



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη Δυναμικών Δικτύων Μετάδοσης Δεδομένων  
από μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα  
Unmanned Aerial Vehicles – UAVs**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σβορώνος Θεοχάρης

A.M: 03117682

**Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη Δυναμικών Δικτύων Μετάδοσης Δεδομένων  
από μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα  
Unmanned Aerial Vehicles – UAVs**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σβορώνος Θεοχάρης  
ΑΜ: 03117682

**Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15 Νοεμβρίου 2021

.....  
Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ευστάθιος Συκάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

.....

Σβορώνος Θεοχάρης

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

Copyright © Σβορώνος Θεοχάρης, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η χρήση των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων – Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) ως κόμβοι μετάδοσης, για την ανάπτυξη δυναμικών δικτύων μετάδοσης δεδομένων. Τα UAVs αποτελούν σύγχρονες πτητικές συσκευές μικρής ή μεγάλης κλίμακας, οι οποίες μπορούν να κινηθούν με ακρίβεια στον τρισδιάστατο χώρο. Οι εφαρμογές που έχουν βασιστεί στη χρήση των UAVs, είναι πολλές και επεκτείνονται ραγδαία στην καθημερινότητα με τη συνεχή πρόοδο της επιστήμης. Η χρήση τους για την ανάπτυξη δυναμικών (ad-hoc) δικτύων αποτελεί μία αρκετά υποσχόμενη εφαρμογή τους, η οποία θα επιλύσει πολλά προβλήματα κάλυψης δικτύων μετάδοσης, ειδικότερα σε περιοχές οι οποίες είναι απομονωμένες ή η ανάπτυξη σταθερών δικτύων είναι δαπανηρή.

Η διασύνδεση των UAVs μεταξύ τους, απαιτεί τη χρήση έτοιμων πρωτοκόλλων διασύνδεσης, που κυρίως βασίζονται στις τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτών των πρωτοκόλλων αφορούν κυρίως σε σταθερούς σταθμούς βάσης και κατά συνέπεια δυσκολεύονται να ακολουθήσουν τις απαιτήσεις των δυναμικών δικτύων. Η διασύνδεση των UAVs μεταξύ τους σχηματίζει δυναμικά ιπτάμενα ad-hoc δίκτυα – FANETs. Οι αρχιτεκτονικές διασύνδεσης μεταξύ των μελών UAVs του σμήνους, κάνουν χρήση των παραδοσιακών τεχνολογιών που έχουν μελετηθεί και για τα επίγεια δίκτυα.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκε η ακόλουθη πληροφορία:

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάστηκε μία εισαγωγή για τα UAVs καθώς και για τις εφαρμογές τους. Επιπλέον, τέθηκαν όλα τα ανοικτά θέματα που αφορούν την διασύνδεση τους, και οι προσφερόμενες τεχνολογίες για την κάλυψη τους. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν οι αρχιτεκτονικές συγκρότησης των ad-hoc δικτύων FANETs. Διερευνήθηκαν οι αρχιτεκτονικές και οι τεχνολογίες διασύνδεσης με χρήση των κλασικών πρωτοκόλλων ασύρματης τεχνολογίας. Εναλλακτικά παρουσιάστηκαν διασυνδέσεις με τεχνολογίες δορυφόρων καθώς και τα πιο εξελιγμένα πρωτόκολλα 802.11x. Η διασύνδεση αντιμετωπίζει προβλήματα μέσω των τεχνολογιών Wi-Fi, οπότε προτείνεται η χρήση και εναλλακτικών τύπων διαμορφώσεων, όπως η διαμόρφωση LoRa. Πρόκειται για μία διαμόρφωση εξαπλωμένου φάσματος, με χρήση ορθογωνικών κωδίκων, η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πολλαπλών πακέτων, μειώνοντας τις ενεργειακές απαιτήσεις των πομποδεκτών, καθώς και τις παρεμβολές μεταξύ τους. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκαν πειραματικές μετρήσεις από μικρής κλίμακας δίκτυα FANETs, κάνοντας χρήση αρχιτεκτονικών κόμβου με χρήση τεχνολογιών διασύνδεσης Wi-Fi. Τέλος στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν τα γενικά συμπεράσματα από τη μελέτη, καθώς και η μελλοντική συνδρομή διαφόρων κλάδων των επιστημών για την μετεξέλιξη της διασυνδεσιμότητας και κάλυψης από τα FANETs.

