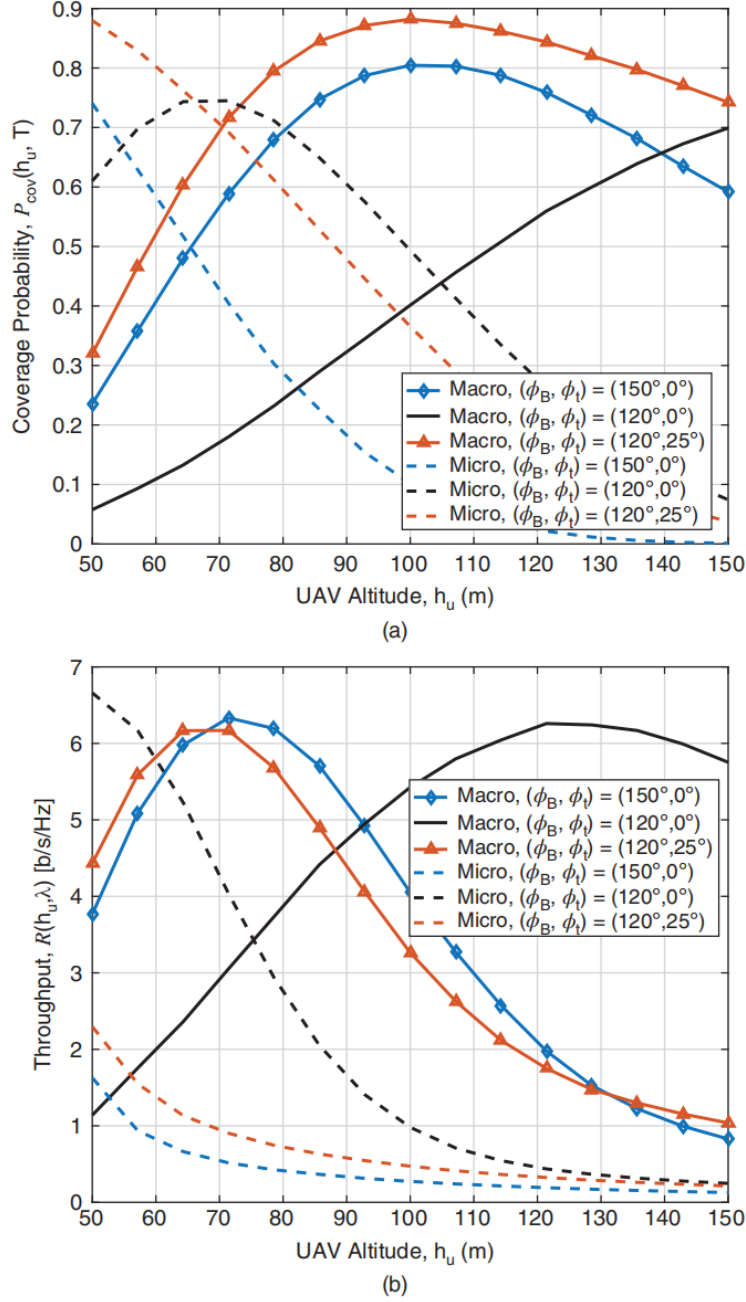
Υψόμετρο UAV Ευρος Ζώνης		Κάλυψη (%)	
h_u (m)	(kHz)	Μικροαστική Περιοχή	Αστική Περιοχή
1.5	200	90	76
50	200	34	54
100	200	20	30
150	200	4	10
1.5	400	97	85
50	400	60	82
100	400	48	60
150	400	28	39

2.4.3 Ετερογενή Δίκτυα – Επιλογή Επιπέδων

Η χρήση διαφορετικών επιπέδων στην κυψελοειδή αρχιτεκτονική είναι μια κοινή προσέγγιση για την αντιμετώπιση πολλών σημαντικών προβλημάτων. Ένα ομοιογενές δίκτυο μακροκυψελών ενδέχεται να μην είναι σε θέση να παρέχει σωστή ποιότητα υπηρεσιών σε hotspots ή στην περίπτωση που οι χρήστες υποφέρουν από σημαντικές σκιάσεις λόγω εμποδίων. Επιπλέον, η σημαντική αύξηση της ζήτησης δεδομένων είναι ένας άλλος λόγος για να εξεταστεί ένα ετερογενές πολυεπίπεδο κυψελωτό δίκτυο. Για να γίνει αυτό, χρειάζεται να αναπτυχθούν λιγότερο ακριβοί μικρο (micro BS) - σταθμοί βάσης για την αντιμετώπιση τέτοιων ζητημάτων.

Σε σύγκριση με τους macro σταθμούς βάσης, οι micro σταθμοί βάσης συνήθως έχουν χαμηλότερο ύψος, μικρότερο μέγεθος κυψέλης, χαμηλότερη ισχύ μετάδοσης και μεγαλύτερη πυκνότητα. Επιπλέον, η συχνότητα λειτουργίας διαφορετικών επιπέδων μπορεί να είναι ορθογώνια, όπως προτείνεται από το πρότυπο “ Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN - Physical layer aspects ” του 3GPP [80].

Είναι δύσκολο να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ποιο επίπεδο είναι καλύτερο στο να εξυπηρετεί τους εναέριους χρήστες. Η υψηλότερη πυκνότητα μικροκυψελών μπορεί να επιβάλλει υψηλότερες παρεμβολές. Ωστόσο, μειώνοντας το ύψος των σταθμών βάσης, αυξάνεται η σκίαση και περιορίζεται η διάδοση των παρεμβολών.



Εικόνα 2.6 Πάνω από ένα συγκεκριμένο υψόμετρο, το UAV εξυπηρετείται καλύτερα από μακροκυψέλες [113].

Επομένως, μια έρευνα τέτοιων προβλημάτων απαιτείται, η οποία παρέχεται στην **Εικόνα 2.6** [113]. Στα δύο πάνελ του σχήματος, χρησιμοποιούνται οι τιμές παραμέτρων που καθορίζονται στις συστάσεις του 3GPP [81].

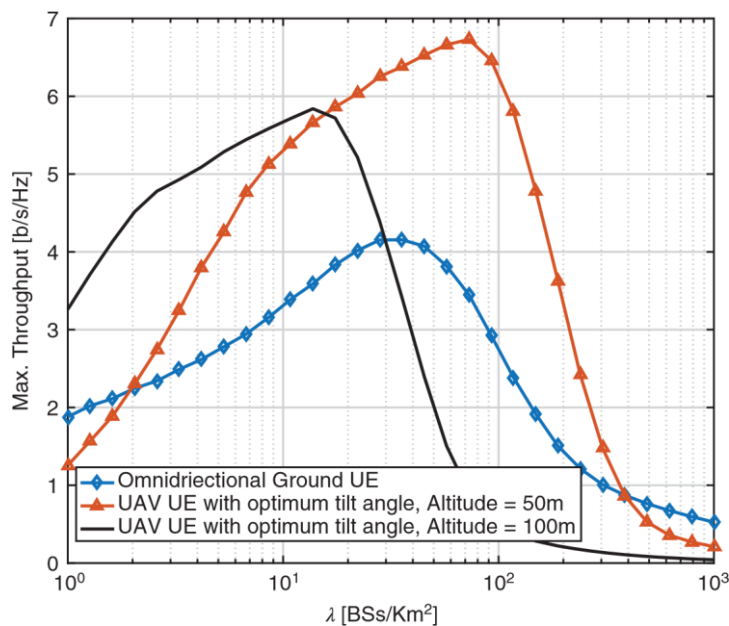
Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν ύψη σταθμών βάσης, πυκνότητες και ισχύς μετάδοσης.

Η **Εικόνα 2.6** [113] δείχνει γενικά ότι, οι εναέριοι χρήστες εξυπηρετούνται καλύτερα από μικροκυψέλες σε χαμηλά υψόμετρα. Ωστόσο, πάνω από ένα συγκεκριμένο υψόμετρο, οι μακροκυψέλες είναι η καλύτερη επιλογή για σύνδεση UAV. Σημειώνεται ότι το σημείο

μεταγωγής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλάτος δέσμης της κεραίας των UAV και την γωνία κλίσης. Στην πραγματικότητα, το μεγαλύτερο ϕ_B έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο υψόμετρο μεταγωγής.

2.4.4 Πύκνωση δικτύου

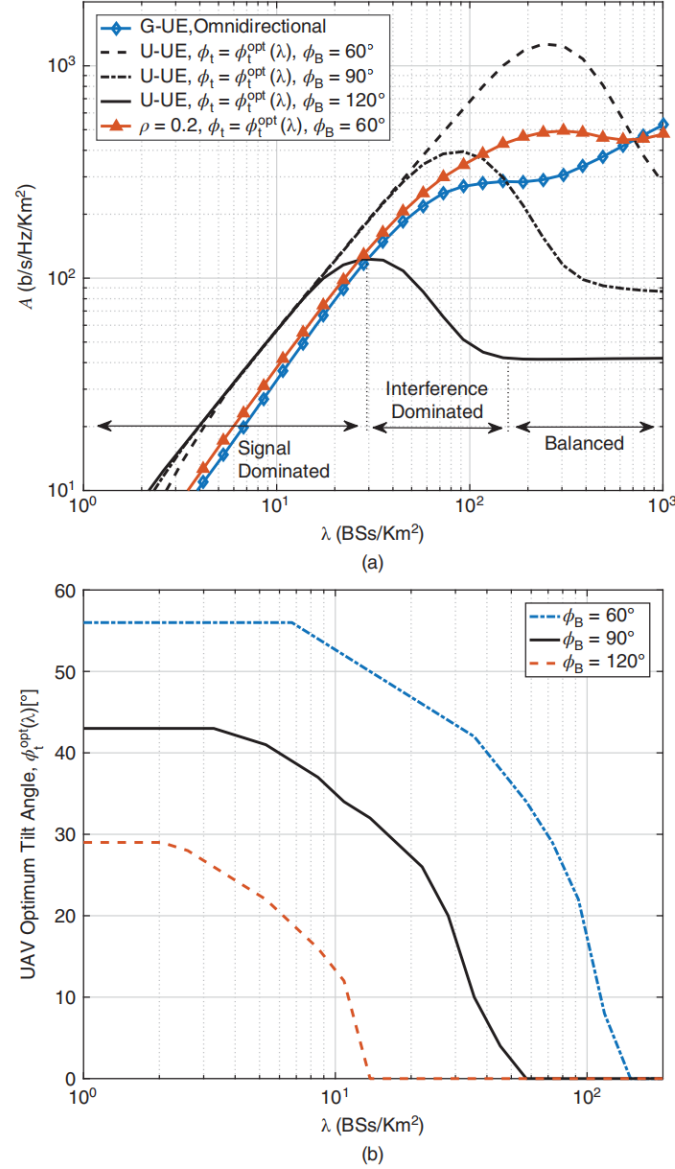
Προκειμένου να ενισχυθεί η χωρητικότητα του δικτύου, η πυκνότητα δικτύου είναι μια άλλη πολλά υποσχόμενη λύση. Με αυτόν τον τρόπο, ο αριθμός των κελιών αυξάνεται για να φέρει τους σταθμούς βάσης πιο κοντά στους χρήστες. Ωστόσο, λόγω της επιβλαβούς επίδρασης των παρεμβαλλόμενων σταθμών βάσης, αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη μόνο μέχρι μια ορισμένη πυκνότητα, που θα πρέπει να καθοριστεί. Η βέλτιστη πυκνότητα δικτύου και τα οφέλη της πυκνότητας ενδέχεται να επηρεαστούν σημαντικά από τη συμπερίληψη εναέριων χρηστών. Για αυτό, στα ακόλουθα, εξετάζεται η πυκνωση με την παρουσία των εναέριων εξοπλισμών χρήστη. Πρώτα εστιάζεται η απόδοση σε επίπεδο χρήστη μέσω της **Εικόνας 2.7** [113] και στη συνέχεια διερευνάται η απόδοση σε επίπεδο δικτύου στην **Εικόνα 2.8α** [113].



Εικόνα 2.7 Από την άποψη του UAV, η απόδοση του δικτύου συγκλίνει στο μηδέν καθώς γίνεται πυκνή, παρόλο που υιοθετείται η βέλτιστη γωνία κλίσης. [113].

Η **Εικόνα 2.7** [113] δείχνει την επιτεύξιμη απόδοση από το χρήστη σε σχέση με την πυκνότητα του σταθμού βάσης. Η απόδοση του UAV σε οποιαδήποτε δεδομένο λ_b επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη γωνία κλίσης $\phi^{opt}(\lambda)$. Πράγματι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχει μια βέλτιστη γωνία κλίσης στην οποία η απόδοση του UAV μεγιστοποιείται. Όπως φαίνεται από την εικόνα, οι εναέριοι χρήστες είναι σε θέση να λαμβάνουν σημαντικά υψηλότερο ποσοστό, χάρη στην ευελιξία τους στην επιλογή των παραμέτρων της κεραίας τους. Επιπλέον, σε

μια ορισμένη πυκνότητα, η απόδοση των χρηστών είναι η υψηλότερη, υποδηλώνοντας την ύπαρξη βέλτιστης πυκνότητας δικτύου. Επίσης, όταν το δίκτυο είναι πυκνό, μειώνοντας σημαντικά το υψόμετρο των UAV βελτιώνεται η απόδοση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μείωση του υψομέτρου UAV μπλοκάρει τους παρεμβαλλόμενους σταθμούς βάσης.



Εικόνα 2.8 Η προσθήκη εναέριων χρηστών μπορεί να βελτιώσει τη φασματική απόδοση της περιοχής μέχρι μια συγκεκριμένη πυκνότητα των σταθμών βάσης. [113].

Η ιδιότητα κλιμάκωσης σε σχέση με το λ_b μελετάται, όταν το δίκτυο αποτελείται μόνο από επίγειους χρήστες, ή μόνο από χρήστες UAV, ή όταν υπάρχουν μαζί εναέριοι και επίγειοι εξοπλισμοί χρηστών ταυτόχρονα. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.8a** [113], όταν το δίκτυο περιλαμβάνει μόνο εναέριους εξοπλισμούς χρήστη, τρία καθεστώτα κλιμάκωσης μπορούν να πραγματοποιηθούν. Το πρώτο είναι όπου η αυξημένη ισχύς του σήματος κυριαρχεί στις υψηλότερες παρεμβολές και ονομάζεται καθεστώς κυριαρχίας σήματος. Σε αυτήν την περιοχή, η

συνολική φασματική απόδοση της περιοχής αυξάνεται συμπεριλαμβάνοντας τους εναέριους χρήστες με τα κατάλληλα ϕ_i . Με άλλα λόγια, η κοινή χρήση πόρων με UAV είναι επωφελής καθώς αυξάνεται η χωρητικότητα του δικτύου. Το δεύτερο καθεστώς είναι όπου κυριαρχούν οι υψηλότερες παρεμβολές και επομένως η συνολική απόδοση υποβαθμίζεται. Αυτή η περιοχή ονομάζεται καθεστώς κυριαρχούμενων παρεμβολών.

Τέλος, το ισορροπημένο καθεστώς είναι όπου η φασματική απόδοση της περιοχής είναι σταθερή. Σε αυτή την περιοχή, η εφικτή απόδοση του UAV εξοπλισμού χρήστη είναι αντιστρόφως ανάλογη με το λ_i . Όπως φαίνεται, όταν το δίκτυο είναι πολύ πυκνό, η προσθήκη περισσότερων χρηστών UAV είναι επιζήμια από την άποψη του δικτύου. Τέλος, η **Εικόνα 2.8b** [113] δείχνει ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης είναι χαμηλότερη για μεγαλύτερη πυκνότητα, η οποία είναι επίσης σημαντικά εξαρτώμενη από το πλάτος δέσμης της κεραίας UAV.

3

Βελτίωση των επιδόσεων σε LTE-συνδεδεμένα UAV

3.1 Εισαγωγή

Ο συνολικός αριθμός των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), γνωστών και ως drones, αναμένεται να φτάσει τα 86,5 εκατομμύρια έως το 2025 [82]. Επί του παρόντος, οι κανονισμοί στις περισσότερες χώρες επιτρέπουν μόνο τη λειτουργία των drones με οπτική επαφή (**VLoS** – Visual-Line-of-Sight) μεταξύ πιλότου και drone, αλλά αναμένεται ότι οι λειτουργίες πέρα από την οπτική οπτική επαφή (**BVLoS** – Beyond-Visual-Line-of-Sight) θα είναι επιτρεπόμενες, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει αξιόπιστη εντολή και έλεγχος σύνδεσης με το drone. Αυτή η σύνδεση είναι σημαντική για τη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας των drones.

Στην κατερχόμενη ζεύξη, δηλαδή από ένα drone σε έναν σταθμό βάσης, η σύνδεση ελέγχου χρησιμοποιείται για την ενημέρωση του διαχείριση κυκλοφορίας συστήματος μη επανδρωμένων αεροσκαφών ή μονάδας ελέγχου πτήσης με μηνύματα κατάστασης, συμπεριλαμβανομένης της θέσης του drone και των πληροφοριών του από αισθητήρες, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν την πτήση και να λάβουν τις κατάλληλες αποφάσεις.

Η ανερχόμενη ζεύξη (προς το drone), επιτρέπει στη λειτουργία ελέγχου πτήσης να αλλάξει το σχέδιο πτήσης των drones για να αποφευχθούν πιθανές συγκρούσεις, για να ρυθμιστεί μια σειρά λειτουργιών επί του drone. Ένα παράδειγμα χρήσης κατερχόμενης ζεύξης της σύνδεσης (**C&C** / **C2** - Command and Control) είναι όταν, στη διαδρομή ενός drone, ξαφνικά ένα ελικόπτερο ή άλλο drone πρέπει να προσγειωθεί σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Σε αυτήν την περίπτωση, η σύνδεση κατερχόμενης ζεύξης C2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ειδοποιήσει το drone για μια νέα ad-hoc ζώνη απαγόρευσης πτήσεων και να ανακατευθύνει το drone παρέχοντας νέες κατευθύνσεις.

Ένα ελκυστικό μέσο για την παροχή αυτής της σύνδεσης C2 είναι η χρήση υφιστάμενων κυψελοειδών δικτύων, ιδίως των υφιστάμενων συστημάτων LTE (μακροπρόθεσμη εξέλιξη) και των μελλοντικών συστημάτων 5G (πέμπτης γενιάς), καθώς υπάρχουν οι υποδομές και επομένως το κόστος υλοποίησης δύναται να ελαχιστοποιηθεί. Ωστόσο, τέτοια δίκτυα δεν έχουν σχεδιαστεί για εναέρια κάλυψη, καθώς είναι σχεδιασμένα για την εξυπηρέτηση επίγειων χρηστών, χρησιμοποιώντας τυπικά κεραίες με κλίση προς το έδαφος, στους σταθμούς βάσης. Τα υπάρχοντα δίκτυα LTE και τα μελλοντικά δίκτυα 5G μπορούν να εξασφαλίσουν αξιόπιστη επικοινωνία C2 με drones και να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην παροχή αξιοπιστίας από άκρο σε άκρο (E2E – End-to-End) για επικοινωνίες με drone, παρόμοια με άλλες περιπτώσεις χρήσης που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία. Με αυτόν τον τρόπο, τα κυψελωτά δίκτυα μπορούν να ενεργοποιήσουν πτήσεις με drone BVLoS.

Πίνακας 3.1 Τεχνική σύγκριση των δυνατοτήτων συγκέντρωσης [113].

	Διεκπεραιωτικότητα Κατερχόμενης Ζεύξης	Διεκπεραιωτικότητα Ανερχόμενης Ζεύξης	Καθυστέρηση αξιοπιστίας
Σύνδεση C2	100kbps	100kbps	99.9% 50ms
Εφαρμογή	$\leq 1\text{Mbps}$	Μέχρι 20Mbps	Παρόμοια με το mobile Broadband

Διάφορες κανονιστικές επιτροπές προσπαθούν να καθορίσουν τους κανόνες με τους οποίους πρέπει να συμμορφώνονται οι λειτουργίες των drone, για να εξασφαλίσουν μια ισχυρή και καλά οργανωμένη μετάβαση προς την “εποχή των εναέριων οχημάτων”. Μεταξύ αυτών των οργανισμών που προσπαθούν να αντιμετωπίσουν περιπτώσεις χρήσης drone, μπορεί κανείς να βρει επίσης το 3GPP, υπεύθυνο για την τυποποίηση παγκόσμιων τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας, όπως το (UMTS - Universal Mobile Telecommunications Service) και το LTE. Σε αυτό το κεφάλαιο, χρησιμοποιούνται οι απαιτήσεις αξιοπιστίας που ορίζονται από το 3GPP στις μελέτες του για εναέρια συνδεσιμότητα, κάτι που σημαίνει 99,9% αξιοπιστία εντός προϋπολογισμού καθυστέρησης μονής κατεύθυνσης 50 ms. Ταυτόχρονα, η απαιτούμενη απόδοση είναι μάλλον χαμηλή, καθώς βάση προτύπου 3GPP απαιτούνται 100 kbps (kilobits ανά δευτερόλεπτο) [83]. Πάνω από τη σύνδεση C2, ενδέχεται να υπάρχουν άλλες εφαρμογές που εκτελούνται στο drone που απαιτούν ραδιοεπικοινωνία. Αυτές οι εφαρμογές μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις, που διαφέρουν από περίπτωση σε περίπτωση, π.χ. ένα drone αυτόνομης μεταφοράς δεν θα ανταλλάσσει πολλές επιπλέον πληροφορίες, με εξαίρεση κατά την διάρκεια της παράδοσης ενός πακέτου. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν συνήθως μεγαλύτερο φορτίο ανοδικής ζεύξης από την κατερχόμενη ζεύξη. Ο σύνδεσμος ελέγχου C2 είναι πιο συμμετρικός. Τα βασικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας drone, που εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1 [113].

3.2 Μετρήσεις δικτύων LTE

Σε σενάρια UAV, ειδικά για την απόδοση σύνδεσης C2 σε κυψελωτά δίκτυα, είναι εξαιρετικά πολύτιμο να καθοριστεί πώς ο κυψελωτός ραδιοδιαποδιαμορφωτής στο UAV θα αντιλαμβάνονταν το ραδιοφωνικό κανάλι στα υπάρχοντα κυψελωτά δίκτυα. Με αυτόν τον στόχο, έχουν διεξαχθεί μετρήσεις από ερευνητικές ομάδες για τον χαρακτηρισμό της μεγάλης και μεσαίας κλίμακας διάδοσης, καθώς και παρεμβολών, που θα αντιμετωπίσει ένα UAV εάν πραγματοποιείται επικοινωνία μέσω των τυπικών αναπτύξεων κυψελοειδούς δικτύου LTE/LTE-A. Ο χαρακτηρισμός έχει γίνει για ύψη λειτουργίας έως και 120 m πάνω από το μέσο επίπεδο του εδάφους, δηλαδή εντός εναέριων χώρων πολύ χαμηλού επιπέδου. Τόσο τα αγροτικά όσο και τα αστικά περιβάλλοντα έχουν χαρακτηριστεί σε έναν αριθμό πειραμάτων κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης, σε κάθε περίπτωση εφαρμόζοντας μια συγκεκριμένη μέθοδο μέτρησης για τον χαρακτηρισμό ενός ή περισσότερων επιθυμητών χαρακτηριστικών. Για την κατερχόμενη ζεύξη, η απώλεια διαδρομής μεγάλης κλίμακας, η σκίαση και η παρεμβολή είναι το κύριο ενδιαφέρον, ενώ για τα πειράματα ανερχόμενης ζεύξης, ήταν κυρίως οι παρεμβολές.

Οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί σε δύο αστικά και δύο αγροτικά περιβάλλοντα. Τα αστικά περιβάλλοντα είναι περιβάλλοντα πόλεων μικρού μεγέθους, με πυκνότητα πληθυσμού που κυμαίνεται από περίπου 1000 έως 2900 κατοίκους ανά km² (μέγεθος πληθυσμού από 110.000 έως 260.000 άτομα, που καλύπτουν τη μεγαλύτερη περιοχή της πόλης). Οι περιοχές μέτρησης χαρακτηρίζονται από ακανόνιστα πλέγματα δρόμων και από συνδυασμό νέων και παλαιών κτιρίων. Το ύψος του κτιρίου ποικίλλει στην περιοχή μέτρησης, από 4 m σε κατοικημένες περιοχές στα περίχωρα, έως 15-20 m στο κέντρο της πόλης. Στα πιο πυκνά μέρη, το μέσο ύψος κτιρίου κυμαίνεται από 20–25 m.

Πίνακας 3.2 Σύνοψη της διαμόρφωσης δικτύου για αστική περιοχή. Το ύψος της κεραίας είναι πάνω από το επίπεδο του εδάφους [113].

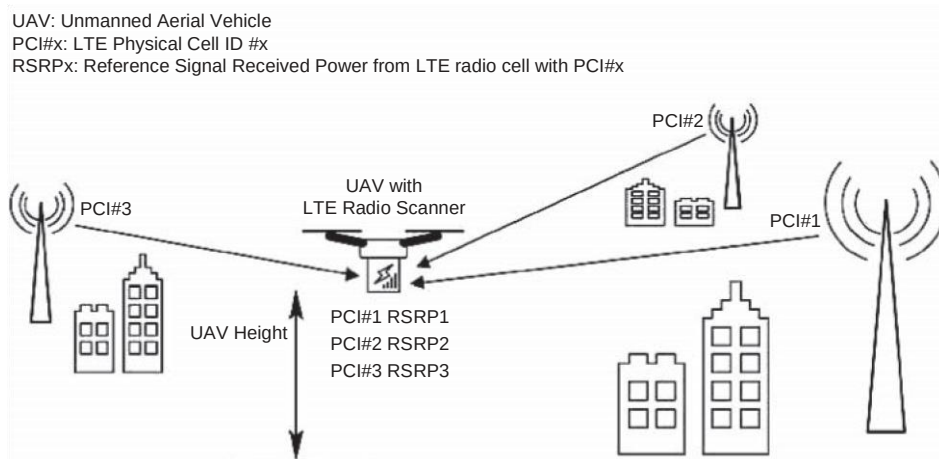
Συχνότητα (MHz)	ISD (m)	Μέσο Ύψος Κεραίας (m)	Μέση κλίση (degrees)
800	850	26	5.5
1800	580	30	5.5
2600	690	25	5.8

Οι περισσότερες από τις τοποθεσίες έχουν διαμορφώσεις τριών τομέων και τυπικό διαχωρισμό γωνιακών τομέων 120 μοιρών. Η φέρουσα συχνότητα παίζει σημαντικό ρόλο στον χαρακτηρισμό της απώλειας διαδρομής και επομένως έχουν μετρηθεί διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Ωστόσο, η κύρια εστίασή ήταν στις ζώνες των 800 MHz και των 1800 MHz. Μια περίληψη της μέσης απόστασης μεταξύ των τοποθεσιών (ISD - Inter-Site Distance), του ύψους της κεραίας και της γωνίας κλίσης προς τα κάτω δίνονται στον Πίνακα 3.2 [113]. Το τυπικό πλάτος δέσμης μισής ισχύος της κεραίας τομέα είναι 65 μοίρες για το επίπεδο H και 7 μοίρες για το επίπεδο E, με μέγιστο κέρδος κεραίας 18 dBi.

Τα δύο αγροτικά περιβάλλοντα διέφεραν κυρίως ως προς την τοπογραφία της γης, και ως εκ τούτου και ως προς την ISD. Το ένα είναι κυρίως επίπεδο με ISD δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5000 m, ενώ το άλλο έχει διακυμάνσεις εδάφους μεταξύ 40 και 120 m και περίπου το ήμισυ του ISD. Αντίστοιχα, τα ύψη της κεραίας και οι κατωφέρειες ήταν επίσης υψηλότερα, κυμαινόμενα από 19 έως 54 m και από 0 έως 9 μίρες, αντίστοιχα, στα δύο περιβάλλοντα, αλλά με την ίδια τυπική διαμόρφωση τριών τομέων και τύπους κεραιών όπως στα αστικά περιβάλλοντα. Για αγροτικά περιβάλλοντα, μόνο η ζώνη των 800 MHz χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.

3.2.1 Πειράματα κατερχόμενης ζεύξης

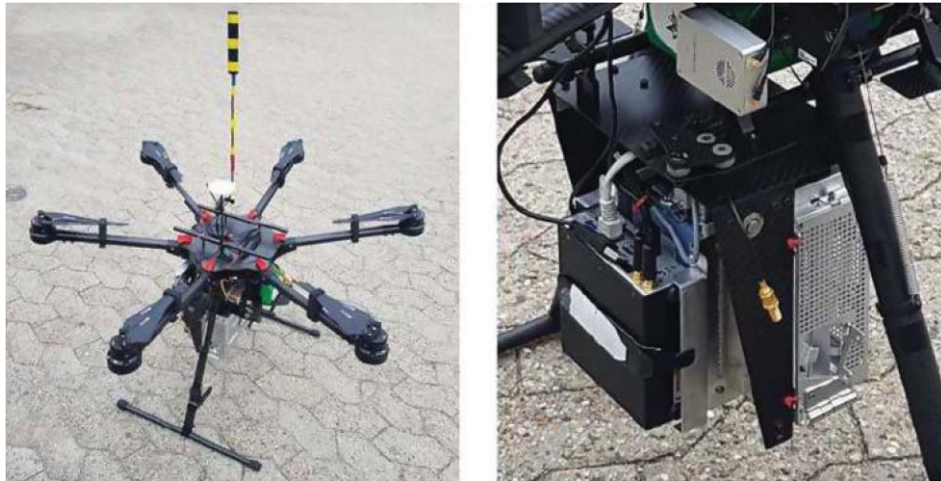
Εφαρμόστηκαν διαφορετικές ρυθμίσεις μετρήσεων για την προσαρμογή των τοπικών κανονισμών και την πρακτική εκτέλεση των μετρήσεων. Επομένως, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με drone και σε άλλες περιπτώσεις με εξοπλισμό μέτρησης τοποθετημένο σε κινητό ανυψωτικό γερανό. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε drone, οι μετρήσεις σε ορισμένες περιπτώσεις συλλέχθηκαν κατά την πτήση πάνω από τμήματα του δρόμου και στις υπόλοιπες, αιωρούμενες σε σταθερή θέση. Όλες οι περιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένης αυτής με σταθερή θέση, πέτυχαν χωρικό μέσο όρο συλλέγοντας δείγματα ενώ μετακινούσαν την κεραία μέτρησης σε υπεργραμμικές ή κυκλικές διαδρομές.



Εικόνα 3.1 Πειραματική μεθοδολογία μέτρησης για έρευνες ραδιοφωνικών καναλιών σε δίκτυα LTE [113].

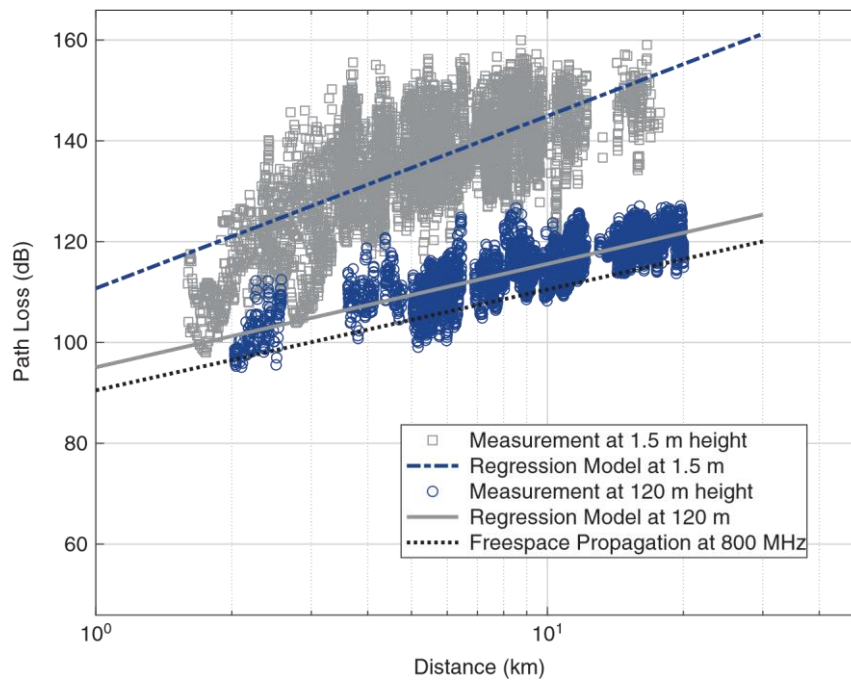
Η βασική πειραματική μεθοδολογία [84] [85] [86] [87] ακολούθησε τη ρύθμιση που απεικονίζεται στην **Εικόνα 3.1** [113]. Για τον χαρακτηρισμό της απώλειας διαδρομής και του περιβάλλοντος της κυψέλης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τον σαρωτή δικτύου κινητής τηλεφωνίας R&S TSME©. Ο σαρωτής ανιχνεύει ενεργά φορείς LTE σε ένα διαμορφώσιμο σύνολο ζωνών συχνοτήτων, που υπόκεινται σε έναν μέγιστο αριθμό ανιχνευόμενων κυψελών και σε ένα ελάχιστο δυνατό επίπεδο ανίχνευσης για σήματα αναφοράς αποδιαμόρφωσης και συγχρονισμού. Η ενεργή ανίχνευση σημαίνει ότι οι μετρήσεις είναι διαθέσιμες μόνο υπό την προϋπόθεση ενεργής αποκωδικοποίησης της αναγνώρισης της κυψέλης. Σε όλες τις μετρήσεις, ο σαρωτής έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να επιτρέπει την ανίχνευση του μέγιστου δυνατού αριθμού κυψελών (32) με ρυθμό μεταξύ 5 και 9 Hz. Η απόδοση ανίχνευσης για την αναγνώριση κυψέλης εξαρτάται από

το απόλυτο επίπεδο σήματος των σημάτων αναφοράς, καθώς και από την ποιότητα του σήματος. Ο πρωταρχικός περιορισμός έγκειται στην ποιότητα του σήματος, στο SINR του καναλιού συγχρονισμού, λόγω της παρεμβολής που αντιμετωπίζει στο κεντρικό 1,08 MHz του φορέα LTE στα εξεταζόμενα περιβάλλοντα μέτρησης. Επομένως, η ανίχνευση εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διαμόρφωση δικτύου και τις συνθήκες διάδοσης σε μια συγκεκριμένη θέση μέτρησης, για να επιτευχθεί SINR συγχρονισμού τουλάχιστον -20 dB.



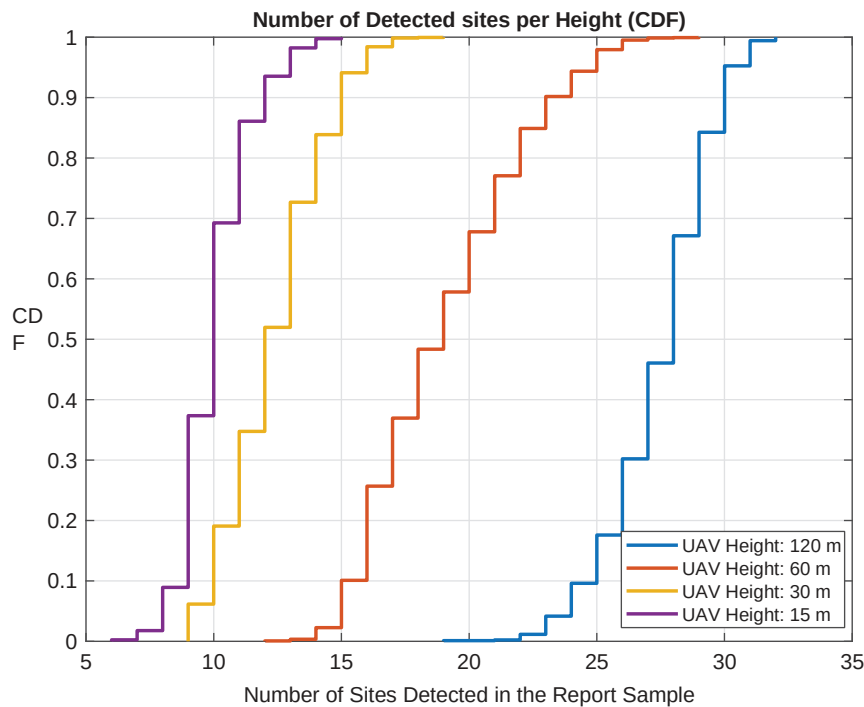
Εικόνα 3.2(αριστερά) Πανκατευθυντική κεραία τοποθετημένη πάνω από την άτρακτο του εξακοπτέρου. (δεξιά) Εξοπλισμός μέτρησης τοποθετημένος σε ένα προσαρμοσμένο πλαίσιο από ανθρακονήματα κάτω από το drone (ο σαρωτής βρίσκεται κάτω από τον υπολογιστή μικρού μεγέθους) [113].

Ο TSME συνδέθηκε με μια (κυτταρική) πολυζωνική πολυκατευθυντική κεραία. Η κεραία φαίνεται τοποθετημένη στην κορυφή του drone στην **Εικόνα 3.2** [113], περίπου 50 cm πάνω από την άτρακτο του drone και το επίπεδο του ρότορα. Η κεραία υποστηρίζει όλες τις κύριες κυψελωτές ζώνες στις περιοχές συχνοτήτων 698–960, 1710–2170 και 2396–2700 MHz, με κέρδος 2 dBi.



Εικόνα 3.3 Εκτιμώμενη απώλεια διαδρομής σε σχέση με την απόσταση για το επίπεδο του εδάφους (1,5 m) και 120 m ύψος σε αγροτικό περιβάλλον (800 MHz) [113].

