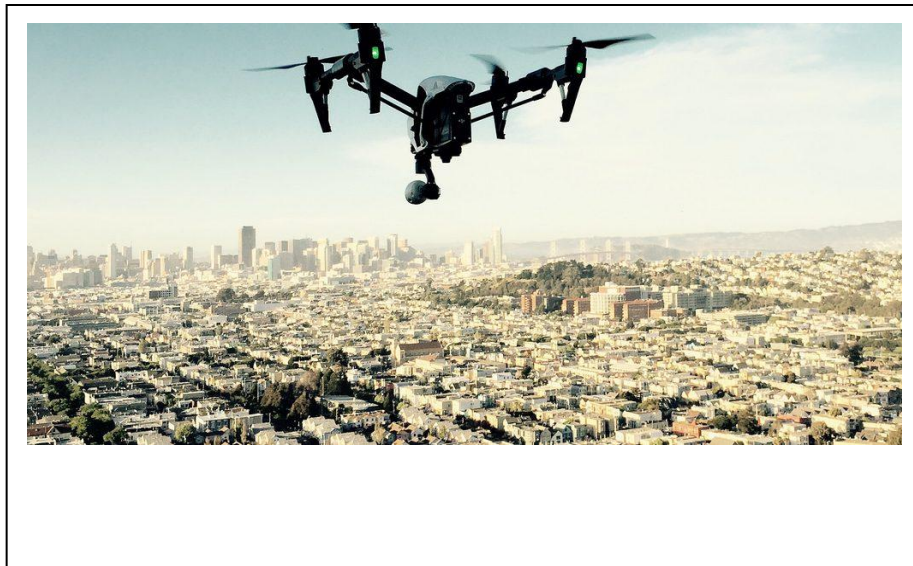


Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Master of Science in
Internetworked Electronic Systems

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βελτίωση Κάλυψης Ασύρματου Δικτύου Επικοινωνιών
με τη Βοήθεια Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Παναγιώτης Νομικός, Α.Μ. 0031
Επιβλέπων: Δημήτριος Καλύβας, καθηγητής

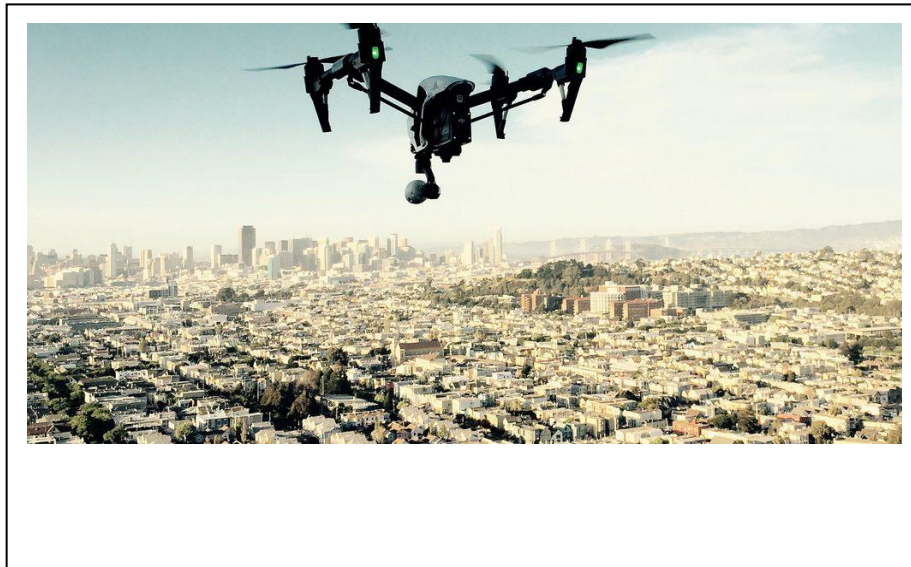
ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Master of Science in
Internetworked Electronic Systems

MSc Thesis

UAV-Assisted Coverage Improvement
in a Wireless Communication Network



Student: Nomikos, Panagiotis, Reg. nr. 0031

MSc Thesis Supervisor: Kalivas, Dimitrios, professor

ATHENS-EGALEO, MARCH 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη σημερινή εποχή ο άνθρωπος αναζητά καθημερινά όλο και περισσότερα μέσα και ιδέες για να επιτύχει μεγαλύτερες επιδόσεις και νέους στόχους στις τεχνολογικές του επιδιώξεις. Η τεχνολογία μη επανδρωμένων αεροσκαφών (Unmanned Aerial Vehicles) έχει κάνει την είσοδό της στην προσπάθεια αυτή και ιδιαίτερα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Πληθώρα ερευνών έχει αποδείξει ότι η αξιοποίηση των UAVs έχει πολλά να προσφέρει στις ασύρματες επικοινωνίες, ωστόσο μένει αρκετός δρόμος μελέτης σχετικά με τις δυσκολίες που παρουσιάζονται.

Στην παρούσα εργασία συζητούνται τα ζητήματα προς επίλυση κατά το σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος επικοινωνιών και προτείνεται μία μέθοδος βελτίωσης μιας τέτοιας επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, αναλύονται τα φαινόμενα που επιφέρουν απώλειες διάδοσης και διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας και παρουσιάζονται οι παράμετροι μοντελοποίησης καναλιού που στοχεύουν στην αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών. Στη συνέχεια, δομείται μια μαθηματική προσέγγιση του παραδείγματος ενός υποθετικού συστήματος επικοινωνίας UAV με επίγειους χρήστες κατά την οποία υπολογίζεται θεωρητικά η εμβέλεια της επικοινωνίας αυτής.

Καταλήγοντας, προτείνεται μια μέθοδος βελτίωσης του συστήματος αυτού και δίνεται ένας αλγόριθμος που υλοποιεί τη μέθοδο αυτή. Τέλος, επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα με χρήση προσομοιώσεων και γίνεται αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: *αέρος – εδάφους, απώλειες διάδοσης, ασύρματη επικοινωνία, διαλείψεις, μεγάλης κλίμακας, μη επανδρωμένο αεροσκάφος, μικρής κλίμακας, μοντελοποίηση καναλιού, τοποθέτηση*

ABSTRACT

In modern days man seeks everyday more and more ways and ideas to achieve greater performances and new goals concerning his technological pursuits. Unmanned Aerial Vehicles technology has made its entrance in this effort and especially in the field of telecommunications. Plenty of research has proved that the use of UAVs has much to offer in wireless communications, although long road of study on the difficulties that appear remains.

In the present thesis, issues to be solved are discussed, that appear while designing such a system and a way of improvement is suggested for such an effort of communication. Specifically, the phenomena that cause propagation losses and small/large scale fading are analyzed and the parameters of channel modeling that aim in dealing with these problems are presented. After, a mathematical approach of an example of a hypothetical system of communication is structured, among a UAV and terrestrial users, in which the range of communication is theoretically calculated.

Ending up, a method of improvement for this system is suggested and an algorithm that implements this method is given. In the end, the results are confirmed by using simulations and an evaluation and interpretation of those results is made.

KEYWORDS: *air to ground, channel modeling, fading, large scale, localization, propagation loss, small scale, UAV, wireless communication*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος – Ανασκόπηση του πεδίου	8
Κατηγοριοποίηση	8
Χρήση – Εφαρμογές	9
Πλεονεκτήματα των UAVs	9
Ζητήματα προς Επίλυση	10
Σχετικές Προσπάθειες – Παρούσα Εργασία	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μεθοδολογία της έρευνας	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η προτεινόμενη μέθοδος – Θεμελίωση, Σχεδίαση, Ανάπτυξη	14
Περίληψη Προσέγγισης	14
Απώλειες Διάδοσης	14
Μοντελοποίηση Καναλιού	16
Ακτίνα Κάλυψης	18
Ύψος Μεγιστοποίησης Ακτίνας Κάλυψης	22
Βέλτιστη 3-D Τοποθέτηση	24
Εφαρμογή και Επιβεβαίωση	24
Συνοπτικά τα Βήματα της Μεθόδου	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογή και Αποτελέσματα	28
Παράμετροι Προσομοίωσης	28
Υπολογισμός Ύψους Μέγιστης Εμβέλειας h_1	30
Δημιουργία Σεναρίου	30
Αρχική Τοποθέτηση UAV-BS	30
Βέλτιστη Τοποθέτηση UAV-BS	30
Επαλήθευση Αποτελεσμάτων	32
Ποσοστό Βελτίωσης	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ	40
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	41
Παράρτημα Α: Καθορισμός Παραμέτρων Προβλήματος	41
Παράρτημα Β: Επαλήθευση Θεωρίας	42
Παράρτημα Γ: Υπολογισμός Βέλτιστης Τοποθέτησης Τοπικά	42
Παράρτημα Δ: Επανάληψη για Κάθε Τοπικό Βέλτιστο	46

Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας

Ο άνθρωπος, κατά την προσπάθειά του να πετύχει ένα ανώτερο επίπεδο στην ποιότητα της ζωής του, χρησιμοποιεί όλα τα μέσα που έχει τη δυνατότητα να διαθέσει, ενώ καθημερινά επιστρατεύει και νέα. Μια σχετικά καινούργια τεχνολογία, η οποία αξιοποιείται μεταξύ άλλων και στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, θα αποτελέσει αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για τη χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs / γνωστά επίσης και ως Drones), η οποία λαμβάνει χώρα σε πληθώρα τεχνολογικών εφαρμογών.

Έχουν κατασκευαστεί αρκετοί τύποι UAV, οι οποίοι ενδέχεται να είναι μικρά αεροσκάφη που διαθέτουν κάποιο σύστημα απομακρυσμένου ελέγχου (Remotely Controlled) ή να έχουν σχεδιαστεί με κάποιο προεγκατεστημένο προγραμματισμό (Pre-programmed). Παρέχουν τη δυνατότητα να δρουν σε μεγάλα ή μικρά ύψη, να αιωρούνται σε σταθερή θέση ή να αναπτύσσουν ταχύτητες. Η ευελιξία που τα χαρακτηρίζει, τα καθιστά κατάλληλα για πληθώρα εφαρμογών στρατιωτικού χαρακτήρα, παρακολούθησης, έρευνας και διάσωσης ή ακόμα και τηλεπικοινωνιών.

Ωστόσο, η αξιοποίηση της τεχνολογίας αυτής συνοδεύεται από περίπλοκα προβλήματα που απαιτείται να αντιμετωπιστούν κατά το σχεδιασμό μιας καινοτομίας. Για το λόγο αυτό καθίσταται αναγκαία η μελέτη των ζητημάτων αυτών, προκειμένου να καταστεί εφικτή η πλήρης αξιοποίηση της τεχνολογίας των UAVs.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των χαρακτηριστικών, των προτερημάτων και των τρόπων με τους οποίους είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα drone. Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στα ζητήματα προς επίλυση, σχετικά με το σχεδιασμό ενός συστήματος επικοινωνιών που χρησιμοποιεί τεχνολογία UAV. Στη συνέχεια, θα συζητηθούν τα φυσικά φαινόμενα και οι περιορισμοί που αφορούν μια τέτοια προσπάθεια, όπως και οι επιλογές που θα καθορίσουν την επιτυχία της (μοντελοποίηση καναλιού). Παρακάτω, θα υπολογιστούν με σαφήνεια οι απώλειες διάδοσης που δυσχεραίνουν την επικοινωνία μεταξύ ενός UAV και οποιουδήποτε επίγειου δέκτη και θα υπολογιστεί η εμβέλεια μιας τέτοιας σύνδεσης. Μετέπειτα, θα περιγραφεί η προτεινόμενη από την παρούσα εργασία μέθοδος υπολογισμού της βέλτιστης τοποθέτησης ενός UAV σε ένα υποθετικό σενάριο και θα αναπτυχθεί αλγόριθμος που την υλοποιεί. Τέλος, θα επαληθευτεί η εγκυρότητα της προσέγγισης

αυτής, τόσο θεωρητικά, όσο και με χρήση προσομοιώσεων, και θα συζητηθούν τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που προκύπτουν.

Κατηγοριοποίηση

Η τεχνολογία αυτή χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη ποικιλομορφία, η οποία αποσκοπεί στην κάλυψη εύρους αναγκών, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Ωστόσο, τα drones είναι δυνατό να ταξινομηθούν σε κατηγορίες, ως εξής:

Με κριτήριο το υψόμετρο στο οποίο θα αξιοποιηθεί ένα UAV χαρακτηρίζεται είτε ως πλατφόρμα μεγάλου υψομέτρου (High Altitude Platform - HAP), είτε ως πλατφόρμα μικρού υψομέτρου (Low Altitude Platform - LAP). Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη τα οποία “δρουν” σε υψόμετρο άνω των 17km. Η χρήση τους συνοδεύεται από αυξημένο κόστος, ενώ από την άλλη προσφέρουν μεγαλύτερη διάρκεια κατά τη χρήση τους. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη τα οποία αξιοποιούνται σε εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα σε χαμηλότερο υψόμετρο, καθώς είναι σχεδιασμένα για λειτουργία σε ύψη δεκάδες μέτρων έως μερικών χιλιομέτρων. Πρόκειται για drones τα οποία παρέχουν δυνατότητα γρήγορης πλοήγησης και είναι ιδιαίτερα ευκίνητα. Καθίστανται κατάλληλα, δηλαδή, για εφαρμογές άμεσης και σύντομης δράσης (temporary event scenarios).

Με χρήση διαφορετικού κριτηρίου, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη ενδέχεται επίσης να ταξινομηθούν στις εξής δύο κατηγορίες. Όταν η πτέρυγα ενός UAV κινείται με ταχύτητα συγκρίσιμη με αυτήν της ατράκτου, τότε γίνεται αναφορά για αεροσκάφος σταθερών πτερύγων (Fixed Wing UAV). Αντιθέτως, στην περίπτωση που η πτέρυγα του UAV κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτήν της ατράκτου, πρόκειται για αεροσκάφος περιστροφικών πτερύγων ή ελικοφόρο (Rotary Wing UAV). Χαρακτηριστικό των drones που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία είναι η απαίτηση να κινούνται προς τα εμπρός, ούτως ώστε να διατηρήσουν την άντωση που τα διατηρεί στον αέρα, σε αντίθεση με αυτά της δεύτερης κατηγορίας, τα οποία διαθέτουν τη δυνατότητα αιώρησης. Από την άλλη, τα αεροσκάφη σταθερών πτερύγων παρέχουν σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια αποστολών, από ό,τι τα ελικοφόρα.

Σε κάθε περίπτωση, καθίσταται προφανές ότι η κάθε κατηγορία παρουσιάζει διαφορετικά προτερήματα, όπως και περιορισμούς. Συνεπώς, κατά το σχεδιασμό οποιουδήποτε project, θα παίξει καθοριστικό ρόλο η λήψη κατάλληλων αποφάσεων

σύμφωνα με τις διατιθέμενες επιλογές, ανάλογα με τη φύση και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής [10].

Χρήση – Εφαρμογές

Σε ένα δίκτυο επικοινωνιών συναντάται συχνά η αξιοποίηση ενός UAV στο ρόλο ενός σταθμού βάσης (Base Station). Στο πλαίσιο αυτό, καθίσταται εφικτό να χρησιμοποιηθεί τεχνολογία μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών (πχ σεισμός, πλημμύρα κλπ.) κατά τις οποίες προκύπτει τα χερσαία δίκτυα να μην είναι πλήρως λειτουργικά. Διαφορετική περίπτωση ενδεικτικά, θα μπορούσε να αποτελέσει κάποιο γιορτινό γεγονός -όπως Ολυμπιακοί Αγώνες, παγκόσμια πρωταθλήματα κλπ.- όπου η χρήση drones έχει να προσφέρει μεγάλη χωρητικότητα δικτύου για ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών (ενδεικτικά projects: Qualcomm-LTE drone, AT&T, ABSOLUTE κλπ.). Τέλος, αναφέρεται ότι μια επιπλέον χρησιμότητα αυτής της τεχνολογίας θα μπορούσε να είναι η συλλογή δεδομένων από δίκτυο αισθητήρων ή άλλων χρηστών εδάφους.