### Λέξεις κλειδιά

UAVs, FANETs, μη επανδρωμένες ιπτάμενες συσκευές, Wi-Fi, 802.11x, διαμορφώσεις διευρυμένου φάσματος, πολυ-επίπεδες αρχιτεκτονικές διασύνδεσης, καθυστέρηση μετάδοσης, throughput, end-to-end delay, QoS

## **Abstract**

This dissertation studied the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as transmission hubs, for the development of dynamic data transmission networks. UAVs are modern, small- or large-scale flying devices, that navigate precisely in three-dimensional space. The applications that have been based on the use of UAVs, are many and are rapidly expanding into everyday life with the continuous progress of science. Their use for the development of dynamic (ad-hoc) networks, is a very promising application, which will solve many problems of coverage of transmission networks, especially in areas that are isolated or the development of such networks is expensive.

The interconnection of UAVs with each other requires the use of ready-made interconnection protocols, which are mainly based on wireless networking technologies. The characteristics of these protocols relate mainly to fixed base stations and therefore make it difficult to follow the requirements of dynamic networks. The interconnection of UAVs, with each other, forms dynamic flying ad-hoc networks - FANETs.

The interconnection architectures between the UAVs members of the swarm, make use of traditional technologies that have also been studied for terrestrial networks. The following information was presented in the context of this dissertation:

Chapter 1 presents an introduction to UAVs and their applications. In addition, all open issues related to their interconnection were raised, as well as the technologies offered to cover them. Chapter 2 presents the architectures of the FANETs ad-hoc networks. Architectures and interconnection technologies were explored using classic wireless technology protocols. Alternatively, interfaces with satellite technologies as well as the more advanced 802.11x protocols were introduced. The interconnection is experiencing problems with Wi-Fi technologies, so it is recommended to use alternative types of configurations, such as the LoRa modulation. It is a spread spectrum modulation, using orthogonal codes, which allows the simultaneous transmission and reception of multiple packets, reducing the energy requirements of the transceivers, as well as the interference between them. Chapter 3 presents experimental measurements from small-scale FANETs, using node architectures utilizing Wi-Fi interconnection technologies. Finally, Chapter 4 presents the general conclusions from the study, as well as the future contribution of various branches of science to the evolution of interconnection and coverage by FANETs.

## **Key words**

UAVs, FANETs, unmanned aerial vehicles, Wi-Fi, 802.11x, spread spectrum modulations, multi-level interface architectures, transmission delay, throughput, end-to-end delay, QoS



## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Χριστοφόρου τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Βικτώρια Σγαρδώνη, Λέκτορα του ΕΚΠΑ, η οποία με την καθοδήγησή της με βοήθησε, τόσο με την εμπειρία της όσο και με τις γνώσεις της, στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα κοντινά μου πρόσωπα, που με την αμέριστη υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου συνέβαλλαν αποφασιστικά στην επίτευξη αυτού του στόχου.





## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	- 5 -
Abstract.....	- 6 -
Ευχαριστίες.....	- 8 -
Περιεχόμενα.....	- 10 -
Κατάλογος σχημάτων.....	- 13 -
Κατάλογος πινάκων.....	- 15 -
1. Εισαγωγή στις τεχνολογίες των Μη Επανδρωμένων Οχημάτων .....	- 16 -
1.1 Μη Επανδρωμένα Οχήματα.....	- 16 -
1.2 Κατηγορίες Μη Επανδρωμένων Οχημάτων, Εφαρμογές και Κανονιστικά Πλαίσια Λειτουργίας .....	- 18 -
1.2.1 Κανονιστικά – Νομικά Πλαίσια για τα UAVs .....	- 22 -
1.3 Ανοικτά Θέματα για Έρευνα στην επικοινωνία με χρήση UAVs .....	- 23 -
1.3.1 Μοντελοποίηση του καναλιού Αέρος – Εδάφους .....	- 24 -
1.3.2 Βέλτιστη ένταξη των UAVs ως ιπτάμενοι σταθμοί βάσης.....	- 25 -
1.3.3 Βελτιστοποίηση Τροχιάς Πτήσης των UAVs.....	- 25 -
1.3.4 Ανάλυση της απόδοσης των Δικτύων από UAVs.....	- 26 -
1.3.5 Σχεδιασμός Κυψελωτών Δικτύων και η συνεισφορά των UAVs .....	- 27 -
1.3.6 Διαχείριση Πόρων και Επιδόσεις Ισχύος των καναλιών .....	- 28 -
1.3.7 Χρήστες drone – UEs σε ασύρματα δίκτυα από UAVs .....	- 29 -
1.4 Τεχνολογίες για την κάλυψη των ανοικτών θεμάτων.....	- 31 -
1.4.1 Μοντελοποίηση του καναλιού Αέρος - Εδάφους .....	- 31 -
1.4.2 Η βέλτιστη τοποθέτηση των UAVs ως ιπτάμενοι σταθμοί βάσης .....	- 33 -
1.4.3 Βελτιστοποίηση επιλογής τροχιών πτήσης για τα UAVs.....	- 35 -
1.4.4 Ανάλυση των Επιδόσεων Ασύρματων Δικτύων που βασίζονται σε UAVs - 36 -	
1.4.5 Σχεδιασμός Κυψελωτών Δικτύων και η παροχή συνδεσιμότητας με δίκτυο UAV .....	- 38 -
1.4.6 Χειρισμός των πόρων του δικτύου και Επίπεδα Ισχύος .....	- 39 -
1.4.7 Τα drone-UEs στα ασύρματα δίκτυα.....	- 41 -
1.5 Συμπεράσματα από τη συμβολή των τεχνολογιών για την κάλυψη των ανοικτών θεμάτων .....	- 42 -
2 Αρχιτεκτονικές για την ανάπτυξη δικτύων μετάδοσης με χρήση των UAVs. Τα δίκτυα FANETs .....	- 44 -

2.1 Αρχιτεκτονικές Διασύνδεσης Σμήνους και πολλαπλών επιπέδων για τη συγκρότηση ενός FANET.....	44 -
2.1.1 UAV Ad-Hoc Network.....	46 -
2.1.2 Multi-Group UAV Ad-Hoc Network.....	46 -
2.1.3 Multi-Layer UAV Ad-Hoc Network .....	47 -
2.2 Ασύρματες Τεχνολογίες για την υποστήριξη της διασύνδεσης των FANETs .	47 -
2.2.1 Wi-Fi (IEEE 802.11) .....	49 -
2.2.2 Bluetooth (IEEE 802.15.1) .....	50 -
2.2.3 Zigbee(IEEE 802.15.4) .....	50 -
2.2.4 WiMAX (IEEE 802.16) .....	51 -
2.2.5 Long Term Evolution (LTE) .....	51 -
2.2.6 Δίκτυα 5 <sup>ης</sup> Γενιάς (5G).....	52 -
2.2.7 Δορυφορικά Δίκτυα (SATCOM) .....	53 -
2.3 Προτεινόμενο μοντέλο διασύνδεσης για την ανάπτυξη του FANET .....	54 -
2.4 Αρχιτεκτονική και εφαρμογές του FANET .....	56 -
2.5 Προσομοίωση του FANET και αποτελέσματα.....	57 -
2.6 Εναλλακτικές τεχνικές διαμόρφωσης για τη διασύνδεση UAVs στο FANET. Το πρωτόκολλο LoRa .....	59 -
2.6.1 Βασικές Αρχές Μετάδοσης σε κανάλι θορύβου.....	60 -
2.6.2 Η τεχνική Διαμόρφωσης LoRa.....	62 -
2.6.3 Βασικά χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης LoRa.....	63 -
2.6.4 Σύγκριση επιπέδων ευαισθησίας μεταξύ των διαμορφώσεων LoRa και FSK .....	64 -
2.6.5 Ανάλυση απωλειών ισχύος μετάδοσης (Link Budget).....	66 -
2.6.6 Δοκιμές Δικτύου και σύγκριση επιδόσεων της διαμόρφωσης LoRa .....	66 -
2.6.7 Η χρήση της LoRa ως τεχνολογία διασύνδεσης των μελών UAVs ενός FANET .....	68 -
2.7 Νέα πρωτόκολλα για την κάλυψη των αναγκών διασύνδεσης των UAVs σε FANETs.....	69 -
3 Πειραματικές Μετρήσεις σε δίκτυα FANETs μικρής κλίμακας.....	71 -
3.1 Ανάπτυξη του δικτύου FANET μικρής κλίμακας. Μεθοδολογία και Εξοπλισμός.....	71 -
3.1.1 Θεωρητική Ανάλυση των μοντέλων διάδοσης.....	72 -
3.2 Μετρήσεις.....	75 -
3.3 Ενεργειακή Απόδοση .....	78 -