Η **Εικόνα 3.3** [113] δείχνει την απώλεια διαδρομής σε σχέση με τα αποτελέσματα της απόστασης που ελήφθησαν στο αγροτικό περιβάλλον, μαζί με τα αντίστοιχα μέσα μοντέλων απωλειών διαδρομής προσαρμοσμένα σε ένα μοντέλο λογαριθμικής απόστασης άλφα-βήτα. Από την **Εικόνα 3.3** [113] υπάρχουν δύο κύριες παρατηρήσεις: η κλίση της γραμμής της απώλειας διαδρομής σε σχέση με την απόσταση μειώνεται με το ύψος και, ομοίως, τα υπολείμματα της διακύμανσης της απώλειας διαδρομής σε σχέση με το μέσο όρο επίσης μειώνονται. Στην πραγματικότητα, σε ύψος 120 m, η μέση συμπεριφορά της απώλειας διαδρομής είναι περίπου η διάδοση σε ελεύθερο χώρο. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν ληφθεί για αστικά περιβάλλοντα και για άλλα ύψη, με κύρια εξαίρεση την ελαφρώς υψηλότερη διακύμανση υπολειμματικής απώλειας διαδρομής για την αστική περίπτωση.



Εικόνα 3.4 Αριθμός γειτονικών κελιών που εντοπίστηκαν ανά δείγμα αναφοράς για διαφορετικά ύψη στο αγροτικό σενάριο μετρήσεων [113].

Η **Εικόνα 3.4** [113] δείχνει ένα άλλο σημαντικό αποτέλεσμα που αποκαλύπτεται από τις μετρήσεις τόσο σε αγροτικά όσο και σε αστικά περιβάλλοντα. Συγκεκριμένα, η εικόνα δείχνει την περίπτωση του αγροτικού σεναρίου, απεικονίζοντας πώς το περιβάλλον παρεμβολής αλλάζει με την αύξηση του ύψους. Από τις μετρήσεις, υπάρχει μια σαφής τάση ότι ο μέσος αριθμός ανιχνευόμενων κυψελών αυξάνεται με το ύψος: για αστικά περιβάλλοντα, από περίπου πέντε (ανάλογα με το ακριβές περιβάλλον) έως περίπου 12 κελιά όταν βρίσκονται πάνω από την ταράτσα και για αγροτικές περιοχές, από περίπου πέντε έως μερικά περισσότερα από 20 [88]. Αλλά αυτό που δείχνει επίσης η **Εικόνα 3.4** [113] είναι ότι είναι πολύ πιθανό να υπάρχει ένα κελί σε απόσταση 3 dB από το ισχυρότερο, και ακόμη και δύο κελιά. Αυτό είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο όταν το drone είναι πολύ πάνω από το μέσο επίπεδο της ταράτσας, δηλαδή στην περιοχή 35–40 m, όπου επίσης ο αριθμός των περιπτώσεων με τρία και τέσσερα κύτταρα εντός 3 dB είναι σημαντικός.

Μερικά από τα πειράματα σε αστικά και αγροτικά περιβάλλοντα έχουν ερευνήσει ύψη έως και 120 m, επιβεβαιώνοντας ότι αυτή η τάση συνεχίζεται. Στα 120 m, ο μέσος αριθμός των ανιχνευθέντων κυψελών για την αστική περίπτωση αυξήθηκε σε 22 κελιά. Η επίδραση της συχνότητας είναι λιγότερο έντονη, ιδιαίτερα σε μεγαλύτερα ύψη, δεδομένου ότι η βελτιωμένη διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις αντισταθμίζεται ήδη από τη διάδοση κοντά στον ελεύθερο χώρο. Όσον αφορά τις αυξημένες παρεμβολές, υπάρχει μια αύξηση στο μέσο εύρος κυψελών με το ύψος, έτσι ώστε όλο και περισσότερα απομακρυσμένα κελιά να έχουν καθοριστικό ρόλο στην παρεμβολή. Η ποιότητα λήψης σήματος αναφοράς LTE (**RSRQ** - Reference Signal Receive Quality), η οποία καταγράφηκε επίσης από τον σαρωτή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων,

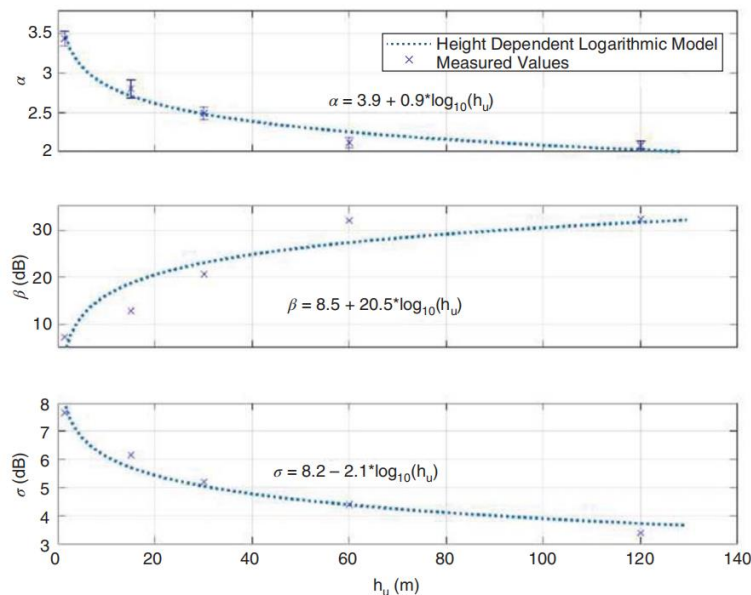
επιβεβαιώνει την επιδείνωση του λόγου σήματος προς παρεμβολή (**SIR** - Signal-to-Interference Ratio) με την αύξηση του ύψους.

3.2.2 Χαρακτηρισμός μοντέλου απώλειας διαδρομής

Από τις εκτιμώμενες τιμές απωλειών διαδρομής και τις τρισδιάστατες αποστάσεις άμεσης οπτικής επαφής LoS μεταξύ του drone και των σχετικών κυψελών, προσαρμόστηκε στα δεδομένα ένα μοντέλο άλφα-βήτα λογαριθμικής απόστασης χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων [89]. Το μοντέλο log-distance δίνεται ως εξής:

$$PL_{\text{est}}(d) = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + X_{\sigma} \quad (3.1)$$

Το μοντέλο έχει ήδη παραδειγματιστεί σε σχέση με την **Εικόνα 3.3** [113], και επιπλέον χρησιμοποιείται ως βάση για τις αξιολογήσεις απόδοσης σε επίπεδο συστήματος. Στην **Εξίσωση 3.1**, το d είναι η τρισδιάστατη απόσταση σε μέτρα, το α αντιπροσωπεύει τον εκθέτη απώλειας διαδρομής και β είναι το σημείο τομής στο $d = 1$ m. Ο όρος X_{σ} είναι μια τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τη διακύμανση απώλειας διαδρομής σε σχέση με τη μέση απώλεια διαδρομής (σκίαση) και μοντελοποιείται ως κανονικά κατανοημένη τυχαία μεταβλητή με τυπική απόκλιση ίση με την τυπική απόκλιση των υπολειμμάτων παλινδρόμησης. Στην παλινδρόμηση, τα δεδομένα εξαιρέθηκαν με βάση τα κριτήρια που ορίστηκαν για τη μέγιστη απόσταση και τη ρουλεμάν σε σχέση με την κατεύθυνση της κύριας δέσμης της κυψέλης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η περικοπή από την ικανότητα ανίχνευσης και τις παρενέργειες του λοβού της κεραίας, αντίστοιχα [90].



Εικόνα 3.5 Παράμετροι παλινδρόμησης που εξαρτώνται από το ύψος για το μοντέλο στην Εξίσωση (3.1) για το αγροτικό περιβάλλον. [113].

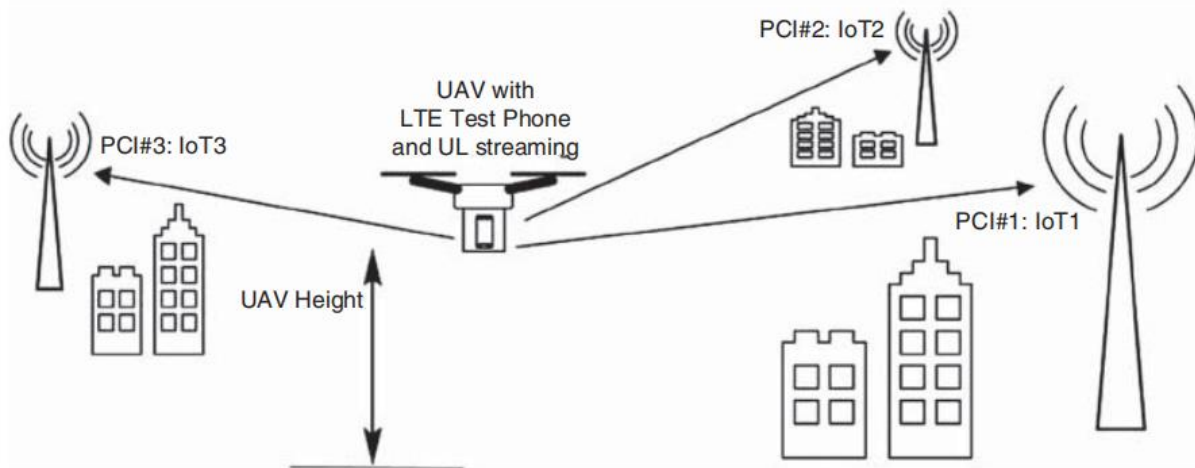
Για τις παραμέτρους στην **Εξίσωση 3.1**, προέκυψαν μοντέλα εξαρτώμενα από το ύψος, που ισχύουν για το αγροτικό περιβάλλον. Η αντίστοιχη συμπεριφορά που εκφράζεται από τα μοντέλα, απεικονίζεται στην **Εικόνα 3.5** [113].

Μια παρόμοια ανάλυση διεξήχθη για το αστικό περιβάλλον, επιβεβαιώνοντας ότι ισχύουν οι ίδιες τάσεις και το πλαίσιο μοντελοποίησης, με την ίδια ή μικρότερη κλίση των απωλειών διαδρομής όπως στην **Εικόνα 3.5** [113], ενώ η τυπική απόκλιση είναι περίπου διπλάσια, πηγαίνοντας πάνω από 12 dB στο επίπεδο του εδάφους σε περίπου 6 dB στα 40 m. Αναμένεται υψηλότερη τυπική απόκλιση για τα αστικά κέντρα, λόγω της αυξημένης ακαταστασίας σε αυτό το περιβάλλον.

3.2.3 Πειράματα ανερχόμενης ζεύξης

Οι μικρότερες απώλειες διάδοσης που παρατηρούνται από τα ιπτάμενα UAV αντιπροσωπεύουν μικρότερη εξασθένηση του ραδιοφωνικού σήματος που ακτινοβολείται από το UAV προς την κυψέλη εξυπηρέτησης, αλλά και προς αρκετές γειτονικές κυψέλες. Ειδικά λόγω της απόστασης στη ραδιοδρομική διαδρομή από το UAV προς την γειτονική κυψέλη, το UAV θα προκαλέσει δυνητικά υψηλότερες παρεμβολές στους γειτονικούς σταθμούς βάσης, σε σύγκριση με τους επίγειους χρήστες.

UAV: Unmanned Aerial Vehicle
PCI#x: LTE Physical Cell ID #x
IoT_x: Interference Over Thermal noise at LTE radio cell with PCI#x



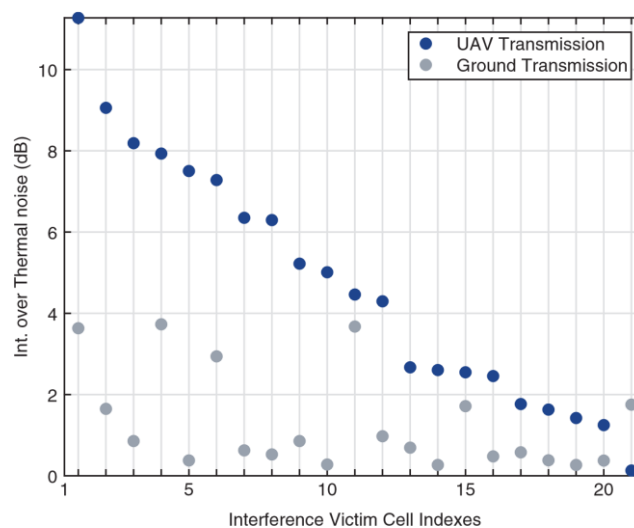
Εικόνα 3.6 Πειραματική ρύθμιση μέτρησης UAV για έρευνες παρεμβολών άνω ζεύξης σε δίκτυα LTE [113].

Η αύξηση της παρεμβολής ανερχόμενης ζεύξης που προκαλείται από αερομεταφερόμενα UAV, σε σύγκριση με την παρεμβολή που προκαλείται από επίγειους εξοπλισμούς χρηστών, καταδεικνύεται από μετρήσεις πεδίου. Η πειραματική ρύθμιση παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.6** [113]. Για τις αερομεταφερόμενες μεταδόσεις, ο εξοπλισμός χρήστη είναι προσαρτημένος σε ένα UAV, που πετά σε ύψος 100 m, σε μια περιφέρεια με ακτίνα 5 m. Οι επίγειες μεταδόσεις γίνονται

με τον εξοπλισμό χρήστη σε ύψος περίπου 1,5 m, σε στατική θέση. Και στις δύο περιπτώσεις, χρησιμοποιείται μια συσκευή LTE Κατηγορίας 6 UE.

Ένας τύπος κυκλοφορίας πλήρους προσωρινής μνήμης προσομοιώνεται στο πείραμα, μέσω μιας κυκλικής μεταφόρτωσης ενός μεγάλου αρχείου σε έναν απομακρυσμένο διακομιστή μέσω μιας σύνδεσης στο διαδίκτυο που παρέχεται από έναν δημόσιο χειριστή LTE. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 2 και 5 π.μ., ώρα που επιλέχθηκε κατάλληλα, με τη βοήθεια του διαχειριστή του δικτύου, για να μετριάσει η επίδραση της παρεμβολής στο παρασκήνιο που προκαλείται από άλλους ενεργούς χρήστες ως παράγοντας σύγχυσης. Η βασική γραμμή για τα πειράματα αποτελείται από επτά ημέρες παρεμβολής στα δεδομένα αύξησης του θερμικού θορύβου που συλλέγονται σε μια περιοχή ενδιαφέροντος, που αντιπροσωπεύεται από μια περιφέρεια ακτίνας 30 km γύρω από τη θέση δοκιμής.

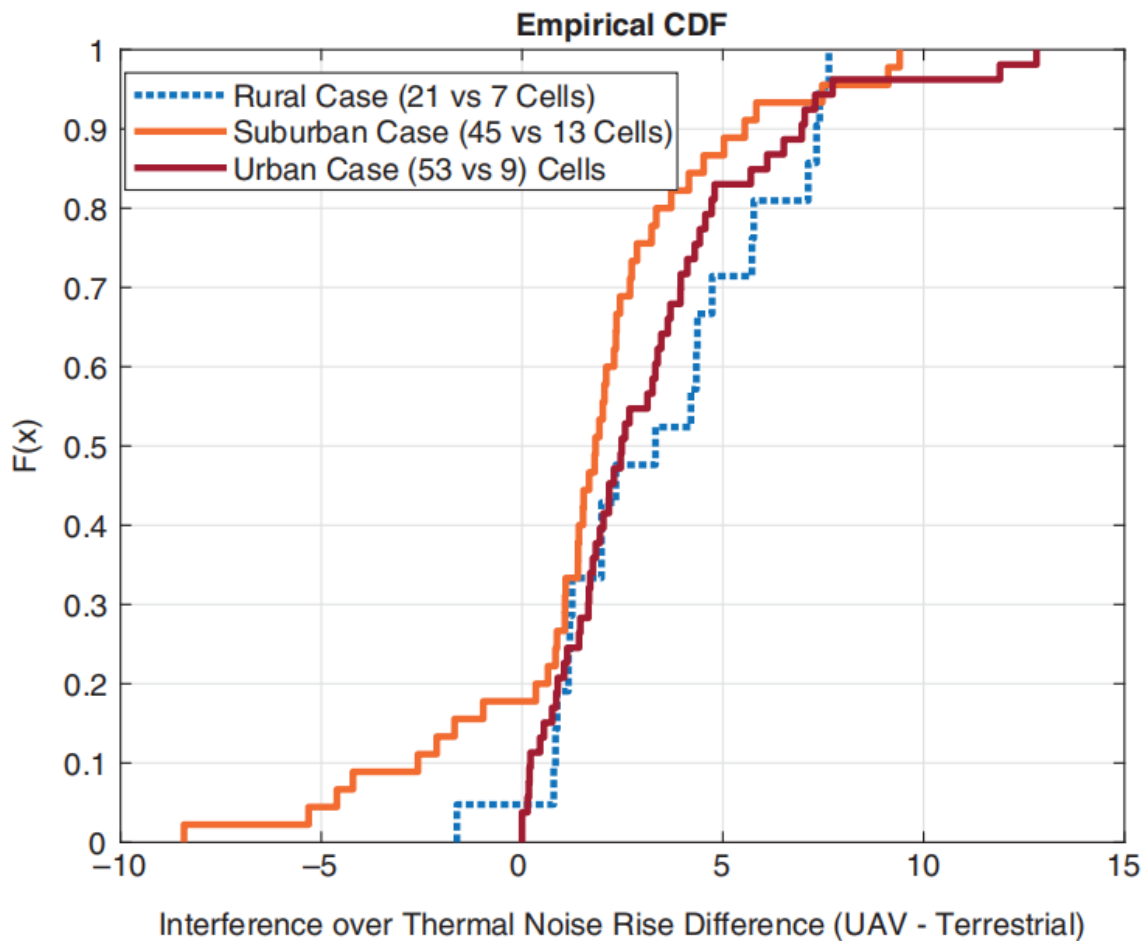
Μια μπαταρία τριών δοκιμών με διάρκεια 15 λεπτών επαναλήφθηκε τόσο για επίγεια όσο και για αερομεταφερόμενους σταθμούς χρηστών, σε διαφορετικούς χρόνους για τον καθέναν. Στη συνέχεια, η αύξηση του θορύβου που αναφέρεται από κάθε σταθμό βάσης στην περιοχή ενδιαφέροντος συλλέγεται και συγκρίνεται με τη γραμμή βάσης. Εάν η αύξηση θορύβου που παρατηρείται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για μια δεδομένη κυψέλη είναι πάνω από το 99% της βασικής γραμμής για τον μέσο όρο των τριών μπαταριών, αυτό το στοιχείο θεωρείται ως κελί θύματος παρεμβολής (IVC - Interference Victim Cell) από τις δοκιμαστικές μεταδόσεις, με κίνητρο ότι είναι πιο πιθανό να προκληθεί από το πείραμα παρά από στατιστική διακύμανση. Η προαναφερθείσα σειρά δοκιμών επαναλήφθηκε σε τρία διαφορετικά σενάρια: αστικό, προαστιακό και αγροτικό. Στην αγροτική τοποθεσία, οι πληροφορίες των γειτονικών σταθμών βάσης περιορίζονταν σε ακτίνα 15 km.



Εικόνα 3.7 Παρεμβολή από θερμικό θόρυβο που παρατηρήθηκε στις κυψέλες θύματος της παρεμβολής για τη μετάδοση UAV (αγροτικό σενάριο). Το UAV πετά σε ύψος 100 μ [113].

Η **Εικόνα 3.7** [113] δείχνει τα αποτελέσματα που μετρήθηκαν στην αγροτική τοποθεσία. Τα IVC εμφανίζονται στον άξονα x και ταξινομούνται με φθίνουσα σειρά παρεμβολών έναντι του θερμικού θορύβου για τις εναέριες μεταδόσεις. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η αερομεταφερόμενη συσκευή έχει επηρεάσει πολύ περισσότερες (20) κυψέλες από την επίγεια μετάδοση (7) και, κατά

μέσο όρο, με πολύ μεγαλύτερη παρεμβολή στον θερμικό θόρυβο (5,0 dB έναντι 2,7 dB) σε αυτές τις κυψέλες .



Εικόνα 3.8 Η CDF απεικονίζει τη διαφορά μεταξύ της παρεμβολής στο θερμικό θόρυβο που προκαλείται από τη μετάδοση UAV στα 100 m σε σύγκριση με μια επίγεια μετάδοση στις κυψέλες του θύματος παρεμβολής για τα τρία σενάρια. [113].

Η **Εικόνα 3.8** [113] δείχνει τις διαφορές της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής της παρεμβολής έναντι του θερμικού θορύβου που μετράται σε όλα τα αερομεταφερόμενα κελιά θυμάτων. Παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική αύξηση στις παρεμβολές που προκαλούνται από τις εναέριες μεταδόσεις, παρόλο που οι κεραιές λήψης στους σταθμούς βάσης έχουν συνήθως κλίση προς τα κάτω, βελτιστοποιημένες για κάλυψη εδάφους. Επιπλέον, το υπόμνημα στην εικόνα δείχνει τη σύγκριση μεταξύ του αριθμού των κελιών των θυμάτων που γίνονται αντιληπτοί από μια εναέρια μετάδοση σε σχέση με τον αριθμό των κελιών των θυμάτων που γίνονται αντιληπτοί από μια επίγεια μετάδοση. Ο μεγαλύτερος αριθμός κυψελών που επηρεάζονται από τη μετάδοση UAV στα 100 m προκαλείται από τη χαμηλότερη εξασθένιση του σήματος για μεγάλες αποστάσεις, σε σύγκριση με τον επίγειο εξοπλισμό χρήστη.

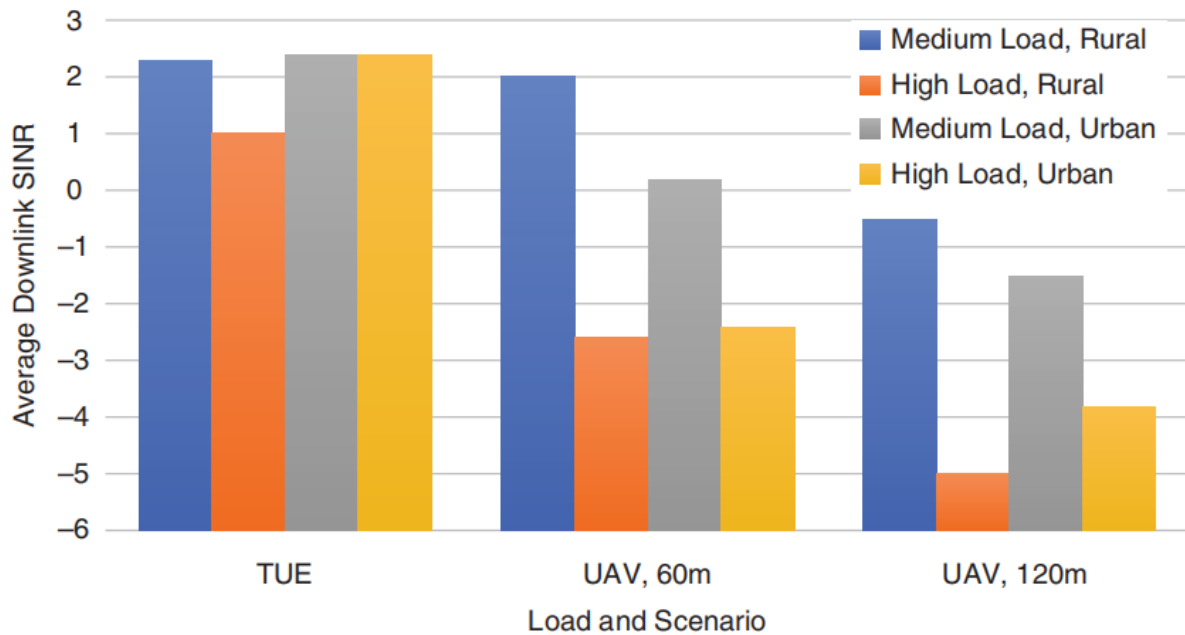
Ωστόσο, η αρχική πυκνότητα των UAV είναι πολύ μικρότερη από τους επίγειους χρήστες και αναμένεται να μεταδίδουν κυρίως πληροφορίες C2 χαμηλής ταχύτητας δεδομένων, απαιτώντας λίγους πόρους συχνότητας. Επειδή το φορτίο που δημιουργείται από τα UAV δεν αναμένεται να

είναι τόσο υψηλό τα πρώτα χρόνια, το αποτέλεσμα που μετράται σε αυτά τα πειράματα τείνει να μην προκαλεί σημαντική πρόσκρουση. Από την άλλη πλευρά, εάν η πυκνότητα των UAV αυξηθεί σημαντικά ή, ειδικά, όταν ορισμένα από αυτά χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση κίνησης uplink υψηλής ταχύτητας δεδομένων (π.χ. με ζωντανή ροή βίντεο από το UAV), ενδέχεται να απαιτηθούν ενέργειες για τον μετριασμό της πιθανής υποβάθμισης της απόδοσης σε όλους τους χρήστες του δικτύου που προκαλείται από μεταδόσεις UAV.

Ο έλεγχος της ισχύος εκπομπής UAV είναι ένας τρόπος προσαρμογής για διαφορετικές συνθήκες διάδοσης, περιορίζοντας την ισχύ εκπομπής του UAV σε χαμηλότερα επίπεδα. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση, ο μετριασμός των παρεμβολών μπορεί να έχει κόστος για την απόδοση του UAV. Μια άλλη επιλογή είναι να χρησιμοποιηθούν εκπομπές υψηλής κατευθυντικότητας από την πλευρά των UAV, επωφελούμενες από την πιθανότητα όρασης LoS και περιορίζοντας την περιοχή που επηρεάζεται από τη μετάδοση UAV.

3.3 Επιδόσεις σε δίκτυα LTE

Για να εμφανιστεί ο αντίκτυπος των διαφορετικών συνθηκών διάδοσης που εξηγήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, διερευνήθηκε η συνδεσιμότητα downlink για drones τόσο σε αγροτικές όσο και σε αστικές περιοχές με προσομοιώσεις. Για την αγροτική περιοχή, μελετήθηκε ένας αγροτικός χώρος $70 \text{ km} \times 70 \text{ km}$ στη Δανία. Για την αστική περιοχή, μελετήθηκε μια από τις μεγαλύτερες πόλεις της Δανίας, το Aalborg. Και στις δύο περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε ένα πραγματικό δίκτυο LTE ως διάταξη δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των πραγματικών θέσεων σταθμών βάσης, των υψών, των σχεδίων της κεραίας, των ρουλεμάν και της κλίσης προς τα κάτω. Στην αγροτική περιοχή, τα ύψη του σταθμού βάσης κυμαίνονται από 19 έως 50 m πάνω από το έδαφος και οι γωνίες κλίσης προς τα κάτω είναι από 0 έως 9 μοίρες. ενώ στην αστική περιοχή, τα ύψη του σταθμού βάσης είναι περίπου 30 m, με λίγο μεγαλύτερη κλίση προς τα κάτω, που κυμαίνεται από 0 έως 11 μοίρες. Το προφίλ του εδάφους λαμβάνεται υπόψη και τα drones θεωρείται ότι πετούν πάντα πάνω από το έδαφος σε σταθερό ύψος. Το σύστημα LTE που λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση είναι 2×2 MIMO. Για την αγροτική περιοχή, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο διάδοσης που προκύπτει από τις μετρήσεις μας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. ενώ για την αστική περιοχή έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο από το 3GPP [111], με πρόσθετη κλίση απώλειας διαδρομής εξαρτώμενη από το ύψος που καθορίζεται από την πιθανότητα LoS.



Εικόνα 3.9 Μέσος όρος SINR κατερχόμενης ζεύξης για τον επίγειο εξοπλισμό χρήστη (TUE) και για τα drones (UAV) σε δύο διαφορετικά ύψη για αγροτικά και αστικά σενάρια σε μεσαίο και υψηλό φορτίο [113].

Η **Εικόνα 3.9** [113] δείχνει το μέσο SINR κατερχόμενης ζεύξης τόσο για τους επίγειους εξοπλισμούς χρήστη, όσο και για τα drones σε διαφορετικά ύψη για τα σενάρια αστικών και αγροτικών περιοχών σε μεσαία και υψηλά φορτία κατερχόμενης ζεύξης. Αυτά τα επίπεδα φορτίου αντιστοιχούν σε 30% και 55-65% μέση χρήση πόρων ή μπλοκ φυσικών πόρων (**PRB** - Physical Resource Block) στην κατερχόμενη ζεύξη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το φορτίο στα σημερινά πραγματικά δίκτυα LTE είναι συνήθως χαμηλότερο από τις τιμές που χρησιμοποιούνται για ένα μεσαίο φορτίο. Ο λόγος για τη χρήση αυτών των υψηλών τιμών είναι για να διερευνηθεί αν μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη αξιοπιστία για τα drones όταν το φορτίο θα αυξηθεί στο μέλλον. Οι ακόλουθες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν σχετικά με αυτά τα αποτελέσματα:

- Το μέσο SINR κατερχόμενης ζεύξης πέφτει με την αύξηση του ύψους πτήσης του drone. Ο λόγος για αυτό είναι ότι η παρεμβολή αυξάνεται με την αύξηση του ύψους, καθώς γίνονται ορατές περισσότερες πηγές παρεμβολής και η διάδοση γίνεται πιο συμφέρουσα όταν αυξάνεται το ύψος.
- Το μέσο SINR κατερχόμενης ζεύξης των drones είναι πιο ευαίσθητο στο φορτίο του δικτύου από αυτό των επίγειων χρηστών, καθώς οι εναέριοι χρήστες βλέπουν περισσότερους πιθανούς παρεμβολείς.

Για να μπορέσει ένας εξοπλισμός χρήστη να συνδεθεί στο δίκτυο και να παραμείνει συνδεδεμένος, το SINR της κατερχόμενης ζεύξης πρέπει να είναι πάνω από -6 dB [112]. Ενώ οι μέσες τιμές SINR της κατερχόμενης ζεύξης είναι όλες πάνω από αυτό το όριο, υπάρχουν παραλλαγές γύρω από αυτές τις μέσες τιμές που προκαλούν στους εξοπλισμούς των χρηστών να αντιμετωπίζουν διαφορετικά επίπεδα διακοπής λειτουργίας σε διαφορετικά ύψη, δηλ. την πιθανότητα να μην είναι δυνατή η σύνδεση στο δίκτυο.

Πίνακας 3.3 Πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για επίγειους χρήστες και drones σε διαφορετικά ύψη για διαφορετικά σενάρια [113].

	Αγροτική Περιοχή (%)		Αστική Περιοχή (%)	
	Medium load	High load	Medium load	High load
Επίγειοι Χρήστες	0.3	1.5	1.1	2.8
Drones στα 60 m	1.7	10.9	6.9	11.2
Drones στα 120 m	3.5	23	14.5	21.4

Τα επίπεδα διακοπής λειτουργίας για διαφορετικά ύψη και φορτία τόσο για αγροτικά όσο και για αστικά σενάρια φαίνονται στον **Πίνακα 3.3** [113]. Από τον πίνακα φαίνεται ότι οι πιθανότητες διακοπής αυξάνονται με το ύψος και το φορτίο του δικτύου. Ενώ, στο έδαφος, σε μια αστική περιοχή, οι επίγειοι χρήστες σε ένα δίκτυο υψηλής φόρτωσης έχουν 1,5% πιθανότητα να αντιμετωπίσουν διακοπές, για drones σε ύψος 120 m στο ίδιο σενάριο, η πιθανότητα διακοπής φθάνει στα 23%. Σε γενικές γραμμές, μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι αυτές οι πιθανότητες διακοπής δείχνουν ότι το τρέχον κυψελοειδές δίκτυο σε υψηλό φορτίο δεν μπορεί να παρέχει μια εξαιρετικά αξιόπιστη σύνδεση με drones, ενώ σε μεσαίο φορτίο οι πιθανότητες διακοπής μπορεί να είναι αποδεκτές. Με άλλα λόγια, για να εξασφαλιστεί υψηλή αξιοπιστία σε όλες τις συνθήκες του φορτίου, απαιτείται μετριασμός των παρεμβολών.

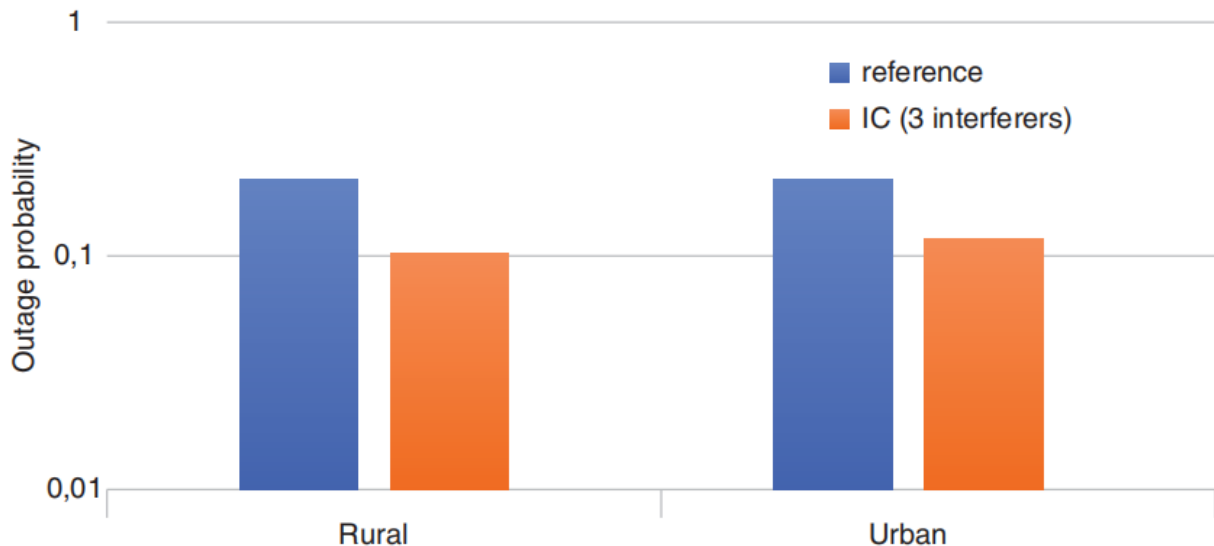
3.4 Βελτιώσεις αξιοπιστίας

Όπως φαίνεται στην προηγούμενη ενότητα, ενδέχεται να χρειαστούν τεχνικές ενίσχυσης της αξιοπιστίας για να διασφαλιστεί μια αξιόπιστη σύνδεση C2. Μπορούμε να χωρίσουμε τις τεχνικές βελτίωσης της αξιοπιστίας σε δύο κατηγορίες: βελτιώσεις στην πλευρά του τερματικού, που αντιστοιχούν στη βελτίωση του δέκτη και/ή του πομπού στο drone και στις βελτιώσεις δικτύου, που αντιστοιχούν στην προσθήκη λειτουργιών στο δίκτυο για μείωση των επιπτώσεων των παρεμβολών. Οι επόμενες υποενότητες δίνουν μια περιγραφή ορισμένων από αυτές τις τεχνικές και δείχνουν τις δυνατότητές τους για την αντιμετώπιση του ζητήματος της αξιοπιστίας στη χειρότερη περίπτωση, όπου ένα drone βρίσκεται σε ύψος 120 m και το φορτίο του δικτύου είναι υψηλό. Επιπλέον, χρησιμοποιείται η ίδια μοντελοποίηση όπως στην προηγούμενη ενότητα.

3.4.1 Ακύρωση παρεμβολών

Μια παραδοσιακή λύση μετριασμού παρεμβολών από την πλευρά του τερματικού για μεταδόσεις κατερχόμενης ζεύξης σε κυψελωτά συστήματα είναι η χρήση αλγορίθμων ακύρωσης παρεμβολών (**IC** - Interference Cancellation) ή συνδυασμού απόρριψης παρεμβολών (**IRC** - Interference Rejection Combining). Όταν δύο ή περισσότερα στοιχεία κεραίας είναι διαθέσιμα στον εξοπλισμό του χρήστη στην αλυσίδα του δέκτη, ο μηχανισμός ακύρωσης παρεμβολών μπορεί να καταστείλει ένα ή περισσότερα κυρίαρχα παρεμβαλλόμενα σήματα στην κατερχόμενη ζεύξη. Στην πράξη, η απόδοση άμβλυνσης των παρεμβολών τέτοιων δεκτών καθορίζεται όχι μόνο από τον αριθμό των στοιχείων της κεραίας, αλλά και από τον βαθμό συσχέτισης της κεραίας, το επίπεδο των σημάτων παρεμβολής και τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά της εξασθένησης του σήματος.

Αξιολογήθηκε από ερευνητικές ομάδες η πιθανή απόδοση ενός ιδανικού αλγορίθμου IC χρησιμοποιώντας μετρημένα ίχνη σήματος σε διάφορες συνθήκες και τοποθεσίες αγροτικού δικτύου [93]. Οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί όπως περιγράφεται στην **Ενότητα 3.2.1**. Αυτά τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα πιθανά κέρδη από την καταστολή τριών ή τεσσάρων παρεμβαλλόμενων σημάτων αλλάζουν σε σχέση με το ύψος πτήσης του UAV με τυπικό μέγιστο ύψος στα 30–60 m, και ταυτόχρονα τα κέρδη εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση μεταξύ του δικτύου και τη θέση του UAV εντός του δικτύου: μεγαλύτερα ISD και χαμηλότερες συνθήκες SIR ή SINR συνήθως οδηγούν σε υψηλότερα κέρδη IC.