Δεν είναι άστοχο να αναφερθεί ότι ένα UAV είναι επίσης κατάλληλο για αξιοποίηση σε εφαρμογές στο ρόλο ενός χρήστη (User). Δεν αποτελεί σενάριο επιστημονικής φαντασίας η παράδοση παραγγελιών από μεταφορείς drones ή η μεταφορά ειδών πρώτων βοηθειών σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Ο άνθρωπος ήδη μελετά τη χρήση UAVs σε επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης ή την αξιοποίηση HAP για παροχή πρόσβασης στο Διαδίκτυο, σε περιοχές οι οποίες δεν υποστηρίζονται επαρκώς από χερσαία δίκτυα (ενδεικτικά projects: Google Loon project, Facebook's Internet drone) [10].

Πλεονεκτήματα των UAVs

Η κατασκευή ενός λειτουργικού δικτύου τηλεπικοινωνιών, το οποίο καλύπτει μια συγκεκριμένη ανάγκη ή τις απαιτήσεις μιας εφαρμογής, δεν ήταν ποτέ εύκολη υπόθεση. Σ' αυτό έχει να προσφέρει η αξιοποίηση της τεχνολογίας των UAVs. Πιο συγκεκριμένα, ένα drone παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένη πιθανότητα επίτευξης συνδέσεων με άμεση οπτική επαφή (Line of Site - LoS). Λόγω του ύψους στο οποίο βρίσκονται, σχετικά με τα χερσαία δίκτυα -ειδικά σε περιοχές με πληθώρα εμποδίων, όπως πυκνοκατοικημένες πόλεις- υπάρχει η δυνατότητα εδραίωσης άμεσων ασύρματων οδών επικοινωνίας. Η προσπάθεια αυτή διευκολύνεται ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι είναι εφικτό να

μεταβάλλεται το υψόμετρο δράσης ενός drone. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παραμετροποιείται και ως εκ τούτου να βελτιστοποιείται η επικοινωνία.

Περαιτέρω, ένα drone έχει τη δυνατότητα να μετακινείται και συνεπώς καθίσταται εφικτή η εξυπηρέτηση μεγάλων γεωγραφικών περιοχών με τη χρήση μερικών μόνο συσκευών. Ακόμα περισσότερο, η όλη υπόθεση διευκολύνεται από το γεγονός ότι η τεχνολογία UAV συνοδεύεται από απλή δομή, χαμηλό κόστος κατασκευής και μπορεί να τεθεί άμεσα σε εφαρμογή [10].

Ζητήματα προς Επίλυση

Κατά το σχεδιασμό ενός project παρουσιάζονται διλήμματα για τα οποία πρέπει να ληφθεί μια απόφαση. Ιδιαίτερα όσον αφορά τον τομέα των επικοινωνιών, όπου αναζητείται πάντα η βέλτιστη παραμετροποίηση, παρατίθενται παρακάτω ζητήματα, τα οποία καθίστανται αντικείμενο διερεύνησης τόσο σε κάθε ξεχωριστή εφαρμογή, όσο και γενικά προβλήματα προς επίλυση [10].

- Βέλτιστη 3-D πλοήγηση (Optimal 3-D deployment): Ποιος είναι ο πιο συμφέρων τρόπος τοποθέτησης ενός ή περισσότερων drones, ώστε να επιτευχθεί μεγιστοποίηση εξυπηρέτησης;
- Σχεδιασμός διαδρομής (Path planning): Με ποιο μοτίβο θα πρέπει να κινούνται τα drones;
- Μοντελοποίηση καναλιού (Channel modeling): Ποιο είναι το πιο αποδοτικό μοντέλο για επικοινωνίες αέρος – εδάφους;
- Ανάλυση επιδόσεων (Performance analysis): Με ποιον τρόπο και ποια θα είναι τα κριτήρια, με τα οποία θα αξιολογηθούν οι μέχρι σήμερα προσπάθειες; Σκοπός είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων τα οποία θα αξιοποιηθούν στη βελτίωση μελλοντικών εφαρμογών.
- Διαχείριση πόρων (Resource management): Για πόσο χρονικό διάστημα μπορεί να διατηρηθεί ένα drone στον αέρα, δεδομένων των περιορισμών στους συσσωρευτές που διαθέτει; Με ποιον τρόπο θα επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των αναγκών σε κατανάλωση ενέργειας ενός drone; Είναι δυνατό να αξιοποιηθούν πόροι από το περιβάλλον;

- Διαχείριση παρεμβολών (Interference management): Δεδομένης της συνύπαρξης στον ίδιο χώρο διαφορετικών συσκευών τόσο στον αέρα όσο και στο έδαφος, με ποιον τρόπο θα καταστεί εφικτή η επικοινωνία;

Σχετικές Προσπάθειες – Παρούσα Εργασία

Η αντιμετώπιση των ανωτέρω ζητημάτων ελκύει αυξανόμενα το ενδιαφέρον στο σημερινό τεχνολογικό κόσμο. Ο David W. Matolak έχει μελετήσει και οργανώσει τη γνώση που αφορά τη μοντελοποίηση καναλιού, ώστε να προσεγγίσει την απάντηση για το πιο αποδοτικό μοντέλο για επικοινωνίες αέρος -εδάφους [1], [2], [3], [4].

Ο Mohamed Alzenad και οι συνεργάτες του ασχολήθηκαν με την ανάλυση της κάλυψης και των ρυθμών επικοινωνίας που είναι δυνατό να επιτευχθούν μεταξύ ενός UAV και επίγειων δεκτών, τόσο στην περίπτωση δυνατότητας για οπτική επαφή (Line of Site - LoS), όσο και στην περίπτωση αδυναμίας για οπτική επαφή (Non-Line of Site - NLoS). Ασχολήθηκαν επίσης, με την αναζήτηση της βέλτιστης 3-D τοποθέτησης ενός UAV, με σκοπό την αναζήτηση ενός λιγότερο δαπανηρού ενεργειακά τρόπου επικοινωνίας [5], [8].

Οι A. Al-Hourani, S. Kandeeran, και S. Lardner χρησιμοποίησαν μια δική τους μέθοδο για τον υπολογισμό κάλυψης επικοινωνίας για πλατφόρμες χαμηλού υψομέτρου (LAP). Αξιοποιώντας παραμέτρους περιβάλλοντος που αφορούν τη δόμηση ημιαστικών και αστικών περιοχών κατέληξαν σε προσεγγιστικές εξισώσεις με σκοπό την απλοποίηση των πράξεων. Οι δύο πρώτοι σε συνεργασία με τον Abbas Jamalipour δεν έμειναν εκεί. Μελέτησαν και επιχείρησαν να μοντελοποιήσουν τις απώλειες διάδοσης LAP σε αστικό περιβάλλον [6], [12].

Αντίστοιχα προβλήματα επιχείρησε να προσεγγίσει ο Mohammad Mozaffari με τους συνεργάτες του, μελετώντας τις επιλογές και τις σχετικές παραμέτρους που απαιτείται να ληφθούν υπ' όψη κατά τη μοντελοποίηση επικοινωνιών αέρος-εδάφους. Οργάνωσε τη γνωστή θεωρία σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν μια τέτοια προσπάθεια και κατέγραψε τα υπέρ και τα κατά των διαφόρων επιλογών [7], [9], [10].

Τα παραπάνω είναι μερικά παραδείγματα των διαφόρων μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί σε μια προσπάθεια να δοθούν απαντήσεις στα προαναφερθέντα προβλήματα προς επίλυση. Τα μαθηματικά εργαλεία και αλγόριθμοι που είναι απαραίτητα για την προσέγγιση των προβλημάτων αυτών κατά το σχεδιασμό ενός project είναι η θεωρία παραμετροποίησης (optimization theory), η στοχαστική γεωμετρία (stochastic geometry) -για ανάλυση επιδόσεων-, η θεωρία μεταφοράς (transport theory) και η θεωρία ελέγχου (control theory).

Ωστόσο η πολυπλοκότητα και η ιδιαιτερότητα της κάθε εφαρμογής καταδεικνύει διαφορετική λύση για κάθε εφαρμογή, αφήνοντας ελάχιστα περιθώρια γενικεύσεων. Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο είναι δύσκολο να ισχυριστεί κανείς με βεβαιότητα πως οποιαδήποτε μέχρι τώρα προσέγγιση οποιουδήποτε προβλήματος είναι η βέλτιστη.

Η παρούσα εργασία έχει να προσφέρει μια προσέγγιση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης ενός UAV, με σκοπό η δοθείσα λύση να μπορεί να αξιοποιηθεί σε ευρύ πλήθος εφαρμογών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μεθοδολογία της έρευνας

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, αρχικά παρουσιάζεται η προϋπάρχουσα γνώση και θεωρία. Συζητούνται οι νόμοι της φύσης οι οποίοι συμμετέχουν στη διαδικασία μιας ασύρματης επικοινωνίας, ούτως ώστε να καταστούν ξεκάθαρα τα φαινόμενα που δυσκολεύουν μια τέτοια προσπάθεια. Παρακάτω, έχοντας αποσαφηνίσει τους περιορισμούς και τα ζητήματα προς επίλυση, αναλύεται ο τρόπος και οι τεχνικές με τις οποίες σχεδιάζεται το μοντέλο ενός καναλιού επικοινωνίας, καθορίζοντας έτσι την αποδοτικότητα ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας.

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά και υπολογίζονται θεωρητικά οι απώλειες στη διάδοση των ασύρματων σημάτων, ώστε να εξαχθεί η πληροφορία για την εμβέλεια ενός UAV, δεδομένων των απαραίτητων παραμέτρων. Επιλύεται θεωρητικά το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης ενός UAV, σε ένα συγκεκριμένο σενάριο, με την πρόταση μιας μεθόδου, και μετέπειτα αναπτύσσεται αλγόριθμος που υλοποιεί την προσέγγιση αυτή.

Τέλος, επαληθεύεται τόσο θεωρητικά, όσο και με χρήση προσομοιώσεων η προτεινόμενη μέθοδος και συζητούνται τα αποτελέσματα, συνοδευόμενα από αντίστοιχα συμπεράσματα.

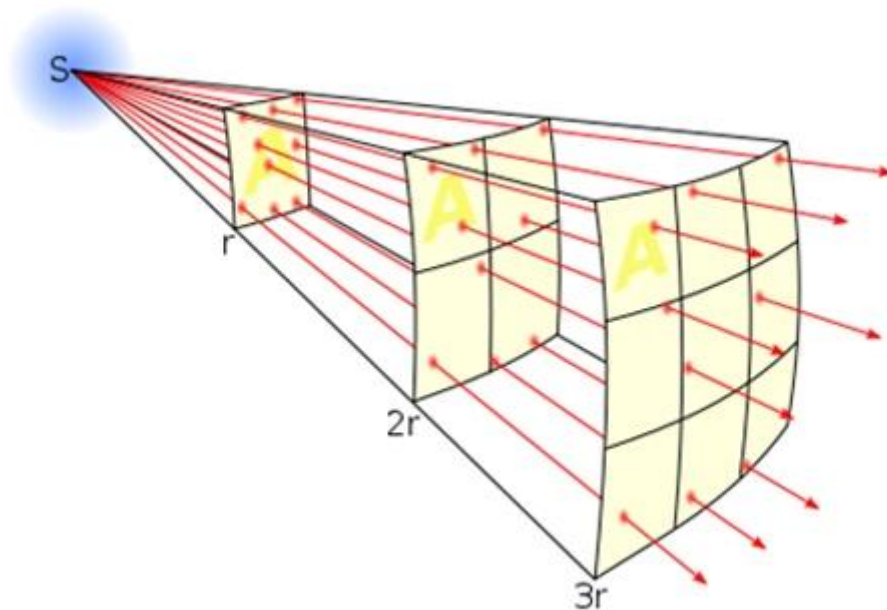
Περίληψη Προσέγγισης

Παρακάτω, θα συζητηθούν τα φαινόμενα απωλειών διάδοσης και διαλείψεων μικρής και μεγάλης κλίμακας. Θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται ένα μοντέλο επικοινωνιών, λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα δεδομένα, ούτως ώστε να μεγιστοποιηθεί η εμβέλεια της επικοινωνίας. Στη συνέχεια, θα υπολογιστούν θεωρητικά οι απώλειες διάδοσης σε ένα δίκτυο επικοινωνίας το οποίο χρησιμοποιεί UAV και θα συζητηθεί η επιλογή της κατάλληλης τοποθέτησής του. Τέλος, με βάση τα παραπάνω, θα αναπτυχθεί αλγόριθμος ο οποίος σκοπεύει στην εύρεση της βέλτιστης 3-D τοποθέτησης του UAV, ούτως ώστε να βελτιστοποιηθεί το δίκτυο επικοινωνιών. Ολοκληρώνοντας, επαληθεύονται τα αποτελέσματα της παρούσας προσέγγισης με χρήση πλήθους προσομοιώσεων και δίνονται διευκρινίσεις για το ποσοστό βελτίωσης της επικοινωνίας.

Απώλειες Διάδοσης

Σε κάθε σύστημα επικοινωνιών το πρώτο ερώτημα που γίνεται αντικείμενο μελέτης αφορά την ισχύ λήψης στον οποιονδήποτε δέκτη, δεδομένης της ισχύος εκπομπής από τον πομπό. Το ζήτημα αυτό δεν είναι καθόλου απλό, ενώ καθίσταται κρίσιμο κατά το σχεδιασμό του συστήματος. Πριν, λοιπόν, από οποιαδήποτε αναφορά σχετικά με το πρόβλημα που σκοπεύει να προσεγγίσει η παρούσα εργασία, είναι αναγκαίο να συζητηθούν συνοπτικά τα φαινόμενα διάδοσης και απωλειών σε γενικότερο πλαίσιο.

Αρχικά, θεωρείται το απλούστερο σύστημα επικοινωνιών, αυτό δηλαδή που αποτελείται αποκλειστικά από έναν πομπό και έναν δέκτη, στον κενό χώρο. Σε αυτήν την περίπτωση ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την ισχύ λήψης σχετικά με την ισχύ εκπομπής είναι η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Συγκεκριμένα, το ποσό ενέργειας που εκπέμπεται από τον πομπό “μοιράζεται” στο χώρο και ένα μόνο ποσοστό αυτής φθάνει στον δέκτη, ενώ το υπόλοιπο εξακολουθεί να διαδίδεται προς άλλες κατευθύνσεις. Επιπλέον παράγοντες που παίζουν ρόλο είναι τα φυσικά χαρακτηριστικά των διατάξεων που χρησιμοποιούνται, δηλαδή το κέρδος (Gain) που παρουσιάζουν ο πομπός και ο δέκτης. Η μείωση αυτή στην ισχύ λήψης ονομάζεται “απώλεια διάδοσης στον ελεύθερο χώρο” (free space propagation loss) [1], [2], [3], [4].