3.4 Συμπεράσματα .....	- 79 -
3.5 Η χρήση των πρωτοκόλλων IEEE 802.11n και 802.11ac για τη διασύνδεση των UAVs σε FANETs.....	- 79 -
3.5.1 Το πειραματικό σύστημα .....	- 79 -
3.5.2 Πείραμα εσωτερικού χώρου (Indoor).....	- 81 -
3.5.3 Πείραμα εξωτερικού χώρου (Outdoor) για σύγκριση 802.11a και 802.11n -	81 -
3.5.4 Πείραμα εξωτερικού χώρου (Outdoor) για σύγκριση 802.11ac και 802.11n .....	- 83 -
3.5.5 Πείραμα εξωτερικού χώρου (Outdoor) για δίκαιη ταυτόχρονη μετάδοση με χρήση 802.11n .....	- 83 -
3.5.6 Πείραμα εξωτερικού χώρου (Outdoor) για ταυτόχρονη μετάδοση με δύο κινούμενα UAVs.....	- 84 -
3.5.7 Συμπεράσματα .....	- 85 -
4 Συμπεράσματα.....	- 86 -
4.1 Συμπεράσματα από την Μελέτη των FANETs .....	- 86 -
4.2 Επιστημονικοί Τομείς για την κάλυψη των Ανοικτών Θεμάτων που σχετίζονται με τη χρήση των UAVs ως σταθμοί βάσης σε δίκτυα FANETs.....	- 87 -
4.2.1 Γενικευμένη θεωρία βελτιστοποίησης.....	- 88 -
4.2.2 Βέλτιστη Θεωρία Μεταφοράς.....	- 89 -
4.2.3 Ανάλυση Επιδόσεων με χρήση της τεχνικής στοχαστικής γεωμετρίας....	- 89 -
4.2.4 Τεχνικές Μηχανικής Εκμάθησης .....	- 90 -
4.2.5 Θεωρία Παιγνίων.....	- 91 -
Βιβλιογραφία.....	- 93 -

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση των UAVs με βάση το ύψος πτήσεως και τον τύπο τους

Σχήμα 2: Εφαρμογές και σχετιζόμενες τεχνολογικές προκλήσεις για τη χρήση των UAVs ως κόμβους για την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων

Σχήμα 3: Μοντέλο πιθανότητας απωλειών διαδρομής

Σχήμα 4: Βέλτιστη τοποθέτηση 3D των UAVs για εφαρμογές IoT

Σχήμα 5: Συνολικά επίπεδα εκπομπής ισχύος των επίγειων συσκευών συναρτήσει των ιπτάμενων κόμβων UAVs (για κάλυψη επίγειων συσκευών IoT)

Σχήμα 6: Μεταβολή του ύψους τοποθέτησης των UAVs συναρτήσει του πλήθους που μετέχουν στο σχηματισμό

Σχήμα 7: Συνολική Κατανάλωση Ισχύος λόγω κινητικότητας των drones συναρτήσει του αριθμού ενημερώσεων θέσεων

Σχήμα 8: Μέσος ρυθμός μετάδοσης χρηστών σε δίκτυο UAV και D2D συναρτήσει του ύψους πτήσης του UAV

Σχήμα 9: Μέση καθυστέρηση μετάδοσης δικτύου για ρυθμό μετάδοσης 1Mb

Σχήμα 10: Μέσος Χρόνος Πτήσεως συναρτήσει του προσφερόμενου εύρους ζώνης

Σχήμα 11: Κατανάλωση ισχύος των UAVs λόγω πτήσεως και επίδραση της κατανομής εύρους ζώνης

Σχήμα 12: Η επίδραση των drone-UEs στην περιγραφή της συνδεσιμότητας των επίγειων χρηστών

Σχήμα 13: Αρχιτεκτονικές Διασύνδεσης FANET (a) Κεντροποιημένη Αρχιτεκτονική (Centralized Architecture) (b) Τυπικό UAV δίκτυο (UAV ad-hoc network) (c) Δίκτυο με συμμετοχή πολλών ομάδων UAVs (Multi Group UAV Ad-hoc network) (δ) Πολυ-επίπεδο UAV δίκτυο (Multi Layer UAV ad-hoc network)