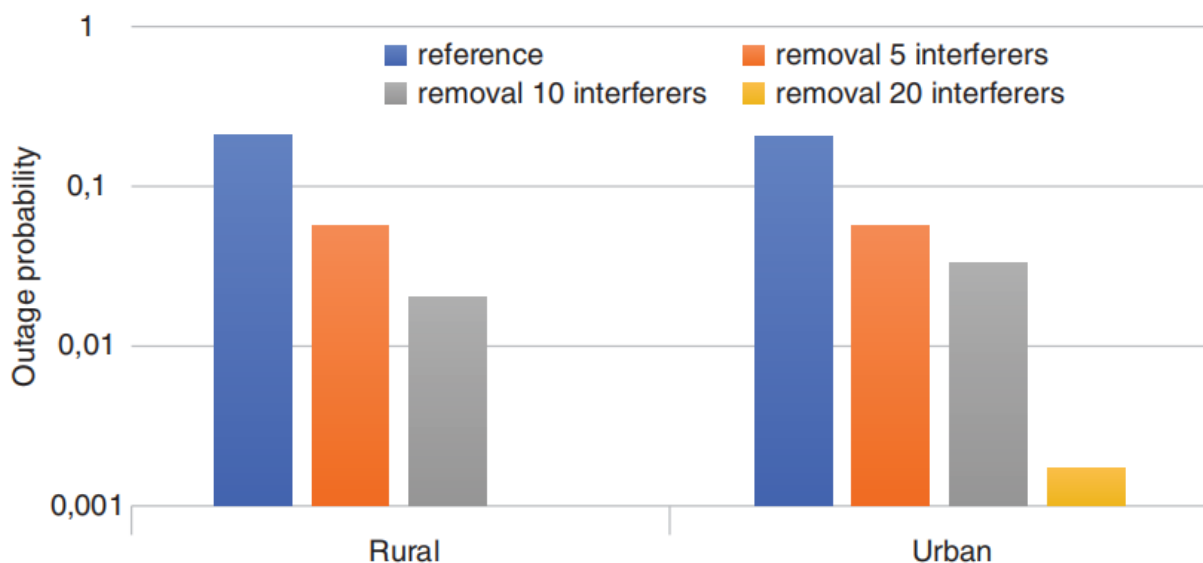


Εικόνα 3.10 Μέσες πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για πτήσεις UAV στα 120 μέτρα σε αστικά και αγροτικά δίκτυα ραδιοφώνου, όταν δεν χρησιμοποιείται IC (αναφορά) και όταν χρησιμοποιείται IC (τρεις παρεμβολές που απορρίπτονται) στο UAV UE [113].

Οι δύο τελευταίες παρατηρήσεις οδηγούν σε περαιτέρω έρευνες της απόδοσης των αλγορίθμων μετριασμού των παρεμβολών χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις σε επίπεδο συστήματος μεγάλης κλίμακας σε αστικά και αγροτικά σενάρια, με την ίδια ρύθμιση όπως περιγράφεται στην **Ενότητα 3.3**. Υποτίθεται ότι κάθε UAV έχει έναν εξοπλισμό χρήστη με δέκτη τεσσάρων κεραιών ικανό να καταστέλλει ιδανικά τρία σήματα παρεμβολής κάτω ζεύξης [94]. Τα κέρδη IC αξιολογήθηκαν ως προς τον δείκτη πιθανότητας διακοπής λειτουργίας και οι μέσες τιμές που επιτεύχθηκαν για UAV σε ύψος 120 m παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.10** [113]. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι, ακόμη και με ένα ιδανικό IC και με τρεις παρεμβολές που απορρίπτονται, τα κέρδη είναι ανεπαρκή για την επίτευξη του στόχου διακοπής του 0,1% (99,9% αξιοπιστία).

3.4.2 Έλεγχος παρεμβολών μεταξύ κυψελών

Μια λύση που βασίζεται σε δίκτυο είναι ο συντονισμός παρεμβολών μεταξύ κυψελών κατερχόμενης ζεύξης (**ICIC** - Inter-cell Interference Coordination). Υπάρχουν πολλές τυποποιημένες λύσεις για αυτό. Το απλούστερο σχήμα ICIC κατερχόμενης ζεύξης εισήχθη στην έκδοση 8 του 3GPP και βασίζεται καθαρά στη σηματοδότηση μεταξύ των κυψελών και δεν απαιτεί καμία λειτουργικότητα από την πλευρά του εξοπλισμού του χρήστη. Η γενική ιδέα είναι να συντονιστεί η χρήση ραδιοφωνικών πόρων μεταξύ των κυψελών για τη βελτιστοποίηση του SINR των άκρων της κυψέλης. Περαιτέρω δυνατότητες εισήχθησαν με τις βελτιωμένες και περαιτέρω βελτιωμένες λύσεις ICIC (**eICIC** - Enhanced Inter-cell Interference Coordination και **feICIC** - Further Enhanced Inter-cell Interference Coordination), οι οποίες συμπεριλήφθηκαν στις εκδόσεις 10 και 11 του 3GPP. Αυτές οι λύσεις μπορούν να θεωρηθούν ως υποψήφιες λύσεις και στα σενάρια των drone. Η διακοπή μπορεί να μειωθεί συντονίζοντας τη μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης από τον σωστό αριθμό κυψελών.



Εικόνα 3.11 Πιθανότητα διακοπής drone για drone στα 120 m σε αστικά και αγροτικά περιβάλλοντα υπό υψηλό φορτίο με αφαίρεση διαφορετικού αριθμού παρεμβολών [113].

Η **Εικόνα 3.11** [113] δείχνει το κέρδος στη διακοπή λειτουργίας σε σχέση με τον αριθμό των πηγών παρεμβολής που αφαιρέθηκαν, δηλ., υποθέτοντας ένα ιδανικό ICIC ικανό να καταστείλει πλήρως την παρεμβολή τους, από το σήμα λήψης για το αστικό και αγροτικό σενάριο.

Από τα αποτελέσματα στην **Εικόνα 3.11** [113], μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι αρκετές κυψέλες πρέπει να είναι σε σίγαση, κατά τα διαστήματα μετάδοσης που είναι αφιερωμένα σε ένα UAV, για να επιτευχθεί αξιοπιστία 99,9% σε περίπτωση υψηλού φορτίου. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η αξιοπιστία αφορά τη σύνδεση C2, η οποία απαιτεί μόνο 100 kbps. Αυτό σημαίνει ότι η μετάδοση δεδομένων από και προς το drone μπορεί να συγκεντρωθεί στο χρόνο, έτσι ώστε, για παράδειγμα, κάθε 10ο χρονικό διάστημα μετάδοσης (**TTI** - Transmission Time Interval) να χρησιμοποιείται για μεταδόσεις που σχετίζονται με drone. Αυτό θα σήμαινε ότι μόνο σε αυτά τα TTI θα πρέπει να γίνει σίγαση των παρεμβαλλόμενων κυττάρων. Ένα παράδειγμα τέτοιας ρύθμισης θα μπορούσε να είναι ότι ένα drone στα 120 m στον αέρα με σύνδεση C2 100 kbps χρησιμοποιεί κάθε 10ο TTI. Στο σενάριο υψηλού φορτίου, αυτό θα απαιτήσει τη σίγαση των οκτώ ισχυρότερων κυψελών κάθε 10ου TTI, που αντιστοιχεί στην αφαίρεση του 10% της χωρητικότητας αυτών των κυψελών [95].

3.4.3 CoMP

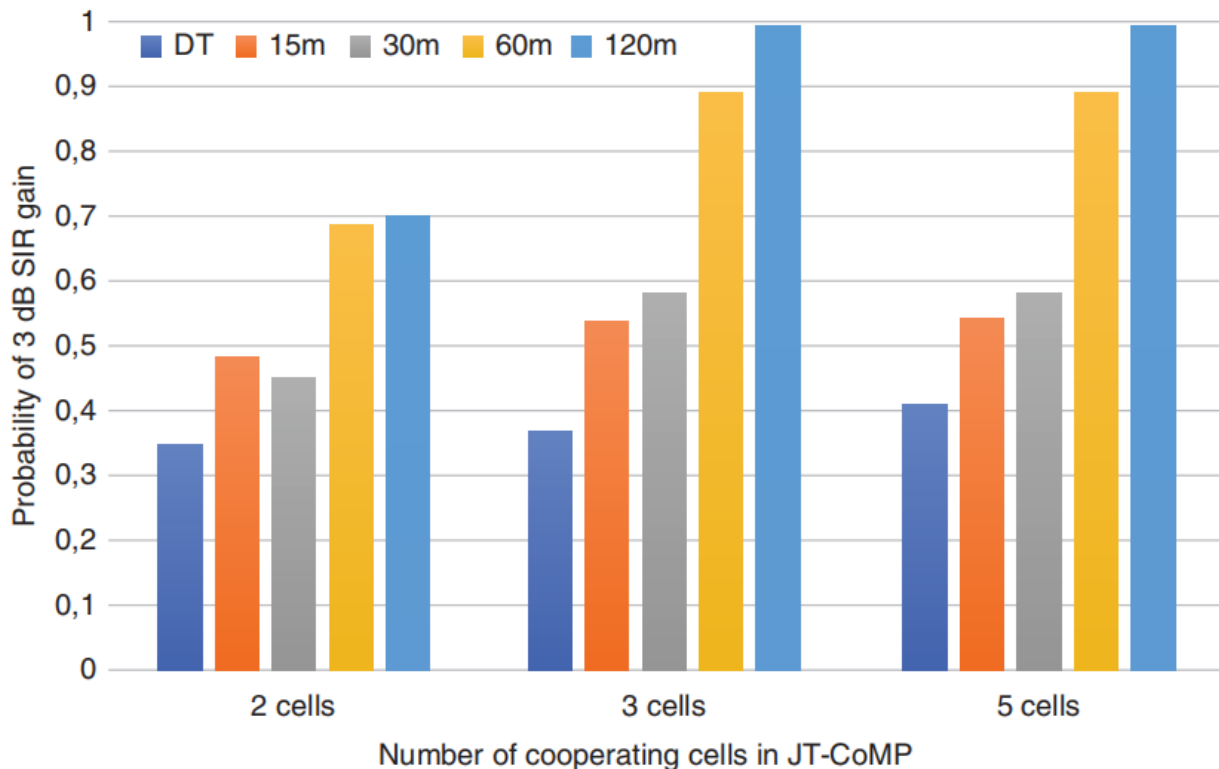
Για να μετριάσει ο αντίκτυπος των ραδιοπαρεμβολών σε κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη στα κυψελωτά συστήματα, έχει αναπτυχθεί και τυποποιηθεί μια ειδική κατηγορία τεχνικών για συστήματα LTE-Advanced: Κοινή Συντονισμένη Πολυσημική Μετάδοση και Λήψη (**JT/JR-CoMP**) [96]. Στη μετάδοση, το (**JT-CoMP** - Joint Coordinated Multipoint Transmission) είναι μια ταυτόχρονη μετάδοση του ίδιου σήματος από περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης προς ένα εξοπλισμό χρήστη, με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας/ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος, με τη συσσώρευση της λαμβανόμενης ισχύος. Ομοίως, στην ανερχόμενη ζεύξη, το (**JR-CoMP** - Joint Coordinated Multipoint Reception) λειτουργεί παρόμοια, με το σήμα του εξοπλισμού χρήστη να λαμβάνεται από περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης που συνδυάζουν τις εκδόσεις τους για να αποκτήσουν μια έκδοση εξόδου με βελτιωμένη αξιοπιστία/ποιότητα.

Τόσο το JT-CoMP όσο και το JR-CoMP απαιτούν μηχανισμούς ραδιοδικτύου που μπορούν να συντονίσουν και να συνδυάσουν τα σήματα μετάδοσης/λήψης από πολλές ραδιοκυψέλες (το σύνολο **CoMP** - Coordinated Multipoint). Αυτό, με τη σειρά του, θέτει ορισμένες απαιτήσεις για την απόδοση των συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ των κυψελών και περιορίζει επίσης τον αριθμό των κυψελών που μπορούν να συμπεριληφθούν στο σύνολο CoMP.

Σε τυπικές αναπτύξεις δικτύου LTE-Advanced, οι εξοπλισμοί των χρηστών βρίσκονται στο έδαφος (ή κοντά) και λόγω των συνθηκών διάδοσης, ο αριθμός των ραδιοκυψελών που πρέπει να συμπεριληφθούν στο σύνολο CoMP είναι σχετικά χαμηλός. Ωστόσο, για τα UAV που πετούν ψηλά πάνω από το έδαφος, και ενδεχομένως ακόμη και πάνω από τις ραδιοκυψέλες, οι σχεδόν μη παρεμποδισμένες συνθήκες διάδοσης οδηγούν στην ανάγκη χρήσης μεγαλύτερων συνόλων CoMP (σε μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή) όταν ο στόχος είναι να επιτευχθούν παρόμοια κέρδη σε σύγκριση με τα σενάρια των επίγειων εξοπλισμών των χρηστών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην

Ενότητα 3.4.2, ο συντονισμός μεγάλου αριθμού κυψελών δεν είναι ρεαλιστική υπόθεση, για τα αγροτικά και υποαγροτικά δίκτυα.

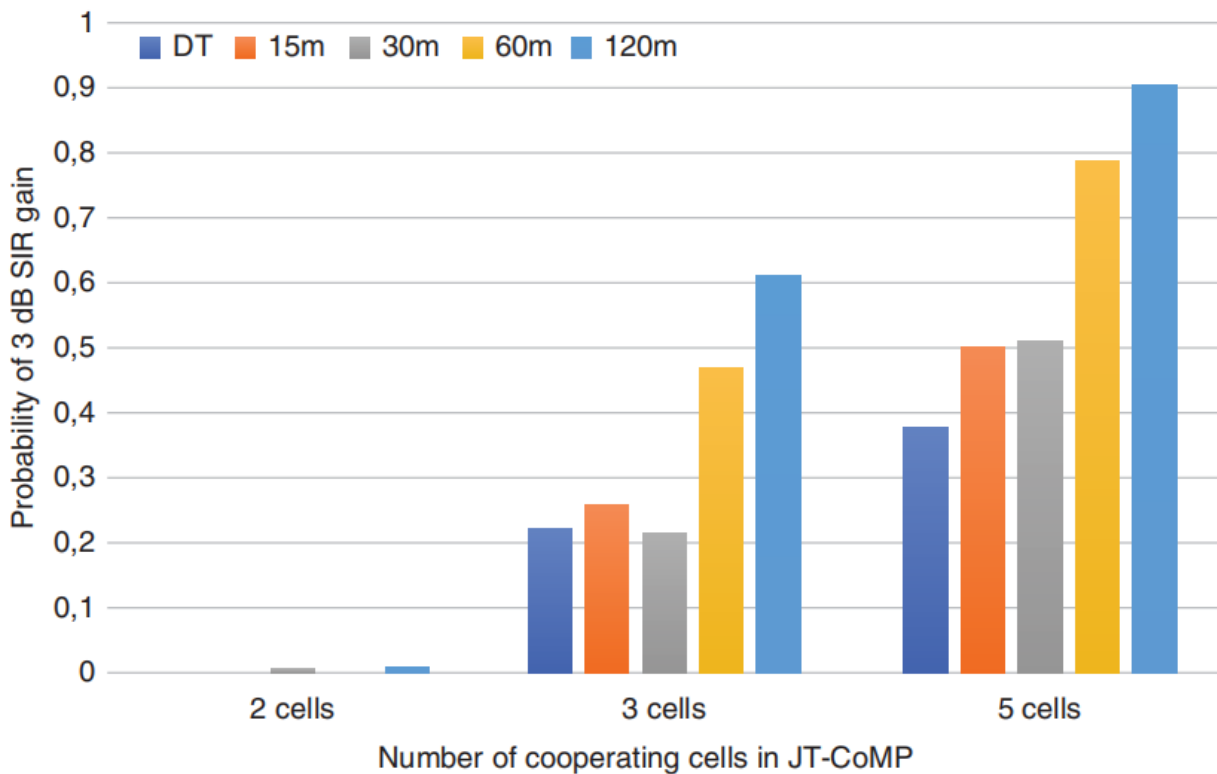
Λαμβάνοντας υπόψη τις πρακτικές δυνατότητες που συζητήθηκαν παραπάνω, σε σενάρια UAV έχουμε διερευνήσει το πιθανό κέρδος από τη χρήση του JT/JR-CoMP μόνο για ένα μειωμένο σύνολο CoMP έως και πέντε κυψελών [93]. Επιπλέον, χρησιμοποιήσαμε τα πειραματικά δεδομένα ραδιομετρήσεων που συλλέχθηκαν στο αγροτικό σενάριο (**Ενότητα 3.2.1**). Το όφελος του JT/JR-CoMP εκτιμάται χρησιμοποιώντας το μέτρο του ιδανικού μέσου κέρδους SINR, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες απόδοσης λόγω ατελούς σηματοδότησης ή της πιθανής περιορισμένης επικοινωνίας μεταξύ των κυψελών στο σύνολο CoMP. Η πιθανότητα επίτευξης τουλάχιστον 3 dB κατερχόμενης ζεύξης SIR ή 3 dB λαμβανόμενου επιπέδου σήματος ανοδικής ζεύξης χρησιμοποιείται ως μετρική αξιολόγησης [93].



Εικόνα 3.12 Επισκόπηση της πιθανότητας κέρδους SIR κατερχόμενης ζεύξης JT-CoMP 3 dB, σε ένα αγροτικό σενάριο με ISD = 2,8 km [113].

Οι **Εικόνες 3.12** και **3.13** [113] συνοψίζουν τα αποτελέσματα αξιολόγησης JT-CoMP και JR-CoMP για το αγροτικό σενάριο με ISD = 2,8 km. Παρουσιάζονται δύο υποπεριπτώσεις που αντιστοιχούν σε πτήσεις UAV στις περιοχές με συνθήκες SIR χαμηλής κατερχόμενης ζεύξης. Τα αποτελέσματα JT-CoMP κατερχόμενης ζεύξης υποδεικνύουν ότι τα σενάρια UAV με ύψος πτήσης πάνω από 60 μέτρα μπορούν να ωφεληθούν περισσότερο από τις τεχνικές CoMP με μόνο τρεις συνεργαζόμενες κυψέλες (μία μερίδα συν δύο επιπλέον), ενώ σε χαμηλότερο ύψος τα κέρδη που παρέχει το JT-CoMP μπορεί να μην είναι πάντα δυνατό να αξιοποιηθεί. Στην περίπτωση του JR-CoMP της ανερχόμενης ζεύξης, τα αποτελέσματά δείχνουν ότι η συνεργασία πέντε κυψελών (μία μερίδα συν τέσσερις επιπλέον) θα χρειαζόταν για να επωφεληθούν από τις τεχνικές JR-

CoMP, ειδικά για πτήσεις UAV σε χαμηλό ύψος, κάτω από 60 μέτρα. Τα κέρδη είναι υψηλότερα για σενάρια UAV με ύψη πτήσης 60 έως 120 m.

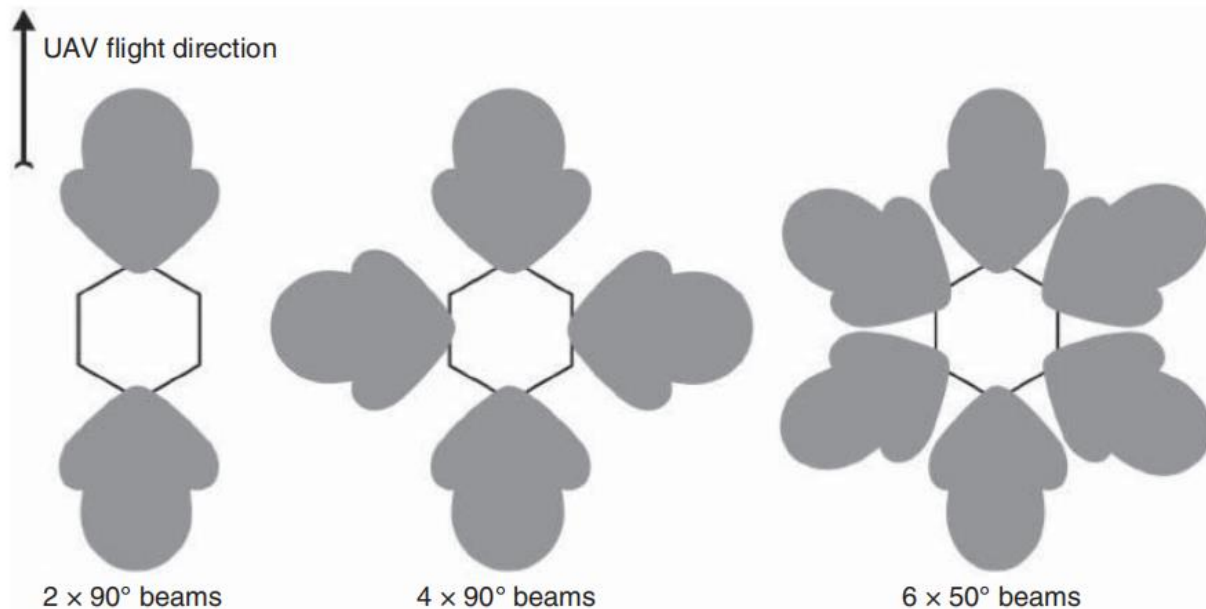


Εικόνα 3.13 Επισκόπηση της πιθανότητας κέρδους ανερχόμενης ζεύξης JR-CoMP 3 dB, σε ένα αγροτικό σενάριο με ISD = 2,8 km [113].

3.4.4 Επιλογή δέσμης κεραίας

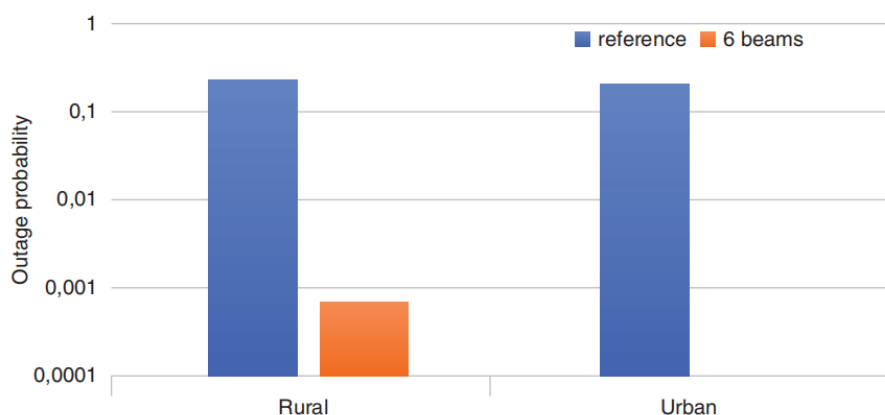
Τα σύγχρονα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας μπορούν να χρησιμοποιήσουν τεχνικές πολλαπλών κεραιών για να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος, αξιοποιώντας τη χωρική και τη χρονική ποικιλομορφία στο κανάλι ραδιοεπικοινωνίας. Μία από τις απλούστερες διαμορφώσεις πολλαπλών κεραιών είναι όταν τα διαθέσιμα στοιχεία κεραίας χρησιμοποιούνται επιλεκτικά ανάλογα με το επίπεδο σήματος (ή την ποιότητα του σήματος) που εκτιμάται σε κάθε στοιχείο κεραίας. Για παράδειγμα, με την επεξεργασία των σημάτων αναφοράς που λαμβάνονται από κάθε στοιχείο κεραίας, το τερματικό λήψης μπορεί να συμπεράνει τα στοιχεία κεραίας που παρέχουν καλύτερη λήψη σήματος και να διαμορφώνουν την ισχύ και τη φάση της διάταξης κεραίας τους για να ευνοούν αυτήν τη δέσμη. Αυτή η τεχνική διαφοροποίησης επιλογής δέσμης κεραίας μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί στη φυσική γεωμετρία του τερματικού, του δέκτη ή/και του πομπού.

Στην περίπτωση των UAV μεσαίου μεγέθους, τα οποία έχουν πολύ μεγαλύτερο φυσικό μέγεθος σε σύγκριση με ένα κινητό τηλέφωνο, η τοποθέτηση με τη σωστή απόσταση των κατευθυντικών στοιχείων της κεραίας γύρω από την άτρακτο επιτρέπει την υλοποίηση του λεγόμενου πλέγματος σταθερών δεσμών (**GoB** - Grid of fixed Beams). Μελετήθηκε η απόδοση ενός τέτοιου GoB στο UAV σε ένα σύστημα μεγάλης κλίμακας σε αστικά και αγροτικά σενάρια, με την ίδια ρύθμιση όπως περιγράφεται στην **Ενότητα 3.3**.



Εικόνα 3.14 Διαμορφώσεις UAV GoB με δύο, τέσσερις και έξι δέσμες (το πλάτος δέσμης δεν είναι σε κλίμακα) [113].

Οι ελεγμένες γεωμετρίες GoB απεικονίζονται στην **Εικόνα 3.14** [113]. Τα μοντελοποιημένα μοτίβα δέσμης κεραίας παρέχουν +6,6 dBι κέρδος στην κύρια κατεύθυνση και 13 dB εξασθένηση του λοβού από το μπροστινό προς το πλάι, γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί ότι ευθύνεται για το μη ιδανικό σχήμα των δοκών. Το ραδιοδίκτυο προσομοιώθηκε με την υπάρχουσα διαμόρφωση τριών τομέων και χωρίς καμία ικανότητα διαμόρφωσης δέσμης.



Εικόνα 3.15 Μέσες πιθανότητες διακοπής λειτουργίας για πτήσεις UAV στα 120 μέτρα σε αστικά και αγροτικά ραδιοφωνικά δίκτυα, όταν χρησιμοποιείται μια πανκατευθυντική κεραία (αναφορά) και GoB με έξι δέσμες στο UAV εξοπλισμού χρήστη [113].

Ο δέκτης στο UAV επιλέγει την κατεύθυνση της δέσμης της κεραίας με την καλύτερη ποιότητα σήματος κατερχόμενης ζεύξης RSRQ χωρίς να προσαρμόζει τον προσανατολισμό του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης. Αυτή η επιλογή κεραίας οδηγεί σε μείωση της ποσότητας ισχύος παρεμβολής που λαμβάνεται στην κάτω ζεύξη, βελτιώνει το SINR λήψης και έτσι μειώνει το συνολικό επίπεδο διακοπής ραδιοφώνου που αντιμετωπίζει το UAV. Τα κέρδη GoB αξιολογήθηκαν ως προς τον δείκτη πιθανότητας διακοπής λειτουργίας και οι μέσες τιμές που επιτεύχθηκαν για UAV σε ύψος 120 m παρουσιάζονται στην **Εικόνα 3.15** [113]. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με μια διαμόρφωση GoB έξι ακτίνων στο UAV, ο στόχος διακοπής λειτουργίας 0,1% μπορεί να επιτευχθεί σε όλα τα σενάρια[94] [95].

Στην ανερχόμενη ζεύξη, η χρήση μιας διαμόρφωσης GoB, με την επιλογή δέσμης κεραίας, βασισμένη στην ποιότητα του σήματος της κατερχόμενης ζεύξης, έχει ως αποτέλεσμα τόσο σε κέρδος σήματος για τις μεταδόσεις UAV όσο και σε μειωμένη παρεμβολή στην ανερχόμενη ζεύξη του δικτύου. Κατά συνέπεια, επιτυγχάνεται βελτιωμένη συνολική απόδοση δικτύου με περισσότερο από 50% βελτίωση της απόδοσης ανοδικής ζεύξης τόσο για επίγειους εξοπλισμούς χρηστών όσο και για UAV εξοπλισμούς χρηστών [94] [95].

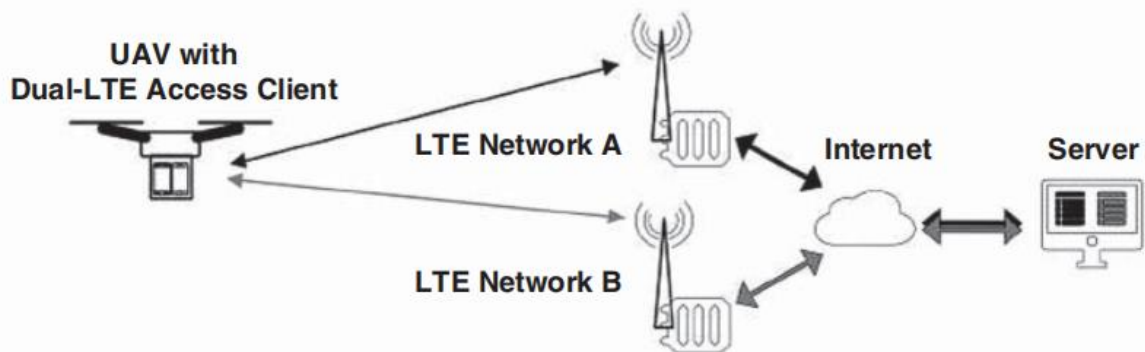
3.4.5 Διπλή πρόσβαση LTE

Μια συμπληρωματική προσέγγιση σε προσομοιώσεις επιπέδου συστήματος όπως αυτές που παρουσιάζονται στην **Ενότητα 3.3** είναι η χρήση μιας ρύθμισης μέτρησης ικανής να καταγράφει τους τυπικούς δείκτες απόδοσης ραδιοσύνδεσης LTE, ενώ εκτελεί ενεργά μεταφορά δεδομένων προς/από το UAV. Επιπλέον, για να αποκτήσει κανείς μια πιο ολοκληρωμένη άποψη σχετικά με την απόδοση της ζεύξης της επικοινωνίας, πρέπει να γίνει εξομείωση της κίνησης δεδομένων στη ζεύξη ραδιοεπικοινωνίας (πακέτα δεδομένων άνω και κάτω ζεύξης) για να αντικατοπτρίζει μια συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης UAV, π.χ. τη σύνδεση C2. τηλεχειριζόμενου UAV μέσω σύνδεσης LTE. Μια πειραματική εγκατάσταση για το σκοπό αυτό θα πρέπει τουλάχιστον να περιλαμβάνει το UAV ενσωματωμένο, ένα ραδιομόντεμ LTE ικανό να καταγράφει δείκτες απόδοσης ραδιοσύνδεσης LTE και μια εφαρμογή πελάτη, η οποία δημιουργεί τα πακέτα και τις εγγραφές ανερχόμενης ζεύξης, τα πακέτα κατερχόμενης ζεύξης, και μια εφαρμογή απομακρυσμένου διακομιστή, συνδεδεμένη στο Διαδίκτυο, η οποία δημιουργεί τα πακέτα κατερχόμενης ζεύξης και καταγράφει τα πακέτα ανερχόμενης ζεύξης. Αυτός ο τύπος πειραματικής εγκατάστασης έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τη διερεύνηση καθυστερήσεων πακέτων στο πλαίσιο σχημάτων μετάδοσης υβριδικής πρόσβασης.

Υιοθετήθηκε μια ρύθμιση, η οποία τροποποιήθηκε από ερευνητές για μελέτες συνδεσιμότητας διπλού δικτύου LTE [97]. Χρησιμοποιήθηκαν δύο μόντεμ ραδιοφώνου LTE, δύο κινητά τηλέφωνα με ειδικό υλικολογισμικό, το καθένα συνδεδεμένο σε διαφορετικό λειτουργό δικτύου LTE και η εφαρμογή πελάτη δημιουργεί και καταγράφει πακέτα δεδομένων προς/από και τα δύο μόντεμ ταυτόχρονα. Ομοίως, η εφαρμογή διακομιστή χειρίζεται και τις δύο συνδέσεις δεδομένων ταυτόχρονα.

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

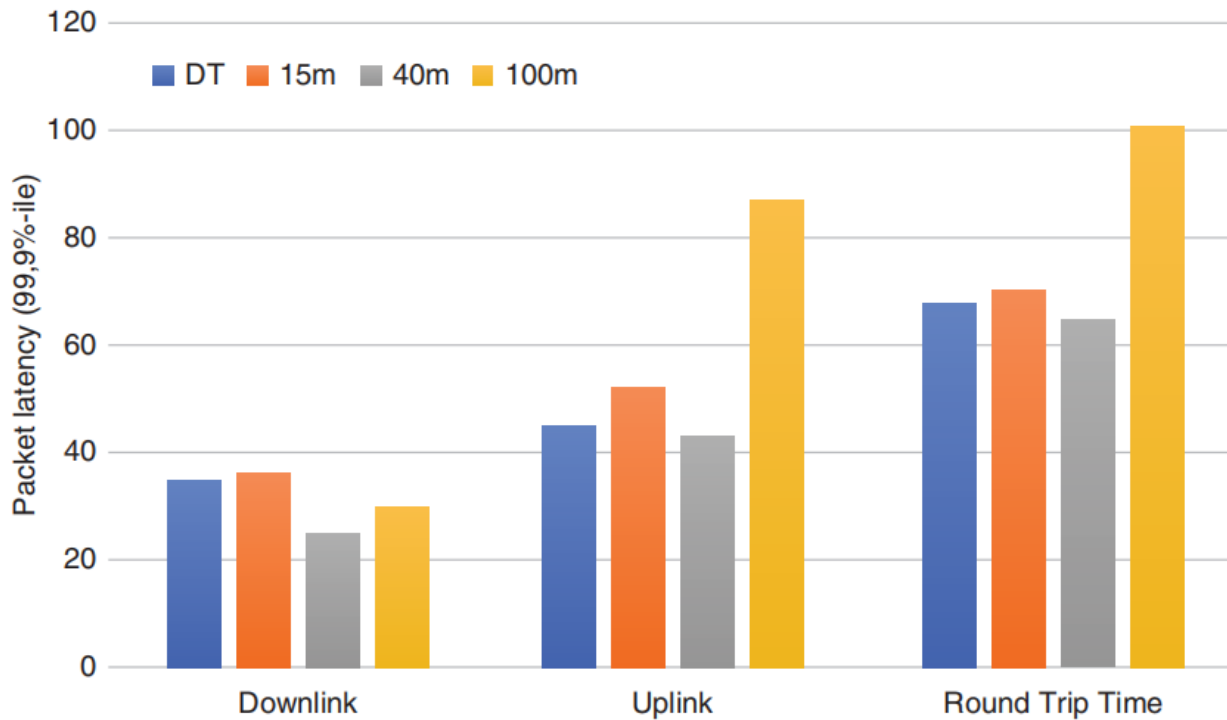
Dual-LTE: Simultaneous data connectivity to two LTE networks



Εικόνα 3.16 Πειραματική ρύθμιση μέτρησης UAV για συνδεσιμότητα διπλού δικτύου σε δίκτυα LTE [113].

Η **Εικόνα 3.16** [113] δείχνει σχηματικά αυτή τη ρύθμιση μέτρησης. Διερευνήθηκε ένα αστικό ραδιοπεριβάλλον, με το UAV να πετά κατά μήκος εναέριων διαδρομών μήκους περίπου 2 km σε τρία διαφορετικά ύψη, 15 m, 40 m και 100 m. Επιπλέον, έχουν επίσης πραγματοποιηθεί δοκιμές μετάδοσης κίνησης, στο επίπεδο του εδάφους [98].

Όλα τα πακέτα δεδομένων που μεταδίδονται (uplink και downlink) φέρουν χρονική σήμανση και οι εφαρμογές πελάτη και διακομιστή συγχρονίζονται χρονικά μέσω ενός παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης (GNSS - Global Navigation Satellite System) [97]. Αυτό επιτρέπει μετρήσεις καθυστέρησης και στις δύο συνδέσεις LTE, με ακρίβεια της τάξης των εκατοντάδων μικροδευτερόλεπτων. Επειδή οι δύο συνδέσεις LTE μετρώνται ταυτόχρονα, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της πιθανής απόδοσης ρεαλιστικών σχεδίων πρόσβασης για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της σύνδεσης C2. Επιπλέον, οι δείκτες απόδοσης σύνδεσης ραδιοφώνου LTE που καταγράφονται από κάθε μόντεμ μπορούν περαιτέρω να χρησιμοποιηθούν για να αποκτήσουν γνώσεις σχετικά με την απόδοση C2 που επιτεύχθηκε και πιθανές βελτιώσεις [98]. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με μια τέτοια ρύθμιση είναι ενδεικτικά των συνολικών επιτευξίμων καθυστερήσεων από άκρο σε άκρο, και όχι μόνο των καθυστερήσεων στα δίκτυα ραδιοπρόσβασης. Επιπλέον, για να επιτευχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα, οι ρυθμοί παραγωγής πακέτων τόσο στον πελάτη όσο και στον διακομιστή πρέπει να διαμορφωθούν σύμφωνα με τις ρυθμίσεις ασυνεχούς λήψης (DRX - Discontinuous reception) στα δίκτυα πρόσβασης, έτσι ώστε οι εξοπλισμοί χρηστών να μην χρειάζεται να αλλάζουν λειτουργίες μεταξύ συνδεδεμένου και αδράνειας, οι οποίες θα οδηγούσαν σε πρόσθετες καθυστερήσεις ρύθμισης σύνδεσης για κάθε μεταδιδόμενο/λαμβανόμενο πακέτο.



Εικόνα 3.17 Η μέτρηση UAV έχει ως αποτέλεσμα τις καθυστερήσεις πακέτων που επιτυγχάνονται για διαφορετικά ύψη πτήσης όταν θεωρείται υβριδική πρόσβαση [113].

Ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3.17** [113], όπου φαίνεται η απόδοση αιχμής καθυστέρησης πακέτων με πιθανότητα 99,9 % όταν υποτίθεται η υβριδική πρόσβαση διπλού LTE, για κατερχόμενη ζεύξη, ανοδική ζεύξη και συνολικό χρόνο μετ' επιστροφής πακέτων. Η υβριδική λύση που υποθέτουμε εδώ είναι ότι τα πακέτα απλώς μεταδίδονται διπλά και στις δύο συνδέσεις δικτύου και μόνο τα πρώτα πακέτα (ελάχιστη καθυστέρηση) διατηρούνται στην πλευρά του δέκτη.

Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η συνολική απόδοση καθυστέρησης της κυκλοφορίας C2 καθορίζεται από τον λανθάνοντα χρόνο στις μεταδόσεις ανερχόμενης ζεύξης (drone-σε-δίκτυο). Μια λύση υβριδικής πρόσβασης διπλού LTE μπορεί να μειώσει τις μέγιστες καθυστερήσεις E2E σε 40 ms και 90 ms σε κατερχόμενη και ανοδική ζεύξη, αντίστοιχα, ενώ επιτυγχάνει χρόνο μετ' επιστροφής κοντά στα 100 ms. Το ύψος πτήσης του UAV μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην καθυστέρηση που επιτυγχάνεται, με καθυστερήσεις έως και 90 ms για ύψη άνω των 40 μέτρων.

3.4.6 Αποκλειστικό φάσμα

Η χρήση ενός αποκλειστικού φάσματος που εκχωρείται για UAV, σε ξεχωριστή ανάπτυξη δικτύου, φαίνεται ιδιαίτερα ελκυστική για την απομόνωση της σύνδεσης C2 από εξωτερικές πηγές παρεμβολών, όπως οι επίγειοι χρήστες. Ωστόσο, η υποδομή που απαιτείται για την ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου, για παράδειγμα, όπως η οπισθόζευξη, μπορεί να συνεπάγεται με μη ελκυστικό κόστος. Ειδικότερα, λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα πυκνότητα των UAV και τον χρόνο που περνούν στον αέρα, μπορεί να είναι αρκετά δύσκολο να γίνει η επένδυση χρήσιμη από επιχειρηματική σκοπιά.