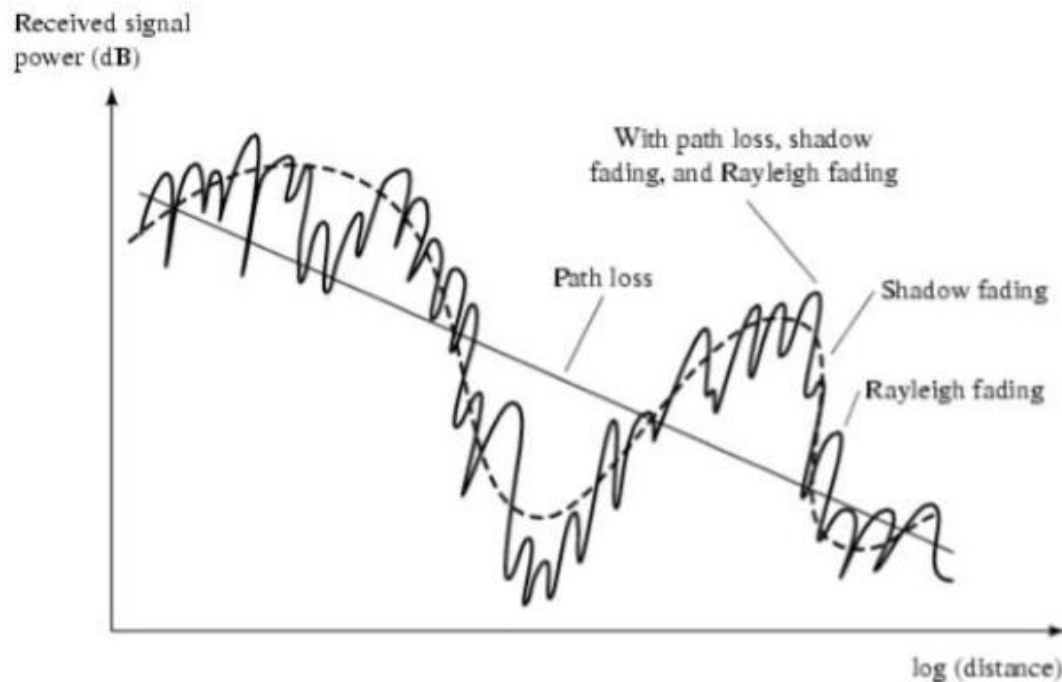


Εικόνα 1: “απώλεια διάδοσης στον ελεύθερο χώρο” (free space propagation loss): το ποσό ενέργειας που εκπέμπεται από τον πομπό “μοιράζεται” στο χώρο και ένα μόνο ποσοστό αυτής φθάνει στον δέκτη [Daniel E. Capano, Wireless propagation fundamentals, Αύγουστος 27, 2014].

Πλησιάζοντας μια πραγματική κατάσταση, το παραπάνω σύστημα τοποθετείται σε περιβάλλον με εμπόδια. Αυτά τα εμπόδια βρίσκονται τόσο ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη, όσο και εξωτερικά από αυτούς. Πλέον, η κατάσταση καθίσταται πολύ πιο περίπλοκη και τα φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν την επικοινωνία είναι γνωστά ως “διαλείψεις” (fading). Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα όταν διέρχεται από διαφορετικό μέσο (στην προκειμένη περίπτωση το εμπόδιο ανάμεσα στον πομπό και το δέκτη), ενώ ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης προκαλείται επίσης και απόσβεση στην ισχύ. Το σύνολο των απωλειών που περιγράφεται μέχρι στιγμής και οφείλεται στην παρεμπόδιση του σήματος από ενδιάμεσα αντικείμενα αποκαλείται “διαλείψεις μεγάλης κλίμακας” (large scale fading) ή “σκίαση” (shadowing) [1], [2], [3], [4].

Ολοκληρώνοντας την προσέγγιση ενός πραγματικού συστήματος επικοινωνιών, λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες συμπεριφοράς του φωτός, όταν αυτό συναντά εμπόδια ή διέρχεται από τη διαχωριστική επιφάνεια διαφορετικών μέσων (ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση, σκέδαση). Είναι πλέον προφανές ότι η κάθε ξεχωριστή ακτίνα που εκπέμπεται από τον ίδιο πομπό θα ανακλαστεί, θα διαθλαστεί, θα περιθλαστεί και/ή θα

καθυστερήσει (διερχόμενη από διαφορετικό μέσο) και εν τέλει θα ακολουθήσει διαφορετική διαδρομή για να καταλήξει στο δέκτη. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως “διάδοση πολλαπλών διαδρομών” (multipath propagation). Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο, ποσοστό ακτινοβολίας που υπό άλλες συνθήκες θα έφτανε στο δέκτη, τώρα πλέον θα ανακατευθυνθεί και το αντίστροφο. Οι απώλειες που προκύπτουν από τα φαινόμενα αυτά ονομάζονται “διαλείψεις μικρής κλίμακας” (small scale fading) [1], [2], [3], [4].



Εικόνα 2: Απώλειες μικρής και μεγάλης κλίμακας (Large - Small Scale Fading)

Μοντελοποίηση Καναλιού

Οι απώλειες διάδοσης που περιγράφονται παραπάνω, αν και πλέον κατανοητές από τον άνθρωπο, είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα σχεδιασμού τα οποία πάντοτε ακολουθούνται από εκτενείς μελέτες πριν την υλοποίηση κάποιας πραγματικής προσπάθειας. Παρακάτω θα συζητηθούν τα προβλήματα στην επικοινωνία που προκύπτουν από τα προαναφερθέντα φαινόμενα, όπως και οι διάφορες παράμετροι στην μοντελοποίηση του καναλιού (channel modeling), που θα καθορίσουν την αποδοτικότητα της επικοινωνίας.

Το γεγονός των απωλειών διάδοσης -αλλιώς “απόσβεση καναλιού” (channel attenuation)- σε ένα σύστημα επικοινωνιών θέτει το ζήτημα της διασφάλισης μιας ποιότητας εξυπηρέτησης (Quality of Service - QoS). Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να

μελετηθούν τα όρια και οι δυνατότητες της επικοινωνίας, ούτως ώστε να φθάνει στο δέκτη επαρκής ισχύς. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, καθίσταται προφανές ότι οι παράμετροι οι οποίες προσαρμόζονται κατάλληλα είναι η απόσταση των συστημάτων που επιχειρούν να επικοινωνήσουν και το επίπεδο της ισχύος εκπομπής. Περεταίρω, η επιλογή του κατάλληλου εύρους συχνότητας λειτουργίας παίζει σημαντικό ρόλο, αφενός επειδή η ατμόσφαιρα συμπεριφέρεται ως φίλτρο συχνοτήτων και αφετέρου διότι οι απώλειες μετάδοσης μεγιστοποιούνται όσο το μήκος κύματος της ακτινοβολίας γίνεται συγκρίσιμο με τις διαστάσεις των εμποδίων. Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο παραμετροποιείται η εμβέλεια της επικοινωνίας.

Πέρα από τη διαφορά των επιπέδων ισχύος εκπομπής και λήψης, το φαινόμενο της “διάδοσης πολλαπλών διαδρομών” έχει να προσθέσει στις δυσκολίες της επικοινωνίας. Ο λόγος είναι η διαφορετική καθυστέρηση με την οποία θα διαδοθεί το κάθε bit πληροφορίας στο χώρο, η οποία προκύπτει από το γεγονός ότι η κάθε ακτίνα σήματος διανύει διαφορετική απόσταση. Αν και πρόκειται για ακτινοβολία η οποία διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός, ένας αυξημένος ρυθμός μετάδοσης συμβόλων ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα η άφιξη ενός bit πληροφορίας να συμπέσει χρονικά με την άφιξη ενός διαδοχικού bit στο δέκτη. Για να ελεγχθούν τα προβλήματα που προκύπτουν από το χρονικό εύρος καθυστέρησης του κάθε συμβόλου (multipath delay spread) απαιτείται να ρυθμιστεί κατάλληλα ο ρυθμός μετάδοσης των συμβόλων. Επιπλέον, είναι δόκιμο να επιλεγεί κατάλληλα και το εύρος ζώνης του σήματος, το οποίο συνδέεται άμεσα με τη διάρκεια των συμβόλων. Το ζητούμενο είναι η εύρεση μιας χρυσής τομής ανάμεσα στη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης και τις ελαχιστοποίησης δημιουργίας σφαλμάτων, ώστε να μεγιστοποιηθεί ο τελικός ρυθμός επικοινωνίας [1], [2], [3], [4].

Τέλος, ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος δεν μπορεί παρά να ληφθεί υπόψη είναι το φαινόμενο Doppler. Το γεγονός ότι ο πομπός και ο δέκτης ενδέχεται να βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους, έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της θέσης και του εύρους των συχνοτήτων (Doppler spread) που καταλαμβάνει ένα πακέτο πληροφορίας. Σε αυτήν την περίπτωση, όταν χρησιμοποιούνται τεχνικές πολυπλεξίας συχνότητας, είναι πιθανό να συμπέσουν τα κανάλια διάδοσης διαφορετικών πακέτων επικοινωνίας. Ο μοναδικός τρόπος να αντιμετωπιστεί το ζήτημα αυτό είναι η κατάλληλη επιλογή εύρους ζώνης των διαφορετικών καναλιών, όπως και η κατασκευή επαρκούς κενού ανάμεσά τους [1], [2], [3], [4].

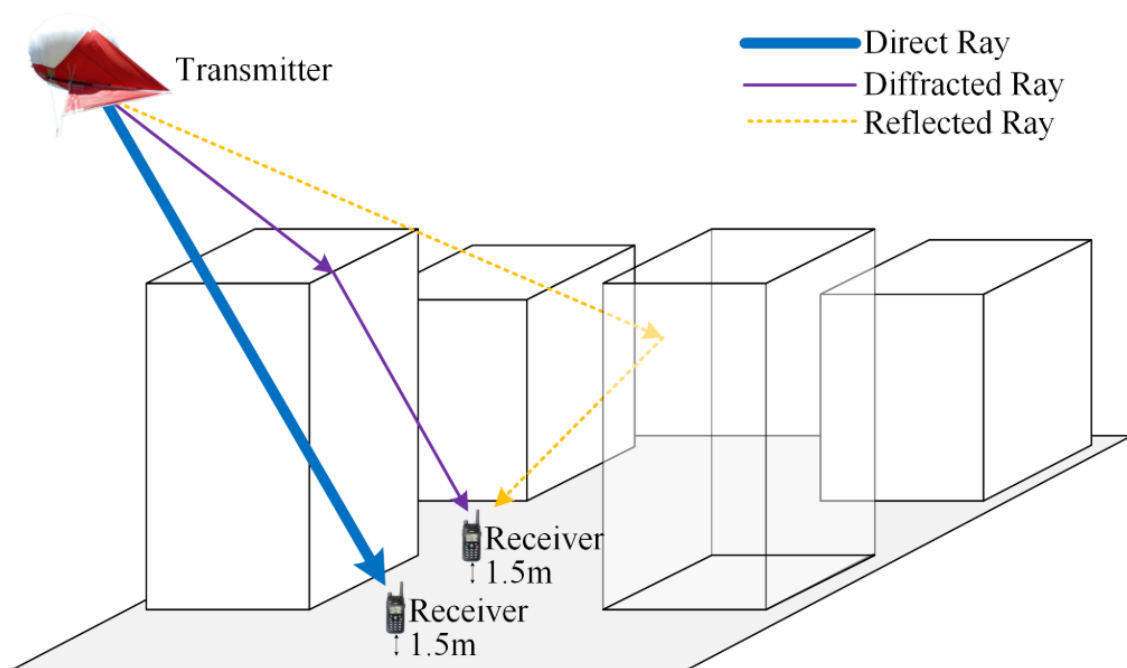
Κατά το σχεδιασμό, λοιπόν, ενός συστήματος επικοινωνίας η κατάλληλη μοντελοποίηση του καναλιού το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί είναι καθοριστική. Έπειτα από τη θεωρητική προσέγγιση ακολουθεί έρευνα και ένα σύνολο μετρήσεων, οι οποίες επαληθεύουν, διορθώνουν ή ακυρώνουν τους προηγηθέντες υπολογισμούς. Το

αποτέλεσμα της μελέτης αυτής θα δώσει στατιστικές τιμές και απαντήσεις σχετικά με την απόδοση της επικοινωνίας και τη βελτιστοποίηση του μοντέλου καναλιού [1], [2], [3], [4].

Ακτίνα Κάλυψης

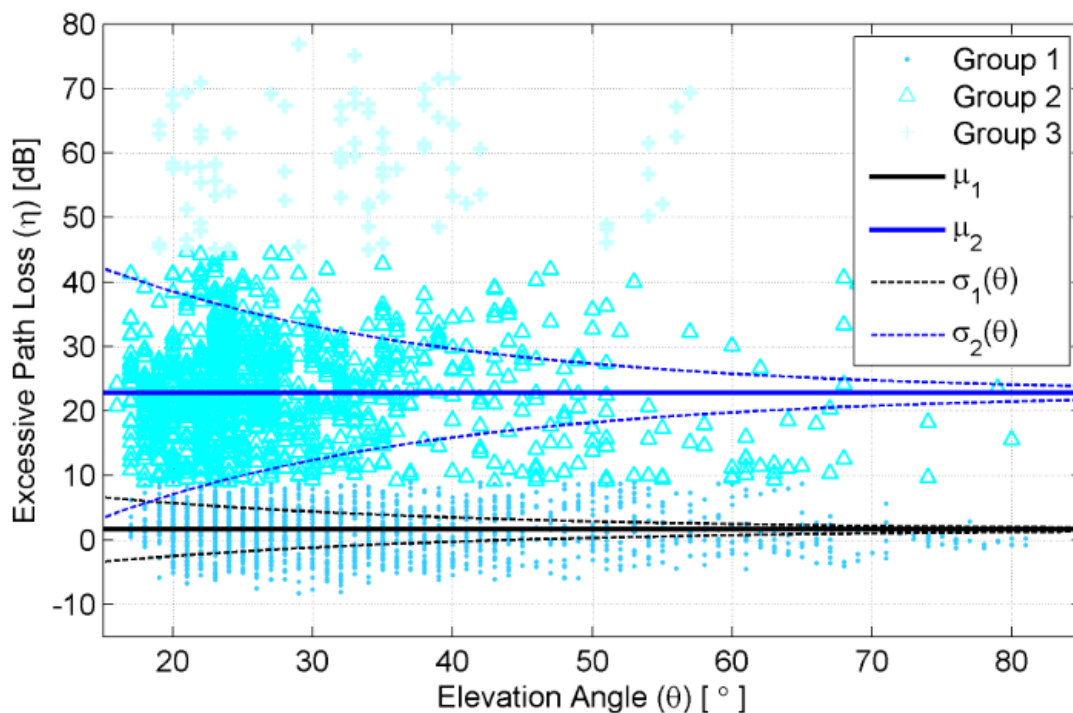
Θεωρείται μια γεωγραφική περιοχή στην οποία βρίσκεται πλήθος χρηστών, ομοιόμορφα τυχαία κατανομημένοι και σε γνωστή θέση, οι οποίοι επιθυμούν να εξυπηρετηθούν από ένα δίκτυο κυψελωτής επικοινωνίας. Έπειτα από την υπόθεση ότι το δίκτυο αυτό είναι υπερφορτωμένο, χρησιμοποιείται ένα UAV ως σταθμός βάσης (UAV Base Station ή UAV-BS), το οποίο στοχεύει να εξυπηρετήσει το μέγιστο δυνατό πλήθος χρηστών, ούτως ώστε να αποφορτίσει το χερσαίο δίκτυο.

Από τα υπάρχοντα μοντέλα επικοινωνιών αέρος – εδάφους υιοθετείται αυτό που περιγράφεται στην [6], το οποίο είναι και το επικρατέστερο τόσο λόγω της απλότητας που έχει να προσφέρει, όσο και λόγω της ακρίβειας με την οποία προσεγγίζει την πραγματικότητα.