Σχήμα 14: Τεχνολογίες για short range ζεύξη και μέγιστες αποστάσεις διασύνδεσης (σε εφαρμογές εντός κλειστού – ανοικτού χώρου)

Σχήμα 15: Μοντέλο νομαδικής κινητικότητας RWP με έμφαση στις εμβέλεις διασύνδεσης (Nomadic Community – NC)

Σχήμα 16: Μοντέλο κινητικότητας χρησιμοποιώντας σημείο αναφοράς (Reference Point Group Mobility – RPGM)

Σχήμα 17: Απλή τοπολογία για την υποστήριξη ενός Πολυ-επίπεδου Πολλών-Ομάδων FANET

Σχήμα 18: Μέσο throughput και delay για το RPGM Μοντέλο κινητικότητας

Σχήμα 19: Μέσο throughput και delay για το RWP Μοντέλο κινητικότητας

Σχήμα 20: Τεχνική διαμόρφωσης διευρυμένου φάσματος με χρήση ορθογωνικού κώδικα

Σχήμα 21: Τεχνική αποδιαμόρφωσης διευρυμένου φάσματος με χρήση ορθογωνικού κώδικα

- Σχήμα 22: Σύγκριση του επιπέδου ευαισθησίας για τις διαμορφώσεις LoRa και FSK
- Σχήμα 23: Περιοχή Shinjuku για την εφαρμογή μετρήσεων δικτύου
- Σχήμα 24: Περιοχή κάλυψης και πεδίο μετρήσεων
- Σχήμα 25: Μέσος ρυθμός μετάδοσης και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετάδοση Rx – Tx
- Σχήμα 26: Σύγκριση των καταναλώσεων των Wi-Fi κόμβων για πακέτα 512 και 1024 bytes
- Σχήμα 27: Απλό σύστημα μετάδοσης μεταξύ ενός UAV και σταθμού βάσης
- Σχήμα 28: Σύστημα πολλαπλής μετάδοσης μεταξύ UAV και σταθμού βάσης
- Σχήμα 29: Μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης για το απλό σχήμα UAV με σταθμό βάσης με χρήση των πρωτοκόλλων 802.11n και 802.11a
- Σχήμα 30: Μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης για το απλό σχήμα UAV με σταθμό βάσης και χρήση των πρωτοκόλλων 802.11ac και 802.11n
- Σχήμα 31: Μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης για ταυτόχρονη μετάδοση με χρήση του 802.11n
- Σχήμα 32: Μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης για ταυτόχρονη μετάδοση για δύο κινούμενα UAVs
- Σχήμα 33: Μαθηματικά εργαλεία για το σχεδιασμό δικτύων FANETs

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ UAV και επίγειων σταθμών βάσης

Πίνακας 2: Σύγκριση μεταξύ UAV και επίγειων δικτύων

Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση των UAVs βάσει ιδιαίτερων χαρακτηριστικών πτήσης ανά γεωγραφική περιοχή

Πίνακας 4: Ασύρματες Τεχνολογίες Ζεύξης και Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Πίνακας 5: Παράμετροι του Μοντέλου προσομοίωσης στο περιβάλλον OPNET<sup>®</sup>

Πίνακας 6: Απώλειες Ισχύος μετάδοσης για τα σημεία των δεκτών

Πίνακας 7: Διαμόρφωση στοίβας πρωτοκόλλων επικοινωνίας για τα δίκτυα FANET

Πίνακας 8: Συγκρίσεις για τη ραδιοκάλυψη (uplink – downlink)

Πίνακας 9: Σύγκριση των μέγιστων ρυθμών μετάδοσης

Πίνακας 10: Λειτουργικοί Ρυθμοί Μετάδοσης (Operational Bandwidth) σε αυτόματη επιλογή με βάση το link state