Για τον μετριασμό αυτού του κόστους, η υποδομή μπορεί να μοιράζεται με τα τρέχοντα κυψελωτά δίκτυα, αλλά εξακολουθεί να χρησιμοποιεί ένα αποκλειστικό εύρος ζώνης φάσματος που προορίζεται για UAV. Με βάση μια δημόσια βάση δεδομένων UAV στις ΗΠΑ [99], εκτιμήθηκε μια πρόβλεψη του μεγέθους του στόλου των UAV και της συνακόλουθης ζήτησης για δεσμευμένο εύρος ζώνης C2 για τα επόμενα 20 χρόνια. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι, στην πλειονότητα των σεναρίων που αναλύθηκαν, τα 5 MHz του εύρους ζώνης προβλέπεται να είναι αρκετά για να εγγυηθούν μια αξιόπιστη συνδεσιμότητα ζεύξης C2 χρησιμοποιώντας επί του παρόντος διαθέσιμες τεχνικές λύσεις για δίκτυα LTE. Οι προσομοιώσεις υπέθεσαν ότι όλα τα UAV πετούσαν σε ύψος 120 μέτρων. Ωστόσο, σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα, όπως το Μανχάταν, το συνολικό απαιτούμενο εύρος ζώνης μπορεί να ανέλθει σε περισσότερα από 10 MHz.

Παρόλο που οι αριθμοί δείχνουν ότι απαιτείται ένα σχετικά στενό εύρος ζώνης και ότι η πυκνότητα της τοποθεσίας μπορεί να διατηρηθεί χαμηλή, υπάρχουν ορισμένες προειδοποιήσεις. Πρώτον, προβλέφθηκε το απαιτούμενο εύρος ζώνης για μέγιστη χρήση, το οποίο μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τη μέση χρήση σε ορισμένες τοποθεσίες. Επομένως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο χρόνος που το φάσμα μπορεί να είναι αδρανές σε ολόκληρο το δίκτυο. Επιπλέον, επειδή τα μικρά εμπορικά drones μπορούν να προσγειωθούν και να απογειωθούν από οπουδήποτε στο έδαφος, είναι αρκετά πιθανό να εμπλέκεται μεγαλύτερη πυκνότητα σταθμών βάσης για την ενίσχυση της κάλυψης εδάφους, προκειμένου να επιτραπούν τέτοιες λειτουργίες [99].

Είναι εφικτό να ελαχιστοποιηθεί η σπατάλη πόρων υιοθετώντας μια πολιτική έξυπνης διαχείρισης φάσματος, όπου η ποσότητα των πόρων που δεσμεύονται για το C2 αυξάνεται και μειώνεται μετά τις διακυμάνσεις της στιγμιαίας ζήτησης. Η ερευνητική κοινότητα πρέπει να διερευνήσει τις στρατηγικές κατανομής πίσω από αυτήν την πολιτική, προκειμένου να επιτύχει μια καλή αντιστάθμιση μεταξύ της προστασίας της σύνδεσης C2 και της σπατάλης πόρων στο αποκλειστικό εύρος ζώνης.

4

Μη-ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση για επικοινωνίες

UAV

4.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν κατευθυνθεί προς την ανάπτυξη τηλεχειριζόμενων μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), τα οποία αποτελούν πιθανές υποψήφιες λύσεις για εφαρμογές εναέριων σταθμών βάσης, έτσι ώστε να παρέχουν υπηρεσίες πρόσβασης σε ασύρματες συσκευές που βρίσκονται στο έδαφος [\[100\]](#) ή στον ουρανό [\[101\]](#).

Στις ασύρματες επικοινωνίες με χρήση των UAV, η συνολική ενέργεια των UAV είναι περιορισμένη, η οποία περιλαμβάνει την ενέργεια πρόωσης και την ενέργεια που σχετίζεται με την επικοινωνία [\[102\]](#). Ως λύση σε αυτό το θέμα, προτάθηκε η ενσωμάτωση UAV και η τεχνική της μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (NOMA - Non-Orthogonal Multiple Access) σε κυψελωτά δίκτυα. Η συγκεκριμένη τεχνική θεωρείται πολλά υποσχόμενη για τη σημαντική βελτίωση της απόδοσης των επίγειων χρηστών στα ασύρματα συστήματα επόμενης γενιάς και περεταίρω, όπου η ενεργειακή απόδοση και η απόδοση του φάσματος μπορεί να είναι πολύ βελτιωμένη στη μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που σχετίζεται με την επικοινωνία [\[103\]](#). Τρεις περιπτώσιολογικές μελέτες, όπως η αξιολόγηση της απόδοσης, ο σχεδιασμός κοινής τροχιάς και η ανάπτυξη UAV με τη βοήθεια μηχανικής μάθησης, πραγματοποιήθηκαν για την καλύτερη κατανόηση των UAV δικτύων με τεχνική NOMA [\[104\]](#). Εξετάστηκε η χρήση ενός σταθερού αριθμού UAV [\[105\]](#), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως ιπτάμενοι αναμεταδότες για την υποστήριξη ασύρματων δικτύων οπισθόζευξης. Προτάθηκε ο αντίκτυπος της απόδοσης του συστήματος των δικτύων UAV με τη βοήθεια MIMO-NOMA, όπου

εκφράσεις κλειστής μορφής της διακοπής λειτουργίας της απόδοσης και του εργοδικού ρυθμού αξιολογήθηκαν στο σενάριο κατερχόμενης ζεύξης [106]. Διερευνήθηκε ένα σενάριο υποβοηθούμενο από NOMA κυψελωτής επικοινωνίας με χρήση των UAV, όπου δύο ειδικές στρατηγικές (εγωιστικές και αλτρουιστικές στρατηγικές μετάδοσης) θεωρήθηκαν ότι εξάγουν τις βελτιστοποιημένες λύσεις[107].

4.1.1 Κίνητρο

Οι δύο προαναφερθείσες έννοιες επικοινωνίας, το UAV και το NOMA, μπορούν φυσικά να συνδεθούν μεταξύ τους ως μια νέα τεχνική ασύρματης μετάδοσης φάσματος και ενεργειακής απόδοσης, η οποία αποτελεί το επίκεντρο αυτού του κεφαλαίου. Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που υποβοηθούνται από την τεχνική NOMA, ένα θέμα που προκύπτει είναι το πως θα εφαρμοστεί η τεχνική NOMA για πολλούς χρήστες τυχαίας περιαγωγής.

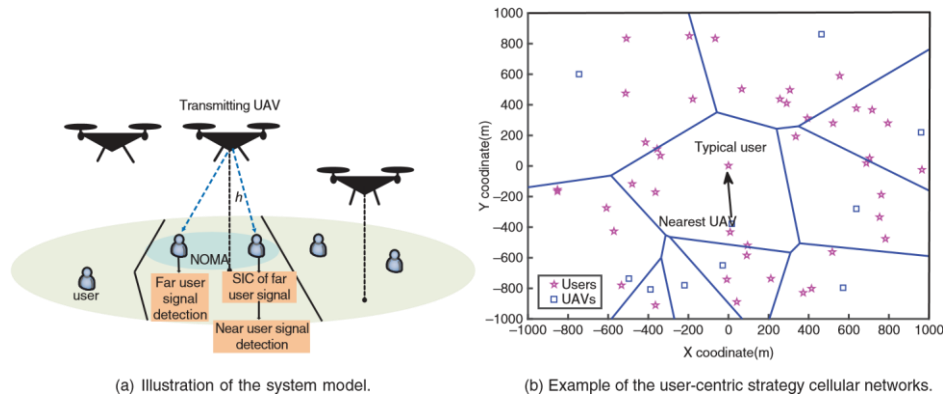
Σε αυτό το κεφάλαιο, προτείνονται δύο πιθανές στρατηγικές συσχέτισης, η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη και η στρατηγική με επίκεντρο το UAV. Επιπλέον, αξιολογείται η επίδραση ενός UAV δικτύου με τη βοήθεια της τεχνικής NOMA. Εφόσον η τεχνική NOMA περιορίζεται με παρεμβολές στο ίδιο κανάλι, είναι ρεαλιστικό να εφαρμοστεί το NOMA με συμβατικές τεχνολογίες ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (**OMA** – Orthogonal Multiple Access). Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί ένα σενάριο στο οποίο οι χρήστες προγραμματίζονται σε ζεύγη για να εκτελέσουν NOMA και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί συμβατική πολλαπλή πρόσβαση χρόνου/συχνότητας/διαίρεσης κώδικα για να εξυπηρετηθούν διαφορετικά ζεύγη χρηστών.

Σε αυτό το κεφάλαιο, οι χρήστες και τα UAV αναπτύσσονται χωρικά τυχαία στο έδαφος και στον ουρανό μέσω μιας ομοιογενούς διαδικασίας σημείου Poisson (HPPP), αντίστοιχα. Εδώ, προτείνονται δύο στρατηγικές επιλογής χρηστών, με βάση τους σκοπούς εξυπηρέτησης για την εκτέλεση του NOMA:

- (i) η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης μετά από καταστροφές σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου όλοι οι επίγειοι χρήστες βρισκόμενοι στο κελί μπορούν να εξυπηρετηθούν από το UAV.
- (ii) η στρατηγική με επίκεντρο τα UAV μπορεί να αναπτυχθεί τέλεια σε πυκνά δίκτυα, όπως σε συναυλίες ή σε αγώνες ποδοσφαίρου, για την παροχή συμπληρωματικών υπηρεσιών πρόσβασης για ενέργειες εκφόρτωσης, όπου οι επίγειοι χρήστες βρίσκονται σε έναν κανονικό δίσκο. Σημειώνεται ότι μια μη αμελητέα διαφορά είναι ότι ο συσχετισμός χρήστη αποφασίζεται από έναν μεμονωμένο χρήστη ή ένα UAV για τη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη ή για τη στρατηγική με επίκεντρο το UAV, αντίστοιχα.

4.2 Στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη για επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης

Οι επίγειοι χρήστες πρέπει να εξυπηρετούνται ισότιμα για επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης, π.χ. μετά από καταστροφές, σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε αγροτικές περιοχές. Με κίνητρο αυτόν τον σκοπό, παρουσιάζεται η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης έκτακτης ανάγκης σε όλους τους επίγειους χρήστες.



Εικόνα 4.1 Απεικόνιση του μοντέλου στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη NOMA[113].

Εστιάζοντας στα σενάρια μετάδοσης της κατερχόμενης ζεύξης, εξετάζεται η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.1(a)** [113]. Σε αυτό το κεφάλαιο, το UAV που είναι εξοπλισμένο με μία κεραία επικοινωνεί με πολλούς χρήστες εξοπλισμένους με μία μόνο κεραία ο καθένας. Στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη, οι τοποθεσίες των επίγειων χρηστών είναι τυχαίες για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και δεν υπάρχουν περαιτέρω πληροφορίες, έτσι ώστε τα UAV να σχεδιάσουν σωστά τις τροχιές τους. Προκειμένου να εξυπηρετούνται ισότιμα όλοι οι επίγειοι χρήστες, πολλαπλά UAV θα πρέπει να κατανέμονται ομοιόμορφα, κάτι το οποίο ορίζεται σύμφωνα με τον ορισμό της HPPP. Έτσι, τα UAV κατανέμονται σύμφωνα με μια HPPP Ψ με πυκνότητα λ .

Για την απλότητα της θεωρητικής ανάλυσης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.1(b)** [113], ένας χρήστης βρίσκεται στο σημείο προέλευσης της στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη, όπου γίνεται ο τυπικός χρήστης. Η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη είναι ένα χρήσιμο μοντέλο για δίκτυα μεγάλης κλίμακας, δηλαδή για μια αγροτική περιοχή, όπου οι χρήστες βρίσκονται ομοιόμορφα στο κελί σύμφωνα με μια HPPP Φ_u με πυκνότητα λ_u . Αξίζει να αναφερθεί ότι, στην περίπτωση που η πυκνότητα των χρηστών λ_u είναι χαμηλή, η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη αποδίδει πολύ καλύτερα από τη στρατηγική με επίκεντρο το UAV.

Θα υπάρχει ένας χρήστης, δηλαδή ένας σταθερός χρήστης, που είναι ήδη συνδεδεμένος στο UAV στον προηγούμενο γύρο της διαδικασίας συσχέτισης χρηστών. Στην πράξη, πολλαπλοί χρήστες συνδέονται ένας προς έναν στον πομπό (UAV). Για απλότητα, η οριζόντια απόσταση μεταξύ του σταθερού χρήστη και του συνδεδεμένου UAV ορίζεται ως r_k , η οποία μπορεί να είναι

οποιαδήποτε αυθαίρετη τιμή, και η οριζόντια απόσταση μεταξύ του τυπικού χρήστη και του συνδεδεμένου UAV είναι τυχαία, που συμβολίζεται με r . Στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη, θεωρούμε ότι δύο χρήστες, ο σταθερός χρήστης και ο τυπικός χρήστης, συνδυάζονται για να εκτελέσουν την τεχνική NOMA, όπου οι ζευγοποιημένοι χρήστες NOMA μοιράζονται τα ίδια μπλοκ πόρων συχνότητας, χρόνου και κώδικα.

Η χρήση ενός μοντέλου σύνθετου καναλιού διακρίνεται σε δύο μέρη, τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας και τις διαλείψεις μικρής κλίμακας. Η οριζόντια απόσταση r κατανέμεται ανεξάρτητα και πανομοιότυπα. Σε αυτό το κεφάλαιο, η διαλείψεις μεγάλης κλίμακας αντιπροσωπεύει την απώλεια διαδρομής μεταξύ του UAV και των χρηστών. Μια λογαριθμική κανονική κατανομημένη τυχαία μεταβλητή για σκίαση τόσο στα επιθυμητά σήματα όσο και στα σήματα παρεμβολής έχει εξεταστεί από σχετικές έρευνες [108]. Όμως είναι μαθηματικά δυσεπίλυτη ενώ δεν αλλάζει τις κύριες τάσεις, καθώς οι σειρές ποικιλομορφίας και οι υψηλές κλίσεις του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) είναι ίδιες.

4.2.1 Μοντέλο συστήματος

Προκειμένου να απεικονιστεί η σύνδεση LoS μεταξύ του UAV και του χρήστη, οι διαλείψεις μικρής κλίμακας ορίζονται από τις διαλείψεις Nakagami και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$f(x) = \frac{m^m x^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-mx} \quad (4.1)$$

Όπου το m υποδηλώνει την παράμετρο διάλωσης και το $\Gamma(m)$ αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση Γάμμα. Σημειώνεται ότι $\Gamma(m) = (m-1)!$, όταν το m είναι ακέραιος αριθμός. Η απόσταση εξυπηρέτησης μεταξύ του συνδεδεμένου UAV σε έναν τυπικό χρήστη μπορεί να γραφτεί ως:

$$r_t = \sqrt{h^2 + r^2} \quad (4.2)$$

όπου r είναι η πλησιέστερη επιτρεπόμενη οριζόντια απόσταση μεταξύ του τυπικού χρήστη και του συνδεδεμένου UAV του και το h υποδηλώνει το ύψος του UAV.

Επομένως, η διάλωση μεγάλης κλίμακας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$L_t = r_t^{-\alpha} \quad (4.3)$$

όπου το α υποδηλώνει τον εκθέτη απώλειας διαδρομής μεταξύ του τυπικού χρήστη και του συνδεδεμένου UAV.

Έτσι, η λαμβανόμενη ισχύς από το συσχετισμένο UAV για τον χρήστη στην αρχή δίνεται από

$$P_t = P_u L_t |h_t|^2 \quad (4.4)$$

όπου το P_u υποδηλώνει την ισχύ εκπομπής του UAV και το h_i τους συντελεστές καναλιού για τον τυπικό χρήστη και το σχετικό UAV.

Στη μετάδοση κατερχόμενη ζεύξης, οι ζευγοποιημένοι χρήστες NOMA ανιχνεύουν επίσης παρεμβολές από γειτονικά UAV. Ως εκ τούτου, η παρεμβολή καναλιού I μπορεί να εκφραστεί περαιτέρω ως εξής:

$$I \triangleq \sum_{j \in \Psi, d_j > r_i} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_i} \quad (4.5)$$

όπου d_j και $|g_j|^2$ δηλώνουν την απόσταση και την εξασθένηση μικρής κλίμακας μεταξύ του χρήστη και του j -ου παρεμβαλλόμενου UAV και το α_i δηλώνει τον εκθέτη απώλειας διαδρομής μεταξύ του παρεμβαλλόμενου UAV και του τυπικού χρήστη.

Επιπλέον, στα πρακτικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας, η λήψη της πληροφορίας κατάστασης του καναλιού (**CSI** - Channel State Information) στον πομπό ή τον δέκτη είναι ένα μη τετριμμένο πρόβλημα, το οποίο απαιτεί την κλασική διαδικασία εκπαίδευσης που βασίζεται σε πιλότους. Επομένως, προκειμένου να δοθούν περισσότερες γνώσεις μηχανικής, θεωρείται ότι η CSI των UAV είναι εν μέρει γνωστή στον τυπικό χρήστη, όπου απαιτούνται μόνο πληροφορίες απόστασης μεταξύ του UAV και του τυπικού χρήστη. Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και το SINR της στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη θα προκύψει στην επόμενη υποενότητα.

Για τη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη, δεδομένου ότι η απόσταση του τυπικού χρήστη δεν είναι προκαθορισμένη, υπάρχουν δύο πιθανές περιπτώσεις για τον τυπικό χρήστη, η περίπτωση του μακρινού χρήστη και η περίπτωση του κοντινού χρήστη. Στη συνέχεια, αναλύεται το SINR σε αυτές τις δύο πιθανές περιπτώσεις.

4.2.1.1 Περίπτωση του μακρινού χρήστη

Για την περίπτωση του μακρινού χρήστη, όπου η απόσταση εξυπηρέτησης του τυπικού χρήστη είναι μεγαλύτερη από αυτή του σταθερού χρήστη, (δηλαδή $r > r_k$), τότε ο τυπικός χρήστης αντιμετωπίζει το σήμα από τον σταθερό χρήστη ως παρεμβολή, και έτσι το SINR μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\text{SINR}_{t, \text{far}} = \frac{|h_t|^2 r_t^{-\alpha} P_u \alpha_v^2}{\sigma^2 + |h_t|^2 r_t^{-\alpha} P_u \alpha_w^2 + \sum_{j \in \Psi, d_j > r_i} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_i}} \quad (4.6)$$

όπου το σ^2 υποδηλώνει την ισχύ του προσθετικού λευκού Gaussian θορύβου **AWGN** και τα α_v^2 και α_w^2 δηλώνουν τους συντελεστές κατανομής ισχύος για τον απομακρυσμένο χρήστη και τον κοντινό χρήστη, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι $\alpha_v^2 + \alpha_w^2 = 1$ για την NOMA επικοινωνία.

Για τη μακρινή περίπτωση χρήστη, εφαρμόζεται η τεχνική της διαδοχικής ακύρωσης παρεμβολών (**SIC** - Successive Interference Cancellation) στον σταθερό χρήστη. Ως εκ τούτου, ο σταθερός χρήστης πρέπει να αποκωδικοποιήσει τις πληροφορίες από τον τυπικό χρήστη με το ακόλουθο SINR:

$$\text{SINR}_{f \rightarrow t, \text{far}} = \frac{|h_f|^2 R_k^{-\alpha} P_u \alpha_v^2}{\sigma^2 + |h_f|^2 R_k^{-\alpha} P_u \alpha_w^2 + \sum_{j \in \Psi, d_j > r_t} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_t}} \quad (4.7)$$

Όπου $R_k = \sqrt{r_k^2 + h^2}$, και h_f δηλώνουν τους συντελεστές καναλιού για τον σταθερό χρήστη.

Μόλις αποκωδικοποιηθεί επιτυχώς, ο σταθερός χρήστης θα αποκωδικοποιήσει το δικό του σήμα με ατελή συντελεστής SIC και το SINR μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\text{sinR}_{f, \text{far}} = \frac{|h_f|^2 R_k^{-\alpha} P_u \alpha_w^2}{\sigma^2 + \beta |h_f|^2 R_k^{-\alpha} P_u \alpha_v^2 + \sum_{j \in \Psi, d_j > r_t} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_t}} \quad (4.8)$$

όπου το β δηλώνει τον ατελή συντελεστή SIC. Εφόσον στην πράξη η SIC δεν είναι τέλεια, ένα κλάσμα $0 < \beta < 1$ θεωρείται στο μοντέλο για τον χρήστη με καλύτερο κέρδος καναλιού. Από τη μία πλευρά, $\beta = 0$ όταν θεωρείται τέλεια SIC και ο κοντινός χρήστης μπορεί να αποκωδικοποιήσει τέλεια το σήμα που προορίζεται για τον μακρινό χρήστη. Από την άλλη πλευρά, όταν η SIC αποτυγχάνει ή δεν υπάρχει αντίστοιχη SIC, τότε $\beta = 1$.

4.2.1.2 Περίπτωση του κοντινού χρήστη

Για την περίπτωση του κοντινού χρήστη, όταν ο τυπικός χρήστης έχει μικρότερη απόσταση εξυπηρέτησης από το UAV απ'ότι ο σταθερός χρήστης (δηλαδή $r < r_k$), τότε το σήμα του τυπικού χρήστη μπορεί να αντιμετωπιστεί ως παρεμβολή στον σταθερό χρήστη, και επομένως το SINR του σταθερού χρήστη να εκφραστεί ως:

$$\text{SINR}_{f, \text{near}} = \frac{|h_f|^2 R_k^{-\alpha} P_u \alpha_v^2}{\sigma^2 + |h_f|^2 R_k^{-\alpha} P_u \alpha_w^2 + \sum_{j \in \Psi, d_j > r_t} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_t}} \quad (4.9)$$

Η τεχνική SIC μπορεί να αναπτυχθεί στον τυπικό χρήστη για την αποκωδικοποίηση του σήματος από τον σταθερό χρήστη και το SINR στον τυπικό χρήστη στην περίπτωση κοντινού χρήστη μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\text{SINR}_{t \rightarrow f, \text{near}} = \frac{|h_t|^2 r_t^{-\alpha} P_u \alpha_v^2}{\sigma^2 + |h_t|^2 r_t^{-\alpha} P_u \alpha_w^2 + \sum_{j \in \Psi, d_j > r_t} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_t}} \quad (4.10)$$

Μόλις ο τυπικός χρήστης αποκωδικοποιήσει με επιτυχία τις πληροφορίες από τον σταθερό χρήστη, μπορεί να αποκωδικοποιήσει το δικό του σήμα με το SINR να εκφράζεται ως εξής:

$$\text{SINR}_{t, \text{near}} = \frac{|h_t|^2 r_t^{-\alpha} P_u \alpha_w^2}{\sigma^2 + \beta |h_t|^2 r_t^{-\alpha} P_u \alpha_v^2 + \sum_{j \in \Psi, d_j > r_t} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_t}} \quad (4.11)$$

4.2.2 Πιθανότητα κάλυψης της στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη

Υποθέτοντας ότι τα UAV κατανέμονται σύμφωνα με μια HPPP με πυκνότητα λ και ένας επιπλέον χρήστης βρίσκεται στην αρχή του δίσκου στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη ή ένα επιπλέον UAV βρίσκεται στην αρχή του δίσκου στην στρατηγική με επίκεντρο το UAV, η οποία είναι υπό τις προσδοκίες έναντι της HPPP. Έτσι, στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη, η οριζόντια απόσταση r μεταξύ του τυπικού χρήστη και των UAV ακολουθεί την κατανομή:

$$f_r(r) = 2\pi\lambda r e^{-\pi\lambda r^2}, r \geq 0 \quad (4.12)$$

Στη συνέχεια, αναλύεται η στρατηγική του προτεινόμενου δικτύου με επίκεντρο τον χρήστη, προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία του συστήματος. Στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη, η συσχέτιση χρηστών βασίζεται στη σύνδεση του πλησιέστερου UAV με τον τυπικό χρήστη.

Η πιθανότητα κάλυψης που εξαρτάται από την απόσταση εξυπηρέτησης του τυπικού χρήστη για την περίπτωση του κοντινού χρήστη στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη εκφράζεται σε κλειστή μορφή ως:

$$P_{t, \text{near}}(r) = \sum_{n=0}^{m-1} \sum_{p=0}^n \binom{n}{p} \frac{(-1)^n}{n!} \Lambda_4^n \Lambda_5^n \exp\left(-mM_t^* \sigma^2 r_t^\alpha - \Lambda_3 r_t^{2+(\alpha-\alpha_t)(i+a)}\right) \times r_t^{\alpha(1-j)q_j + (2+(\alpha-\alpha_t)(i+a)-\alpha b)q_b + \alpha n} \quad (4.13)$$

Για τη περίπτωση του μακρινού χρήστη, σημειώνεται ότι η αποκωδικοποίηση θα πετύχει εάν ο τυπικός χρήστης μπορεί να αποκωδικοποιήσει το δικό του μήνυμα αντιμετωπίζοντας το σήμα από τον σταθερό χρήστη ως παρεμβολή.

Η πιθανότητα κάλυψης που εξαρτάται από την απόσταση εξυπηρέτησης του τυπικού χρήστη για τη περίπτωση του μακρινού χρήστη στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη εκφράζεται σε κλειστή μορφή ως:

$$P_{t, \text{far}}(r) = \sum_{n=0}^{m-1} \sum_{p=0}^n \binom{n}{p} \frac{(-1)^n}{n!} \Lambda_4^f \Lambda_5^f \exp\left(-mM_t^f \sigma^2 r_t^\alpha - \Lambda_3^f r_t^{2+(\alpha-\alpha_t)(i+a)}\right) \times r_t^{\alpha(1-j)q_j + (2+(\alpha-\alpha_t)(i+a)-\alpha b)q_b + \alpha n} \quad (4.14)$$

Τα αποτελέσματα στις **Εξισώσεις (4.13)** και **(4.14)** καταδεικνύουν ότι η πιθανότητα κάλυψης του τυπικού χρήστη καθορίζεται από τον ατελή συντελεστή της SIC, τον δικό του ρυθμό-στόχο, την παράμετρο διάλειψης m των καναλιών διαλείψεων μικρής κλίμακας και την απόσταση του σταθερού χρήστη που εξυπηρετείται από το ίδιο το UAV.

Η ακριβής έκφραση της πιθανότητας κάλυψης για τον τυπικό χρήστη εκφράζεται ως εξής:

$$P_t = \int_0^{r_k} P_{t, \text{near}}(r) f_r(r) dr + \int_{r_k}^{\infty} P_{t, \text{far}}(r) f_r(r) dr \quad (4.15)$$

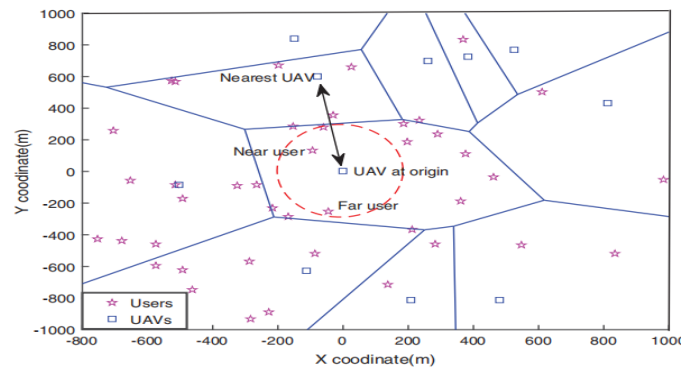
όπου το $P_{t, \text{near}}(r)$ δίνεται στην **Εξίσωση (4.13)**, το $P_{t, \text{far}}(r)$ δίνεται στην **Εξίσωση (4.14)**, και το $f_r(r)$ δίνεται στην **Εξίσωση (4.12)**.

Με βάση το αποτέλεσμα στην **Εξίσωση (4.15)**, η πιθανότητα κάλυψης του τυπικού χρήστη εξαρτάται από την απόσταση του σταθερού χρήστη στην στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη.

Προκειμένου να παρέχονται περισσότερες πληροφορίες για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που υποβοηθούνται από UAV, η πιθανότητα κάλυψης του τυπικού χρήστη προκύπτει επίσης για τα υποβοηθούμενα από OMA κυψελωτά δίκτυα UAV, όπως η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (**TDMA** - Time Division Multiple Access). Ο τυπικός χρήστης και ο σταθερός χρήστης ακολουθούν τις ίδιες κατανομές απόστασης και τα κανάλια εξασθένησης μικρής κλίμακας στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας UAV με τη βοήθεια OMA. Το σημείο αναφοράς στο OMA που υιοθετείται είναι η διαίρεση των δύο χρηστών σε ίσες υποδοχές χρόνου/συχνότητας.

4.3 Στρατηγική με επίκεντρο το UAV για εκφόρτωση ενεργειών

Σε ένα συμβατικό σύστημα επικοινωνίας σταθμών βάσης, οι σταθμοί βάσης κατανέμονται για να καλύπτουν όλο το έδαφος, ενώ οι επικοινωνίες UAV επικεντρώνονται κυρίως στην παροχή υπηρεσιών πρόσβασης για την υποστήριξη σταθμών βάσεων στις περιοχές hotspot των πυκνών δικτύων, π.χ. αεροδρόμια ή θέρετρα [109].



Εικόνα 4.2 Παράδειγμα της στρατηγικής με επίκεντρο των UAV σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [113].

Έστω ότι η περιοχή εξυπηρέτησης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας κανονικός δίσκος [110]. Μια άλλη στρατηγική που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο είναι η στρατηγική με επίκεντρο τα UAV, όπου οι ζευγαρωμένοι χρήστες NOMA βρίσκονται μέσα στο δίσκο κάλυψης, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.2** [113]. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι τοποθεσίες των UAV έχουν επιλεγεί κατάλληλα για να εξυπηρετούν επίγειους χρήστες στις περιοχές hotspot με βάση την πυκνότητα χρήστη στη στρατηγική με επίκεντρο τα UAV. Με βάση τις γνώσεις μιας διαδικασίας συμπλέγματος Poisson (**PCP** – Poisson Cluster Plus), οι χρήστες βρίσκονται στην πράξη σε πολλαπλά μικρά συμπλέγματα.

Για τη στρατηγική με επίκεντρο το UAV, ένα UAV βρίσκεται στο σημείο προέλευσης, το οποίο γίνεται το τυπικό UAV που εξυπηρετεί τους χρήστες στην τυπική κυψέλη. Υποτίθεται ότι η απόσταση μεταξύ του UAV στην αρχή και του πλησιέστερου UAV είναι R , και οι πιθανοί ζευγαρωμένοι χρήστες NOMA βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης εντός της ακτίνας $R/2$. Στη στρατηγική με επίκεντρο το UAV, η στρατηγική σύζευξης χρήστη καθορίζεται από το συνδεδεμένο UAV, όπου όλοι οι χρήστες στο δίσκο κάλυψης είναι συνδεδεμένοι στο UAV. Στη συσχέτιση χρηστών, για λόγους απλότητας υποτίθεται ότι υπάρχουν δύο χρήστες, ο κοντινός χρήστης w και ο μακρινός χρήστης v , που έχουν πρόσβαση στο UAV στην αρχή για να εκτελέσουν NOMA. Θεωρείται ότι οι χρήστες είναι ομοιόμορφα τοποθετημένοι, που σύμφωνα με την HPPP, συμβολίζεται με Ψ_u , και σχετίζεται με την πυκνότητα λ_u , μέσα σε ένα μεγάλο δακτύλιο και μικρό δίσκο με ακτίνες $R/2$ και $R/4$, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνική NOMA μπορεί να εκτελεστεί χωρίς ακριβή CSI.

4.3.1 Ανάλυση SINR

Για τη στρατηγική με επίκεντρο το UAV, οι αποστάσεις μεταξύ των UAV που παρεμβάλλονται και των χρηστών είναι πιο περίπλοκες. Η θέση του j -ου παρεμβαλλόμενου UAV συμβολίζεται με y_j , όπου $y_j \in \Psi$. Οι τοποθεσίες των χρηστών εξαρτώνται από τις θέσεις των UAV. Ως εκ τούτου, το SINR του μακρινού χρήστη v υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{SINR}_v = \frac{|h_v|^2 d_v^{-\alpha} P_u \alpha_v^2}{\sigma^2 + |h_v|^2 d_v^{-\alpha} P_u \alpha_w^2 + \sum_{j \in \Psi} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_i}} \quad (4.16)$$

όπου $|h_v|^2$ και d_v δηλώνουν το κέρδος καναλιού μικρής κλίμακας και την απόσταση μεταξύ του απομακρυσμένου χρήστη και του UAV, και $|g_j|^2$ και d_j δηλώνουν το κέρδος καναλιού μικρής κλίμακας και την απόσταση μεταξύ του j -ου παρεμβαλλόμενου UAV και του χρήστη, αντίστοιχα.

Ο κοντινός χρήστης w θα αποκωδικοποιήσει πρώτα το σήμα του απομακρυσμένου χρήστη v με το ακόλουθο SINR:

$$\text{SINR}_{w \rightarrow v} = \frac{|h_w|^2 d_w^{-\alpha} P_u \alpha_v^2}{\sigma^2 + |h_w|^2 d_w^{-\alpha} P_u \alpha_w^2 + \sum_{j \in \Psi} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_t}} \quad (4.17)$$

όπου $|h_w|^2$ και d_w δηλώνουν το κέρδος καναλιού μικρής κλίμακας και την απόσταση μεταξύ του κοντινού χρήστη και του UAV. Εάν το σήμα του v χρήστη μπορεί να αποκωδικοποιηθεί με επιτυχία, ο w -ος χρήστης αποκωδικοποιεί το δικό του σήμα. Ως εκ τούτου, το SINR στον w -ο χρήστη υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{SINR}_w = \frac{|h_w|^2 d_w^{-\alpha} P_u \alpha_w^2}{\sigma^2 + \beta |h_w|^2 d_w^{-\alpha} P_u \alpha_v^2 + \sum_{j \in \Psi} |g_j|^2 P_u d_j^{-\alpha_t}} \quad (4.18)$$

4.3.2 Πιθανότητα Κάλυψης της στρατηγικής με επίκεντρο το UAV

Έστω ένας δίσκος με κέντρο στην αρχή με ακτίνα $R/2$, που φαίνεται στην **Εικόνα 4.2** [113]. Προκειμένου να υλοποιηθεί η τεχνική NOMA, διαχωρίζεται ο δίσκος σε δύο ζώνες ισχύος, έναν μικρό δίσκο με ακτίνα $R/4$ και έναν δακτύλιο με ακτίνα από $R/4$ έως $R/2$, για να εξυπηρετούνται οι ζευγαρωμένοι χρήστες NOMA. Υποτίθεται ότι οι κοντινοί χρήστες και οι μακρινοί χρήστες βρίσκονται στον μικρό δίσκο και στο μεγάλο δακτύλιο, αντίστοιχα.

Εστιάζοντας στο τυπικό κελί, το οποίο βρίσκεται στην αρχή, ακολουθεί η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της απόστασης για τους κοντινούς χρήστες που εξαρτάται από την απόσταση εξυπηρέτησης R :

$$f_w(r| R) = \frac{32r}{R^2}, 0 \leq r \leq l_1 \quad (4.19)$$

όπου $l_1 = R/4$.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για τους μακρινούς χρήστες είναι:

$$f_v(r| R) = \frac{32r}{3R^2}, l_1 \leq r \leq l_2 \quad (4.20)$$

όπου $l_2 = R/2$.

Η έκφραση κλειστής μορφής της πιθανότητας κάλυψης που εξαρτάται από την απόσταση εξυπηρέτησης για τον κοντινό χρήστη υπολογίζεται ως:

$$P_{\text{cov},w}(r|R) = \sum_{n=0}^{m-1} \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^k \frac{(-1)^n r_w^{\alpha n}}{l!(k-l)!(n-k)!} \Theta_3 \Theta_4 \Theta_5 \times \exp\left(-mM_{w^*} \sigma^2 r_w^\alpha - \Theta_1 r_w^{\alpha(i+a)} - \frac{ml_I}{R} + \Theta_2 r_w^{\alpha U}\right) \times r_w^{\alpha(1-j)q_j + \alpha(i+a-g)q_g + \alpha n + \alpha(U-b)q_u} \quad (4.21)$$

Η έκφραση κλειστής μορφής της πιθανότητας κάλυψης που εξαρτάται από την απόσταση εξυπηρέτησης για τον μακρινό χρήστη υπολογίζεται ως:

$$P_{\text{cov},v}(r|R) = \sum_{n=0}^{m-1} \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^k \frac{(-1)^n r_v^{\alpha n}}{l!(k-l)!(n-k)!} \Theta_{3,v} \Theta_{4,v} \Theta_{5,v} \times \exp\left(-mM_v \sigma^2 r_v^\alpha - \Theta_{1,v} r_v^{\alpha(i+a)} - \frac{ml_I}{R} + \Theta_{2,v} r_v^{\alpha U}\right) \times r_v^{\alpha(1-j)q_j + \alpha(i+a-g)q_g + \alpha n + \alpha(U-b)q_u} \quad (4.22)$$

Με βάση τις **Εξισώσεις (4.21) και (4.22)**, οι ακριβείς εκφράσεις της πιθανότητας κάλυψης για τους ζευγαρωμένους χρήστες NOMA μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$P_{\text{cov},w} = \int_0^\infty \int_0^{l_1} P_{\text{cov},w}(r|R) f_w(r|R) dr f_r(R) dR \quad (4.23)$$

και

$$P_{\text{cov},v} = \int_0^\infty \int_{l_1}^{l_2} P_{\text{cov},v}(r|R) f_v(r|R) dr f_r(R) dR \quad (4.24)$$

όπου $l_1 = R/4$, $l_2 = R/2$, $P_{\text{cov},w}(r|R)$ δίνεται στην **Εξίσωση (4.21)**, $P_{\text{cov},w}(r|R)$ δίνεται στην **Εξίσωση (4.22)**, $f_w(r|R)$ δίνεται στην **Εξίσωση (4.19)**, $f_v(r|R)$ δίνεται στην **Εξίσωση (4.20)** και το $f_r(R)$ δίνεται στην **Εξίσωση (4.12)**.