Εικόνα 3: Οι τρεις τρόπους διάδοσης της εκπεμπόμενης από το UAV ισχύος, η άμεση ακτίνα (Direct Ray), η περιθλώμενη ακτίνα (Diffracted Ray) και η ανακλώμενη ακτίνα (Reflected Ray) [12].

Στην [12] οι Akram Al-Hourani, Sithamparanathan Kandeepan και Abbas Jamalipour μελετούν τους τρεις τρόπους διάδοσης της εκπεμπόμενης από το UAV ισχύος. Αναφέρονται στην άμεση ακτίνα (Direct Ray), στην περιθλώμενη ακτίνα (Diffracted Ray) και στην ανακλώμενη ακτίνα (Reflected Ray), υπολογίζοντας την ισχύ που λαμβάνεται από τον επίγειο δέκτη. Το μοντέλο που αναπτύσσουν οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο τρίτος τρόπος επικοινωνίας υπόκειται σε ισχυρές απώλειες και η ισχύς που φθάνει στο δέκτη μέσω ανακλώμενων ακτινών είναι αμελητέα. Συνεπώς, η επικοινωνία ανάμεσα σε ένα UAV και έναν επίγειο δέκτη ουσιαστικά επιτυγχάνεται με τους δύο άλλους τρόπους διάδοσης.



Διάγραμμα 1: Δείγματα απωλειών διάδοσης για κάθε τρόπο επικοινωνίας (Group 1: άμεση ακτίνα, Group 2: περιθλώμενη ακτίνα, Group 3: ανακλώμενη ακτίνα) [12].

Είναι ασφαλής, λοιπόν, η υπόθεση ότι η επικοινωνία ανάμεσα στο UAV-BS και τον κάθε χρήστη πραγματοποιείται αποκλειστικά με σήματα άμεσης οπτικής επαφής (LoS) και σήματα μη άμεσης οπτικής επαφής (NLoS). Η πιθανότητα πραγματοποίησης επικοινωνίας με LoS σύνδεση ανάμεσα στον i -στο χρήστη και ένα UAV-BS υπολογίζεται στην [6] και δίνεται από τη σχέση:

$$P_{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp\left(-b \left(\frac{180}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{h}{r_i}\right) - a\right)\right)}, \quad (1)$$

Οι σταθερές a και b της παραπάνω εξίσωσης καθορίζονται το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η τιμή τους εξάγεται στην [6] με τη χρήση ενός εμπειρικού μοντέλου που προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τις μεταβλητές a , b και γ , οι οποίες προκύπτουν ως εξής:

a : αναλογία χτισμένου εμβαδού σχετικά με το συνολικό εμβαδόν της περιοχής

β : μέσο πλήθος κτηρίων ανά μονάδα εμβαδού (κτήρια/km²)

γ : βαθμωτή παράμετρος που περιγράφει την κατανομή του ύψους των κτηρίων σύμφωνα με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh:

$$f(H) = (H/\gamma^2) \exp(-H^2/2\gamma^2) \quad \text{όπου } H: \text{ το ύψος των κτηρίων (m)}$$

Η μεταβλητή h εκφράζει το ύψος στο οποίο βρίσκεται το UAV-BS και η μεταβλητή r_i δίνεται από τη σχέση:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_D)^2 + (y_i - y_D)^2}$$

Όπου (x_D, y_D) : η προβολή της 3-D θέσης του UAV-BS στο έδαφος

(x_i, y_i) : η θέση του i -στου χρήστη στο έδαφος

Επιπλέον, σύμφωνα με την [6], η πιθανότητα πραγματοποίησης επικοινωνίας με NLoS σύνδεση είναι:

$$P_{NLoS} = 1 - P_{LoS}, \quad (2)$$

Οι ανωτέρω υπολογισμοί είναι χρήσιμοι διότι πέρα από τις απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο, τα σήματα που εκπέμπονται, αντιμετωπίζουν περαιτέρω απώλειες λόγω φαινομένων σκίασης και διασποράς που προκύπτουν από τα διάφορα εμπόδια που εμφανίζονται στο περιβάλλον. Θέτοντας, λοιπόν, η_{LoS} και η_{NLoS} τις επιπρόσθετες αυτές απώλειες διάδοσης για LoS και NLoS επικοινωνία αντίστοιχα (η ελαχιστοποίηση των τιμών των η_{LoS} και η_{NLoS} είναι ο σκοπός της προαναφερθείσας διαδικασίας μοντελοποίησης καναλιού), προκύπτει το παρακάτω μοντέλο υπολογισμού απωλειών:

$$L_{(h,r_i)} = L_{LoS} P_{LoS} + L_{NLoS} P_{NLoS}, \quad (3)$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει θεωρώντας:

$$L_{LoS} = 20 \log \left(\frac{4\pi f_c d_i}{c} \right) + \eta_{LoS} , \quad (4)$$

$$L_{NLoS} = 20 \log \left(\frac{4\pi f_c d_i}{c} \right) + \eta_{NLoS} , \quad (5)$$

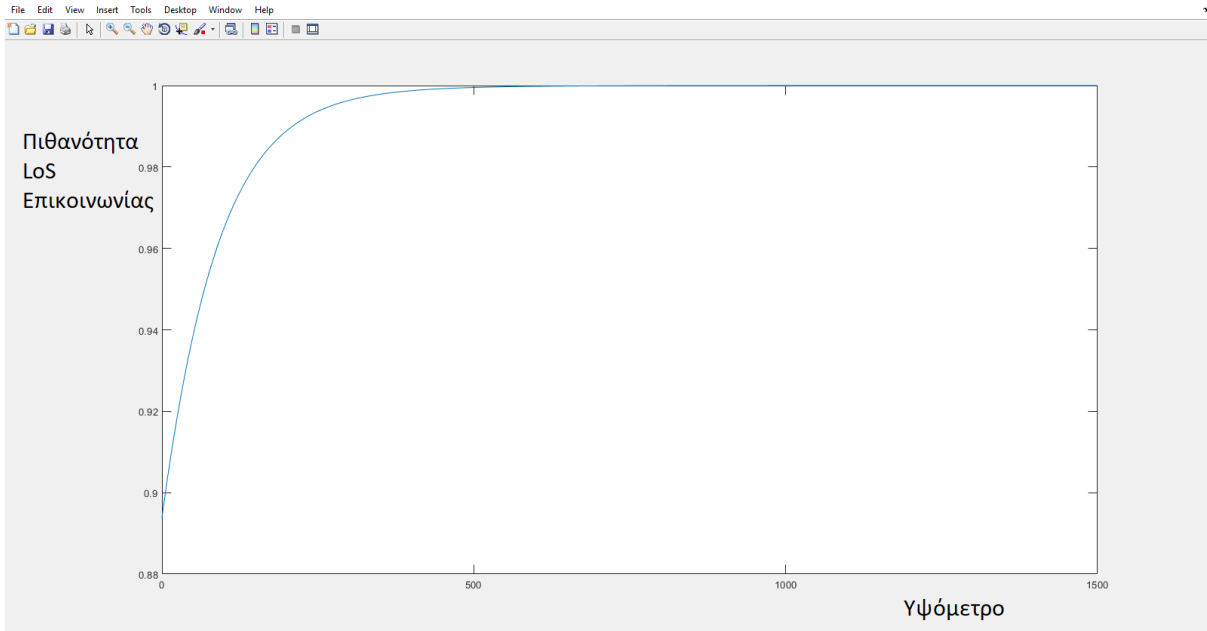
Όπου f_c : η φέρουσα συχνότητα

$d_i = \sqrt{h^2 + r_i^2}$: η απόσταση του UAV-BS από τον i -στο χρήστη

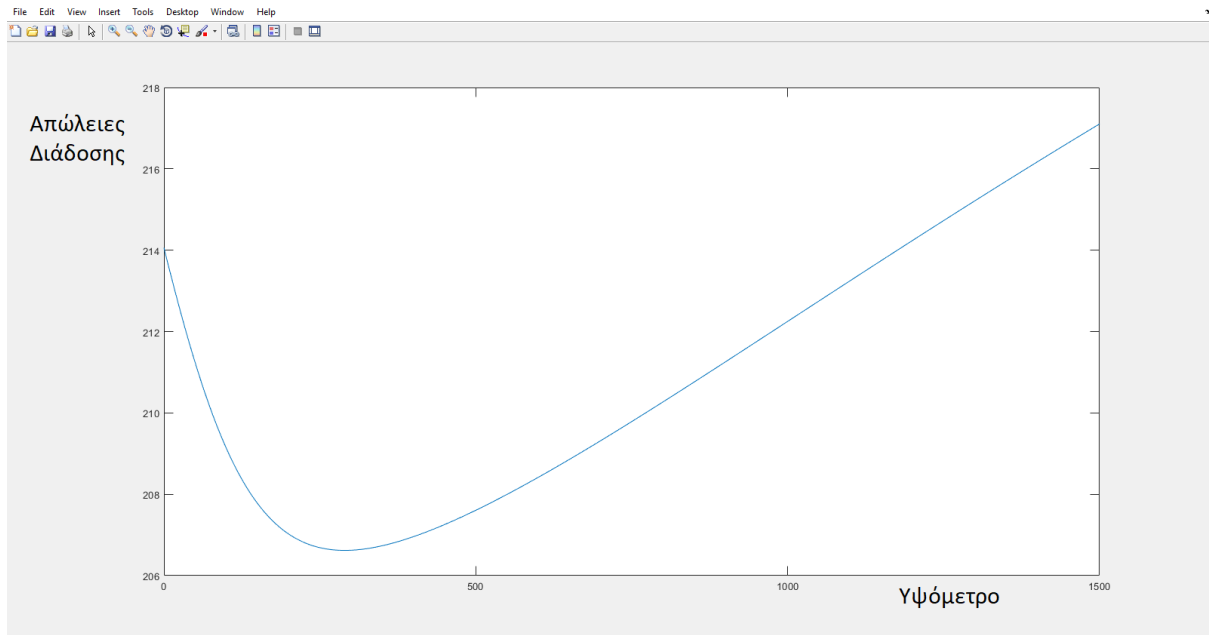
Θέτοντας $A = \eta_{LoS} - \eta_{NLoS}$, $B = 20 \log \left(\frac{4\pi f_c d_i}{c} \right)$ και $\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{h}{r_i} \right)$ σε ακτίνια προκύπτει από τις (1),(2),(3),(4),(5) η παρακάτω σχέση, εφόσον $h^2 + r_i^2 = \left(\frac{r_i}{\cos(\theta_i)} \right)^2$:

$$L_{(h,r_i)} = \frac{A}{1 + a \exp \left(-b \left(\frac{180}{\pi} \theta_i - a \right) \right)} + 20 \log \left(\frac{r_i}{\cos(\theta_i)} \right) + B , \quad (6)$$

Για καλύτερη κατανόηση και επιβεβαίωση των διαλαμβανόμενων των προηγούμενων παραγράφων, όπως και των μαθηματικών σχέσεων που αναφέρονται, κατασκευάζονται τα *Διαγράμματα 2* και *3*. Σε αυτά απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από τις σχέσεις (1) και (6), με χρήση των παραμέτρων που επιλέγονται στον *Πίνακα 1* του *Κεφαλαίου 4*.



Διάγραμμα 2: Η πιθανότητα LoS επικοινωνίας με το χρήστη, αναφορικά με το ύψος στο οποίο βρίσκεται το UAV-BS.



Διάγραμμα 3: Οι απώλειες διάδοσης που προκύπτουν σχετικά με το ύψος στο οποίο βρίσκεται το UAV-BS.

Για δεδομένη ισχύ εκπομπής P_t , η λαμβανόμενη ισχύς στον i -στό χρήστη εξαρτάται από τις απώλειες της επικοινωνίας που περιεγράφηκαν και διαμορφώνεται ως εξής:

$$P_r = P_t - L_{(h,r_i)} , \quad (7)$$

Προκειμένου να εγγυάται μια ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS) θεωρείται πως η λαμβανόμενη ισχύς P_r είναι αναγκαίο να υπερβαίνει ένα κατώτατο όριο P_{min} . Ο i -στός χρήστης, δηλαδή, εξυπηρετείται επαρκώς αν και μόνο αν η σύνδεση επικοινωνίας του με το UAV-BS υπόκειται σε απώλειες το πολύ ίσες με ένα κατώφλι L_{th} . Θα πρέπει, λοιπόν, να ισχύει:

$$L_{(h,r_i)} \leq L_{th} , \quad (8)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις καθίσταται προφανές ότι η ακτίνα κάλυψης ενός UAV-BS μπορεί να οριστεί ως:

$$R = r |_{L_{(h,r_i)}=L_{th}} , \quad (9)$$

Ύψος Μεγιστοποίησης Ακτίνας Κάλυψης

Όπως προκύπτει από την (6) σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον (συγκεκριμένες τιμές των A και B), για δεδομένο ύψος πτήσης h του UAV-BS, όλα τα σημεία στο έδαφος που βρίσκονται σε απόσταση ακτίνας R αντιμετωπίζουν τις ίδιες απώλειες L_{th} .

Επιπλέον, όλα τα σημεία που βρίσκονται σε απόσταση ακτίνας $r \leq R$ αντιμετωπίζουν απώλειες μικρότερες από L_{th} . Συνεπώς, η επαρκής κάλυψη ενός UAV-BS στο χώρο υφίσταται στο εσωτερικό ενός κυκλικού δίσκου στο έδαφος. Το ζητούμενο αρχικά είναι η εύρεση του ύψους πτήσης h_1 για το οποίο μεγιστοποιείται η ακτίνα R .

Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα δεν είναι προφανής, διότι στις δύο ακραίες περιπτώσεις πολύ μεγάλου και πολύ μικρού ύψους πτήσης h η ακτίνα κάλυψης τείνει να μικραίνει αισθητά. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που το ύψος πτήσης είναι πολύ μεγάλο ($h \rightarrow \infty$), η απόσταση του UAV-BS από τον i -στο χρήστη τείνει στο άπειρο ($d_i \rightarrow \infty$). Έτσι, σύμφωνα με τις εξισώσεις (4),(5) οι απώλειες επικοινωνίας τείνουν επίσης στο άπειρο. Αντίθετα, στην περίπτωση που το ύψος πτήσης είναι πολύ μικρό ($h \rightarrow 0$), προκύπτει από την (1) ότι η πιθανότητα LoS επικοινωνίας τείνει στο μηδέν ($P_{LoS} \rightarrow 0$) και ως εκ τούτου αυτή δεν είναι η βέλτιστη λύση, μιας και οι απώλειες NLoS είναι αισθητά ασθενέστερες ($\eta_{LoS} > \eta_{NLoS}$).