Πίνακας 11: Μετρήσεις στο πείραμα εσωτερικού χώρου

# 1. Εισαγωγή στις τεχνολογίες των Μη Επανδρωμένων Οχημάτων

## 1.1 Μη Επανδρωμένα Οχήματα

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ιδιαίτερα σημαντικά η χρήση των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs). Σε αυτό έχει συμβάλει το γεγονός ότι οι τιμές για τις ιπτάμενες συσκευές μικρών διαστάσεων είναι αρκετά προσιτές στο ευρύ κοινό. Καθοριστικός παράγοντας για την αύξηση αυτή αποτέλεσε και η δυνατότητα μαζικής παραγωγής τους σε τεχνολογικό επίπεδο από τη βιομηχανία, σε συνδυασμό με την ευκολία χειρισμού τους στα θέματα πλοήγησης. Η πλοήγηση τους βασίζεται σε σταθμούς βάσης με τη μορφή τηλεχειρισμού, η οποία επίσης συνδυάζεται με τα ευρύτερα συστήματα γεωγραφικού εντοπισμού (Global Positioning System – GPS) που χρησιμοποιούν τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών κινητής τηλεφωνίας και δορυφόρων.

Ισοδύναμα με τον όρο UAVs, οι Μη Επανδρωμένες Ιπτάμενες Συσκευές εναλλακτικά καλούνται και Μη Επανδρωμένα Ιπτάμενα Συστήματα (Unmanned Aerial Systems – UAS). Οι ιπτάμενες συσκευές είναι πιο γνωστές στο ευρύ κοινό ως drones.

Οι εφαρμογές που κάνουν χρήση των ιπταμένων μη επανδρωμένων οχημάτων (UAVs) περιλαμβάνουν την επιτήρηση και παρακολούθηση γεωγραφικών περιοχών/τομέων, επιχειρήσεις διάσωσης, τη διανομή αγαθών και εμπορευμάτων και τη λειτουργία ως κόμβων για τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση.

Σε άμεση μελλοντική χρήση, τα UAVs αναμένεται να χρησιμοποιηθούν ως σταθμοί βάσης (Flying Base Stations – BS) για την κάλυψη των αναγκών διασύνδεσης δικτύων 5G (ραδιοκάλυψη και χρήση ως τοπικών κόμβων για τη συγκέντρωση και μεταφορά δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης). Ειδικότερα για την παροχή των υπηρεσιών διασύνδεσης, τα UAVs θα πρέπει να μελετηθούν ως προς τη δυνατότητα καθορισμένου εντοπισμού τους στο χώρο, προσφέροντας κανάλια για τη μετάδοση των δεδομένων πτήσης τους παράλληλα με τα κανάλια για τη μεταφορά και διασύνδεση των κόμβων δεδομένων. Στόχος, λοιπόν, με τη χρήση των UAVs είναι η διαμόρφωση δικτύων ad-hoc με κόμβους οι οποίοι δυναμικά μεταβάλλονται σε γεωγραφικές θέσεις ως προς το χρόνο και το χώρο.

Τα δίκτυα μετάδοσης και λήψης ψηφιακών δεδομένων έχουν προσομοιωθεί εκτενώς για σταθερούς κόμβους ως προς τη γεωγραφική θέση, δηλαδή για κόμβους ενός σύγχρονου δικτύου οι οποίοι δεν μεταβάλλουν τη θέση τους στο χώρο και στο χρόνο, ενώ μόνο οι χρήστες αυτών θεωρούνται ως κινητοί σταθμοί. Τα δίκτυα ραδιοκάλυψης που βασίζονται σε UAVs, επιπλέον από τη μοντελοποίησή τους (θέματα εύρους ζώνης, πρωτοκόλλων, διαρκούς κίνησης στο χώρο και στο χρόνο), χρειάζονται αναλυτικές



διαδικασίες μοντελοποίησης, οι οποίες καλούνται να μελετήσουν τα ειδικά χαρακτηριστικά μετάδοσης, όπως είναι οι αποσβέσεις των διαύλων, τα φαινόμενα Doppler και οι βυθίσεις ισχύος από την κίνηση.

Οι κόμβοι που προσφέρονται για τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση μέσω των UAVs έχουν ειδικά χαρακτηριστικά τα οποία διαφέρουν σημαντικά από τα τυπικά δίκτυα ασύρματης διασύνδεσης που προσφέρονται στα πλαίσια των κινητών επικοινωνιών (σταθεροί σταθμοί βάσης).