Χρησιμοποιώντας την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας στην **Εξίσωση (4.19)**, η πιθανότητα κάλυψης του κοντινού χρήστη που εξαρτάται από την απόσταση εξυπηρέτησης μπορεί να ληφθεί ως εξής:

$$P_{\text{cov},w}(R) = \int_0^{l_1} P_{\text{cov},w}(r|R) f_w(r|R) dr \quad (4.25)$$

Η συνολική πιθανότητα κάλυψης μπορεί να προκύψει από την απόσταση εξυπηρέτησης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας που υποστηρίζονται από το UAV, η οποία μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_{\text{cov},w} = \int_0^\infty P_{\text{cov},w}(R) f_r(R) dR \quad (4.26)$$

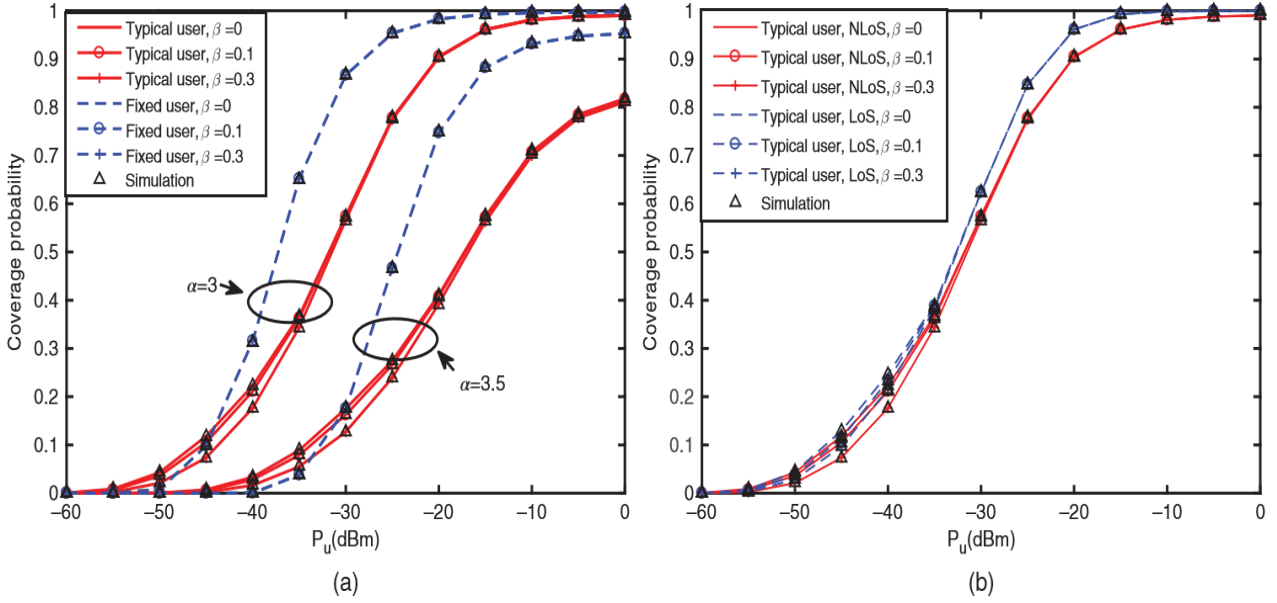
Εισάγοντας την **Εξίσωση (4.12)** στην **Εξίσωση (4.26)**, μπορεί να ληφθεί η πιθανότητα κάλυψης του κοντινού χρήστη.

4.4 Αριθμητικά αποτελέσματα

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για τη διευκόλυνση της αξιολόγησης της απόδοσης των κυψελοειδών δικτύων UAV που υποβοηθούνται από το NOMA. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις Monte Carlo για την επαλήθευση των αναλυτικών αποτελεσμάτων. Στο εξεταζόμενο δίκτυο, θεωρείται ότι οι συντελεστές κατανομής ισχύος είναι $\alpha^2_v = 0,6$ για τον μακρινό χρήστη και $\alpha^2_w = 0,4$ για τον κοντινό χρήστη. Ο εκθέτης παρεμβολής της απώλειας διαδρομής α_l ορίζεται στο 4 και ο εκθέτης απώλειας διαδρομής της επιθυμητής μετάδοσης είναι μικρότερος από 4. Το ύψος του UAV είναι σταθερό στα 100 m. Στις προσομοιώσεις Monte Carlo, δεν είναι δυνατό να προσομοιωθεί μια πραγματική άπειρη κατανομή για UAV. Ως εκ τούτου, τα UAV είναι κατανεμημένα σε έναν δίσκο και η ακτίνα του δίσκου είναι 10000 m. Το εύρος ζώνης της μετάδοσης της κατερχόμενης ζεύξης έχει οριστεί σε $BW = 300$ kHz και η ισχύς του **AWGN** ορίζεται σε $\sigma^2 = -174 + 10\log_{10}(BW)$ dBm. Η πυκνότητα UAV $\lambda = 1/(500^2\pi)$. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τα σενάρια LoS και NLoS υποδεικνύονται από την παράμετρο διαλείψεων Nakagami-m, όπου $m = 1$ για σενάρια NLoS (Rayleigh) και $m > 1$ για σενάρια LoS. Χωρίς απώλεια γενικότητας, χρησιμοποιείται $m = 2$ για να αναπαραστηθεί το σενάριο LoS σε όλη την ενότητα.

4.4.1 Στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη

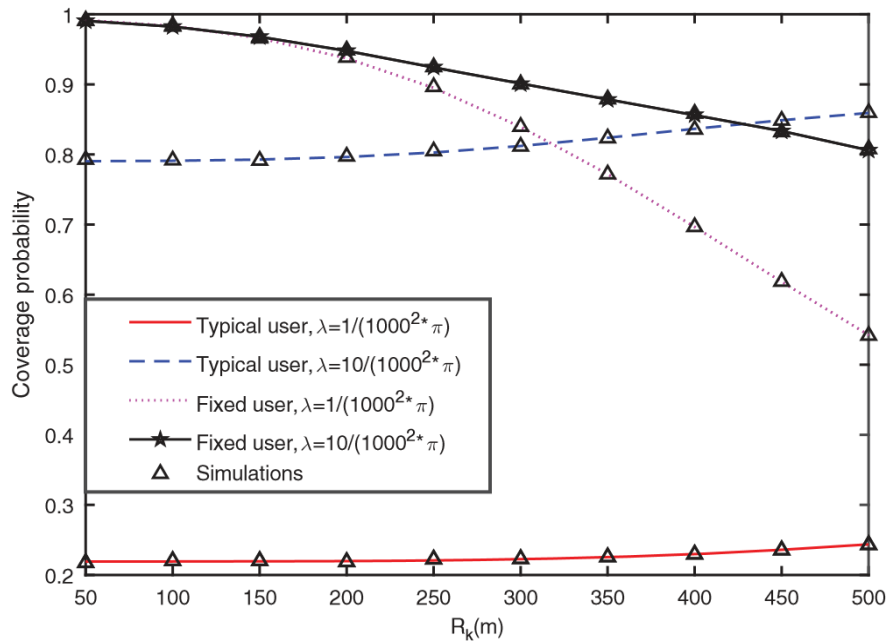
Αρχικά, αξιολογείται η απόδοση κάλυψης των χρηστών NOMA κατερχόμενης ζεύξης στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη. Στην **Εικόνα 4.3(a)** [113], για ένα δεδομένο σύνολο της απόστασης των σταθερών χρηστών, οι συμπαγείς καμπύλες και οι διακεκομμένες καμπύλες είναι η πιθανότητα κάλυψης για τυπικούς χρήστες και σταθερούς χρήστες, αντίστοιχα. Μπορούμε να δούμε ότι, καθώς αυξάνεται η ισχύς του UAV, εμφανίζονται ανώτατα όρια κάλυψης, τα οποία είναι η μέγιστη πιθανότητα κάλυψης για τα προτεινόμενα δίκτυα, τόσο των τυπικών όσο και των σταθερών χρηστών NOMA. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, καθώς αναπτύσσεται το υψηλότερο επίπεδο ισχύος των UAV παρεμβολών, το λαμβανόμενο SINR μειώνεται δραματικά. Παρατηρείται ότι, καθώς αυξάνεται ο ατελής συντελεστής SIC β , η πιθανότητα κάλυψης των τυπικών χρηστών μειώνεται, γεγονός που δείχνει ότι η απόδοση της επικοινωνίας UAV με τη βοήθεια NOMA μπορεί να βελτιωθεί αποτελεσματικά μειώνοντας τον ατελή συντελεστή SIC. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του $\beta = 23$, η υπολειπόμενη ισχύς από ατελές SIC είναι υψηλότερη από την ισχύ των κοντινών χρηστών, π.χ. $\alpha^2_w < \alpha^2_v\beta$.



Εικόνα 4.3 Πιθανότητα κάλυψης των ζευγαρωμένων χρηστών NOMA έναντι της ισχύος του UAV στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη, με ρυθμό στόχο $R_t = 1$ BPCU και $R_f = 0,5$ BPCU. Η οριζόντια απόσταση του σταθερού χρήστη είναι 300 m. Τα ακριβή αποτελέσματα του NOMA υπολογίζονται από την Εξίσωση (4.18). (a) Πιθανότητα κάλυψης στο σενάριο NLoS με διαφορετικούς εκθέτες απωλειών διαδρομής, όπου οι παράμετροι εξασθένησης ορίζονται σε $m = 1$ και $m_I = 1$. (b) Πιθανότητα κάλυψης και στα δύο σενάρια NLoS και LoS, όπου οι παράμετροι εξασθένησης είναι $m = 2$ και $m_I = 1$. Ο εκθέτης απώλειας διαδρομής του επιθυμητού συνδέσμου έχει οριστεί σε $\alpha = 3$ [113].

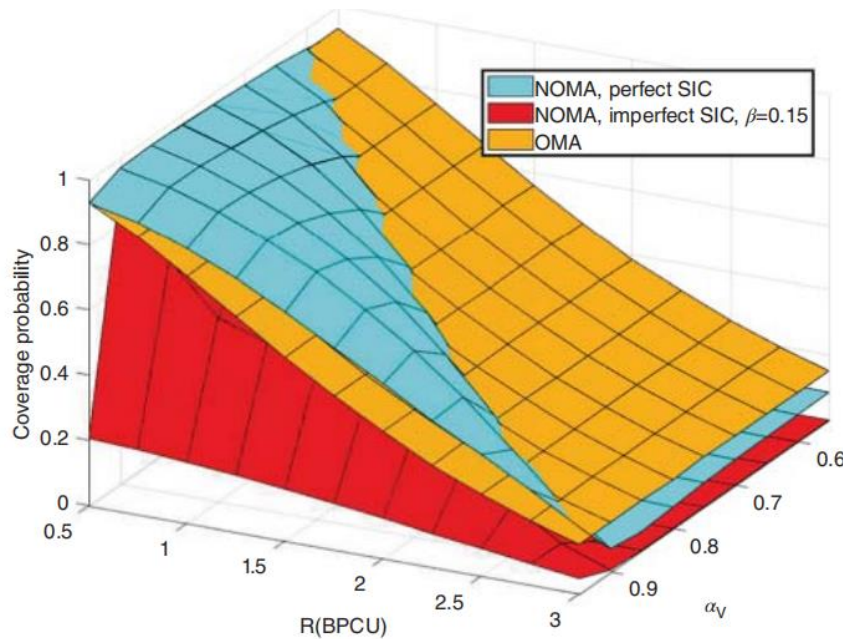
Φαίνεται ότι, στην περίπτωση των $\beta = 0, 0.1$ και 0.3 , οι πιθανότητες κάλυψης των σταθερών χρηστών είναι οι ίδιες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ατελής SIC είναι το κρίσιμο στοιχείο των τυπικών χρηστών, ενώ η ατελής SIC δεν έχει καμία επίδραση για σταθερούς χρήστες στην περίπτωση του $R_f = 0,5$ BPCU (bits ανά χρήση καναλιού). Όπως φαίνεται στην εικόνα, η διακοπή λειτουργίας των τυπικών χρηστών συμβαίνει πιο συχνά από ό,τι για τους σταθερούς χρήστες. Αυτό οφείλεται στην επιλογή των συντελεστών κατανομής ισχύος και στην απόσταση του σταθερού χρήστη. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τα αναλυτικά αποτελέσματα ταιριάζουν απόλυτα στην **Εικόνα 4.3(a)** [113], το οποίο δείχνει την ακρίβεια των αναπτυγμένων αναλυτικών αποτελεσμάτων.

Η **Εικόνα 4.3(b)** [113] δείχνει την πιθανότητα κάλυψης που επιτυγχάνεται από τυπικούς χρήστες και στα δύο σενάρια NLoS και LoS. Προκειμένου να απεικονιστεί η απόδοση που επηρεάζεται από τη μετάδοση LoS, η περίπτωση NLoS φαίνεται επίσης στην εικόνα ως σημείο αναφοράς για σύγκριση. Στην **Εικόνα 4.3(b)** [113], μπορούμε να δούμε ότι η υψηλότερη παράμετρος διαλείψεων m θα είχε ως αποτέλεσμα μειωμένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για διαφορετικά επίπεδα ισχύος UAV και διαφορετικούς ατελείς συντελεστές SIC. Αυτό συμβαίνει επειδή η σύνδεση LoS μεταξύ του UAV και των χρηστών παρέχει υψηλότερο επίπεδο ισχύος λήψης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το προτεινόμενο δίκτυο δεν απαιτεί μεγάλη ισχύ εκπομπής για να αυξηθεί η πιθανότητα κάλυψης λόγω του γεγονότος ότι το ανώτατο όριο κάλυψης εμφανίζεται σε καθεστώς υψηλού SNR.



Εικόνα 4.4 Πιθανότητα κάλυψης της στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη έναντι της απόστασης σταθερών χρηστών, με ρυθμό στόχο $R_t = 1$ BPCU και $R_f = 0,5$ BPCU. Ο εκθέτης απώλειας διαδρομής είναι σταθερός στο $\alpha = 3$ και η ισχύς του UAV ορίζεται στα -30 dBm [113].

Στην **Εικόνα 4.4** [113], μελετάται η επίδραση διαφορετικών επιλογών πυκνότητας UAV και απόστασης σταθερών χρηστών. Όπως φαίνεται από την εικόνα, η αύξηση της απόστασης των σταθερών χρηστών θα μειώσει την πιθανότητα κάλυψης για τους σταθερούς χρήστες, ενώ η πιθανότητα κάλυψης των τυπικών χρηστών αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απόσταση των σταθερών χρηστών έχει επίδραση στη συσχέτιση χρηστών για τυπικούς χρήστες. Για σταθερούς χρήστες, η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται δραματικά όταν αυξάνεται η απόσταση. Από την άλλη πλευρά, για τις διακεκομμένες και με αστέρι καμπύλες, όπου η πυκνότητα των UAV είναι 10 φορές υψηλότερη από ό,τι για τις συμπαγείς και διακεκομμένες καμπύλες, η πιθανότητα κάλυψης των τυπικών χρηστών NOMA στην περίπτωση υψηλής UAV πυκνότητας είναι πολύ μεγαλύτερη από την περίπτωση της χαμηλής UAV πυκνότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αριθμός των UAV είναι αυξημένος, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της απόστασης των συνδεδεμένων UAV. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο διελεύσεις για σταθερούς χρήστες, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει μια βέλτιστη απόσταση σταθερών χρηστών για δεδομένη πυκνότητα UAV.

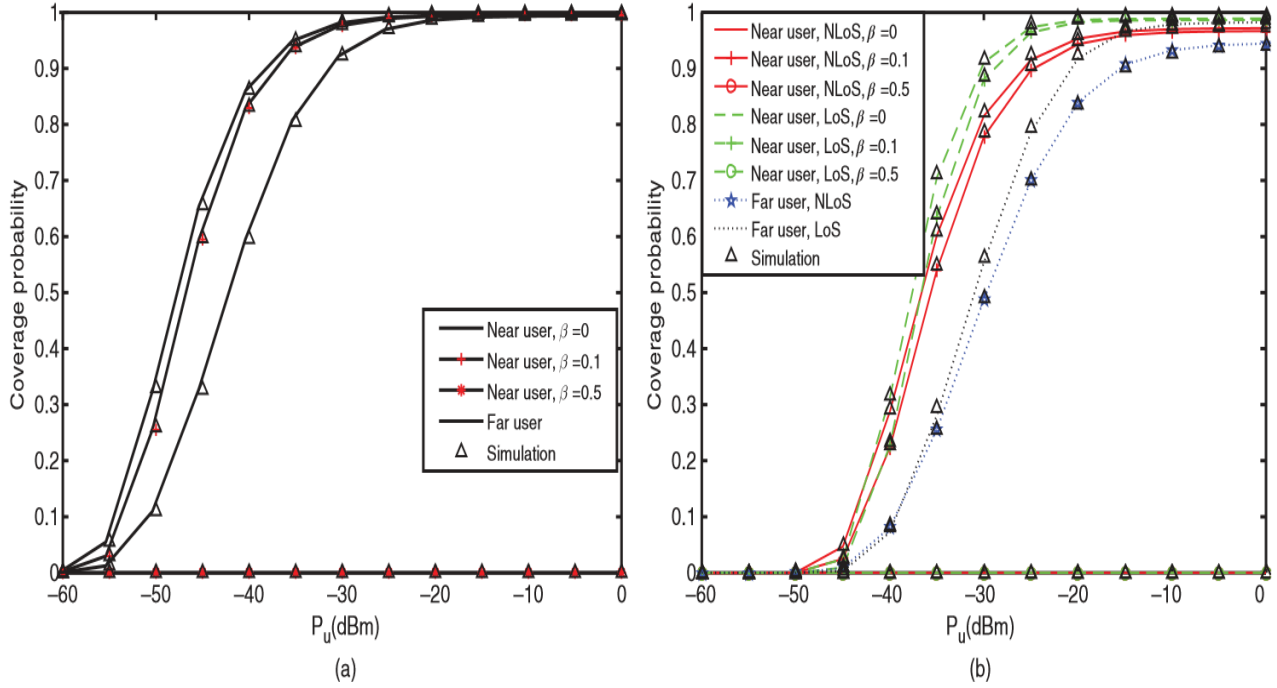


Εικόνα 4.5 Πιθανότητα κάλυψης τυπικών χρηστών έναντι του στοχευόμενου ρυθμού $R_t = R$ BPCU και του συντελεστή κατανομής ισχύος α_v , με τον ατελή συντελεστή SIC $\beta = 0$ και $0,15$. Ο ρυθμός στόχος των σταθερών χρηστών $R_f = 0,5$ BPCU και η οριζόντια απόσταση του σταθερού χρήστη είναι 300 m. Η ισχύς εκπομπής των UAV είναι σταθερή στα -30 dBm με εκθέτη απώλειας διαδρομής $\alpha = 3$. Οι παράμετροι εξασθένησης ορίζονται σε $m = 3$ και $m_I = 2$ [113].

Στη συνέχεια, η **Εικόνα 4.5** [113] απεικονίζει την πιθανότητα κάλυψης των ζευγαρωμένων χρηστών NOMA στη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη έναντι του ρυθμού-στόχου R και του παράγοντα κατανομής ισχύος α_v . Παρατηρείται ότι η πιθανότητα κάλυψης είναι μηδενική στην περίπτωση ακατάλληλων ποσοστών στόχου και συντελεστών κατανομής ισχύος. Η πιθανότητα κάλυψης των τυπικών χρηστών στο OMA απεικονίζεται επίσης, γεγονός που υποδεικνύει ότι το NOMA είναι σε θέση να ξεπεράσει το OMA για τους κατάλληλους συντελεστές κατανομής ισχύος και τους ρυθμούς στόχους των ζευγαρωμένων χρηστών NOMA. Παρατηρείται επίσης, ότι το NOMA δεν μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση από το OMA στην περίπτωση του $\beta = 0,15$ για τη στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη. Αυτό δείχνει ότι ένα υβριδικό δίκτυο UAV με τη βοήθεια NOMA/OMA μπορεί να είναι μια καλή λύση σε περίπτωση κακής ποιότητας SIC. Το UAV θα μπορούσε να επιλέξει έξυπνα τις τεχνικές πρόσβασης για τη βελτίωση της πιθανότητας κάλυψης του συστήματος.

4.4.2 Στρατηγική με επίκεντρο το UAV

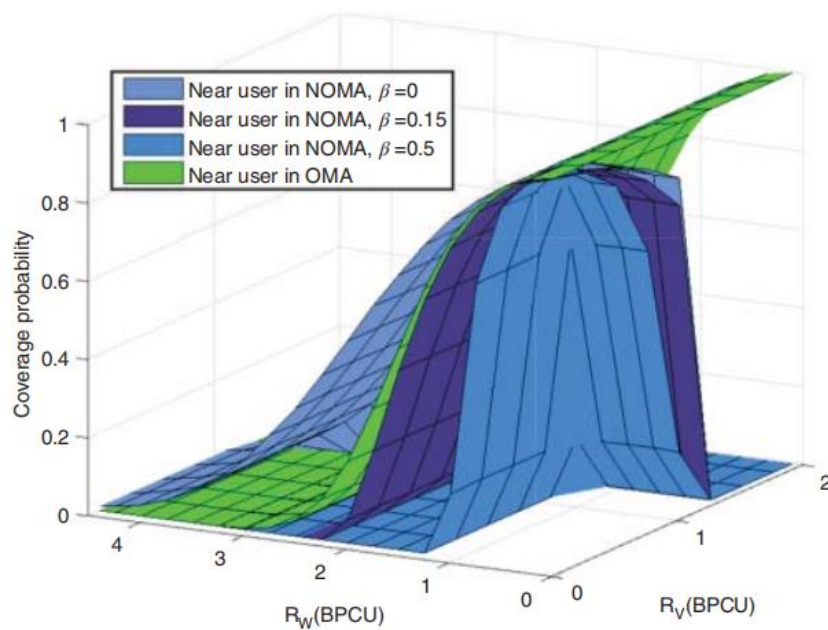
Στη στρατηγική με επίκεντρο το UAV, το $\varepsilon = 0,1$ m χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της παρεμβολής που λαμβάνεται από το UAV που βρίσκεται στην απόσταση R.



Εικόνα 4.6 Πιθανότητα κάλυψης των ζευγαρωμένων χρηστών NOMA στη στρατηγική με επίκεντρο τα UAV έναντι της ισχύος εκπομπής, με ρυθμούς στόχου $R_w = 1,5$ BPCU και $R_v = 1$ BPCU, αντίστοιχα. (a) Πιθανότητα κάλυψης στο σενάριο NLoS, όπου οι παράμετροι εξασθένησης ορίζονται σε $m = 1$ και $m_I = 1$. Ο εκθέτης απώλειας διαδρομής ορίζεται σε $\alpha = 3$. (b) Πιθανότητα κάλυψης και στα δύο σενάρια NLoS και LoS με διαδρομή- εκθέτης απώλειας $\alpha = 3,5$, όπου οι παράμετροι διαλείψεων ορίζονται σε $m = 2$ και $m_I = 1$ [113].

Στη συνέχεια, αξιολογείται η απόδοση των χρηστών κατερχόμενης ζεύξης στην συγκεκριμένη στρατηγική. Στην **Εικόνα 4.6(a)** και **4.6(b)** [113], μελετάται ο αντίκτυπος της στρατηγικής με επίκεντρο το UAV με τη χρήση NOMA στην πιθανότητα κάλυψης. Οι στοχευόμενοι ρυθμοί των κοντινών χρηστών και των μακρινών χρηστών έχουν οριστεί σε $R_w = 1,5$ BPCU και $R_v = 1$ BPCU, αντίστοιχα. Η συμπαγής και η διακεκομμένη καμπύλη είναι η πιθανότητα κάλυψης των κοντινών χρηστών και των μακρινών χρηστών, αντίστοιχα. Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο εμφανίζεται στη στρατηγική με επίκεντρο τα UAV, δηλαδή ότι, στην περίπτωση του $\beta = 0.5$, οι πιθανότητες κάλυψης των κοντινών χρηστών είναι όλες μηδενικές, πράγμα που δείχνει ότι η μετάδοση απέτυχε. Αυτό οφείλεται και πάλι στο γεγονός ότι $\alpha^2_w - \beta\alpha^2_{v\epsilon_w} < 0$.

Συγκρίνοντας την **Εικόνα 4.6(a)** και **4.6(b)** [113], μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η επίδραση της παραμέτρου εξασθένησης m στην πιθανότητα κάλυψης είναι επίσης σημαντική, γεγονός που οφείλεται στο γεγονός ότι το επίπεδο ισχύος που λαμβάνεται είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση μεγαλύτερης τιμής του M . Και πάλι, μπορούμε να δούμε ότι η πιθανότητα κάλυψης είναι επίσης μία για τους κοντινούς χρήστες στην περίπτωση του $\beta=0,5$, κάτι που δείχνει ότι ο σύνδεσμος LoS δεν έχει καμία επίδραση. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η πιθανότητα κάλυψης της στρατηγικής με επίκεντρο τον χρήστη είναι πολύ μεγαλύτερη από ό,τι για τη στρατηγική με επίκεντρο το UAV στην περίπτωση του $\beta = 0,5$, γεγονός που δείχνει ότι η στρατηγική με επίκεντρο το UAV είναι πιο επιρρεπής σε έναν ατελές παράγοντα SIC απ'ότι η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη.



Εικόνα 4.7 Πιθανότητα κάλυψης του κοντινού χρήστη έναντι του στοχευμένου ρυθμού. Η ισχύς μετάδοσης των UAV είναι σταθερή στα -40 dBm. Οι παράμετροι διαλείψεων ορίζονται σε $m = 3$ και $m_I = 2$ [113].

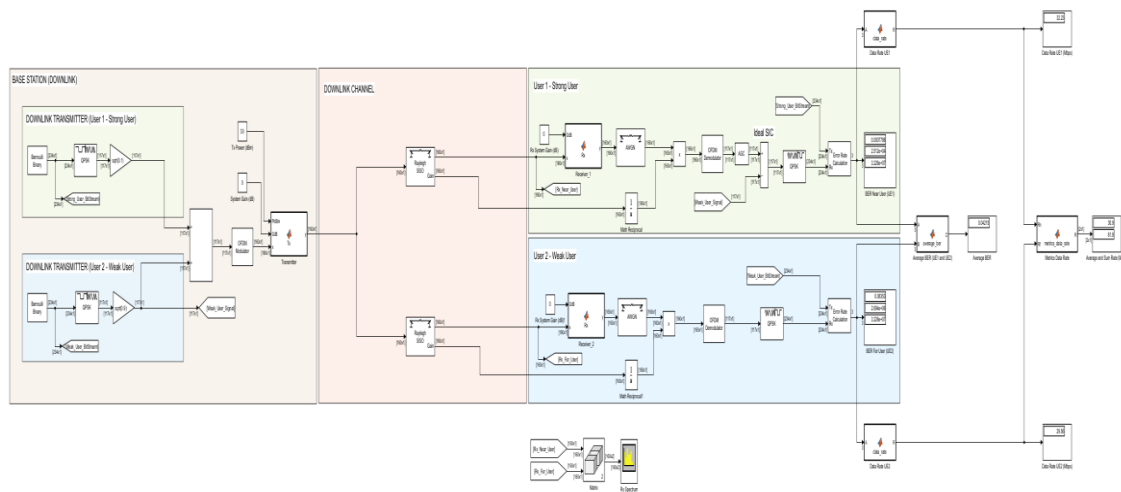
Η **Εικόνα 4.7** [113] απεικονίζει την πιθανότητα κάλυψης για τους κοντινούς χρήστες στην κεντρική στρατηγική UAV στις περιπτώσεις $\beta = 0$, $\beta = 0.1$ και $\beta = 0.5$. Μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι, αφενός, η ακατάλληλη κατανομή ισχύος θα έχει ως αποτέλεσμα η πιθανότητα κάλυψης να είναι πάντα μηδενική. Από την άλλη πλευρά, φαίνεται ότι, στην περίπτωση του $\beta > 0$, η πιθανότητα κάλυψης μειώνεται δραματικά όταν αυξάνεται ο ρυθμός στόχου, ο οποίος επαληθεύει ότι το υπόλειμμα SIC είναι η κυρίαρχη παρεμβολή στο NOMA. Προκειμένου να παρέχονται περισσότερες πληροφορίες, παρέχεται επίσης η κάλυψη ανά απόδοση του OMA στη στρατηγική με επίκεντρο το UAV. Στην περίπτωση που $\beta = 0$, το NOMA αποδίδει καλύτερα από το OMA, γεγονός που δείχνει ότι τα προτεινόμενα δίκτυα αποδεικνύονται αναλυτικά ότι είναι εφαρμόσιμα για επικοινωνίες UAV. Στην περίπτωση που $\beta = 0,15$, η απόδοση κάλυψης των κυψελοειδών δικτύων UAV με τη βοήθεια NOMA και OMA δείχνει στενή συμφωνία, γεγονός που υποδεικνύει επίσης ότι ένα υβριδικό δίκτυο UAV με τη βοήθεια NOMA/OMA μπορεί να είναι μια καλή λύση για στρατηγική με επίκεντρο το UAV.

5

Προσομοίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύγκριση των τεχνικών OMA (**OFDM** - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και Hybrid NOMA/OMA ως προς τις επιδόσεις του ρυθμού εσφαλμένων δυαδικών ψηφίων (**BER** - Bit error rate) και της ρυθμαπόδοσης δεδομένων (**data rate**), συναρτήσει της διαθέσιμης ισχύος εκπομπής. Η ισχύς εκπομπής στα διαφορετικά σενάρια κυμαίνεται από 0 έως 40 dBm. Σε κάθε σενάριο, υπολογίζονται και για τους 2 χρήστες (κοντινό και μακρινό) το BER, το data rate, το μέσο BER και το μέσο data rate του κάθε χρήστη, καθώς και ο αθροιστικός ρυθμός μετάδοσης του συστήματος (sum rate). Επιπλέον, για κάθε σενάριο παρουσιάζεται το κατειλημμένο εύρος ζώνης των υπό εξεταζόμενων τεχνικών. Συνολικά υλοποιήθηκαν τέσσερα (4) σενάρια προσομοίωσης στο περιβάλλον Simulink του MATLAB για τέσσερις ξεχωριστές περιπτώσεις: δύο (2) σενάρια NOMA, το ένα για μετάδοση μέσω επίγειου σταθμού βάσης (BS-NOMA) και το άλλο για μετάδοση μέσω UAV (UAV-NOMA), καθώς και δύο (2) αντίστοιχα σενάρια με χρήση της τεχνικής OFDM. Εν συνέχεια, παρουσιάζονται συγκρίσεις απόδοσης των συγκεκριμένων σεναρίων μέσω σχετικών γραφημάτων που προέκυψαν από την εκτέλεση της εκάστοτε προσομοίωσης. Τέλος, αποκλειστικά για την περίπτωση του UAV, υλοποιήθηκε ένα ξεχωριστό σενάριο, το οποίο σε πραγματικό χρόνο προσομοιώνει την κίνηση ενός UAV σε ένα φωτορεαλιστικό περιβάλλον.

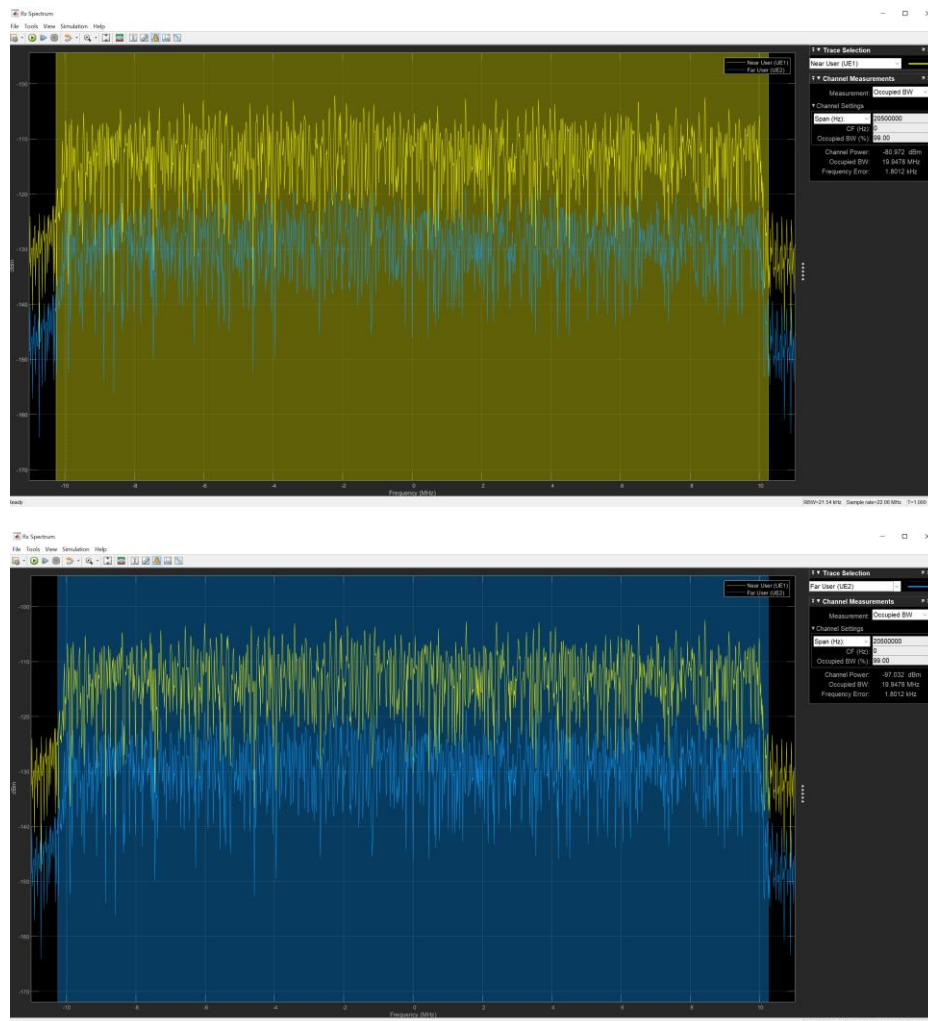
Σενάριο BS-NOMA



Εικόνα 5.1 Απεικόνιση του BS-NOMA σεναρίου για τους δύο χρήστες.

Στην **Εικόνα 5.1** απεικονίζεται το BS-NOMA σενάριο. Στην κατερχόμενη ζεύξη ο σταθμός βάσης μεταδίδει σε δυο διαφορετικούς χρήστες, τον κοντινό χρήστη και τον μακρινό χρήστη. Η διαδικασία της μετάδοσης αρχικά περιλαμβάνει την παραγωγή των δεδομένων (δυαδικών ψηφίων) μέσω του block της ψηφιακής γεννήτριας σημάτων Bernoulli και στη συνέχεια πραγματοποιείται διαμόρφωση αυτών με τη χρήση της τεχνικής τετραδικής διαμόρφωσης ολίσθησης φάσης (**QPSK** - Quadrature Phase Shift Keying). Αμέσως μετά, τίθεται ένας παράγοντας κατανομής ισχύος (power allocation) στον κάθε χρήστη ως εξής: 0.1 ή 10% της συνολικής διαθέσιμης ισχύος για τον κοντινό χρήστη και 0.9 ή 90% για τον μακρινό χρήστη. Έπειτα, τα σήματα των χρηστών αθροίζονται (superposition coding) και διαμορφώνονται κατά OFDM στο block του OFDM Modulator, όπου μετά εισάγονται στην συνάρτηση-block του πομπού για τη μετάδοση. Κατά τη διάρκεια της μετάδοσης στο κανάλι, εφαρμόζεται το φαινόμενο των διαλείψεων Rayleigh από το block Rayleigh SISO. Προχωρώντας, με τη συνάρτηση block που αναπαριστά την λειτουργία του δέκτη, λαμβάνονται τα σήματα των χρηστών. Ακολούθως, τα σήματα διέρχονται μέσα από ένα AWGN κανάλι και αποδιαμορφώνονται μέσω του OFDM Modulator block. Στον κοντινό χρήστη λαμβάνει χώρα μια παραπάνω λειτουργία από ότι στον μακρινό χρήστη, αυτή της διαδοχικής ακύρωσης των παρεμβολών SIC. Μέσω της SIC τεχνικής, αφαιρείται από το λαμβανόμενο σήμα στον ισχυρό χρήστη το σήμα του αδύναμου χρήστη, εφόσον το τελευταίο θεωρούμε ότι έχει εκτιμηθεί σωστά μέσω του λαμβανόμενου σήματος. Ισχυρός χρήστης θεωρείται ο κοντινός χρήστης, λόγω καλύτερου καναλιού, καθώς και μικρότερου παράγοντα power allocation (0.1 έναντι 0.9 του μακρινού χρήστη). Τα σήματα αποδιαμορφώνονται κατά QPSK και μέσω σχετικών block-συναρτήσεων υπολογίζονται: i) το BER, ii) το data rate, iii) το μέσο BER των χρηστών, iv) το μέσο data rate του κάθε χρήστη, καθώς και v) ο αθροιστικός ρυθμός μετάδοσης (sum rate).