Σύμφωνα με τα παραπάνω και όπως ταυτόχρονα αποδεικνύεται στην [6], η συνάρτηση $r(h)$ είναι γνησίως αύξουσα στο διάστημα $h = [0, h_1)$ και γνησίως φθίνουσα στο διάστημα $h = (h_1, \infty)$. Όταν το UAV-BS βρίσκεται στο ζητούμενο ύψος h_1 ισχύει:

$$\frac{\partial R}{\partial h} = \frac{\partial R}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial h} = 0, \quad (10)$$

Εφόσον, $\frac{\partial \theta}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h} \tan^{-1} \left(\frac{h}{r} \right) = \frac{r}{h^2 + r^2} > 0$, η αναζήτηση του ύψους $h = h_1$, ανάγεται στην αναζήτηση της γωνίας $\theta = \theta_{opt}$, η οποία μεγιστοποιεί την ακτίνα $R = R_1$. Λύνοντας, λοιπόν, την $\frac{\partial R}{\partial \theta} = 0$ ως προς θ , προκύπτει η παρακάτω σχέση [6]:

$$\frac{\pi}{9 \ln(10)} \tan \theta_{opt} + \frac{abA \exp \left(-b \left(\frac{180}{\pi} \theta_{opt} - a \right) \right)}{\left(a \exp \left(-b \left(\frac{180}{\pi} \theta_{opt} - a \right) \right) + 1 \right)^2} = 0, \quad (11)$$

Από την (11) μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η γωνία θ_{opt} καθορίζεται αποκλειστικά από το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, στην [5] αναφέρεται ότι επιλύοντας αριθμητικά προκύπτει $\theta_{opt} = 20.34^\circ, 42.44^\circ, 54.62^\circ, 75.52^\circ$ για ημιαστικό, αστικό, πυκνό αστικό και αστικό με ψηλά κτήρια περιβάλλον αντίστοιχα.

Δεδομένης, πλέον, τόσο της γωνίας θ_{opt} , όσο και του ορίου L_{th} , η (6) γίνεται:

$$L_{th} = \frac{A}{1 + a \exp\left(-b\left(\frac{180}{\pi}\theta_{opt} - a\right)\right)} + 20 \log\left(\frac{R_1}{\cos(\theta_{opt})}\right) + B, \quad (12)$$

Τέλος, έχοντας λύσει την (12) ως προς R_1 , μπορεί να υπολογιστεί το ύψος h_1 από τη σχέση:

$$h_1 = R_1 \tan(\theta_{opt}), \quad (13)$$

Βέλτιστη 3-D Τοποθέτηση

Όπως προαναφέρθηκε, θεωρείται ότι η θέση του κάθε χρήστη που αναμένει να εξυπηρετηθεί είναι δεδομένη. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι το UAV-BS δύναται να χρησιμοποιηθεί παρέχοντας εμβέλεια το πολύ ίση με R_1 . Τοποθετείται, λοιπόν, ένας κυκλικός δίσκος με ακτίνα R_1 σε όλες τις πιθανές θέσεις εντός της γεωγραφικής περιοχής ενδιαφέροντος και σε κάθε δοκιμή μετράται το πλήθος των χρηστών u_i που εξυπηρετούνται. Σημειώνεται η θέση στην οποία παρατηρείται ότι εξυπηρετείται το μεγαλύτερο δυνατό πλήθος χρηστών και είναι γνωστό πλέον πόσους το πολύ χρήστες δύναται να εξυπηρετήσει το UAV-BS.

Η θέση στην οποία μεγιστοποιείται το πλήθος χρηστών που εξυπηρετούνται δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη, καθώς τίθεται το ερώτημα εάν υπάρχει διαφορετική 3-D τοποθέτηση, η οποία εξυπηρετεί το ίδιο σύνολο χρηστών, με χαμηλότερο κόστος. Πιο συγκεκριμένα, ενδέχεται να εκπέμπεται μικρότερο ποσό ισχύος από το UAV-BS με αποτέλεσμα να δαπανάται λιγότερη ενέργεια (οι συσσωρευτές προσφέρουν συγκεκριμένη χωρητικότητα) ή εναλλακτικά να βόλευε για κάποιο λόγο η πτήση σε διαφορετικό ύψος. Σε αυτές τις περιπτώσεις το αποτέλεσμα είναι η ακτίνα εμβέλειας R να παρουσιάζεται μικρότερη. Αν αυτή η μεταβολή πραγματοποιηθεί με κατάλληλη επανατοποθέτηση του κυκλικού δίσκου, ώστε κανένας χρήστης να μη βρεθεί εκτός της εμβέλειας, τότε έχει βρεθεί μια περισσότερο αποδοτική θέση για το UAV-BS. Συνεπώς, η βέλτιστη 3-D τοποθέτηση του UAV-BS είναι εκείνη στην οποία ελαχιστοποιείται η ακτίνα R χωρίς να μειωθεί το πλήθος εξυπηρετούμενων χρηστών [5].

Εφαρμογή και Επιβεβαίωση

Η παρούσα εργασία προσεγγίζει το πρόβλημα βέλτιστης 3-D τοποθέτησης ενός UAV με την εισήγηση μιας νέας μεθόδου υπολογισμού. Συγκεκριμένα αναπτύσσεται

αλγόριθμος ο οποίος αρχικά υπολογίζει τη μέγιστη ακτίνα κάλυψης $R = R_1$ ενός drone, λαμβάνοντας ως δεδομένα παραμέτρους σχετικά με το εκάστοτε περιβάλλον και τα χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας ($a, b, \eta_{LOS}, \eta_{NLOS}, f_c, P_t, P_{th}$). Στη συνέχεια κατασκευάζει ένα χώρο στον οποίο τοποθετείται συγκεκριμένο πλήθος n_u χρηστών u_i , σε τυχαία κατανομή, οι οποίοι αναμένουν να εξυπηρετηθούν. Υπολογίζεται το μέγιστο πλήθος το οποίο δύναται να εξυπηρετείται ταυτόχρονα και σχεδιάζει έναν κυκλικό δίσκο κάλυψης με ακτίνα R_1 . Ο δίσκος αυτός αντιστοιχεί στην περίπτωση που το UAV-BS βρίσκεται σε ύψος μέγιστης κάλυψης h_1 και εξυπηρετεί το μέγιστο δυνατό πλήθος χρηστών. Παρακάτω, μετακινεί τον κυκλικό αυτό δίσκο και μεταβάλλει την ακτίνα του, διατηρώντας πάντα τους ίδιους χρήστες εντός κάλυψης, έως ότου καταλήξει στη μικρότερη δυνατή ακτίνα. Σε αυτό το σημείο υπολογίζει την αντίστοιχη θέση (x_D, y_D, h_2) , η οποία αντιπροσωπεύει τη βέλτιστη 3-D τοποθέτηση του UAV.

Η επιβεβαίωση της αξιοπιστίας της μεθόδου σε θεωρητικό επίπεδο είναι εξαιρετικά απλή, δεδομένου ότι καταλήγει σε έναν κυκλικό δίσκο, ο οποίος αφενός εμπεριέχει το μέγιστο πλήθος χρηστών και αφετέρου τοποθετεί τρεις από αυτούς στην περιφέρειά του (εναλλακτικά ενδέχεται μόνο δύο χρήστες να βρίσκονται στην περιφέρεια του κυκλικού δίσκου, όμως σε αυτήν την περίπτωση οι χρήστες αυτοί βρίσκονται αντιδιαμετρικά του κέντρου). Σε κάθε περίπτωση, πρόκειται για το σχεδιασμό της ελάχιστης δυνατής ακτίνας κάλυψης, εφόσον μια οποιαδήποτε μετακίνηση του τελικού κυκλικού δίσκου ή μεταβολή της ακτίνας αυτού θα έχει ως αποτέλεσμα την εξυπηρέτηση του ίδιου ή μικρότερου πλήθους χρηστών.

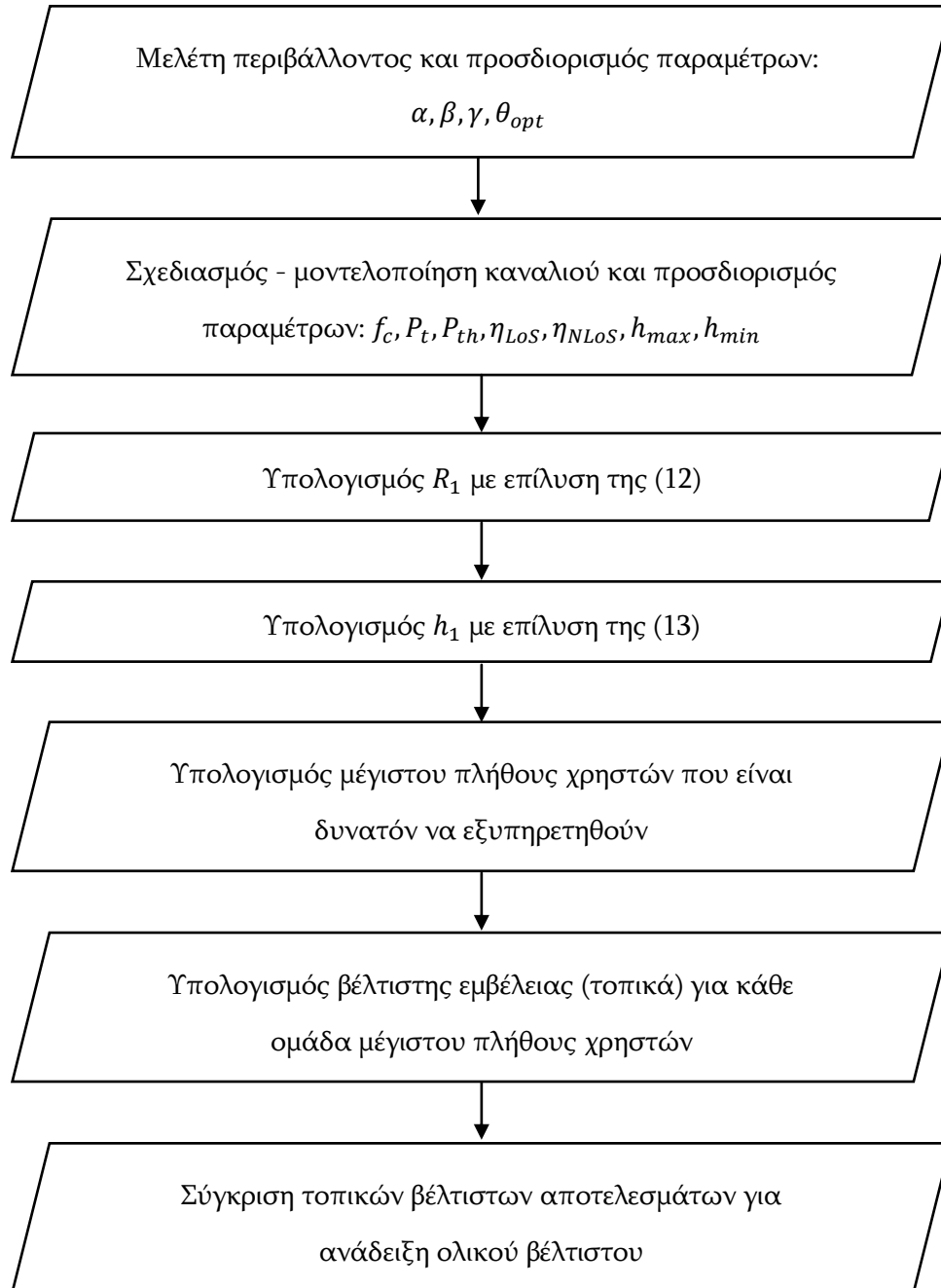
Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα δεν έχει υπολογιστεί ο βέλτιστος κυκλικός δίσκος, αλλά πρόκειται για μια τοπική λύση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί επιστρέφοντας στο βήμα αρχικής τοποθέτησης του UAV σε ύψος h_1 , με σκοπό να εξυπηρετείται το μέγιστο πλήθος χρηστών. Στην περίπτωση που υπάρχουν δύο ή περισσότερα διαφορετικά σύνολα ίδιου (μέγιστου) πλήθους χρηστών, τα οποία μπορούν να εντάσσονται σε εμβέλεια R_1 , τότε θα πρέπει να ακολουθηθεί η διαδικασία της προηγούμενης παραγράφου για όλα αυτά τα σύνολα χρηστών. Η κάθε εκτέλεση της διαδικασίας αυτής εξάγει διαφορετικό τοπικό βέλτιστο κυκλικό δίσκο. Έπειτα από σύγκριση μεταξύ τους, προκύπτει ο κυκλικός δίσκος με τη μικρότερη ακτίνα, ο οποίος αντιστοιχεί και στη βέλτιστη τοποθέτηση του UAV-BS. Αυτή η μείωση ακτίνας στην πράξη μεταφράζεται τόσο ως εξοικονόμηση απαιτούμενης ενέργειας για τη λειτουργία ενός drone, όσο και ως περιθώριο ανάληψης αντισυμβατικών συμπεριφορών/αποφάσεων, οι οποίες ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή ενδέχεται να καταστούν αναγκαίες (π.χ. πτήση σε ύψος διαφορετικό του αποδοτικότερου κ.α.).

Μια επιβεβαίωση των ανωτέρω θεωρητικών εγχειρημάτων παρουσιάζεται αναγκαία. Πέραν όμως τούτου, απαιτείται επίσης να διευκρινιστεί το ποσοστό μείωσης

της ακτίνας εμβέλειας ενός UAV που αξιοποιεί την προτεινόμενη τοποθέτηση. Αναπτύσσεται, έτσι, τμήμα αλγορίθμου το οποίο δρα στα διαφορετικά είδη περιβάλλοντος (ημιαστικό, αστικό, πυκνό αστικό και αστικό περιβάλλον ψηλών κτηρίων), με τις ίδιες παραμέτρους. Δοκιμάζει να τοποθετήσει το UAV-BS σε όλες τις δυνατές θέσεις του υπάρχοντος υποθετικού χώρου (συμπεριλαμβάνοντας και διαφορετικά ύψη πτήσης), υπολογίζοντας κάθε φορά το πλήθος των χρηστών το οποίο εξυπηρετείται και την ακτίνα εμβέλειας κάλυψης που προκύπτει. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η απάντηση για την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και το μέγεθος του κέρδους της μεθόδου που προτείνει η παρούσα εργασία.

Συνοπτικά τα Βήματα της Μεθόδου

Η προτεινόμενη μέθοδος που περιγράφεται ανωτέρω συνοψίζεται σε μια σειρά βημάτων ως εξής:



Παράμετροι Προσομοίωσης

Για την προσομοίωση της επίλυσης του προβλήματος και των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος σε γλώσσα Matlab. Οι τιμές των παραμέτρων περιβάλλοντος επιλέχθηκαν με σκοπό να αναφέρονται σε ένα όσο το δυνατόν ρεαλιστικό σύστημα επικοινωνίας, σύμφωνα με το πρόβλημα που περιεγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, οι τιμές των μεταβλητών για ημιαστικό, αστικό, πυκνό αστικό και αστικό περιβάλλον ψηλών κτηρίων και των “παραμέτρων δικτύου” - όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1- ανταποκρίνονται σε συνήθεις εφαρμογές που υλοποιούνται σε κάθε είδος περιβάλλοντος και είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται από τον Elham Kalantari και τους συνεργάτες του στην [11].

Η μεταβλητή r_i αναφέρεται στην απόσταση ανάμεσα στο UAV και έναν επίγειο χρήστη (όπως αναφέρεται στα προηγούμενα κεφάλαια) και η τιμή της επιλέχθηκε κατάλληλα, ώστε να είναι εμφανές όλο το εύρος των καμπυλών που παρουσιάζονται στα διαγράμματα 1 και 2. Στην πράξη, η τιμή της μεταβλητής αυτής εξαρτάται από την περιοχή που μελετάται και ανάλογα με αυτήν προκύπτουν διαφορετικά τμήματα των καμπυλών που παρουσιάζονται στα διαγράμματα 1 και 2.

Η παράμετρος ανάλυση (*resolution*) είναι μια μεταβλητή που αναφέρεται στην ελάχιστη μετακίνηση του UAV που θεωρείται ότι είναι καθοριστική. Η τιμή της καθορίζει το χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων από τον αλγόριθμο και καθορίζεται από τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ, όπως και από την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η παρούσα προσομοίωση θα υλοποιηθεί με ανάλυση 5 m.

Τέλος, επιλέγεται το πλήθος χρηστών εύρους από 10 έως 100 ($n_u = 10 \sim 100$), οι οποίοι θα τοποθετηθούν ακολουθώντας τυχαία κατανομή σε τετράγωνο χώρο (*terrain*) ακμής 1500 m.

Οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα προσομοίωση φαίνονται στον Πίνακα 1:

Ημιαστικό Περιβάλλον (Suburban)	
α	0.1
β	750
γ	8
θ_{opt}	20.34°
Αστικό Περιβάλλον (Urban)	
α	0.3
β	500
γ	15
θ_{opt}	42.44°
Πυκνό Αστικό Περιβάλλον (Dense Urban)	
α	0.5
β	300
γ	20
θ_{opt}	54.62°
Αστικό Περιβάλλον Ψηλών Κτηρίων (Highrise Urban)	
α	0.5
β	300
γ	50
θ_{opt}	75.52°
Παράμετροι Δικτύου	
f_c	2 GHz
P_t	5 W
P_{th}	25 mW
η_{LoS}	1 dB
η_{NLoS}	20 dB
h_{max}	1.5 km
h_{min}	100 m
Παράμετροι Προβλήματος	
r_i	500 m
resolution	5 m
n_u : πλήθος χρηστών	10~100
terrain	1500 m

Πίνακας 1: Παράμετροι Προσομοίωσης

Υπολογισμός Ύψους Μέγιστης Εμβέλειας h_1

Γνωρίζοντας το περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται το σύστημα επικοινωνιών, γίνεται χρήση παραμέτρων που λαμβάνονται από την [6], σύμφωνα με τον Πίνακα 1. Επιλύεται, έτσι, η (12) ως προς R_1 , έπειτα από την υπόθεση ότι σε ύψος h_1 , ο χρήστης “βλέπει” το UAV-BS υπό γωνία $\theta = \theta_{opt}$. Στη συνέχεια, η (13) δίνει το ύψος h_1 στο οποίο μεγιστοποιείται η εμβέλεια κάλυψης.

Δημιουργία Σεναρίου

Παρακάτω, κατασκευάζεται ένας επίπεδος χώρος σχήματος τετραγώνου με ακμή $terrain = 1500m$, στον οποίο τοποθετείται ομοιόμορφα τυχαία κατανεμημένο πλήθος $n_u = 10 \sim 100$ χρηστών, οι οποίοι αναμένουν να επικοινωνήσουν με το UAV-BS.

Αρχική Τοποθέτηση UAV-BS

Έπειτα από τον υπολογισμό της μέγιστης εμβέλειας R_1 , με χρήση μιας εξαντλητικής μεθόδου η οποία “δοκιμάζει” όλες τις πιθανές θέσεις, εντοπίζεται η τοποθεσία στην οποία το UAV-BS αποκτά τη δυνατότητα να επικοινωνήσει με το μεγαλύτερο δυνατό πλήθος χρηστών. Εκεί τοποθετείται το UAV-BS. Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι είναι δυνατό να υπάρχουν δύο ή περισσότερες θέσεις στις οποίες αν τοποθετηθεί το UAV-BS θα εξυπηρετεί διαφορετικό σύνολο μέγιστου πλήθους χρηστών. Σε αυτήν την περίπτωση η παρακάτω διαδικασία θα επαναληφθεί για κάθε μία από αυτές τις θέσεις και στο τέλος θα εκτελεστεί σύγκριση μεταξύ τους.

Βέλτιστη Τοποθέτηση UAV-BS

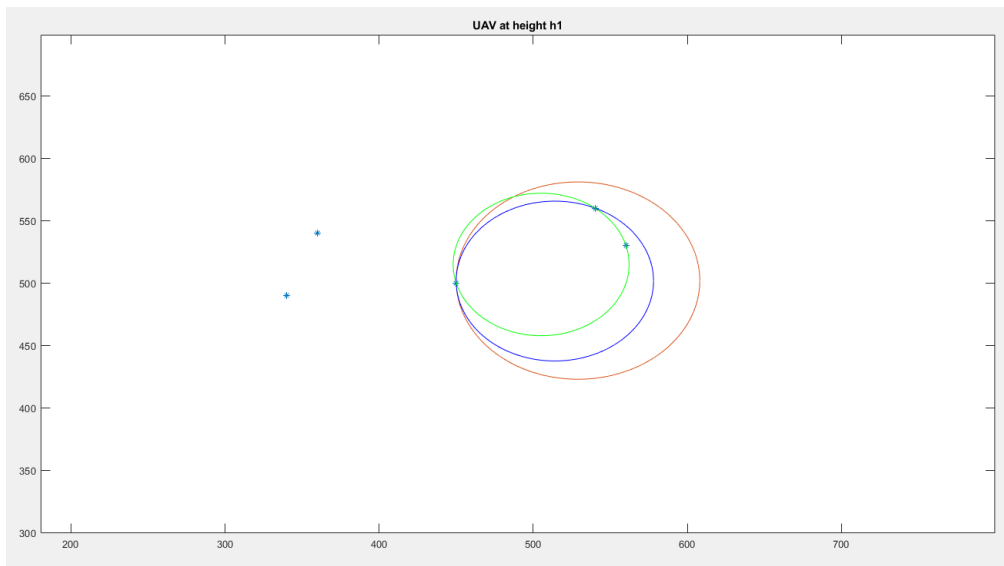
Το UAV-BS θεωρείται τοποθετημένο στη θέση που του επιτρέπει την επικοινωνία με το μεγαλύτερο δυνατό πλήθος χρηστών, σε ύψος h_1 . Η εμβέλεια κάλυψης στο επίπεδο έδαφος προκύπτει κυκλικός δίσκος με κέντρο την προβολή (x_D, y_D) του σημείου αυτού και ακτίνα R_1 . Διατηρώντας το κέντρο του κύκλου αμετακίνητο, ο αλγόριθμος σχεδιάζει έναν δεύτερο κύκλο μικρότερης ακτίνας, όπου ο μακρινότερος χρήστης που πρόκειται να επικοινωνήσει με το UAV-BS, βρίσκεται οριακά πάνω στην καμπύλη (ο όρος οριακά καθορίζεται από την επιλεγμένη ανάλυση $resolution = 5m$).

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος αρχίζει να μικραίνει την ακτίνα του κύκλου, μετακινώντας όμως ταυτόχρονα το κέντρο προς τον χρήστη αυτό, με επιλεγμένο βήμα ώστε αυτός να διατηρείται πάντα εντός των ορίων της εμβέλειας (σύμφωνα, πάντα, με την επιλεγμένη ανάλυση $resolution = 5m$). Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τη

στιγμή που ένας δεύτερος χρήστης θα βρεθεί στα όρια του κύκλου της εμβέλειας. Τότε, ο αλγόριθμος θα εξακολουθήσει να μικραίνει την ακτίνα του κύκλου, μετακινώντας όμως ταυτόχρονα το κέντρο προς το μέσο του ευθύγραμμου τμήματος με άκρα τους δύο αυτούς μακρινότερους χρήστες. Με αυτόν τον τρόπο, αυτοί διατηρούνται στο όριο της εμβέλειας. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ένας ακόμα χρήστης βρεθεί επίσης στο όριο και εκεί παύει. Στην περίπτωση που το κέντρο του κυκλικού δίσκου φτάσει στο μέσο του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέει τους δύο προηγούμενους χρήστες, προτού να βρεθεί κάποιος τρίτος χρήστης πάνω στην περιφέρεια της εμβέλειας, τότε ο αλγόριθμος παύει.

Με τη λήξη του αλγορίθμου υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια. Είτε τρεις χρήστες βρίσκονται πάνω στην περιφέρεια του κύκλου, είτε δύο χρήστες βρίσκονται πάνω στην περιφέρεια, αλλά αντιδιαμετρικά του κέντρου. Σε κάθε περίπτωση, ο κυκλικός δίσκος που έχει σχεδιαστεί αντιπροσωπεύει τη βέλτιστη λύση, καθώς εμπεριέχει το ίδιο πλήθος χρηστών με τον αρχικό κυκλικό δίσκο μέγιστης εμβέλειας, ενώ οποιαδήποτε μεταβολή της ακτίνας ή μετακίνηση του κέντρου θα έχει ως αποτέλεσμα κάποιος χρήστης να βρεθεί εκτός. Συνεπώς, πρόκειται για τη βέλτιστη 3-D τοποθέτηση του UAV-BS (τοπική λύση).

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε σύνολο μέγιστου πλήθους χρηστών που αναφέρεται στο προηγούμενο βήμα, με σκοπό στο τέλος να συγκριθούν οι ακτίνες των κύκλων εμβέλειας και να εξαχθεί η βέλτιστη λύση.



Διάγραμμα 4: Εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα ο κύκλος μέγιστης εμβέλειας, με μπλε χρώμα ο ενδιάμεσος κύκλος όταν δύο χρήστες βρίσκονται στο όριο και με πράσινο χρώμα ο τελικός κύκλος βέλτιστης τοποθέτησης.

Επαλήθευση Αποτελεσμάτων

Παρακάτω, προστίθεται ένα ακόμα τμήμα, το οποίο εμφωλεύει το προηγούμενο “σώμα” του αλγορίθμου σε μία δομή επανάληψης, χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους. Αυτό συνεπάγεται με το γεγονός ότι πρόκειται για το ίδιο περιβάλλον, με τους ίδιους χρήστες και τα ίδια χαρακτηριστικά καναλιού. Σε αυτό το περιβάλλον σχεδιάζεται πλήθος κύκλων με διαφορετικές ακτίνες και σε διαφορετική θέση, οι οποίοι αντιστοιχούν σε διαφορετική 3-D τοποθέτηση του UAV-BS. Για όλες τις πιθανές περιπτώσεις υπολογίζεται το πλήθος των χρηστών οι οποίοι βρίσκονται εντός εμβέλειας και συγκρίνεται με αυτό που εξάγει η παραπάνω μέθοδος. Με αυτόν τον τρόπο επαληθεύεται με χρήση εξαντλητικής μεθόδου ότι η ακτίνα εμβέλειας κάλυψης που εξάγει η προτεινόμενη μέθοδος είναι όντως η ελάχιστη δυνατή.

Ποσοστό Βελτίωσης

Στο τέλος, διεξάγονται περισσότερες επαναλήψεις της προσομοίωσης, με εισαγωγή διαφορετικών παραμέτρων, οι οποίες έχουν σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών για το ποσοστό βελτίωσης της επικοινωνίας που έχει να προσφέρει η προτεινόμενη μέθοδος. Συγκεκριμένα, συγκρίνεται η ακτίνα R_{max} , η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ακτίνα εμβέλειας κάλυψης με την ακτίνα βέλτιστης τοποθέτησης R_1 , η οποία προκύπτει από την προτεινόμενη μέθοδο της παρούσας εργασίας. Με αυτά τα στοιχεία υπολογίζεται η ποσοστιαία μείωση της ακτίνας κάλυψης και η αντίστοιχη ποσοστιαία μείωση της απαιτούμενης εκπεμπόμενης ισχύος.

Ένα ικανοποιητικό πλήθος προσομοιώσεων πραγματοποιείται αρχικά με παραμετροποίηση που αντιστοιχεί σε ημιαστικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται 10 χρήστες. Στη συνέχεια εξετάζεται βηματικά το ποσοστό βελτίωσης της επικοινωνίας για περιβάλλον με περισσότερους επίγειους δέκτες, έως το πλήθος των 100 χρηστών. Με τον ίδιο τρόπο εξετάζεται έπειτα το αποτέλεσμα της προτεινόμενης μεθόδου για τους υπόλοιπους τύπους περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα διατίθενται στους Πίνακες 2, 3, 4 και 5.

R_{max} (m)	μέση R_1 (m)	n_u	μέση % μείωση ακτίνας	μέση μείωση P_t (dB)
173	126	10	26.96	3.22
173	149	20	13.96	1.40
173	155	30	10.14	0.96
173	160	40	7.03	0.64
173	161	50	6.79	0.63
173	165	60	4.82	0.43
173	166	70	4.23	0.37
173	167	80	3.68	0.32
173	168	90	3.30	0.29
173	173	100	2.82	0.26

Πίνακας 2: Μέση ποσοστιαία μείωση της ακτίνας και κατ' επέκταση απαραίτητης εκπεμπόμενης ισχύος ανάλογα με το πλήθος των επίγειων χρηστών, σε ημιαστικό περιβάλλον (suburban).

R_{max} (m)	μέση R_1 (m)	n_u	μέση % μείωση ακτίνας	μέση μείωση P_t (dB)
112	82	10	26.79	2.37
112	87	20	22.88	2.14
112	96	30	14.50	1.22
112	99	40	11.57	0.97
112	100	50	10.57	0.86
112	102	60	8.84	0.70
112	103	70	6.88	0.55
112	104	80	6.80	0.53
112	105	90	5.58	0.43
112	106	100	5.48	0.43

Πίνακας 3: Μέση ποσοστιαία μείωση της ακτίνας και κατ' επέκταση απαραίτητης εκπεμπόμενης ισχύος ανάλογα με το πλήθος των επίγειων χρηστών, σε αστικό περιβάλλον (urban).

R_{max} (m)	μέση R_1 (m)	n_u	μέση % μείωση ακτίνας	μέση μείωση P_t (dB)
75	58	10	21.89	3.54
75	59	20	22.87	1.86
75	60	30	20.29	1.65
75	61	40	18.52	1.41
75	64	50	13.94	1.07
75	65	60	14.11	1.06
75	66	70	13.69	1.01
75	67	80	10.76	0.79
75	68	90	9.13	0.65
75	69	100	8.68	0.62

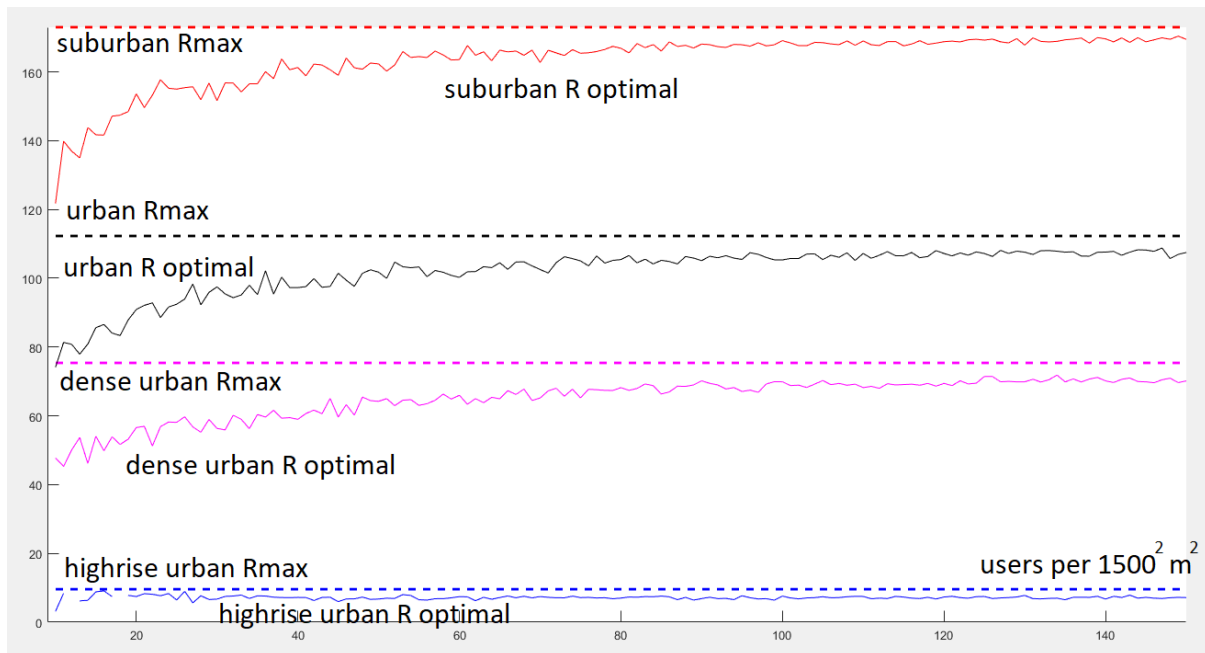
Πίνακας 4: Μέση ποσοστιαία μείωση της ακτίνας και κατ' επέκταση απαραίτητης εκπεμπόμενης ισχύος ανάλογα με το πλήθος των επίγειων χρηστών, σε πυκνό αστικό περιβάλλον (dense urban).