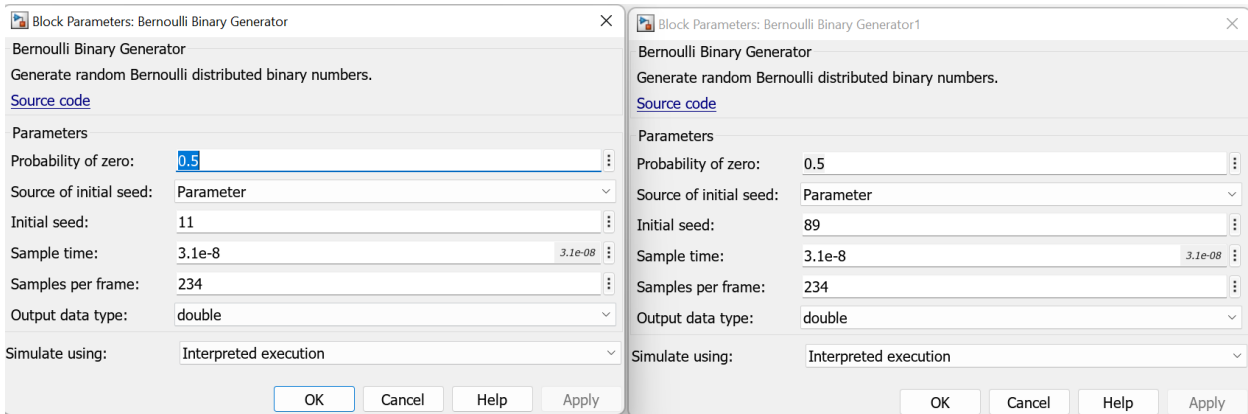
Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται οι μετρήσεις του φάσματος για τον κοντινό και τον μακρινό χρήστη μέσω του Spectrum Analyzer block.



Εικόνα 5.2 Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης για το σενάριο BS-NOMA για ισχύ εκπομπής 30 dBm για κοντινό χρήστη και για μακρινό χρήστη.

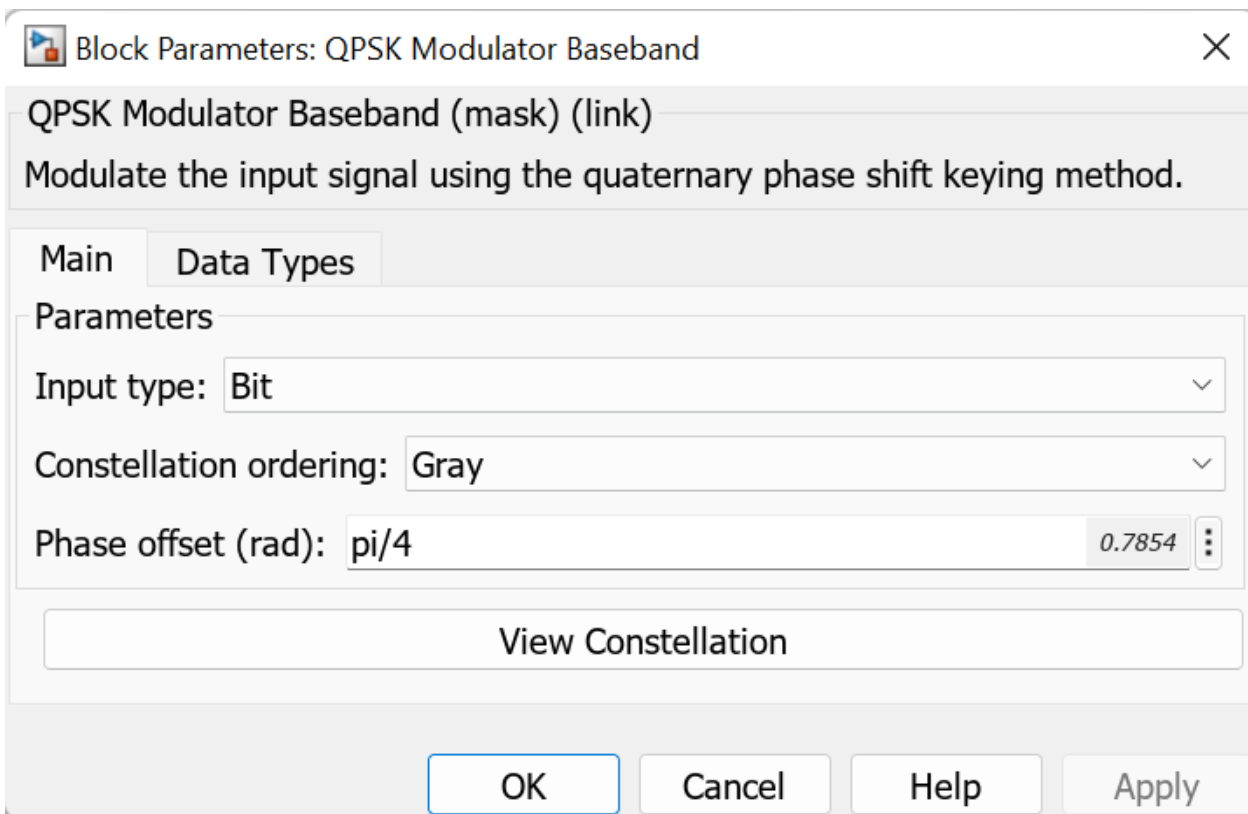
Στην **Εικόνα 5.2** παρατηρούμε ότι για ισχύ εκπομπής 30 dBm το κατειλημμένο εύρος ζώνης χρησιμοποιώντας την τεχνική NOMA κυμαίνεται στα 19,9478 MHz. Στον κοντινό χρήστη (UE1) το Channel Power είναι ίσο με -80,972 dBm. Αντίστοιχα, στον μακρινό χρήστη (UE2) το Channel Power είναι ίσο με -97,032 dBm.

Στην συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση των blocks για το συγκεκριμένο μοντέλο:



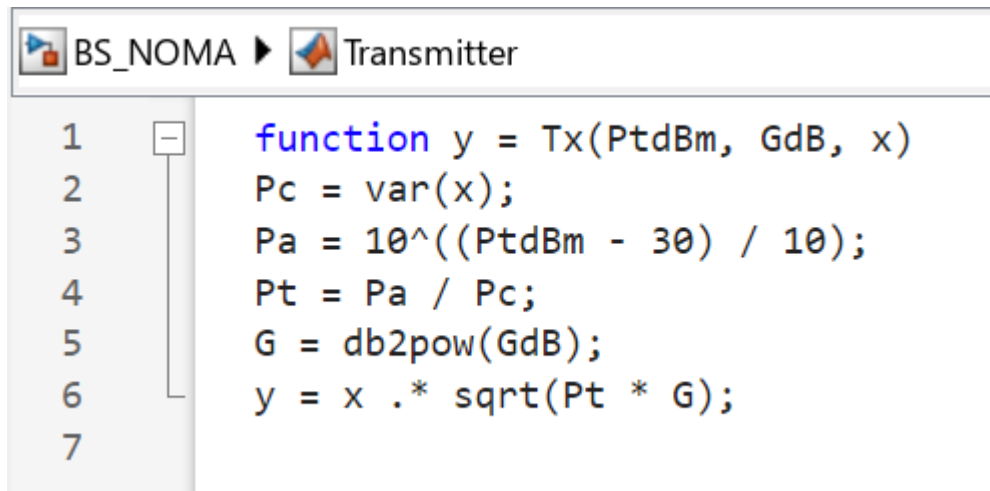
Εικόνα 5.3 Απεικόνιση των παραμέτρων του block για τον Bernoulli Binary Generator (BS-NOMA).

Στο block του Bernoulli Binary Generator ορίστηκε το Probability of zero στο 0.5, έτσι ώστε τα 0 και 1 να μπορούν να εμφανιστούν τυχαία και ισοπίθανα από την γεννήτρια Bernoulli. Το Sample time ορίστηκε 3.1e-8 seconds, ενώ το Samples per frame ορίστηκε στα 234. Το Sample Time αφορά τα δείγματα που λαμβάνονται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ενώ το Samples per frame αφορά τα δείγματα δυαδικών ψηφίων που λαμβάνονται και μεταδίδονται σε ένα πλαίσιο.



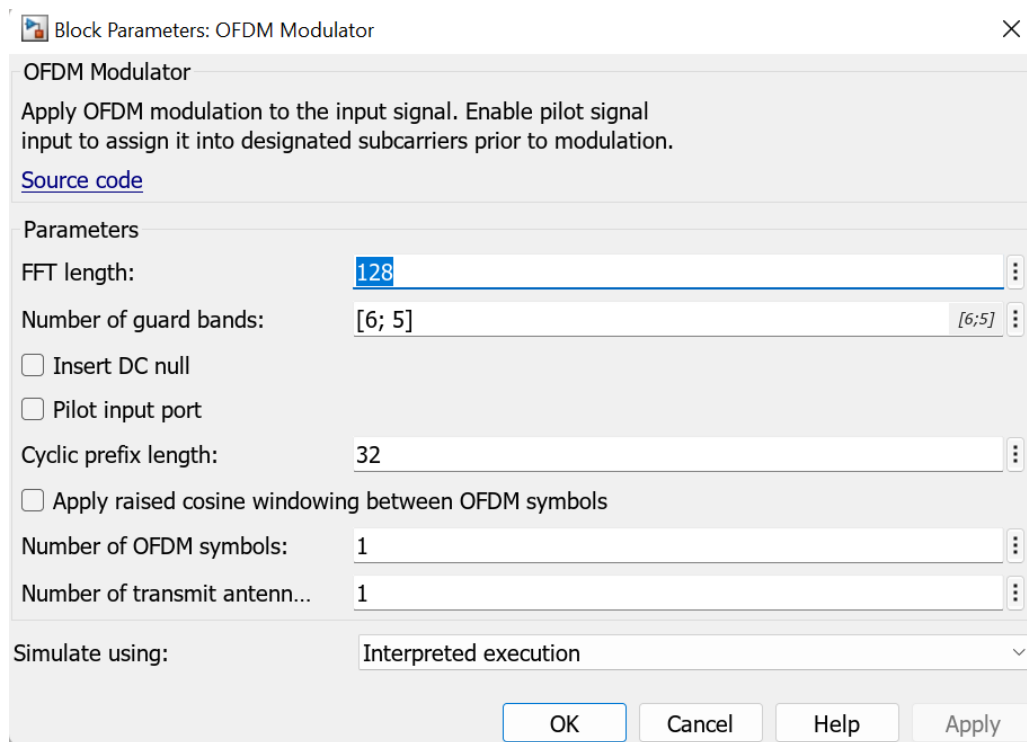
Εικόνα 5.4 Απεικόνιση των παραμέτρων του block για τον QPSK Modulator.

Ακολουθεί το block QPSK Modulator. Η QPSK είναι ένα είδος ψηφιακής διαμόρφωσης στην οποία μεταδίδονται δύο bit ταυτόχρονα (1 σύμβολο), επιλέγοντας μία από τις τέσσερις πιθανές μετατοπίσεις φάσης φορέα (0, 90, 180 ή 270 μοίρες) για QPSK- $\pi/2$. Αποτελείται από $M = 4$ σύμβολα και στέλνει 2 bit ανά σύμβολο ($N = \log_2 M = 2$). Το Phase offset στους QPSK modulators ορίστηκε $\pi / 4$.



Εικόνα 5.5 Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον Transmitter.

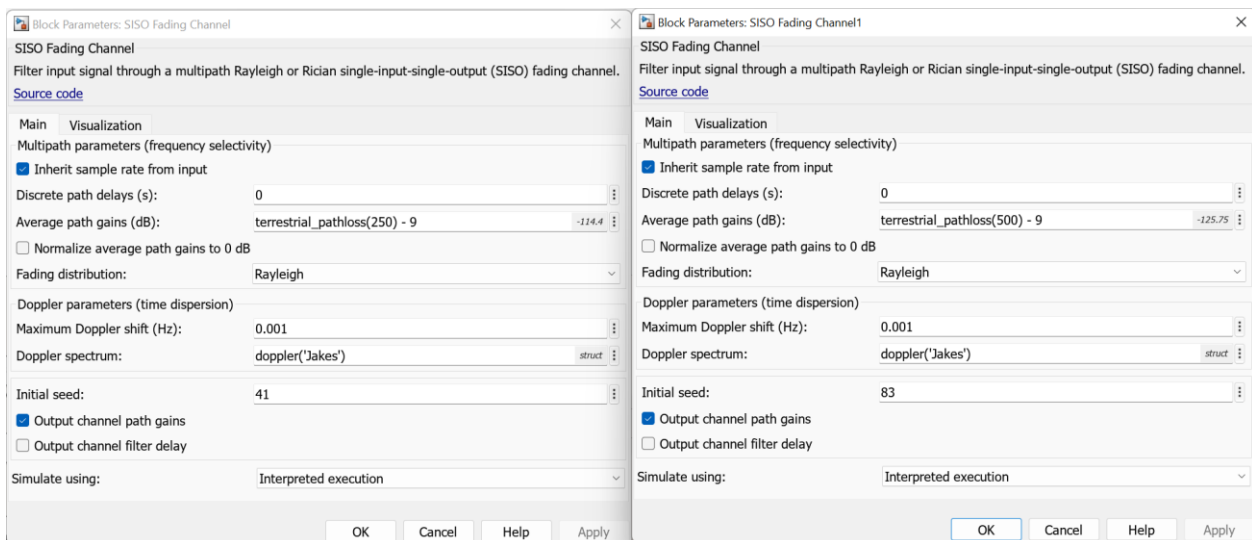
Ακολουθεί, ο κώδικας της συνάρτησης-block που υλοποιήθηκε για να αναπαραστήσει την λειτουργία του πομπού που δέχεται ως παραμέτρους την ισχύ εκπομπής σε dBm, το κέρδος σε dB, και την είσοδο x (σήμα) από τον OFDM modulator. Η συνάρτηση επιστρέφει στην έξοδο το σήμα πολλαπλασιασμένο με την τετραγωνική ρίζα του γινομένου της ισχύς εκπομπής με το κέρδος δεδομένου ότι εργαζόμαστε με το equivalent baseband σήμα (complex).



Εικόνα 5.6 Απεικόνιση της παραμετροποίησης του OFDM Modulator.

Στην συνέχεια ακολουθεί η παραμετροποίηση του OFDM Modulator:

Το FFT length έχει οριστεί με τιμή 128, ενώ το Cyclic prefix length με τιμή 32.



Εικόνα 5.7 Απεικόνιση της παραμετροποίησης του Rayleigh fading channel (Επίγειος σταθμός βάσης).

Προχωράμε στην απεικόνιση του Rayleigh fading channel.

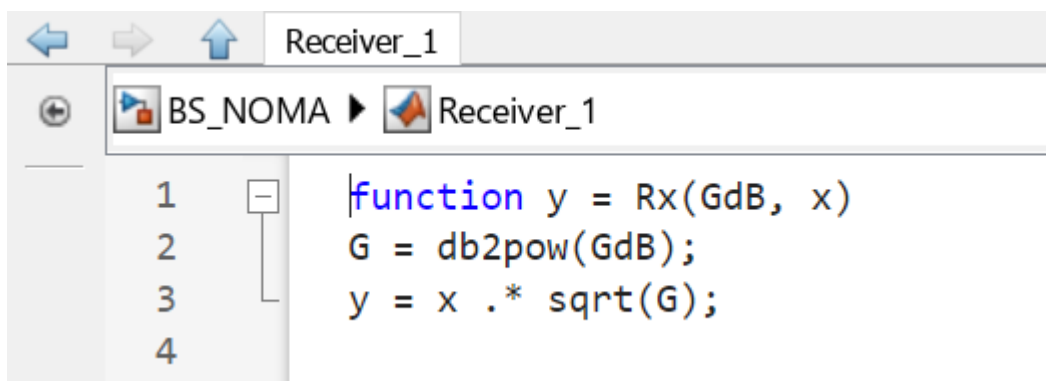
Παρατηρούμε, στο κανάλι Rayleigh ότι στα κέρδη των διαδρομών καλείται μια συνάρτηση με όνομα `terrestrial_pathloss()` η οποία δέχεται ως όρισμα την δισδιάστατη (2D) απόσταση για την περίπτωση του κάθε χρήστη. Συγκεκριμένα, για τις ανάγκες της προσομοίωσης έχει επιλέγει η απόσταση των 250m για τον κοντινό χρήστη και των 500m για τον μακρινό χρήστη. Παράλληλα λαμβάνεται υπόψη σκίαση με τιμή -9 dB για την περίπτωση της επίγειας μετάδοσης.

Ο κώδικας της συνάρτησης `terrestrial_pathloss()` για τον υπολογισμό των επίγειων απωλειών διαδρομής, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 5.8**.

```
1 function PLdB = terrestrial_pathloss(r)
2   r = r / 1000;
3   PLdB = -(128.1 + 37.7*log10(r));
4   end
5
```

Εικόνα 5.8 Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης `terrestrial_pathloss()`.

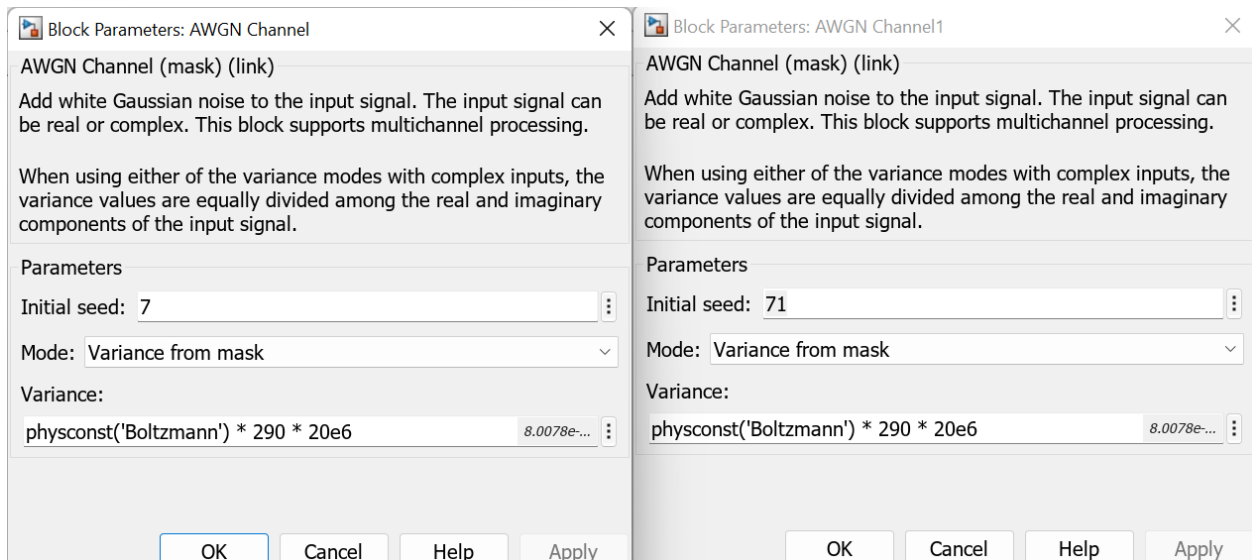
Ακολουθεί, ο κώδικας του της συνάρτησης-block που υλοποιήθηκε για να αναπαραστήσει την λειτουργία του δέκτη που δέχεται ως παραμέτρους το κέρδος σε dB, και την είσοδο x από το fading channel.



```
1 function y = Rx(GdB, x)
2   G = db2pow(GdB);
3   y = x .* sqrt(G);
4
```

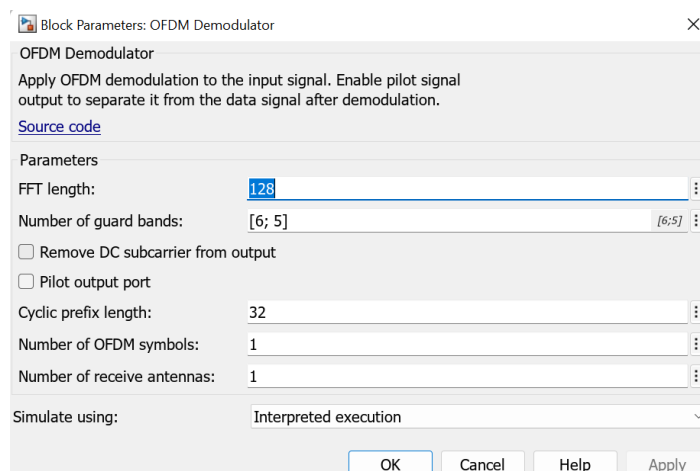
Εικόνα 5.9 Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον Receiver.

Ακολουθεί το block του AGWN θορύβου.

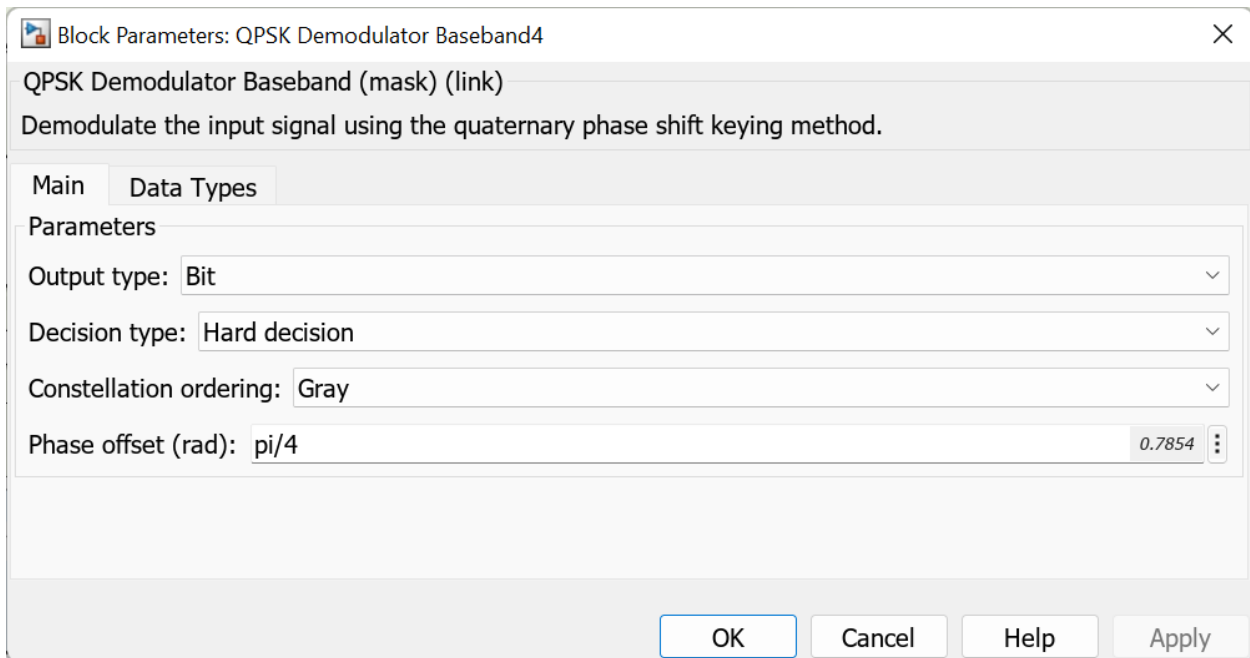


Εικόνα 5.10 Απεικόνιση της παραμετροποίησης για το block του AGWN θορύβου.

Ακολουθεί ο OFDM Demodulator, ο οποίος έχει τις ίδιες τιμές με τον OFDM Modulator.

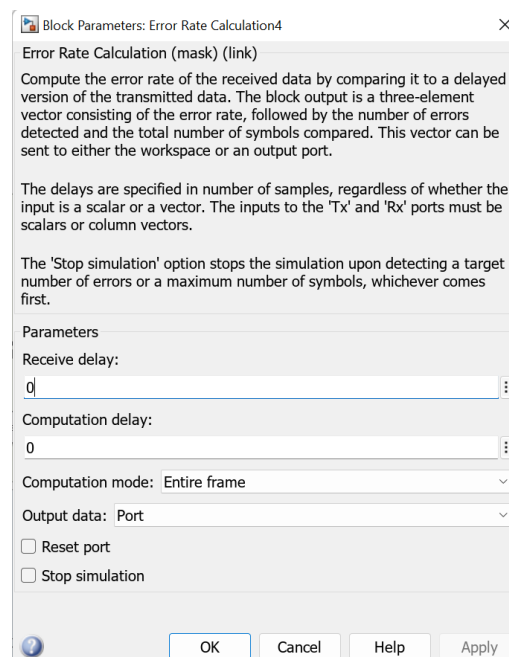


Εικόνα 5.11 Απεικόνιση της παραμετροποίησης για το block του OFDM Demodulator.



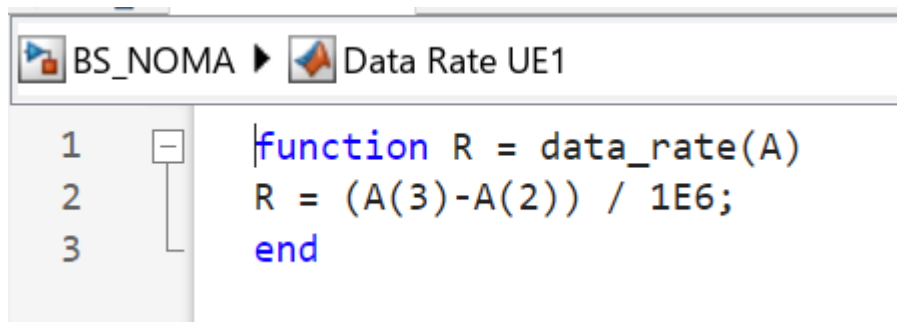
Εικόνα 5.12 Απεικόνιση της παραμετροποίησης για το block του QPSK Demodulator.

Ακολουθεί και ο QPSK Demodulator, με τις ίδιες ακριβώς τιμές που έχει ο QPSK Modulator.



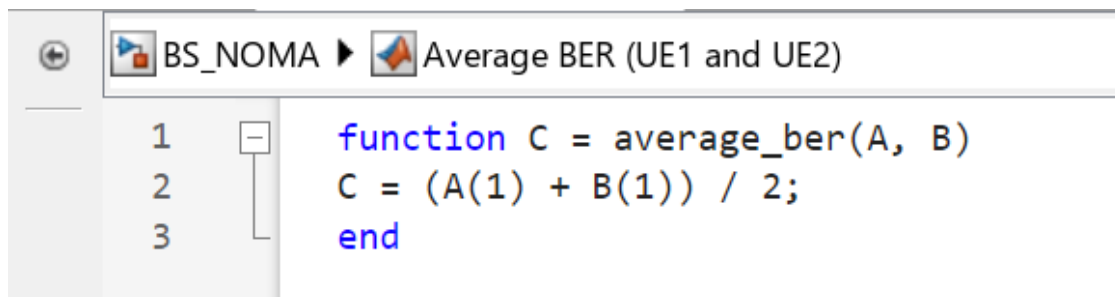
Εικόνα 5.13 Απεικόνιση της παραμετροποίησης για το block του Error rate calculation.

Ακολουθεί η παραμετροποίηση του block για το Error rate calculation.



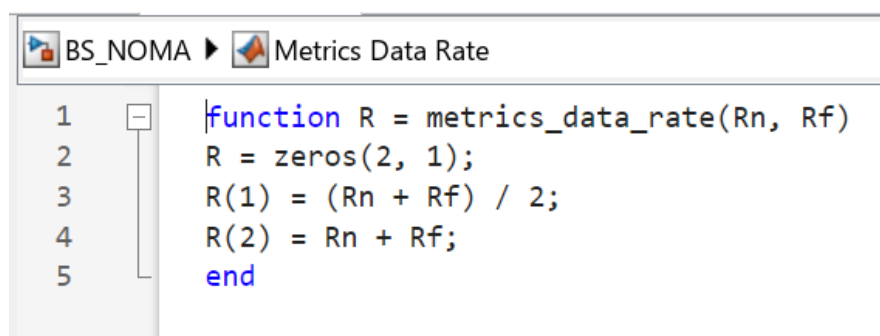
Εικόνα 5.14 Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον υπολογισμό του data rate.

Ακολουθεί, ο κώδικας της συνάρτησης-block που υλοποιήθηκε για τον υπολογισμό του data rate του κάθε χρήστη σε Mbps, με είσοδο του πίνακα που προκύπτει από τον πίνακα του BER display. Αφαιρούνται τα συνολικά bits με το πλήθος των εσφαλμένων bit και στην συνέχεια διαιρούνται με το 10^6 , έτσι ώστε το data rate να υπολογιστεί σε Mbps.



Εικόνα 5.15 Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον υπολογισμό του data rate.

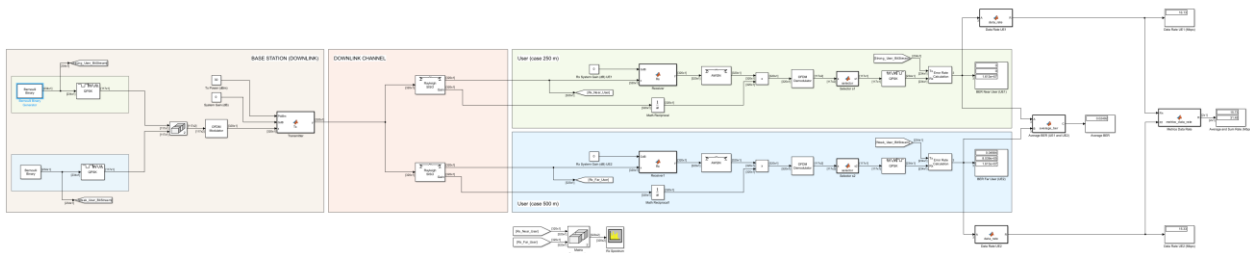
Ακολουθεί, ο κώδικας της συνάρτησης-block που υλοποιήθηκε για τον υπολογισμό του average BER, όπου τα ορίσματα A και B είναι οι τιμές των BER των 2 χρηστών.



Εικόνα 5.16 Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης-block για τον υπολογισμό του average data rate και του sum rate.

Ακολουθεί, ο κώδικας της συνάρτησης-block που υλοποιήθηκε για τον υπολογισμό του average data rate και του sum rate , όπου τα ορίσματα R_n και R_f είναι οι τιμές των data rate των 2 χρηστών.

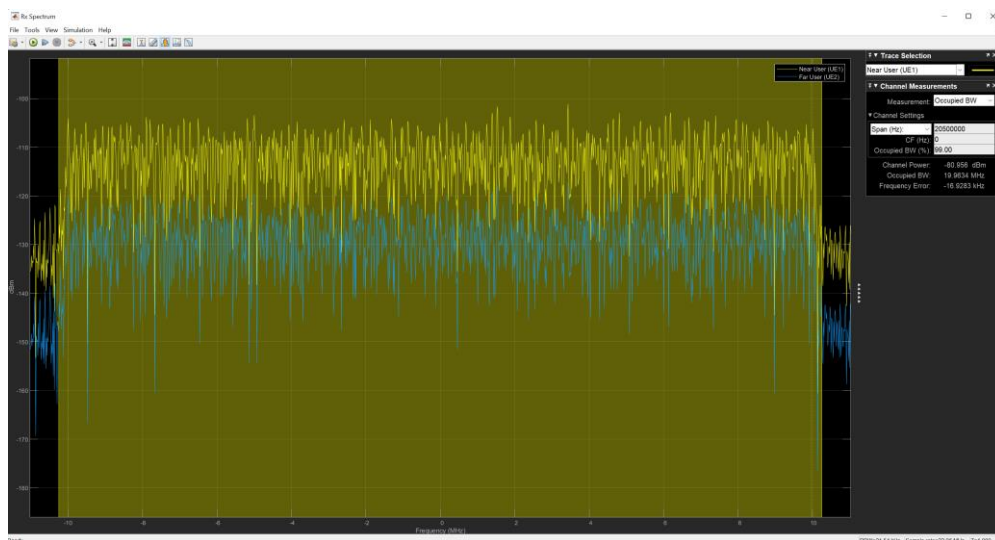
Σενάριο BS-OMA

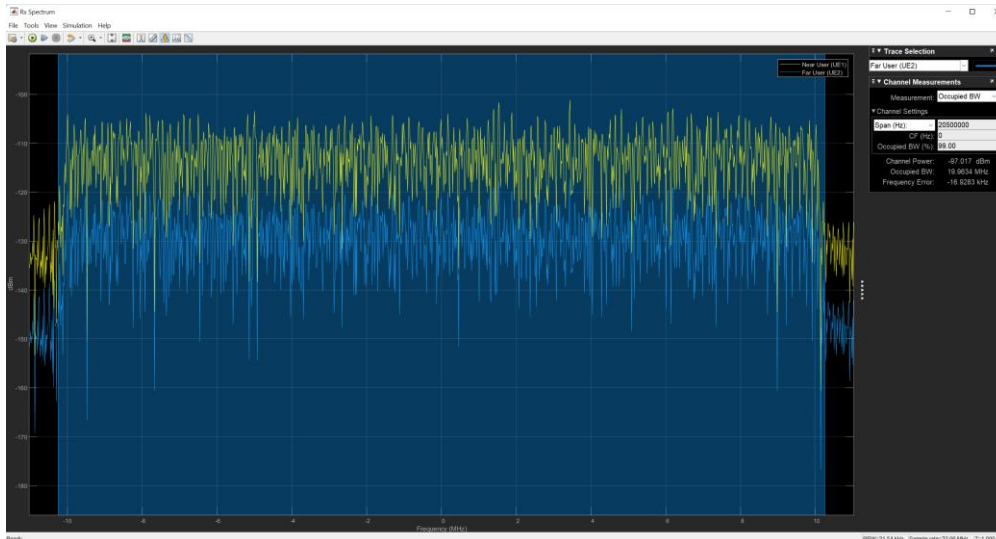


Εικόνα 5.17 Απεικόνιση του BS-OMA σεναρίου για τους 2 χρήστες.

Στην **Εικόνα 5.17** απεικονίζεται το BS-OMA σενάριο. Η διαδικασία μετάδοσης είναι παρόμοια με την τεχνική BS-NOMA αναφορικά πάντα με τους διαμορφωτές/αποδιαμορφωτές, τις μετρήσεις, καθώς και το κανάλι μετάδοσης και το θόρυβο. Η βασική διαφορά εντοπίζεται στο ότι μετά τη διαμόρφωση των σημάτων των χρηστών κατά QPSK, τα σήματα των χρηστών λαμβάνουν την ίδια ισχύ και χρησιμοποιούν διαφορετικό μέρος του διαθέσιμου φάσματος για τη μετάδοση των σημάτων τους. Εδώ να σημειωθεί πως το διαθέσιμο φάσμα έχει καταναμηθεί ισότιμα στους δύο χρήστες και όπως θα δούμε για δίκαιη σύγκριση των σχημάτων BS-NOMA και BS-OMA το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι μετρήσεις του φάσματος για τον κοντινό και τον μακρινό χρήστη στην περίπτωση της τεχνικής μετάδοσης BS-OMA.

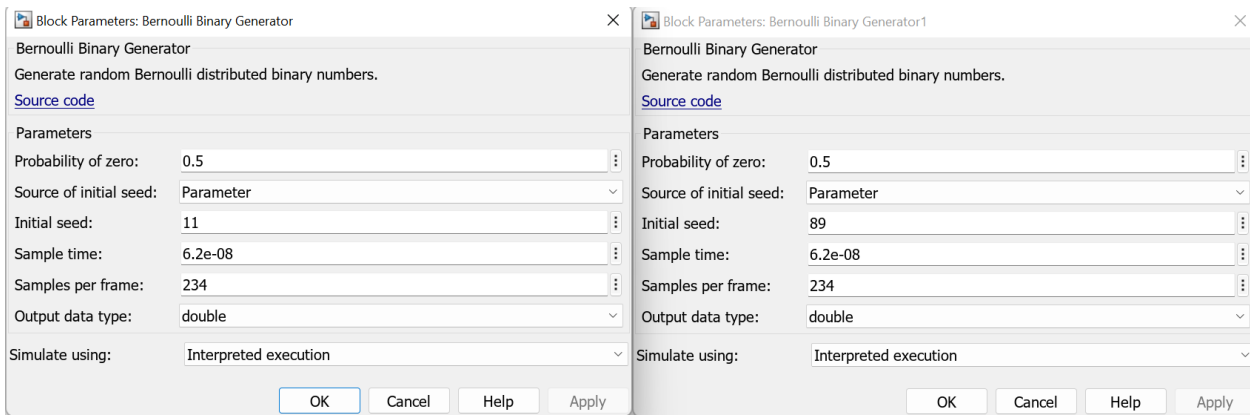




Εικόνα 5.18 Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης για το σενάριο BS-OMA για ισχύ εκπομπής 30 dBm για κοντινό χρήστη και για μακρινό χρήστη.

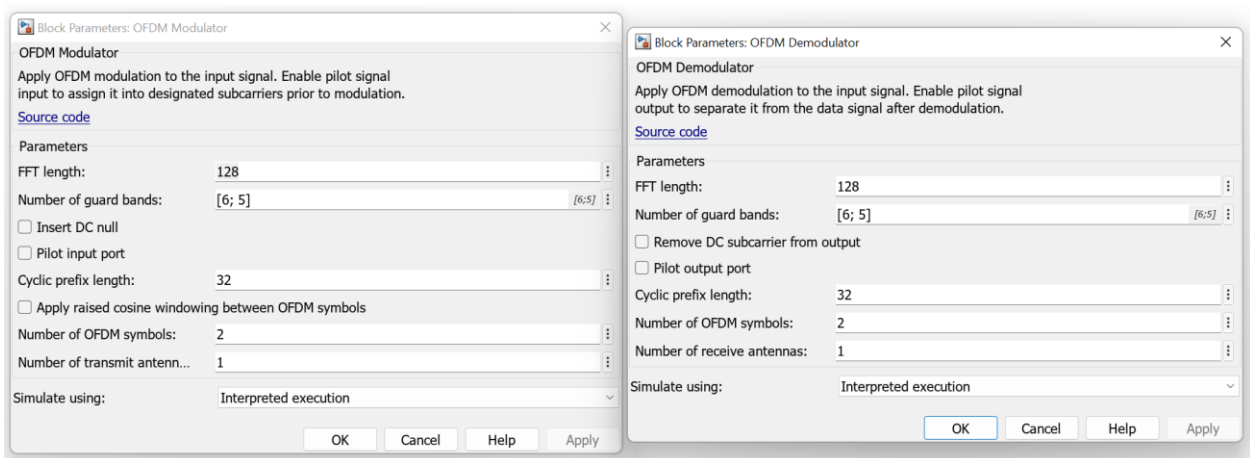
Στην **Εικόνα 5.18** παρατηρούμε ότι για ισχύ εκπομπής 30 dBm το κατειλημμένο εύρος ζώνης κυμαίνεται στα 19,9634 MHz. Αυτό που θα πρέπει να παρατηρήσουμε αρχικά είναι ότι το κατειλημμένο εύρος ζώνης στην περίπτωση της τεχνικής BS-OMA είναι ίδιο με αυτό της περίπτωσης όπου εξετάζεται το φάσμα της τεχνικής BS-NOMA. Όπως αναφέρθηκε, αυτό συμβαίνει διότι η τεχνική BS-NOMA χρησιμοποιεί το ίδιο εύρος ζώνης με την τεχνική BS-OMA έτσι ώστε να διασφαλίζεται η δικαιοσύνη για τη σύγκριση των δύο τεχνικών. Υπενθυμίζοντας τη λειτουργία των δύο τεχνικών, στη BS-NOMA οι δύο χρήστες μοιράζονται το ίδιο εύρος ζώνης λαμβάνοντας διαφορετικά μέρη της διαθέσιμης ισχύος του σταθμού βάσης, ενώ στη τεχνική BS-OMA και οι δύο χρήστες απολαμβάνουν την ίδια ισχύ από το σταθμό βάσης με τη διαφορά ότι ο καθένας λαμβάνει το μισό εύρος ζώνης για μετάδοση (δηλαδή, έστω B το διαθέσιμο εύρος ζώνης, $B/2$ λαμβάνει ο κάθε χρήστης). Επιλέχθηκε μισό εύρος ζώνης $B/2$, να κατανέμεται σε κάθε χρήστη από το συνολικό (δηλαδή, $B=B/2 + B/2$), έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η δικαιοσύνη αναφορικά με τη μετάδοση των δεδομένων του εκάστοτε χρήστη. Από την **Εικόνα 5.18** θα πρέπει να παρατηρήσουμε επίσης ότι το Channel Power του κοντινού χρήστη (UE1) είναι ίσο με -80,956 dBm, ενώ για τον μακρινό χρήστη (UE2) το Channel Power είναι ίσο με -97,017 dBm.