R_{max} (m)	μέση R_1 (m)	n_u	μέση % μείωση ακτίνας	μέση μείωση P_t (dB)
9.60	-	10	-	-
9.60	-	20	-	-
9.60	-	30	-	-
9.60	-	40	-	-
9.60	-	50	-	-
9.60	-	60	-	-
9.60	-	70	-	-
9.60	6.60	80	31.37	1.9
9.60	7.70	90	19.75	1.2
9.60	6.90	100	28.57	1.84

Πίνακας 5: Μέση ποσοστιαία μείωση της ακτίνας και κατ' επέκταση απαραίτητης εκπεμπόμενης ισχύος ανάλογα με το πλήθος των επίγειων χρηστών, σε αστικό περιβάλλον ψηλών κτηρίων (highrise urban).

Στο σημείο καθίσταται κατανοητό ότι αν και η προτεινόμενη μέθοδος έχει να προσφέρει σημαντική βελτίωση στην επικοινωνία του σεναρίου που δίνεται, η απάντηση για μέγεθος της βελτίωσης αυτής δεν είναι απλή. Οι μέσοι όροι ακτίνας βέλτιστης τοποθέτησης R_1 , όπως αυτοί προκύπτουν στις διάφορες επαναλήψεις της προσομοίωσης για κάθε είδος περιβάλλοντος παρουσιάζονται για καλύτερη κατανόηση

στο Διάγραμμα 5. Ωστόσο, μένει να σημειωθεί ότι σύνολο συγκεκριμένων προσομοιώσεων δεν αποφέρει αποτελέσματα, καθώς τυγχάνει το μέγιστο πλήθος χρηστών που είναι δυνατό να εξυπηρετηθούν να μην ξεπερνάει τον έναν. Σε αυτήν την περίπτωση η ακτίνα εμβέλειας βέλτιστης τοποθέτησης R_1 μηδενίζεται και τίθενται υπό εξέταση οι αποφάσεις που λήφθηκαν κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης καναλιού ή ακόμα και η αναλογία κέρδους-κόστους για την πραγματοποίηση της εφαρμογής εξ' αρχής. Η πιθανότητα να συμβεί αυτό θα συζητηθεί παρακάτω.



Διάγραμμα 5: Μέση ακτίνα εμβέλειας βέλτιστης τοποθέτησης R_1 , όπως αυτή προκύπτει εμπειρικά σε κάθε επανάληψη προσομοίωσης στα διαφορετικά είδη περιβάλλοντος (κόκκινο: Ημιαστικό Περιβάλλον (Suburban), μαύρο: Αστικό Περιβάλλον (Urban), κυανό: Πυκνό Αστικό Περιβάλλον (Dense Urban), μπλε: Αστικό Περιβάλλον Ψηλών Κτηρίων (Highrise Urban)).

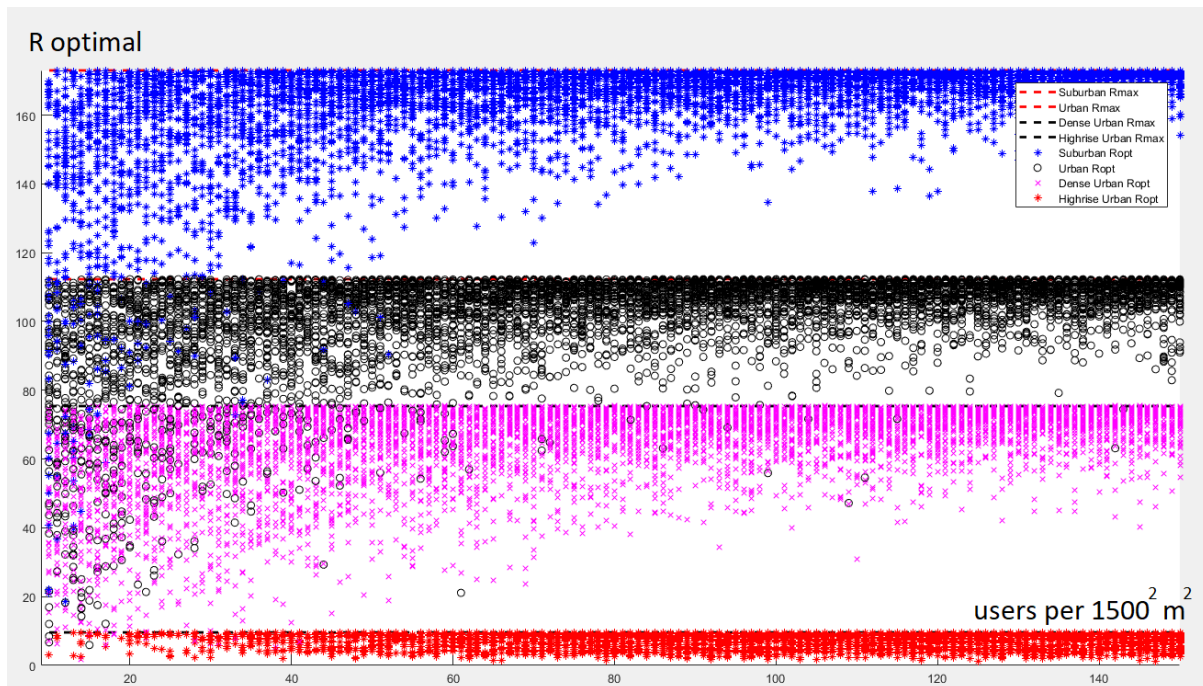
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση

Στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας περιεγράφηκε, σχεδιάστηκε, αναλύθηκε και επαληθεύτηκε μια νέα μέθοδος προσέγγισης του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης ενός UAV, σε ένα χώρο στον οποίο επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της εξυπηρέτησης. Συζητήθηκαν, αρχικά, τα φυσικά φαινόμενα και οι νόμοι οι οποίοι θα καθορίσουν την αποτελεσματικότητα σε ένα σύστημα επικοινωνιών και στη συνέχεια σχεδιάστηκε μια θεωρητική προσέγγιση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε αλγόριθμος ο οποίος υλοποιεί τη νέα αυτή μέθοδο και, τέλος, επαληθεύει την εγκυρότητα αυτής.

Αν και η επιβεβαίωση της μεθόδου που εισάγει η παρούσα εργασία σε θεωρητικό επίπεδο είναι ιδιαίτερα απλή, υλοποιήθηκε επιπλέον προσομοίωση, η οποία επαναλήφθηκε αρκετές φορές. Κατά τις επαναλήψεις αυτές τροποποιήθηκαν όλες οι παράμετροι του αλγορίθμου, ωστόσο για κάθε συνδυασμό διαφορετικών παραμέτρων ο αλγόριθμος τέθηκε σε εφαρμογή επίσης κατ' επανάληψη, εφόσον εμπεριέχει τυχαίες μεταβλητές (η τοποθέτηση χρηστών σε τυχαία κατανομή δίνει κάθε φορά διαφορετικά αποτελέσματα). Σε κάθε μία από αυτές τις επαναλήψεις το εξαγόμενο αποτέλεσμα παρουσίασε την προτεινόμενη, από την εξεταζόμενη μέθοδο, τοποθέτηση του UAV-BS ως τη βέλτιστη ή μία από τις ισάξιες βέλτιστες. Πιο συγκεκριμένα, σε μία περιοχή στην οποία βρίσκεται ιδιαίτερα αυξημένο πλήθος χρηστών, ενδέχεται να υφίστανται περισσότερες από μία τοποθετήσεις του UAV-BS οι οποίες εξυπηρετούν το ίδιο (μέγιστο δυνατό) πλήθος διαφορετικών χρηστών χρησιμοποιώντας την ίδια ακτίνα βέλτιστης εμβέλειας. Τότε, παρουσιάζονται περισσότερες από μία ισάξιες βέλτιστες τοποθετήσεις του UAV-BS. Πέρα όμως από αυτό το σενάριο, σε καμία περίπτωση δεν εξήχθη αποτέλεσμα πιο αποδοτικό από αυτό που προτείνει η εξεταζόμενη μέθοδος.

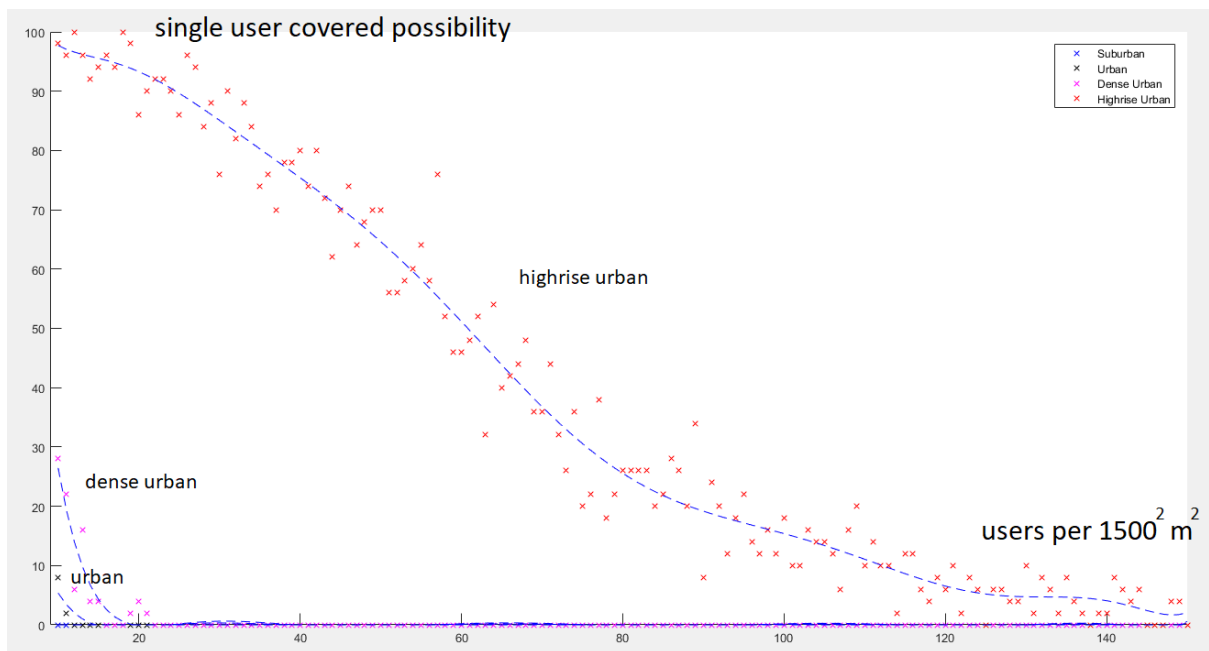
Πέρα από την επαλήθευση της εγκυρότητας των διαλαμβανομένων στα προηγούμενα κεφάλαια, έγινε επίσης προσπάθεια να απαντηθεί το ερώτημα σχετικά με το μέγεθος του οφέλους που έχει να προσφέρει η προτεινόμενη μέθοδος. Έπειτα από μελέτη των *Διαγραμμάτων 6 και 7* προκύπτει ότι η απάντηση δεν είναι τόσο απλή. Συγκεκριμένα, στο *Διάγραμμα 6* παρουσιάζεται η ακτίνα μέγιστης εμβέλειας R_{max} που προκύπτει για κάθε περιβάλλον (ημιαστικό, αστικό, πυκνό αστικό και αστικό με ψηλά κτήρια), σύμφωνα με τις επιλεγμένες παραμέτρους, συγκρινόμενη με την ακτίνα βέλτιστης εμβέλειας που προκύπτει σε κάθε προσομοίωση, αναφορικά με το διαφορετικό πλήθος χρηστών που βρίσκονται στο χώρο. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι

το εμβαδόν του χώρου που έχει επιλεγεί (2.25 km^2) είναι κατά πολύ μεγαλύτερο και μη συγκρίσιμο με τη μέγιστη ακτίνα κάλυψης. Συνεπώς, το πλήθος των ομοιόμορφα τυχαία κατανομημένων χρηστών ($n_u = 10 \sim 150$) ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την πυκνότητα με την οποία αυτοί τοποθετούνται.



Διάγραμμα 6: Ακτίνα εμβέλειας βέλτιστης τοποθέτησης R_1 , όπως αυτή προκύπτει εμπειρικά σε κάθε επανάληψη προσομοίωσης στα διαφορετικά είδη περιβάλλοντος (μπλε: Ημιαστικό Περιβάλλον (Suburban), μαύρο: Αστικό Περιβάλλον (Urban), κυανό: Πυκνό Αστικό Περιβάλλον (Dense Urban), κόκκινο: Αστικό Περιβάλλον Ψηλών Κτηρίων (Highrise Urban)).

Η παράμετρος της πυκνότητας $d = n_u / 2.25 \text{ km}^2$ είναι καθοριστική. Ένας από τους λόγους είναι το γεγονός ότι συνδέεται με την πιθανότητα η μέγιστη εμβέλεια να μην μπορεί να καλύψει περισσότερους από έναν χρήστες. Σε αυτήν την περίπτωση η ακτίνα βέλτιστης τοποθέτησης R_1 τείνει στο μηδέν και τίθενται υπό εξέταση οι αποφάσεις που λήφθηκαν κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης καναλιού ή ακόμα και η αναλογία κέρδους-κόστους για την πραγματοποίηση της εφαρμογής εξ' ολοκλήρου. Στο *Διάγραμμα 7* παρουσιάζεται μια προσέγγιση της πιθανότητας αυτής, όπως προσεγγίστηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, έπειτα από πλήθος επαναλήψεων της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 7: Πιθανότητα αδυναμίας κάλυψης περισσότερων από έναν χρήστη σε κάθε περιβάλλον, όπως αυτή προκύπτει εμπειρικά (μπλε: Ημιαστικό Περιβάλλον (Suburban), μαύρο: Αστικό Περιβάλλον (Urban), κυανό: Πυκνό Αστικό Περιβάλλον (Dense Urban), κόκκινο: Αστικό Περιβάλλον Ψηλών Κτηρίων (Highrise Urban)).

Η απάντηση, λοιπόν, για το ποσοστό κατά το οποίο βελτιώνεται η επικοινωνία με χρήση της προτεινόμενης μεθόδου θα δοθεί με παρατήρηση των *Διαγραμμάτων* 6 και 7. Συγκεκριμένα, στο *Διάγραμμα* 6 καθίσταται ξεκάθαρο πως όσο πιο πυκνά βρίσκονται τοποθετημένοι οι χρήστες, τόσο μικρότερο είναι το κέρδος σε μείωση της ακτίνας εμβέλειας. Πρακτικά, σε μεγάλη πυκνότητα χρηστών ($d > 200/2.25 \text{ km}^2$) η ακτίνα μέγιστης εμβέλειας εξισώνεται με την ακτίνα βέλτιστης τοποθέτησης ($R_{max} = R_1$) και το κέρδος σε εκπεμπόμενη ισχύ μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει διότι πυκνά τοποθετημένοι χρήστες παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα να “χωρέσει” μεγάλο πλήθος χρηστών στην ακτίνα R_1 , αφήνοντας μικρά περιθώρια ελάττωσης της ακτίνας αυτής με διατήρηση του πλήθους αυτού σε εμβέλεια.