Στην συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση των blocks (όπου διαφέρουν οι παραμετροποιήσεις) για το συγκεκριμένο μοντέλο:



Εικόνα 5.19 Απεικόνιση των παραμέτρων του block για τον Bernoulli Binary Generator (OMA).

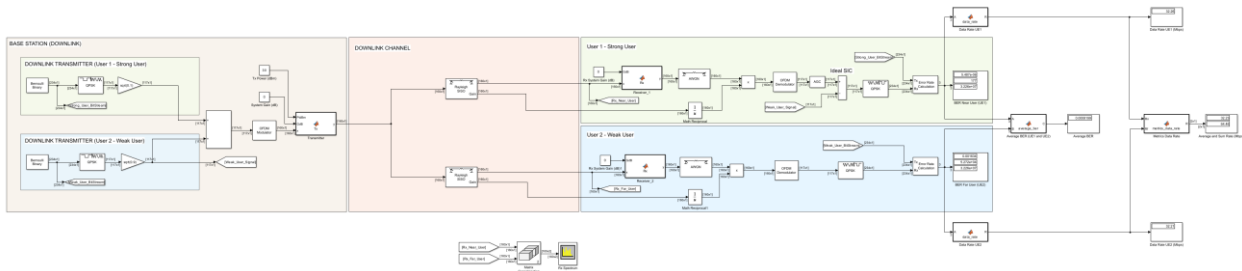
Παρατηρούμε ότι το Sample time στην Bernoulli του BS-OMA είναι $6.2e-8$, δηλαδή διπλάσια τιμή από την περίπτωση του BS-NOMA για να διασφαλίζεται η δικαιοσύνη μεταξύ της σύγκρισης των δύο τεχνικών. Αυτό οφείλεται επειδή στην περίπτωση του NOMA το εύρος ζώνης μοιράζεται και στους 2 χρήστες, ενώ στο OMA ο κάθε χρήστης λαμβάνει ένα μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης μετάδοσης.



Εικόνα 5.20 Απεικόνιση των παραμέτρων στους OFDM Modulators/Demodulators (OMA).

Παρομοίως, για τον παραπάνω λόγο, έχει τεθεί ο αριθμός των OFDM συμβόλων στους OFDM Modulators/Demodulators διπλάσιος στο OMA, έναντι του NOMA και κάθε χρήστης λαμβάνει ένα OFDM σύμβολο με μικρότερο εύρος ζώνης. Πρόκειται για θέμα υλοποίησης, έτσι ώστε να αποτυπωθεί σωστά η ανωτέρω περιγραφόμενη λειτουργία των δύο τεχνικών.

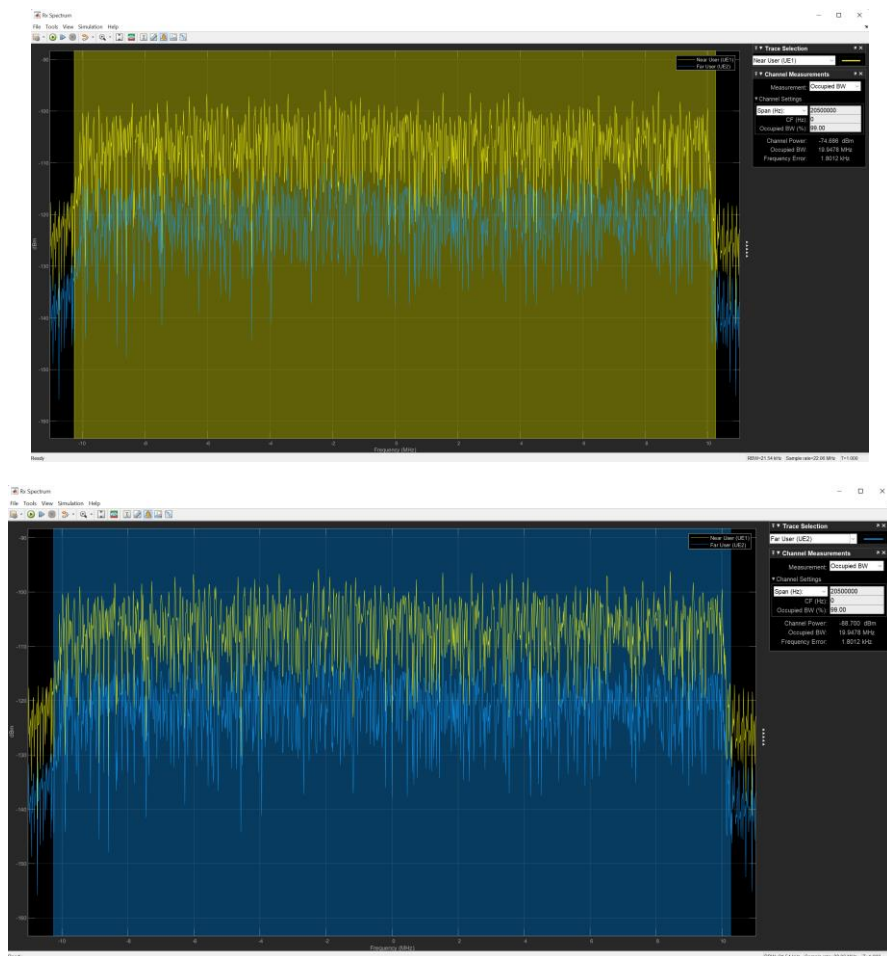
Σενάριο UAV-NOMA



Εικόνα 5.21 Απεικόνιση του UAV-NOMA σεναρίου για τους 2 χρήστες.

Στην **Εικόνα 5.21** απεικονίζεται το UAV-NOMA σενάριο, με τον κοντινό χρήστη να έχει power allocation factor 0.1 ή 10%, ενώ τον μακρινό χρήστη να έχει power allocation factor 0,9 ή 90% της συνολικής διαθέσιμης ισχύος του UAV.

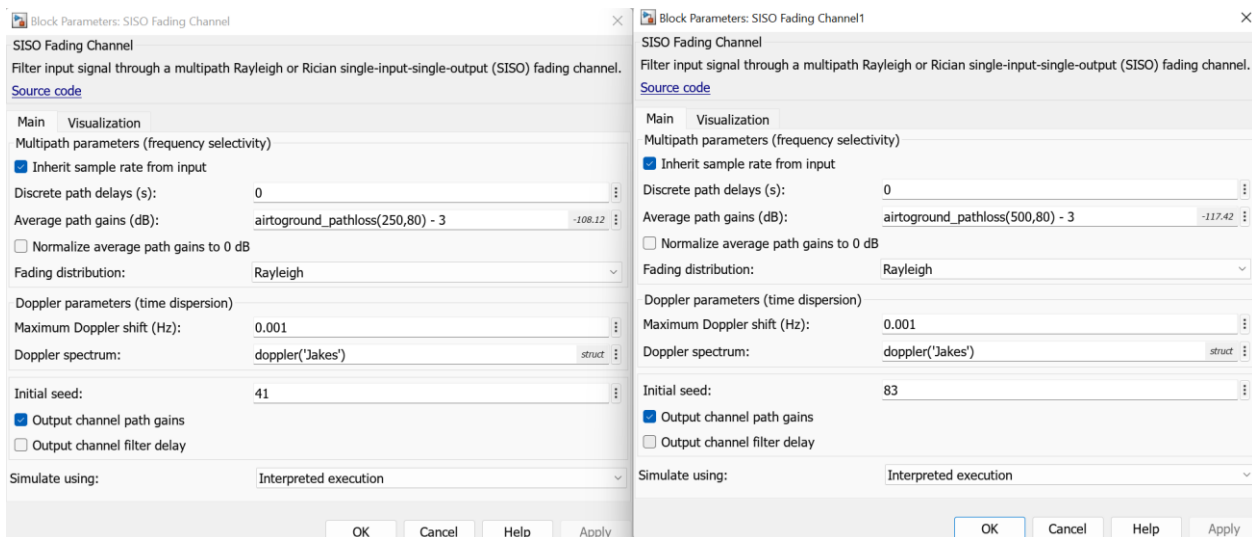
Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι μετρήσεις του φάσματος για τον κοντινό και τον μακρινό χρήστη.



Εικόνα 5.22 Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης για το σενάριο UAV-NOMA για ισχύ εκπομπής 30 dBm για κοντινό χρήστη και για μακρινό χρήστη.

Στην **Εικόνα 5.22** παρατηρούμε ότι για ισχύ λήψης 30 dBm το κατειλημμένο εύρος ζώνης κυμαίνεται στα 19,9478 MHz. Στον κοντινό χρήστη (UE1) το Channel Power είναι ίσο με -74,686 dBm. Αντίστοιχα, στον μακρινό χρήστη (UE2) το Channel Power είναι ίσο με -88,700 dBm.

Στην συνέχεια ακολουθεί μια ανάλυση των blocks (όπου διαφέρουν οι παραμετροποιήσεις) για το συγκεκριμένο μοντέλο:



Εικόνα 5.23 Απεικόνιση της παραμετροποίησης του Rayleigh fading channel (Εναέριος σταθμός βάσης).

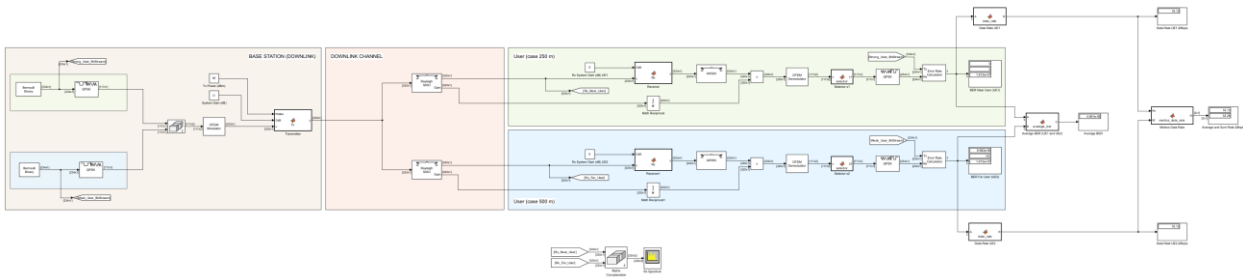
Η μοναδική διαφορά που υπάρχει στην παραμετροποίηση των blocks μεταξύ μοντέλου BS-NOMA και UAV-NOMA είναι η κλήση της συνάρτησης στο average pathloss του Rayleigh καναλιού. Για τον υπολογισμό των εναέριων απωλειών διαδρομής υλοποιήθηκε η συνάρτηση airtoground_pathloss() με ορίσματα την απόσταση του χρήστη και την απόσταση του UAV. Στην περίπτωση της εναέριας μετάδοσης, η σκίαση έχει ως παράμετρο την τιμή -3 εκφρασμένη σε λογαριθμική κλίμακα (dB).

Ο κώδικας της συνάρτησης airtoground_pathloss() για τον υπολογισμό των εναέριων απωλειών διαδρομής είναι ο εξής:

```
1 function PLdB = airtoground_pathloss(r, h)
2 c = physconst('lightspeed');
3 fd = 3e9;
4 a = 9.61;
5 b = 0.16;
6 d = sqrt((r.^2) + (h.^2));
7 theta = atan(h ./ r);
8 hNLoS = 20;
9 hLoS = 1;
10 PLoS = 1 ./ (1 + a .* (exp(-b .* ((180./pi) .* theta - a))));
11 PNLoS = 1 - PLoS;
12 PLdB = -(20 .* log10((4 .* pi .* fd .* d) ./ c) + PLoS .* hLoS + PNLoS .* hNLoS);
13 end
```

Εικόνα 5.24 Απεικόνιση του κώδικα της συνάρτησης airtoground_pathloss().

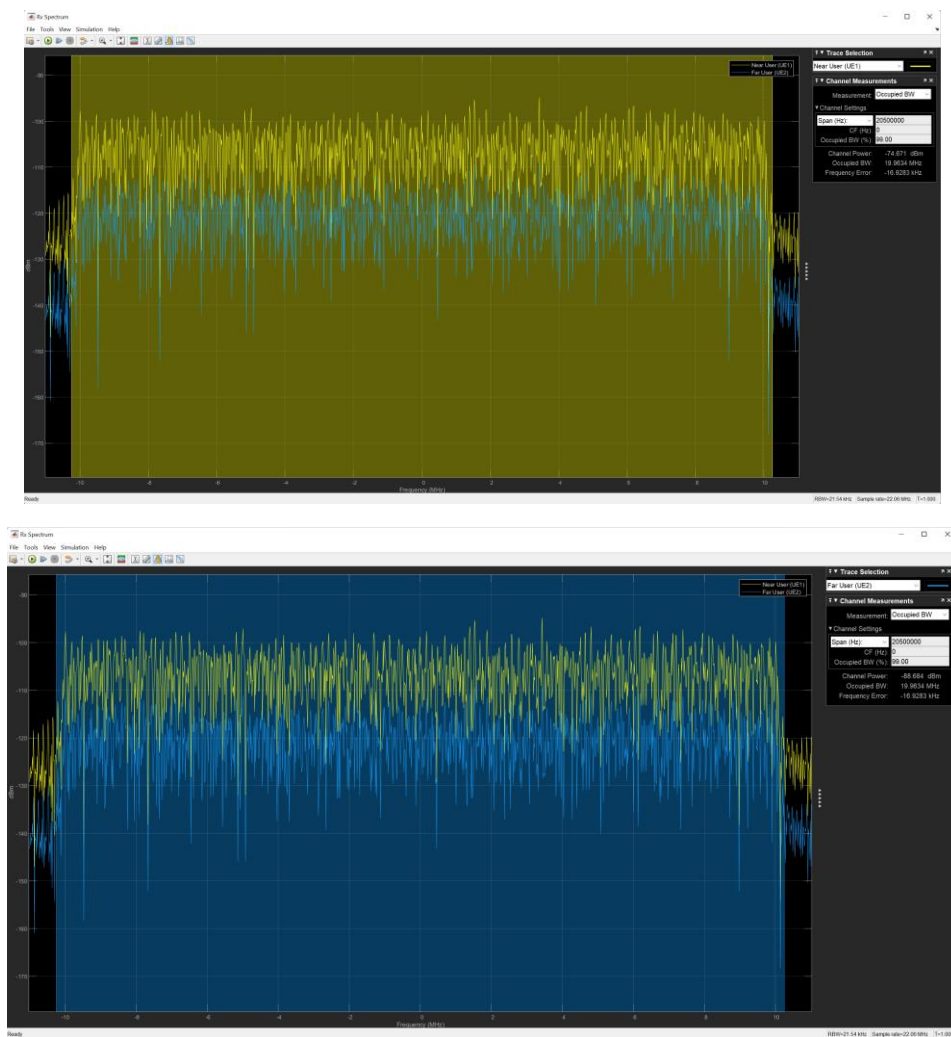
Σενάριο UAV-OMA



Εικόνα 5.25 Απεικόνιση του UAV-OMA σεναρίου για τους 2 χρήστες.

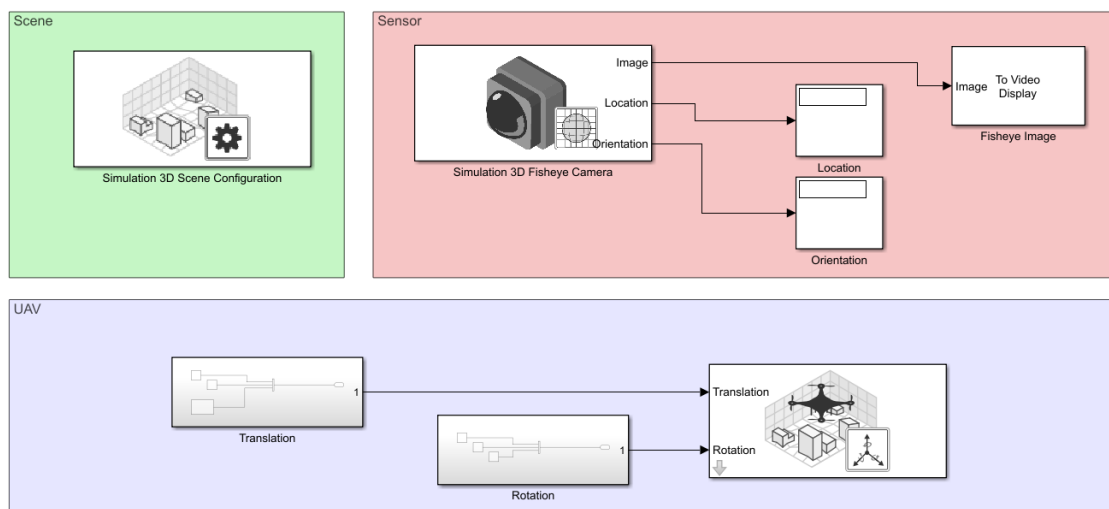
Στην Εικόνα 5.25 απεικονίζεται το UAV-OMA σενάριο.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι μετρήσεις του φάσματος για τον κοντινό και τον μακρινό χρήστη.



Εικόνα 5.26 Απεικόνιση της φασματικής απόκρισης για το σενάριο UAV-OMA για ισχύ εκπομπής 30 dBm για κοντινό χρήστη και για μακρινό χρήστη.

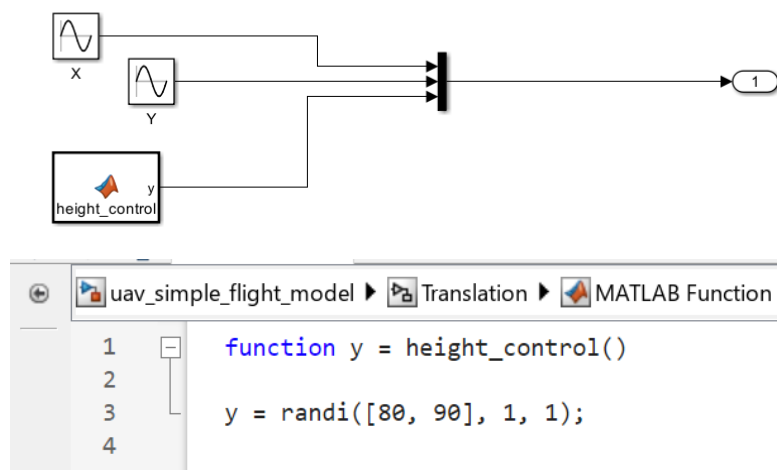
Στην **Εικόνα 5.26** παρατηρούμε ότι για ισχύ λήψης 30 dBm το κατειλημμένο εύρος ζώνης κυμαίνεται στα 19,9634 MHz. Όμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για τα σενάρια UAV-OMA και UAV-NOMA όπως στα BS-NOMA και BS-OMA. Στον κοντινό χρήστη (UE1) το Channel Power είναι ίσο με -74,671 dBm. Αντίστοιχα, στον μακρινό χρήστη (UE2) το Channel Power είναι ίσο με -88,684 dBm. Η βασική διαφορά μεταξύ επίγειας (BS) και εναέριας (UAV) μετάδοσης ανεξαρτήτως τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης έγκειται στη βελτίωση του Channel Power και των δύο χρηστών. Αυτό οφείλεται στο καλύτερο κανάλι επικοινωνίας που δύναται να προσφέρει το UAV στους χρήστες εν συγκρίσει με τον επίγειο σταθμό βάσης (BS). Πιο συγκεκριμένα, το UAV μπορεί να προσφέρει επικοινωνία με απευθείας συνιστώσα (LoS) εκ φύσεως, ενώ η επίγεια επικοινωνία περιορίζεται σε NLoS μειώνοντάς έτσι τη συνολική επίδοση.



Copyright 2020 The MathWorks, Inc.

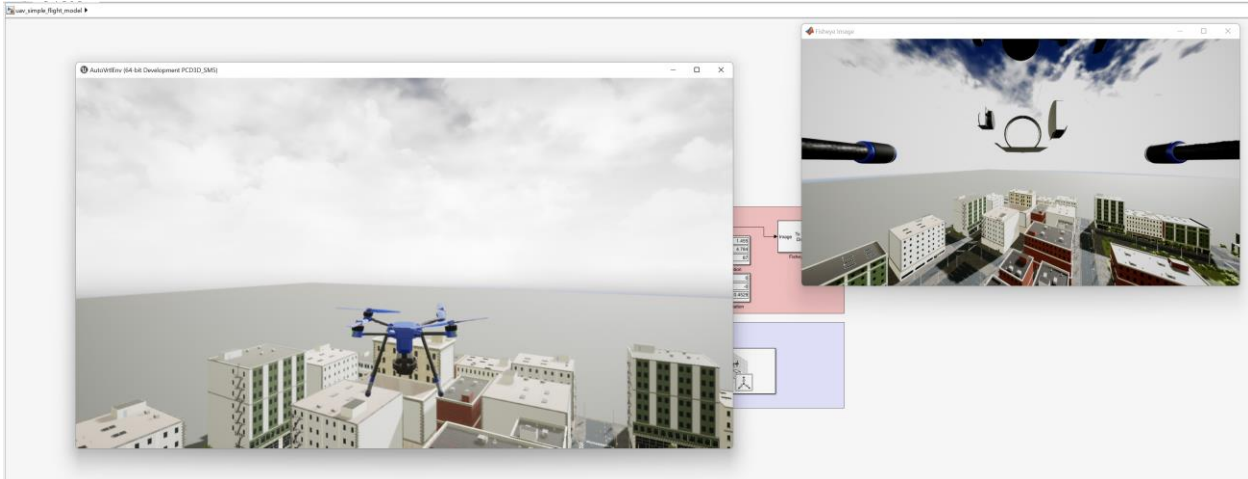
Εικόνα 5.27 Απεικόνιση του UAV μοντέλου για προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο.

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το μοντέλο που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση του UAV σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 5.28 Ορισμός του ύψους στο UAV μοντέλο.

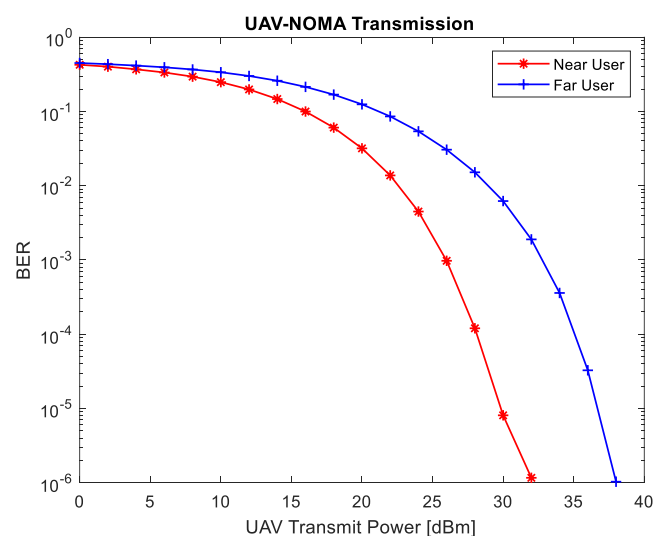
Με την συνάρτηση `height_control()` που υλοποιήθηκε στον άξονα Z του Translation subblock, ορίστηκε το ύψος και η κίνηση του UAV μεταξύ 80 και 90 μέτρων.



Εικόνα 5.29 Προσομοίωση UAV πραγματικού χρόνου σε φωτορεαλιστικό περιβάλλον.

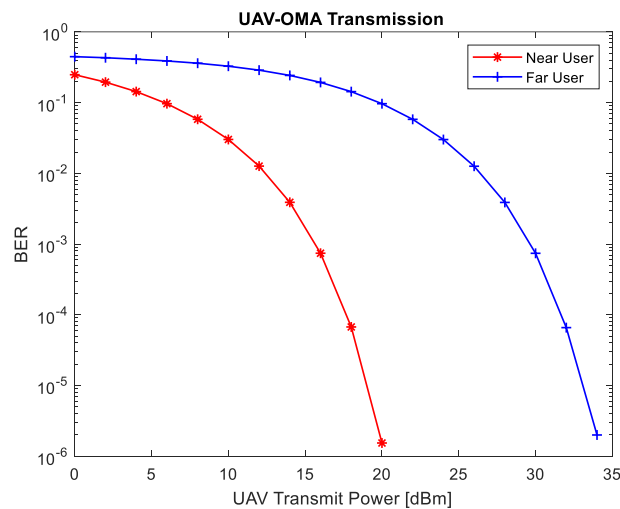
Ακολουθεί μια επίδειξη της προσομοίωσης του UAV σε φωτορεαλιστικό περιβάλλον.

Συνεχίζοντας, προχωράμε στις συγκρίσεις μεταξύ των τεχνικών OMA και NOMA για εναέρια (UAV) και επίγεια μετάδοση (BS), καθώς σχολιάζονται και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις ισχύος για όλα τα σενάρια, με εύρος από 0 έως 40 dBm για την ισχύ εκπομπής του UAV, όπως και του BS.



Εικόνα 5.30 Σύγκριση BER ως προς την ισχύ εκπομπής του UAV μεταξύ κοντινού χρήστη και μακρινού χρήστη.

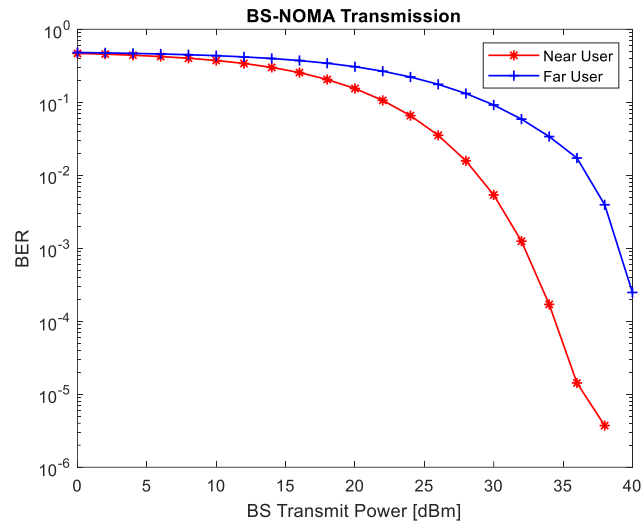
Στην **Εικόνα 5.30** φαίνεται ότι το BER του κοντινού χρήστη είναι καλύτερο από το BER του μακρινού χρήστη σε συνάρτηση με την ισχύ εκπομπής του UAV. Αυτό συμβαίνει, επειδή ο μακρινός χρήστης βρίσκεται πιο μακριά από το UAV από ότι ο κοντινός χρήστης, δηλαδή οι συνθήκες καναλιού είναι δυσμενείς σε σχέση με τον κοντινό χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνει μειωμένη ποιότητα σήματος σε σχέση με τον κοντινό χρήστη. Επιπλέον, δέχεται παραπάνω παρεμβολές τις οποίες δεν δέχεται ο κοντινός χρήστης, λόγω του ότι εφαρμόζει τέλεια SIC όπου αφαιρείται από τον κοντινό χρήστη το σήμα του μακρινού χρήστη. Συνεπώς, ο μακρινός χρήστης έχει χειρότερη τιμή SINR από ότι ο κοντινός χρήστης, κάτι το οποίο επηρεάζει αρκετά σημαντικά τα αποτελέσματα καθώς η τιμή του BER είναι εξαρτώμενη από την τιμή του SINR.



Εικόνα 5.31 Σύγκριση BER ως προς την ισχύ εκπομπής του UAV μεταξύ κοντινού χρήστη και μακρινού χρήστη.

Παρόμοια συμπεράσματα παρατηρούνται και στην **Εικόνα 5.31** για την περίπτωση του UAV-OMA σεναρίου, όσον αφορά την σύγκριση των τιμών του BER μεταξύ του κοντινού και του μακρινού χρήστη.

Όμως, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ των χρηστών των σεναρίων UAV-NOMA και UAV-OMA, παρατηρούμε ότι οι τιμές των BER για τους χρήστες στο UAV-OMA είναι καλύτερες σε σχέση με τις τιμές των BER στο UAV-NOMA. Αυτό συμβαίνει, επειδή στην τεχνική OMA οι χρήστες απολαμβάνουν όλη τη διαθέσιμη ισχύ του UAV, εν αντιθέσει με την τεχνική NOMA, όπου οι δύο χρήστες λαμβάνουν ένα μέρος της συνολικής ισχύος του UAV.

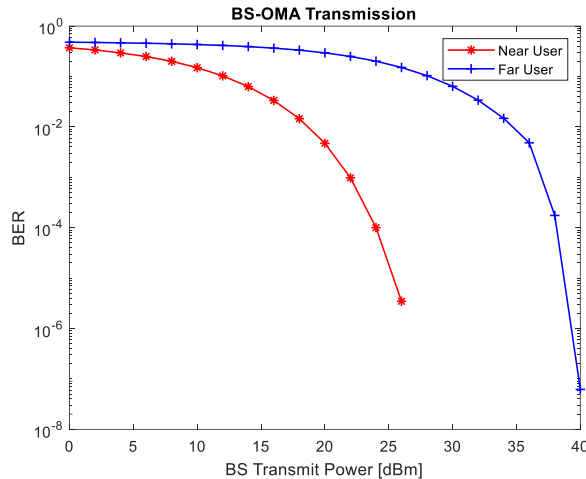


Εικόνα 5.32 Σύγκριση BER ως προς την ισχύ εκπομπής του UAV μεταξύ κοντινού χρήστη και μακρινού χρήστη.

Παρόμοια συμπεράσματα και στην **Εικόνα 5.32** για την περίπτωση του BS-NOMA σεναρίου, όσον αφορά την σύγκριση των τιμών του BER μεταξύ του κοντινού και του μακρινού χρήστη.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ των χρηστών των σεναρίων BS-NOMA και UAV-NOMA, παρατηρούμε ότι οι τιμές των BER για τους χρήστες στο UAV-NOMA είναι καλύτερες σε σχέση με τις τιμές των BER στο BS-NOMA. Αυτό συμβαίνει, επειδή το UAV προσφέρει την δυνατότητα LoS και κατ' επέκταση καλύτερο κανάλι από ότι ο σταθμό βάσης. Συνεπώς, προκύπτουν καλύτερες οι τιμές του BER περίπτωση της UAV μετάδοσης έναντι της επίγειας.

Όμως, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ των χρηστών των σεναρίων BS-NOMA και UAV-OMA, παρατηρούμε ότι οι τιμές των BER για τους χρήστες στο UAV-OMA είναι καλύτερες σε σχέση με τις τιμές των BER στο UAV-NOMA, λόγω του ότι στην τεχνική OMA οι χρήστες παίρνουν την καλύτερη ισχύ συγκριτικά με την τεχνική NOMA. Επιπλέον, η διαφορά γίνεται μεγαλύτερη καθώς η μετάδοση με UAV υπερτερεί της επίγειας μετάδοσης



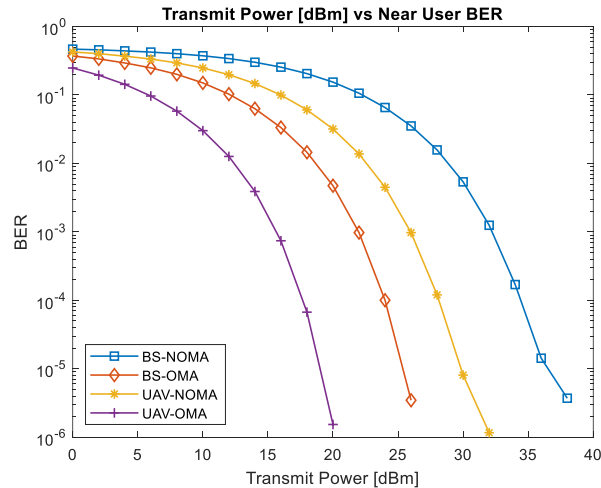
Εικόνα 5.33 Σύγκριση BER ως προς την ισχύ εκπομπής μεταξύ κοντινού χρήστη και μακρινού χρήστη για την τεχνική μετάδοσης BS-OMA.

Παρόμοια συμπεράσματα και στην **Εικόνα 5.33** για την περίπτωση του BS-OMA σεναρίου, όσον αφορά την σύγκριση των τιμών του BER μεταξύ του κοντινού και του μακρινού χρήστη.

Συγκρίνοντας τους χρήστες ως προς BS-OMA και BS-NOMA, οι τιμές του BS-OMA είναι καλύτερες από αυτές του BS-NOMA, λόγω του ότι στην τεχνική OMA οι χρήστες παίρνουν την καλύτερη ισχύ συγκριτικά με την τεχνική NOMA.

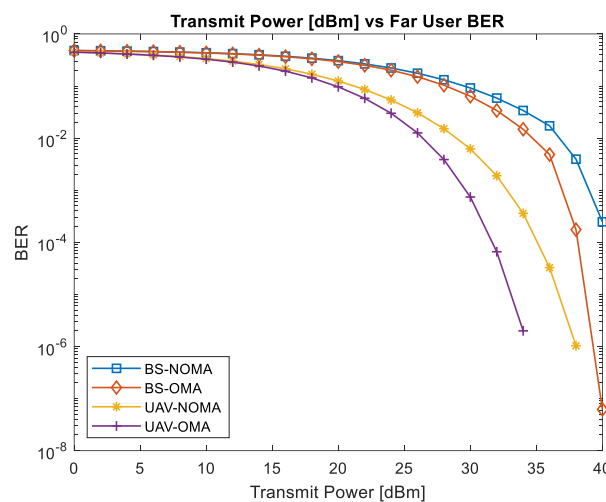
Συγκρίνοντας τους χρήστες ως προς BS-OMA και UAV-OMA, οι τιμές του UAV-OMA είναι καλύτερες από αυτές του BS-OMA, λόγω του ότι η μετάδοση μέσω UAV είναι καλύτερη της επίγειας μετάδοσης.

Συγκρίνοντας τους χρήστες ως προς BS-OMA και UAV-NOMA, οι τιμές του BS-OMA είναι καλύτερες από αυτές του UAV-NOMA, λόγω του ότι οι χρήστες στο OMA παίρνουν την καλύτερη ισχύ έναντι του NOMA.



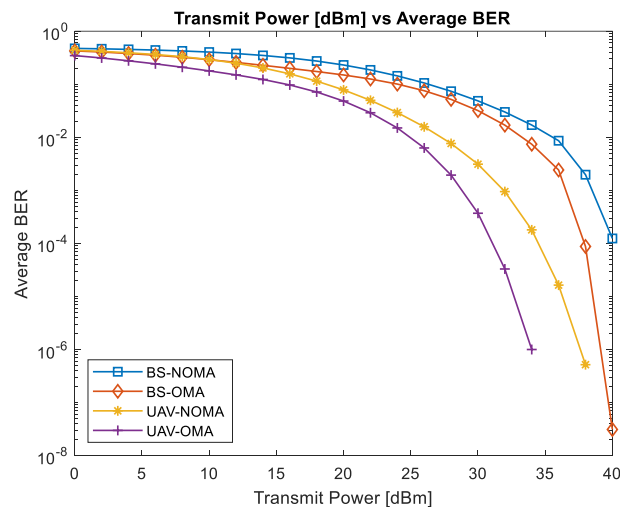
Εικόνα 5.34 Σύγκριση BER μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής για την περίπτωση του κοντινού χρήστη.

Στην **Εικόνα 5.34** η περίπτωση του UAV-OMA σεναρίου έχει την μικρότερη τιμή του BER, επειδή η UAV μετάδοση υπερτερεί της επίγειας μετάδοσης και επειδή οι χρήστες στην τεχνική OMA παίρνουν όλη τη διαθέσιμη ισχύ του UAV σε αντίθεση με την τεχνική NOMA. Μετά ακολουθεί η περίπτωση του BS-OMA σεναρίου, το οποίο έχει καλύτερες τιμές από το UAV-NOMA, επειδή οι χρήστες στην τεχνική OMA παίρνουν την καλύτερη ισχύ έναντι της τεχνικής NOMA. Στην συνέχεια ακολουθεί, η περίπτωση του UAV-NOMA σεναρίου, το οποίο έχει καλύτερες τιμές από το BS-NOMA, επειδή η UAV μετάδοση υπερτερεί της επίγειας μετάδοσης. Την μεγαλύτερη τιμή του BER την έχει η περίπτωση του BS-NOMA σεναρίου.



Εικόνα 5.35 Σύγκριση BER μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής για την περίπτωση του μακρινού χρήστη.

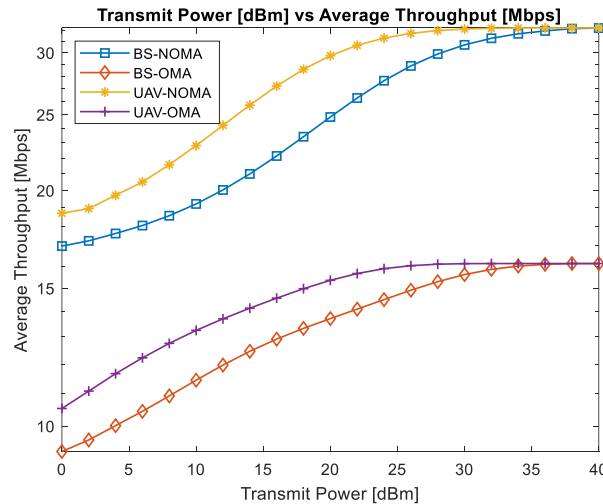
Στην **Εικόνα 5.35** η περίπτωση του UAV-OMA σεναρίου έχει την μικρότερη τιμή του BER, επειδή η UAV μετάδοση υπερτερεί της επίγειας μετάδοσης και επειδή οι χρήστες στην τεχνική OMA παίρνουν την καλύτερη ισχύ έναντι της τεχνικής NOMA. Μετά ακολουθεί η περίπτωση του UAV-NOMA σεναρίου, το οποίο έχει καλύτερες τιμές από το BS-OMA, επειδή η εναέρια μετάδοση υπερτερεί της επίγειας μετάδοσης. Στην συνέχεια ακολουθεί, η περίπτωση του BS-OMA σεναρίου, το οποίο έχει καλύτερες τιμές από το BS-NOMA, επειδή οι χρήστες στην τεχνική OMA παίρνουν την καλύτερη ισχύ έναντι της τεχνικής NOMA. Την μεγαλύτερη τιμή του BER την έχει η περίπτωση του BS-NOMA σεναρίου.



Εικόνα 5.36 Σύγκριση του ενδιάμεσου BER μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής.

Τα ίδια ακριβώς συμπεράσματα με την **Εικόνα 5.35** προκύπτουν και στην **Εικόνα 5.36** για την περίπτωση του μέσου BER των χρηστών.

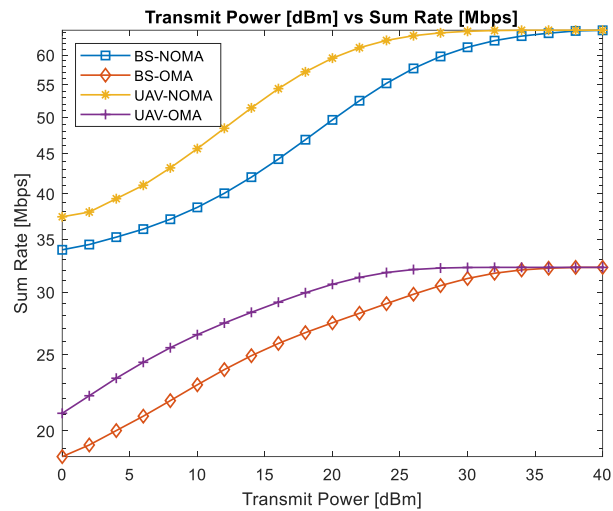
Στην **Εικόνα 5.36** προκύπτει το τελικό συμπέρασμα, ότι οι τιμές του BER στην τεχνική OMA είναι καλύτερες από την τεχνική NOMA. Συνεπώς, η τεχνική OMA υπερτερεί της τεχνικής NOMA ως αξιόπιστη μετάδοση, έχοντας όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα στην μετάδοση. Κάτι που αξίζει να σημειωθεί επίσης, είναι ότι η εναέρια μετάδοση υπερτερεί της επίγειας μετάδοσης ως προς την αξιοπιστία και το μικρότερο ποσοστό σφαλμάτων.



Εικόνα 5.37 Σύγκριση του μέσου data rate μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής της εκάστοτε πηγής (BS ή UAV).

Στην **Εικόνα 5.37** βλέπουμε ότι την καλύτερη τιμή του ενδιάμεσου data rate την έχει η περίπτωση του UAV-NOMA σεναρίου. Μετά ακολουθεί η περίπτωση του BS-NOMA σεναρίου, με χειρότερες επιδόσεις από το UAV-NOMA σενάριο, λόγω του ότι η εναέρια μετάδοση υπερτερεί της επίγειας μετάδοσης. Στην συνέχεια, ακολουθεί η περίπτωση του UAV-OMA σεναρίου, με τιμές throughput σχεδόν υποδιπλάσιες από την περίπτωση του UAV-NOMA σεναρίου. Την χειρότερη τιμή του ενδιάμεσου data rate την έχει η περίπτωση του BS-OMA σεναρίου, καθώς η επίγεια μετάδοση είναι υποδεέστερη της UAV μετάδοσης συγκριτικά με το data-rate του UAV-OMA σεναρίου. Η σχεδόν διπλάσια ρυθμαπόδοση της τεχνικής NOMA έναντι της OMA οφείλεται στο γεγονός ότι με την τεχνική NOMA οι χρήστες στέλνουν περισσότερα δεδομένα αφού μοιράζονται όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης B. Με την τεχνική OMA, οι χρήστες μεταδίδουν δεδομένα με βάση το μισό από το διαθέσιμο εύρος ζώνης B, δηλαδή $B/2$, και για αυτό το λόγο η επιτυγχανόμενη ρυθμαπόδοση της τεχνικής NOMA είναι σχεδόν διπλάσια της OMA.

Γενικά, η τεχνική NOMA υπερτερεί της τεχνικής OMA ως προς την αποδοτικότητα της μετάδοσης σε λόγους ρυθμαπόδοσης, έχοντας σχεδόν διπλάσιες επιδόσεις. Αυτό συμβαίνει επειδή στην τεχνική NOMA οι χρήστες μοιράζονται στον τομέα της ισχύος και κάθε χρήστης έχει διαθέσιμο όλο το εύρος ζώνης μετάδοσης. Συγκρίνοντας τις τεχνικές OMA και NOMA με το ίδιο εύρος ζώνης, η τεχνική NOMA έχει περίπου διπλάσια απόδοση σε σχέση με την τεχνική OMA.



Εικόνα 5.38 Σύγκριση του sum rate μεταξύ όλων των σεναρίων ως προς την ισχύ εκπομπής.

Στην **Εικόνα 5.38** στο sum rate προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα όπως και στην **Εικόνα 5.37** με την σύγκριση των τιμών του data-rate.

6

Επίλογος

Στο πρώτο κεφάλαιο, έγινε μια εισαγωγή όσον αφορά τα UAV, τις απαιτήσεις τους και τις προδιαγραφές τους. Αναλύθηκαν τα βασικά τους χαρακτηριστικά και κατηγοριοποιήθηκαν με βάση συγκεκριμένες κατηγορίες. Αναφέρθηκαν ορισμένα προβλήματα και προκλήσεις που προκύπτουν από την χρήση των UAV ως εναέριοι σταθμοί βάσης και προτάθηκαν ορισμένες λύσεις για την αντιμετώπιση τους. Τέλος, αναφέρθηκαν διάφορες εφαρμογές των UAV στην καθημερινότητα των χρηστών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μελετήθηκε η σκοπιμότητα της ενσωμάτωσης των UAV σε υπάρχοντα και μελλοντικά κινητά δίκτυα 5G. Για αυτό, παρουσιάστηκε ένα γενικό τρισδιάστατο πλαίσιο βασισμένο στη στοχαστική γεωμετρία που επέτρεψε στο να δημιουργηθούν αναλυτικές εκφράσεις για διάφορους χρήστες και δίκτυα βασισμένα σε KPIs. Μέσα από την ανάλυση, βρέθηκε μια σειρά από σχεδιαστικές γνώσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν για την ομαλή ενσωμάτωση των UAV στα 5G δίκτυα. Συνοψίζονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η μείωση του κέρδους της κεραίας του σταθμού βάσης συμπληρώνεται από την ευνοϊκότερη συνθήκη διάδοσης ελεύθερου χώρου στον ουρανό. Κατά συνέπεια, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι υψηλότερη σε υψόμετρα σε σύγκριση με το επίπεδο του εδάφους.
- Η απόδοση ενός χρήστη UAV εξοπλισμένου με μια πανκατευθυντική κεραία είναι περιορισμένη λόγω του αυξημένου αριθμού των κόμβων παρεμβολής LoS που ανιχνεύονται από τον ουρανό. Αυτό με τη σειρά του περιορίζει το εφικτό εύρος λειτουργίας του UAV.
- Υπάρχει ένα βέλτιστο ύψος στο οποίο η απόδοση ενός UAV είναι υψηλότερη σε σύγκριση με έναν επίγειο χρήστη, αν και αυτό το βέλτιστο ύψος είναι συνήθως πολύ χαμηλό και μπορεί να μην είναι εφικτό για την πτήση του UAV.

- Η διαμόρφωση της κεραίας του UAV παίζει σημαντικό ρόλο. Ο σωστός σχεδιασμός του πλάτους δέσμης και της γωνίας κλίσης του, ξεπερνά τις δυσμενείς επιπτώσεις της παρεμβολής LoS στον ουρανό και ως εκ τούτου επιτρέπει στα UAV να λειτουργούν με ασφάλεια και αξιοπιστία. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα, ωστόσο, δεν ισχύει για πολύ πυκνά επίγεια δίκτυα, και ως εκ τούτου χρειάζονται άλλες λύσεις.
- Οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύου μπορούν να επωφεληθούν από τη συμπερίληψη εναέριων χρηστών, καθώς μπορεί να βελτιωθεί η φασματική απόδοση της περιοχής.
- Όταν οι micro σταθμοί βάσης είναι διαθέσιμοι, σε αντίθεση με τους macro σταθμούς βάσης, μια σωστή επιλογή επιπέδου για τα UAV βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του δικτύου και των UAV. Τα UAV είναι ικανά να ανιχνεύουν και τα δύο επίπεδα, λόγω της υψηλής πιθανότητας LoS.

Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων των ασύρματων συνδέσεων air-to-ground, η πιο κρίσιμη πτυχή για την εξυπηρέτηση των drones είναι η διαχείριση της ακραίας ευπάθειας τους σε παρεμβολές. Το επίπεδο παρεμβολής μπορεί να ελεγχθεί με επιτυχία σχεδιάζοντας το δίκτυο με κατάλληλο ύψος του σταθμού βάσης και γωνία κλίσης προς τα κάτω, με κατάλληλες παραμέτρους κεραίας του drone και με το κατάλληλο υψόμετρο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, τονίζεται η ραγδαία αύξηση του αριθμού των drones. Είναι κατανοητό ότι, για να επιτραπεί το BVLoS, το οποίο διευρύνει τις περιπτώσεις χρήσης των UAV, χρειάζεται μια αξιόπιστη σύνδεση C2. Αυτή η σύνδεση C2 απαιτεί υψηλή αξιοπιστία και κάλυψη ευρείας περιοχής για να εγγυηθεί την ασφάλεια. Μια εγγύηση για την παροχή αυτής της σύνδεσης C2 είναι τα κινητά δίκτυα, καθώς έχουν ήδη παράσχει σχεδόν πανταχού παρούσα κάλυψη, καθιστώντας την οικονομικά ελκυστική. Ωστόσο, τα κινητά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν κάλυψη σε επίγειους χρήστες και όχι στον ουρανό. Οι κεραίες, για παράδειγμα, έχουν συνήθως κλίση προς τα κάτω. Επιπλέον, τα σήματα διαδίδονται περισσότερο στον ουρανό σε σύγκριση με το έδαφος, καθώς υπάρχει μικρότερη συγκέντρωση κτιρίων, βλάστησης κ.λπ. Αυτό οδηγεί σε ενισχυμένα σήματα, αλλά, ταυτόχρονα, έχει ως αποτέλεσμα ισχυρότερες παρεμβολές. Επιπλέον, ο αριθμός των ορατών παρεμβολών αυξάνεται με το ύψος πτήσης των UAV. Για δίκτυα σχετικά χαμηλού φορτίου, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, αλλά για δίκτυα μεσαίου και μεγάλου φορτίου, η απαιτούμενη αξιοπιστία για την υπηρεσία C2 ενδέχεται να μην επιτευχθεί χωρίς ορισμένα πρόσθετα μέτρα. Επιπλέον, όταν το drone εκτελεί μια εφαρμογή με υψηλή απόδοση ανερχόμενης ζεύξης προς τον σταθμό βάσης, π.χ. ροή βίντεο, αυτό προκαλεί σημαντικά περισσότερες παρεμβολές στους άλλους χρήστες του δικτύου από μια συσκευή χρήστη με παρόμοια υπηρεσία στο επίπεδο του εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρειαστεί μετριασμός των παρεμβολών σε περίπτωση βαρέως φορτίου. Από τις μελετημένες τεχνικές μετριασμού των παρεμβολών, το πλέγμα των σταθερών δεσμών (fixed-beam grid) που εφαρμόζονται στο drone και το υβριδικό σχήμα πρόσβασης είναι οι πιο ελκυστικές λύσεις, δίνοντας καλά κέρδη σε μέτρια αύξηση της πολυπλοκότητας στο drone. Μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση για τη διασφάλιση αξιόπιστης επικοινωνίας ζεύξης C2 είναι η λειτουργία σε αποκλειστικό φάσμα, αλλά αυτό μπορεί να μην είναι μια επιλογή σε όλες τις περιοχές. Γενικά, τα σημερινά κινητά δίκτυα μπορούν να παρέχουν κάλυψη για drones σε πολλά σενάρια εφαρμογών και με μικρές βελτιώσεις θα είναι σε θέση να παρέχουν υψηλή αξιοπιστία για πιο δύσκολες συνθήκες με μεγάλο φόρτο δικτύου. Σε εξαιρετικά δύσκολες συνθήκες, απαιτούνται τεχνικές 5G για την παροχή αξιόπιστης σύνδεσης C2 με εκμετάλλευση υψηλής πυκνότητας drones με λειτουργία πάνω από τον εναέριο χώρο, τεράστιες βελτιώσεις του massive MIMO και των τεχνικών διαχείρισης δέσμης (π.χ. beam steering και beam-forming), καθώς και βελτιωμένος σχεδιασμός αναφορικά με τη σηματοδότηση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, εξετάζεται η εφαρμογή του NOMA σε κινητές επικοινωνίες που υποστηρίζονται από UAV. Γενικά στη βιβλιογραφία, έχει προταθεί ένα ζεύγος στρατηγικών συσχέτισης, συγκεκριμένα, η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη και στρατηγική με επίκεντρο το UAV. Η στρατηγική με επίκεντρο τον χρήστη εφαρμόζεται όταν όλοι οι χρήστες που βρίσκονται στην κυψέλη πρέπει να εξυπηρετούνται από το UAV ταυτόχρονα. Τα προκύπτοντα αποτελέσματα παρέχουν το σημείο αναφοράς για δίκτυα κινητής τηλεφωνίας UAV που υποστηρίζονται από το NOMA. Η στρατηγική με επίκεντρο το UAV βασίζεται στο γεγονός ότι, στην πράξη, είναι πιο εφαρμόσιμη για την εξυπηρέτηση χρηστών σε πυκνά δίκτυα. Η βασική ιδέα της στρατηγικής με επίκεντρο το UAV είναι να παρέχει υπηρεσίες μόνο για περιοχές hotspot, δηλαδή αεροδρόμια ή θέρετρα. Επίσης, διάφορες μελέτες στην ανοιχτή τεχνική βιβλιογραφία, αποδεικνύουν ότι οι επιδόσεις ενός δικτύου πολλαπλών UAV που αναπτύσσονται στον ουρανό για να εξυπηρετήσουν πολλούς χρήστες στο έδαφος είναι αρκετά υψηλές σε σχέση με συμβατικά σχήματα μετάδοσης ενός UAV ή και πολλών επίγειων σταθμών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, έγινε ανάλυση των σεναρίων με βάση τις τεχνικές OMA/NOMA. Όσον αφορά το κατειλημμένο εύρος ζώνης η τεχνική NOMA υπερτερεί έναντι της τεχνικής OMA με διπλάσιες επιδόσεις ως προς το ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, καθώς οι χρήστες μοιράζονται τους πόρους στον τομέα της ισχύος και κάθε χρήστης έχει διαθέσιμο όλο το εύρος ζώνης μετάδοσης. Αυτή η αξιοποίηση όλου του εύρους ζώνης οδηγεί στην μετάδοση περισσότερων δεδομένων. Η τεχνική OMA είναι καλύτερη της τεχνικής NOMA ως προς τις τιμές του BER, επειδή με τη τεχνική OMA, όλη η διαθέσιμη ισχύς του πομπού δίνεται σε κάθε χρήστη ξεχωριστά, και η απόδοση BER είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ισχύ εκπομπής. Συνεπώς, σε περιπτώσεις αξιόπιστης σύνδεσης με όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα, η τεχνική OMA υπερτερεί της τεχνικής NOMA. Συγκριτικά, μεταξύ της επίγειας μετάδοσης και της μετάδοσης με UAV, η μετάδοση με UAV έχει καλύτερες επιδόσεις από την επίγεια μετάδοση και σε μετάδοση δεδομένων αλλά και σε μειωμένες τιμές του BER, με ελάχιστα σφάλματα στην μετάδοση. Σε οποιοδήποτε σενάριο μετάδοσης με την τεχνική NOMA, ο κοντινός χρήστης αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα έναντι του μακρινού χρήστη, λόγω καλύτερης κάλυψης στην σύνδεση, αλλά και λόγω του επιτυχημένου SIC.

Βιβλιογραφία

- [1] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, May 2016.
- [2] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, “Modeling air-toground path loss for low altitude platforms in urban environments”, *Proc. IEEE Glob. Telecommun. Conf. (GLOBECOM)*, Austin, TX, USA, Dec. 2014, pp. 2898–2904.
- [3] D. Gettinger and A. H. Michel, “Drone Sightings and Close Encounters: An Analysis, Center Study Drone, Bard College, Annandale-on-Hudson”, NY, USA, 2015.
- [4] A. Fotouhi et al. (2018), “Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges”, [Online], Available: <https://arxiv.org/abs/1809.01752>
- [5] C. Stöcker, R. Bennett, F. Nex, M. Gerke, and J. Zevenbergen, “Review of the current state of UAV regulations”, *Remote Sens.*, vol. 9, no. 5, p. 459, 2017.
- [6] A. Fotouhi, H. Qiang, M. Ding et al. (2019), “Survey on UAV cellular communications: practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges”, *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, early access.
- [7] ITU (2009), “Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace”, *ITU Tech. Rep. M.2171*.
- [8] 3GPP TR 36.777 (2017), “Technical specification group radio access network: study on enhanced LTE support for aerial vehicles”, v.15.0.0.
- [9] China Mobile (2017), “China Mobile technical report: Internet of drones” (in Chinese), <http://www.jintiankansha.me/t/AE9FsWW9tc> (accessed 18 February 2019).
- [10] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and S. Temel (2013), “Flying ad-hoc networks (FANETs): a survey Ad Hoc Netw.”, 11 (3): 1254–1270.
- [11] Y. Zeng, J. Lyu, and R. Zhang (2019), “Cellular-connected UAV: potentials, challenges and promising technologies”, *IEEE Wireless Commun.* 26 (1): 120–127.
- [12] Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang (2019), “Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond”, *Proc. IEEE*, submitted, arXiv/1903.05289.
- [13] L. Tang and G. Shao, “Drone remote sensing for forestry research and practices”, *J. Forestry Res.*, vol. 26, no. 4, pp. 791–797, 2015.
- [14] P. Fahlstrom and T. Gleason, “Introduction to UAV Systems”, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.

- [15] A. Al-Hourani and K. Gomez, “Modeling cellular-to-UAV path-loss for suburban environments”, IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 7, no. 1, pp. 82–85, Feb. 2018
- [16] K. Nonami, F. Kendoul, S. Suzuki, W. Wang, and D. Nakazawa, "Autonomous Flying Robots", Tokyo, Japan: Springer-Verlag, 2010.
- [17] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, “Optimal LAP altitude for maximum coverage”, IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 3, no. 6, pp. 569–572, Dec. 2014.
- [18] M. Ding, P. Wang, D. López-Pérez, G. Mao, and Z. Lin, “Performance impact of LoS and NLoS transmissions in dense cellular networks”, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 3, pp. 2365–2380, Mar. 2016.
- [19] T. Ding et al., “Uplink performance analysis of dense cellular networks with LoS and NLoS transmissions”, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 4, pp. 2601–2613, Apr. 2017.
- [20] M. Ding and D. López-Pérez, “Please lower small cell antenna heights in 5G”, in Proc. IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2016, pp. 1–6.
- [21] M. Ding and D. López-Pérez, “Performance impact of base station antenna heights in dense cellular networks”, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 12, pp. 8147–8161, Dec. 2017.
- [22] S. A. P. Quintero, F. Papi, D. J. Klein, L. Chisci, and J. P. Hespanha, “Optimal UAV coordination for target tracking using dynamic programming”, in Proc. 49th IEEE Conf. Decis. Control (CDC), 2010, pp. 4541–4546.
- [23] K. Sayler. (2015), "A World of Proliferated Drones: A Technology Primer", Accessed: May 20, 2018 [Online], Available: <https://www.cnas.org/publications/reports/a-world-of-proliferated-drones-a-technology-primer>
- [24] Skyfront, Accessed: May 10, 2018. [Online], Available: <https://skyfront.com/>
- [25] M. Dudek et al., “Hybrid fuel cell—Battery system as a main power unit for small unmanned aerial vehicles (UAV)”, Int. J. Electrochem. Sci., vol. 8, pp. 8442–8463, Jun. 2013.
- [26] M. H. Shaheed et al., “Flying by the sun only: The solarcopter prototype”, Aerosp. Sci. Technol., vol. 45, pp. 209–214, Sep. 2015.
- [27] D. López-Pérez et al., “On the downlink performance of UAV communications in dense cellular networks”, in Proc. IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2018, pp. 1–7.
- [28] C. Liu et al., “Performance analysis for practical unmanned aerial vehicle networks with LoS/NLoS transmissions”, in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (ICC Workshops), May 2018, pp. 1–6.
- [29] A. Merwaday and I. Guvenc, “UAV assisted heterogeneous networks for public safety communications”, in Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops (WCNCW), Mar. 2015, pp. 329–334.
- [30] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, “Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks”, in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), 2016, pp. 1–5.
- [31] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “Optimal transport theory for power efficient deployment of unmanned aerial vehicles”, in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), May 2016, pp. 1–6.
- [32] S. Rohde, M. Putzke, and C. Wietfeld, “Ad hoc self-healing of OFDMA networks using UAV-based relays”, Ad Hoc Netw., vol. 11, no. 7, pp. 1893–1906, 2013.

- [33] B. Galkin, J. Kibilda, and L. A. DaSilva, “Deployment of UAV mounted access points according to spatial user locations in two-tier cellular networks”, in Proc. Wireless Days (WD), Mar. 2016, pp. 1–6.
- [34] J. Košmerl and A. Vilhar, “Base stations placement optimization in wireless networks for emergency communications”, in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (ICC), Jun. 2014, pp. 200–205.
- [35] J. Lyu, Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, “Placement optimization of UAV-mounted mobile base stations”, IEEE Commun. Lett., vol. 21, no. 3, pp. 604–607, Mar. 2017.
- [36] X. Sun and N. Ansari, “Jointly optimizing drone-mounted base station placement and user association in heterogeneous networks”, in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), May 2018, pp. 1–6.
- [37] S. F. Chou, T. C. Chiu, Y. J. Yu, and A. C. Pang, “Mobile small cell deployment for next generation cellular networks”, in Proc. IEEE Glob. Commun. Conf., Dec. 2014, pp. 4852–4857.
- [38] Y. Qu, J. Wu, B. Xiao, and D. Yuan, “A fault-tolerant cooperative positioning approach for multiple UAVs”, IEEE Access, vol. 5, pp. 15630–15640, 2017.
- [39] L. Ruan et al., “Energy-efficient multi-UAV coverage deployment in UAV networks: A game-theoretic framework”, China Commun., vol. 15, no. 10, pp. 194–209, Oct. 2018.
- [40] T. Chen, Q. Gao, and M. Guo, “An improved multiple UAVs cooperative flight algorithm based on leader follower strategy”, in Proc. Chin. Control Decis. Conf. (CCDC), Jun. 2018, pp. 165–169.
- [41] Y. H. Tan, S. Lai, K. Wang, and B. M. Chen, “Cooperative heavy lifting using unmanned multi-agent systems”, in Proc. IEEE 14th Int. Conf. Control Autom. (ICCA), Jun. 2018, pp. 1119–1126.
- [42] P. de Sousa Paula, M. F. de Castro, G. A. L. Paillard, and W. W. F. Sarmiento, “A swarm solution for a cooperative and selforganized team of UAVs to search targets”, in Proc. 8th Euro Amer. Conf. Telematics Inf. Syst. (EATIS), Apr. 2016, pp. 1–8.
- [43] A. Fotouhi, M. Ding, and M. Hassan, “Dynamic base station repositioning to improve spectral efficiency of drone small cells”, in Proc. IEEE 18th Int. Symp. World Wireless Mobile Multimedia Netw. (WoWMoM), Jun. 2017, pp. 1–9.
- [44] A. Fotouhi, M. Ding, and M. Hassan, “Service on demand: Drone base stations cruising in the cellular network”, in Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Dec. 2017, pp. 1–6.
- [45] S. Koulali, E. Sabir, T. Taleb, and M. Azizi, “A green strategic activity scheduling for UAV networks: A sub-modular game perspective”, IEEE Commun. Mag., vol. 54, no. 5, pp. 58–64, May 2016.
- [46] S. Kandeepan, K. Gomez, L. Reynaud, and T. Rasheed, “Aerialterrestrial communications: Terrestrial cooperation and energy-efficient transmissions to aerial base stations”, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 50, no. 4, pp. 2715–2735, Oct. 2014.
- [47] E. M. Shakshuki, D. Zorbas, T. Razafifindralambo, D. P. P. Luigi, and F. Guerriero, “Energy efficient mobile target tracking using flying drones”, Procedia Comput. Sci., vol. 19, pp. 80–87, Jun. 2013.
- [48] L. D. P. Pugliese, F. Guerriero, D. Zorbas, and T. Razafifindralambo, “Modelling the mobile target covering problem using flying drones”, Optim. Lett., vol. 10, no. 5, pp. 1021–1052, 2016.
- [49] D. Zorbas, L. D. P. Pugliese, T. Razafifindralambo, and F. Guerriero, “Optimal drone placement and cost-efficient target coverage”, J. Netw. Comput. Appl., vol. 75, pp. 16–31, Nov. 2016.
- [50] Y. Zeng and R. Zhang, “Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization”, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 6, pp. 3747–3760, Jun. 2017.

- [51] V. Sharma, K. Srinivasan, H.-C. Chao, K.-L. Hua, and W.-H. Cheng, “Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage”, *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 85, pp. 94–105, May 2016.
- [52] M. Blenkin. (2017), "Powerlines to Charge Drones: Lockheed Martin's Melbourne Research Lab Takes Flight", Accessed: Aug. 23, 2017. [Online], Available: <http://australianaviation.com.au/2017/08/lockheed-martins-melbourne-research-lab-takes-flight/>
- [53] A. Bonfante et al., “5G massive MIMO architectures: Self-backhauled small cells versus direct access”, arXiv preprint arXiv:1809.03953v1, 2018.
- [54] Y. Chen, N. Zhao, Z. Ding, and M. Alouini, “Multiple UAVs as relays: Multi-hop single link versus multiple dual-hop links”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 9, pp. 6348–6359, Sep. 2018.
- [55] A. Fouda, A. S. Ibrahim, I. Guvenc, and M. Ghosh, “UAV-based in band integrated access and backhaul for 5G communications”, *ArXiv e-prints arXiv:1807.07230*, Jul. 2018.
- [56] Market Research Report: "Emerging Market Opportunitites", Analysys Mason, New Delhi, India, 2010.
- [57] D.-E. Meddour, T. Rasheed, and Y. Gourhant, “On the role of infrastructure sharing for mobile network operators in emerging markets”, *Comput. Netw.*, vol. 55, no. 7, pp. 1576–1591, 2011.
- [58] E. Lang, S. Redana, and B. Raaf, “Business impact of relay deployment for coverage extension in 3GPP LTE-advanced”, in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops ICC Workshops*, 2009, pp. 1–5.
- [59] H. Vadada. (Mar. 2011), "Radio Network Sharing—New Paradigm for LTE.", [Online], Available: <http://www.telecom-cloud.net/radionetwork-sharing-the-new-paradigm/>
- [60] K. Gomez et al., “Capacity evaluation of aerial LTE base-stations for public safety communications”, in *Proc. IEEE Eur. Conf. Netw. Commun. (EuCNC)*, Paris, France, Jun. 2015, pp. 133–138.
- [61] G. Baldini, S. Karanasios, D. Allen, and F. Vergari, “Survey of wireless communication technologies for public safety”, *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 2, pp. 619–641, 2nd Quart., 2014.
- [62] A. Merwaday and I. Guvenc, “UAV assisted heterogeneous networks for public safety communications”, in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops (WCNCW)*, New Orleans, LA, USA, Mar. 2015, pp. 329–334.
- [63] A. Orsino et al., “Effects of heterogeneous mobility on D2D-and drone-assisted mission-critical MTC in 5G”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 79–87, Feb. 2017.
- [64] Sophia Antipolis, “Enhanced LTE support for aerial vehicles,” 3GPP, France, Rep. TR 36.777, May 2017.
- [65] Y. Li, X. Ji, D. Liang, and Y. Li, “Dynamic beamforming for three dimensional MIMO technique in LTE-advanced networks”, *Int J. Antennas Propag.*, vol. 2013, p. 8, Jul. 2013.
- [66] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “Communications and control for wireless drone-based antenna array”, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 1, pp. 820–834, Jan. 2019.
- [67] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions”, *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [68] Z. Dawy, W. Saad, A. Ghosh, J. G. Andrews, and E. Yaacoub, “Toward massive machine type cellular communications,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 1, pp. 120–128, Feb. 2017.
- [69] S.-Y. Lien, K.-C. Chen, and Y. Lin, “Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 4, pp. 66–74, Apr. 2011.

- [70] W. Zafar and B. M. Khan, "Flying ad-hoc networks: Technological and social implications", IEEE Technol. Soc. Mag., vol. 35, no. 2, pp. 67–74, Jun. 2016.
- [71] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and S. Temel, "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey", Ad Hoc Netw., vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
- [72] U. Siddique, H. Tabassum, E. Hossain, and D. I. Kim, "Wireless backhauling of 5G small cells: Challenges and solution approaches", IEEE Wireless Commun., vol. 22, no. 5, pp. 22–31, Oct. 2015.
- [73] U. Challita and W. Saad, "Network formation in the Sky: Unmanned aerial vehicles for multi-hop wireless backhauling", in Proc. IEEE Glob. Telecommun. Conf. (GLOBECOM), Singapore, Dec. 2017, pp. 1–6.
- [74] A. Ferdowsi, W. Saad, and N. B. Mandayam. (2017), "Colonel Blotto Game for Secure State Estimation in Interdependent Critical Infrastructure" [Online], Available: <https://arxiv.org/abs/1709.09768>
- [75] J. Chen, U. Yatnalli, and D. Gesbert, "Learning radio maps for UAV-aided wireless networks: A segmented regression approach", in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), Paris, France, May 2017, pp. 1–6.
- [76] S. Jeong, O. Simeone, and J. Kang, "Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimal bit allocation and path planning", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 67, no. 3, pp. 2049–2063, Mar. 2018.
- [77] M. Haenggi (2012), "Stochastic Geometry for Wireless Networks", Cambridge University Press.
- [78] M. Di Renzo, W. Lu, and P. Guan, "The intensity matching approach: a tractable stochastic geometry approximation to system-level analysis of cellular networks", IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 9, pp. 5963–5983, 2016.
- [79] 3GPP (2018), 3rd Generation Partnership Project: "Technical specification group radio access network; study on enhanced LTE support for aerial vehicles (release 15)", Tech. Rep., Jan. www.3gpp.org/dynareport/36777.htm
- [80] 3GPP (2013), "Small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN – physical layer aspects", Tech. Rep., December 2013, www.3gpp.org/dynareport/36872.htm
- [81] 3GPP (2018), 3rd Generation Partnership Project: "Technical specification group radioaccess network; study on enhanced LTE support for aerial vehicles (release 15)", Tech. Rep., Jan. www.3gpp.org/dynareport/36777.htm
- [82] GSMA (2019), "A look into the future of mobile-enabled drones", <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2019/02/22166-Connected-Drones-Infographic-v3-002.pdf> (accessed June 2019).
- [83] 3GPP (2018), "Enhanced LTE support for aerial vehicles", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 36.777, version 15.0.0, January.
- [84] R. Amorim, H. Nguyen, P. Mogensen et al. (2017), "Radio channel modeling for UAV communication over cellular networks", IEEE Wireless Commun. Lett. 6 (4): 514–517.
- [85] R. Amorim, H. Nguyen, J. Wigard et al. (2018), "LTE radio measurements above urban rooftops for aerial communications", Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1–6.

- [86] T. B. Sørensen and R. Amorim (2018), "DroC2om-763601. Preliminary report on first drone flight campaign", SESAR Joint Undertaking, Deliverable 5.1, March.
- [87] T. B. Sørensen, R. Amorim, and M. López (2018), "DroC2om-763601. Report of first drone flight campaign", SESAR Joint Undertaking, Deliverable 5.2, October.
- [88] R. Amorim, H. Nguyen, J. Wigard et al. (2018), "LTE radio measurements above urban rooftops for aerial communications", Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1–6.
- [89] T. Rappaport (2002), "Wireless Communications: Principles and Practice", Prentice-Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, Prentice-Hall.
- [90] R. Amorim, H. Nguyen, P. Mogensen et al. (2017), "Radio channel modeling for UAV communication over cellular networks", IEEE Wireless Commun. Lett. 6 (4): 514–517.
- [91] 3GPP (2018), "Enhanced LTE support for aerial vehicles", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 36.777, version 15.0.0, January.
- [92] 3GPP (2012), "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Mobility enhancements in heterogeneous networks", 3GPP Tech. Rep. TS 36.839, version 2.0.0, September.
- [93] I. Kovacs, R. Amorim, H. C. Nguyen et al. (2017), "Interference analysis for UAV connectivity over LTE using aerial radio measurements", Proceedings of the 86th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Fall, September, pp. 1–6.
- [94] Nokia, "Reliable 3D connectivity for drones over LTE networks", Nokia, White Paper, May 2018.
- [95] H. C. Nguyen, R. Amorim, J. Wigard et al. (2018), "How to ensure reliable connectivity for aerial vehicles over cellular networks", IEEE Access 6, 12304–12317.
- [96] D. Lee, H. Seo, B. Clerckx et al., E. Hardouin, D. Mazzarese, S. Nagata, and K. Sayana (2012), "Coordinated multipoint transmission and reception in LTE-advanced: Deployment scenarios and operational challenges", IEEE Communications Magazine 50 (2): 148–155. February 2012.
- [97] G. Pocovi, T. Kolding, M. Lauridsen, R. Mogensen, C. Markmiller, and R. Jess-Williams (2018), "Measurement framework for assessing reliable real-time capabilities of wireless networks", IEEE Communications Magazine. 56 (12): 156–163. December 2018.
- [98] R. Amorim, J. Wigard, I. Z. Kovacs, T. Sorensen, P. Mogensen, and G. Pocovi (2019), "Improving drone's command and control link reliability through dual-network connectivity", 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 2019, pp. 1–5.
- [99] R. Amorim, I. Z. Kovács, J. Wigard, T. B. Sorensen, and P. Mogensen (2019), "Forecasting spectrum demand for uavs served by dedicated allocation in cellular networks", 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1–6.
- [100] Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges", IEEE Commun. Mag., vol. 54, no. 5, pp. 36–42, May 2016.
- [101] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs", IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 6, pp. 3949–3963, Jun. 2016.
- [102] Y. Zeng, J. Xu and R. Zhang, "Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV", IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 18, no. 4, pp. 2329–2345, Apr. 2019.

- [103] Y. Zeng, J. Lyu and R. Zhang, “Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies”, IEEE Wireless Commun., vol. 26, no. 1, pp. 120–127, Feb. 2019.
- [104] X. Liu, Y. Liu, Y. Chen and L. Hanzo, “Trajectory design and power control for multi-UAV assisted wireless networks: A machine learning approach”, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 68, no. 8, pp. 7957–7969, Aug. 2019.
- [105] T. M. Nguyen, W. Ajib and C. Assi, “A novel cooperative NOMA for designing UAV-assisted wireless backhaul networks”, IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 36, no.11, pp. 2497–2507, Nov. 2018.
- [106] T. Hou, Y. Liu, Z. Song, X. Sun and Y. Chen, “Multiple antenna aided NOMA in UAV networks: A stochastic geometry approach,” IEEE Trans. Commun., vol. 67, no. 2, pp. 1031–1044, Feb. 2019.
- [107] W. Mei and R. Zhang, “Uplink cooperative NOMA for cellular-connected UAV,” IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 13, no. 3, pp. 644–656, Jun. 2019.
- [108] J. G. Andrews, F. Baccelli and R. K. Ganti, “A tractable approach to coverage and rate in cellular networks”, IEEE Trans. Commun., vol. 59, no. 11, pp. 3122–3134, Nov. 2011.
- [109] J. Lyu, Y. Zeng and R. Zhang, “UAV-aided offloading for cellular hotspot”, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 17, no. 6, pp. 3988–4001, Jun. 2018.
- [110] K. S. Ali, M. Haenggi, H. ElSawy, A. Chaaban and M. Alouini, “Downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) in poisson networks,” in IEEE Trans. Commun., vol. 67, no. 2, pp. 1613–1628, Feb. 2019.
- [111] Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Young-Han Nam, and Mérouane Debbah, ”A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems”, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 21, NO. 3, THIRD QUARTER 2019
- [112] Azade Fotouhi, Haoran Qiang, Ming Ding, Mahbub Hassan, Lorenzo Galati Giordano, Adrian Garcia-Rodriguez, and Jinhong Yuan, ”Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges”, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 21, NO. 4, FOURTH QUARTER 2019
- [113] Yong Zeng, Ismail Guvenc, Rui Zhang, Giovanni Geraci, David W. Matolak, “UAV Communications for 5G and Beyond (Book)”