Στην αντίθετη περίπτωση, αραιά τοποθετημένοι χρήστες στο χώρο καθιστούν πιθανότερη μια σημαντική ελάττωση της ακτίνας μέγιστης εμβέλειας R_{max} και έτσι η ακτίνα βέλτιστης τοποθέτησης R_1 να ενδέχεται να προκύψει οσοδήποτε μικρή. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πιθανότητα να είναι δυνατή η εξυπηρέτηση αποκλειστικά ενός χρήστη αυξάνεται σημαντικά. Ιδιαίτερα, σε αστικό περιβάλλον ψηλών κτηρίων, όπου η ακτίνα R_{max} μικραίνει σημαντικά,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η παρούσα εργασία αποτελεί προσέγγιση ενός εκ των ζητημάτων προς επίλυση που αναφέρθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, αυτό της βέλτιστης 3-D τοποθέτησης ενός UAV. Δεν είναι προφανές ότι όντως υπάρχει θέση, η οποία βελτιστοποιεί την αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος επικοινωνιών, ενώ ο υπολογισμός αυτής δεν είναι καθόλου απλός. Αν και τα δύο αυτά ερωτήματα έχουν πλέον απαντηθεί, μένουν πολλά ακόμα. Όσο διαφορετικές εφαρμογές παρουσιάζουν διαφορετικές απαιτήσεις, η ειδικότερη προσέγγιση πιο συγκεκριμένων ζητημάτων καθίσταται αναγκαία.

Ακολουθώντας την παραπάνω λογική, ακόμα και το ήδη λυμένο πρόβλημα της βέλτιστης 3-D τοποθέτησης ενός UAV δίνει χώρο για περαιτέρω συζήτηση. Ποιος είναι ο κατάλληλος υπολογισμός για χρήση περισσότερων drones; Τι είδους δυσκολίες προκύπτουν σε περίπτωση που ενδιαφερόμαστε για μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου; Είναι προφανές ότι και η πιο μικρή διαφοροποίηση του σεναρίου αναδύει πολλά επιπλέον προβλήματα προς αντιμετώπιση. Στην περίπτωση περισσότερων από ένα UAVs απαιτείται διαφορετική μοντελοποίηση καναλιού, μιας και εισάγεται το πρόβλημα της μεταξύ τους παρεμβολής. Περεταίρω, πρέπει να μελετηθεί το ερώτημα αν συμφέρει να συμπίπτουν οι εμβέλειες των drones, προκειμένου να εισέρχονται σε αυτές οι περισσότεροι δυνατοί χρήστες. Αντίστοιχα, στην περίπτωση που γίνεται συζήτηση για μεγαλύτερη διάρκεια χρόνου εξυπηρέτησης χρηστών, παρουσιάζεται το ζήτημα της καθοριστικής μεταβολής της θέσης των χρηστών, με αποτέλεσμα την πιθανότητα η δύο διαδοχικές βέλτιστες τοποθετήσεις του UAV να προκύπτουν σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Συνδυάζεται, δηλαδή, με το ζήτημα του κατάλληλου σχεδιασμού διαδρομής που αναφέρεται στο πρώτο κεφάλαιο.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω σχόλια είναι πως ο σχεδιασμός ενός συστήματος επικοινωνιών που αξιοποιεί την τεχνολογία UAV είναι ιδιαίτερα πολυσύνθετος και για αυτό η έρευνα βρίσκεται ακόμα στα πρώτα της βήματα στον τομέα. Πρόκειται για ένα δύσκολο μονοπάτι, χωρίς όμως αυτό να συνεπάγεται ότι δεν προσφέρεται ήδη η δυνατότητα στον άνθρωπο να “γεύεται” τα οφέλη που έχει να προσφέρει η νέα αυτή τεχνολογία.

- [1] David W. Matolak, “Air-Ground Channels & Models: Comprehensive Review and Considerations for Unmanned Aircraft Systems”.
- [2] David W. Matolak, “Air-Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems—Part I: Methods, Measurements, and Models for Over-Water Settings”.
- [3] David W. Matolak, “Air-Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems Part II: Hilly and Mountainous Settings”.
- [4] David W. Matolak, “Air-Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems—Part III: The Suburban and Near-Urban Environments”.
- [5] Mohamed Alzenad, Amr El-Keyi, Faraj Lagum, and Halim Yanikomeroglu, “3D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station (UAV-BS) for Energy-Efficient Maximal Coverage”, Department of Systems and Computer Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada, Apr 2017.
- [6] 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.
- [7] Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Debbah, “Unmanned Aerial Vehicle with Underlaid Device-to-Device Communications: Performance and Tradeoffs”, Feb 2016.
- [8] Mohamed Alzenad, Halim Yanikomeroglu, “Coverage and Rate Analysis for Unmanned Aerial Vehicle Base Stations with LoS/NLoS Propagation”, Apr 2018.
- [9] Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Young-Han Nam, Debbah, “A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems”, Mar 2018.
- [10] Mohammad Mozaffari, “Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Fundamentals, Deployment and Optimization”, Presentation in Virginia Tech, Dec 2017.
- [11] Elham Kalantari, Muhammad Zeeshan Shakir, Halim Yanikomeroglu, and Abbas Yongacoglu, “Backhaul-aware Robust 3D Drone Placement in 5G+ Wireless Networks”, Carleton University, Ottawa, 2017.
- [12] Akram Al-Hourani, Sithamparanathan Kandeepan, Abbas Jamalipour, “Modeling Air-to-Ground Path Loss for Low Altitude Platforms in Urban Environments”, *Globecom 2014 - Symposium on Selected Areas in Communications: GC14 SAC Satellite & Space Communication*.

Παράρτημα Α: Καθορισμός Παραμέτρων Προβλήματος

```
clear all
close all
c=3e8;

%Environment Parameters
%1:Suburban, 2:Urban, 3:Dense Urban, 4:Highrise Urban
environment=2;
h_los=1;
h_nlos=20;

%Network Info
f_c=2e9;
P_t=pow2db(5);
P_r=pow2db(25e-3);
h_max=1.5e3;
h_min=100;

%Problem Info
r_i=500;
res=5;
n_users=80;
terrain=1.5e3;

%=====
%Building the environment
if environment==1
    alpha=0.1;
    btheta=750;
    gamma=8;
    theta_opt=20.34*pi/180;
elseif environment==2
    alpha=0.3;
    btheta=500;
    gamma=15;
    theta_opt=42.44*pi/180;
elseif environment==3
    alpha=0.5;
    btheta=300;
    gamma=20;
    theta_opt=54.62*pi/180;
elseif environment==4
    alpha=0.5;
    btheta=300;
    gamma=50;
    theta_opt=75.52*pi/180;
end
```

```

c_a=[9.34e-01 2.3e-01 -2.25e-03 1.86e-05;1.94e-02 2.44e-03 6.58e-06 0;-
1.24e-04 -3.34e-06 0 0;2.73e-07 0 0 0];
c_b=[1.17e+00 -7.56e-02 1.98e-03 -1.78e-05;-5.79e-03 1.81e-04 -1.65e-06
0;1.73e-05 -2.02e-07 0 0;-2.00e-08 0 0 0];
a=0;
b=0;
for j=0:3
    for i=0:3-j
        a=a+c_a(i+1,j+1)*(alpha*btheta)^(i)*gamma^j;
        b=b+c_b(i+1,j+1)*(alpha*btheta)^(i)*gamma^j;
    end
end
end

```

Παράρτημα Β: Επαλήθευση Θεωρίας

```

%P_los
h=linspace(h_min,h_max,h_max/res);
theta_i=atan(h./r_i);
P_los=1./(1+a.*exp(-b*(theta_i*180/pi-a)));

figure('Name','LoS Probability vs Height','NumberTitle','off');
plot(h,P_los);

%=====
%Loss
A=h_los-h_nlos;
B=pow2db(4*pi*f_c/c);
L=A./(1+a.*exp(-b*(theta_i*180/pi-a)))+pow2db(r_i./cos(theta_i))+B;

figure('Name','Loss vs Height','NumberTitle','off');
plot(h,L)

```

Παράρτημα Γ: Υπολογισμός Βέλτιστης Τοποθέτησης Τοπικά

```

%Finding optimal height h1

L_thres=P_t-P_r;
R_max=db2pow((L_thres-A/(1+a*exp(-b*(theta_opt*180/pi-a)))-
B))*cos(theta_opt);
h1=R_max*tan(theta_opt);

%=====
%Creating users on the field
users = rand(n_users, 2)*terrain;
figure
plot(users(:, 1), users(:, 2), '*')
title('UAV at height h1')
hold on

%=====
%Placing the UAV at height h1, while maximizing covered users

```

```

x=linspace(min(users(:, 1)),max(users(:, 1)), (max(users(:, 1))-min(users(:,
1))+1)/res);
y=linspace(min(users(:, 2)),max(users(:, 2)), (max(users(:, 2))-min(users(:,
2))+1)/res);
u=zeros(length(x),length(y));
x0=x(1);
y0=y(1);
i_opt=1;
j_opt=1;
for i=1:length(x)
    for j=1:length(y)
        for n=1:n_users
            if (x(i)-users(n,1))^2+(y(j)-users(n,2))^2<=R_max^2
                u(i,j)=u(i,j)+1;
            end
            if u(i,j)>=u(i_opt,j_opt)
                x0=x(i);
                y0=y(j);
                i_opt=i;
                j_opt=j;
            end
        end
    end
end

ang=0:0.01:2*pi;
xp=R_max*cos(ang);
yp=R_max*sin(ang);
plot(x0+xp,y0+yp)

%=====
%Recenter and resize coverage region

%Finding fareset user
R1=R_max;
d_sq=zeros(1,n_users);
n_max_d=1;
for n=1:n_users
    if (x0-users(n,1))^2+(y0-users(n,2))^2<=R1^2
        d_sq(n)=(x0-users(n,1))^2+(y0-users(n,2))^2;
        if d_sq(n)>=d_sq(n_max_d)
            n_max_d=n;
        end
    end
end
xn=users(n_max_d,1);
yn=users(n_max_d,2);

%Minimizing radius, while covering same number of users
R1_sq=(xn-x0)^2+(yn-y0)^2;

%Calculating one step closer to the fareset user
a=(yn-y0)/(xn-x0);

if xn>x0
    xd=x0+sqrt(res^2/(a^2+1));

```

```

else
    xd=x0-sqrt(res^2/(a^2+1));
end
yd=y0+a*(xd-x0);
Rd_sq=(xn-xd)^2+(yn-yd)^2;

%Check if less users are covered
nd=0;
for n=1:n_users
    if (xd-users(n,1))^2+(yd-users(n,2))^2<=Rd_sq
        nd=nd+1;
    end
end

%Moving one step closer to the forest user
if nd==u(i_opt,j_opt)
    x0=xd;
    y0=yd;
    R1_sq=Rd_sq;
end

%Repeating until before someone is out
while nd==u(i_opt,j_opt)
    if xn>x0
        xd=x0+sqrt(res^2/(a^2+1));
    else
        xd=x0-sqrt(res^2/(a^2+1));
    end
    yd=y0+a*(xd-x0);
    Rd_sq=(xn-xd)^2+(yn-yd)^2;

    nd=0;
    for n=1:n_users
        if (xd-users(n,1))^2+(yd-users(n,2))^2<=Rd_sq
            nd=nd+1;
        end
    end

    if nd==u(i_opt,j_opt)
        x0=xd;
        y0=yd;
        R1_sq=Rd_sq;
    end
end

R1=sqrt(R1_sq);
xp=R1*cos(ang);
yp=R1*sin(ang);
plot(x0+xp,y0+yp,'b')

%Finding 2nd forest user
d_sq=zeros(1,n_users);
n_2max_d=1;
if n_max_d==1
    n_users2=2:n_users;
elseif n_max_d==n_users

```

```

        n_users2=1:(n_users-1);
else
    n_users2=[1:(n_max_d-1) (n_max_d+1):n_users];
end
for n=n_users2
    if (x0-users(n,1))^2+(y0-users(n,2))^2<=R1^2
        d_sq(n)=(x0-users(n,1))^2+(y0-users(n,2))^2;
        if d_sq(n)>=d_sq(n_2max_d)
            n_2max_d=n;
        end
    end
end
xn2=users(n_2max_d,1);
yn2=users(n_2max_d,2);

%Calculating one step closer to their centre
xc=(xn+xn2)/2;
yc=(yn+yn2)/2;
a=(yc-y0)/(xc-x0);

if xc>x0
    xd=x0+sqrt(res^2/(a^2+1));
else
    xd=x0-sqrt(res^2/(a^2+1));
end
yd=y0+a*(xd-x0);
Rd_sq=(xn-xd)^2+(yn-yd)^2;

%Check if less users are covered
nd=0;
for n=1:n_users
    if (xd-users(n,1))^2+(yd-users(n,2))^2<=Rd_sq
        nd=nd+1;
    end
end

%Moving one step closer to the farrest user
if nd==u(i_opt,j_opt)
    x0=xd;
    y0=yd;
    R1_sq=Rd_sq;
end

%Repeating until finding final-optimal circle
while nd==u(i_opt,j_opt)
    if xc>x0
        xd=x0+sqrt(res^2/(a^2+1));
    else
        xd=x0-sqrt(res^2/(a^2+1));
    end
    yd=y0+a*(xd-x0);
    Rd_sq=(xn-xd)^2+(yn-yd)^2;

    nd=0;
    for n=1:n_users
        if (xd-users(n,1))^2+(yd-users(n,2))^2<=Rd_sq

```

```

        nd=nd+1;
    end
end

    if nd==u(i_opt,j_opt)
        x0=xd;
        y0=yd;
        R1_sq=Rd_sq;
    end
end

R1=sqrt(R1_sq);
xp=R1*cos(ang);
yp=R1*sin(ang);
plot(x0+xp,y0+yp,'g')

%=====
%Results

theta=atan(h1/R1);
L1=A/(1+a*exp(-b*(theta*180/pi-a)))+pow2db(R1/theta)+B;
Pt1=P_r+L1;

success_R=(R_max-R1)*100/R_max;
success_P=P_t-Pt1;

```

Παράρτημα Δ: Επανάληψη για Κάθε Τοπικό Βέλτιστο

```

u_max=max(max(u));
K=zeros(1,u_max);
G=zeros(1,2+u_max);
g1=1;
for i=1:length(x)
    for j=1:length(y)
        if u(i,j)==u_max
            g2=1;
            for n=1:n_users
                if (x(i)-users(n,1))^2+(y(j)-users(n,2))^2<=R_max^2
                    K(g2)=n;
                    g2=g2+1;
                end
            end
            k2=0;
            k3=size(G);
            for k1=1:k3(1)
                if g1~=1
                    if K==G(k1,3:2+u_max)
                        k2=k2+1;
                    end
                end
            end
            if k2~=u_max
                if g1==1
                    G=[i j K];
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        else
            G=[G;i j K];
        end
        g1=g1+1;
    end
end
end
end

k3=size(G);
R1=zeros(1,k3(1));
for v=1:k3(1)
    x0=x(i);
    y0=y(j);
    i_opt=i;
    j_opt=j;
    [...]
end

```