Η χρήση σε εμπορικό επίπεδο των UAVs, δείχνει μία εκθετική αύξηση, φαινόμενο που στο προσεχές μέλλον αναμένεται να συνεχιστεί. Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση των UAVs αναφέρονται σε ένα πλήθος ειδικών χαρακτηριστικών που αυτά προσφέρουν, όπως:

- Ευκολία χειρισμού και πλοήγησης
- Διασυνεχής έλεγχος παραμέτρων κίνησης – πτήσης
- Ευελιξία στην κίνηση για την κάλυψη περιοχών
- Αυξανόμενη και κλιμακούμενη δυνατότητα (ανάλογα με τον τύπο του UAV) για την ανύψωση και μεταφορά φορτίων - εμπορευμάτων

Τα παραπάνω έχουν αυξήσει σημαντικά το πεδίο εφαρμογών των UAVs, σε εφαρμογές οι οποίες ξεκινούν από το απλό εμπορικό επίπεδο, φτάνοντας μέχρι πολύ ειδικές εφαρμογές στρατιωτικού τύπου.

Στο πλαίσιο των εφαρμογών που τα UAVs μπορούν να προσφέρουν συμπεριλαμβάνονται:

- Ικανότητα παρακολούθησης – κάλυψης απομονωμένων γεωγραφικών περιοχών
- Ικανότητα καταγραφής δεδομένων (εικόνα, θερμικά-γεωλογικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο)
- Έλεγχος και επιτήρηση καταστάσεων ειδικού τύπου (θεομηνίες, καταστροφές)
- Ραδιοκάλυψη με λειτουργία τους ως κόμβοι για τη διαδικτυακή διασύνδεση απομονωμένων περιοχών για μετάδοση και λήψη δεδομένων σε σύνδεση με τα δίκτυα κορμού.

Επομένως το εμπορικό ενδιαφέρον διαφαίνεται τεράστιο για το άμεσο μέλλον. Από στατιστικές μελέτες στο χώρο της αγοράς των UAVs, προβλέπεται να πωληθούν τουλάχιστον 3 εκατομμύρια ιπτάμενες συσκευές μέχρι το 2025. Από οικονομικής πλευράς τα προσδιοριζόμενα οφέλη εκτιμώνται στα 9 δις δολάρια για την επόμενη δεκαετία [1].

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναφερόμαστε σε μικρών διαστάσεων μη επανδρωμένες ιπτάμενες συσκευές, κυρίως για την κάλυψη και τη

διασύνδεση γεωγραφικών περιοχών, με στόχο τη διασφάλιση και δημιουργία ad-hoc δικτύων για τη μετάδοση/λήψη ψηφιακών δεδομένων. Η χρήση τους διευκολύνει τα υπάρχοντα δίκτυα κορμού όταν οι δικτυακές υποδομές βιώνουν φαινόμενα συμφόρησης (congestion), ή απώλειας συνδεσιμότητας – λειτουργικότητας από φυσική καταστροφή ή αποσύνδεση ενός κόμβου.

Η τεχνολογία 5G (τεχνολογία ασύρματων δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς) [2], θα συμπεριλάβει τα UAVs ως αυτόνομους τηλεπικοινωνιακούς κόμβους για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας με χαμηλή καθυστέρηση (low latency), υψηλού ρυθμού μετάδοσης και υψηλούς δείκτες ποιότητας.

Αυτό διαφαίνεται επίσης σε εταιρικό επίπεδο, όπου πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιακού σχεδιασμού έχουν αρχίσει ήδη δοκιμές για την χρήση των UAVs ως κόμβων στα δίκτυα τους. Εταιρείες όπως η Qualcomm® ήδη ελέγχει την διαλειτουργικότητα των UAVs με τα υπάρχοντα LTE δίκτυα της (Long Term Evolution) για τις μελλοντικές γενιές των ασύρματων δικτύων που θα προσφέρει στην αγορά στο προσεχές μέλλον. Τα UAVs επίσης προορίζονται για χρήση ως σημεία διασύνδεσης (Access Points) για κινητές επικοινωνίες σε διαφορετικά δικτυακά περιβάλλοντα. Για το λόγο αυτό, τα UAVs θα εφοδιαστούν με διεπαφές επικοινωνίας (interfaces) που υποστηρίζουν τα απαιτούμενα πρωτόκολλα (πρωτόκολλο 802.11.x). Ήδη διερευνάται η δυνατότητα διασύνδεσης με το διαδίκτυο (internet) μέσω UAVs (εταιρείες Facebook® και Google®), ειδικότερα για γεωγραφικά απομονωμένες περιοχές που δεν επιτρέπουν φυσικές συνδέσεις μέσω των δικτύων κορμού [3].

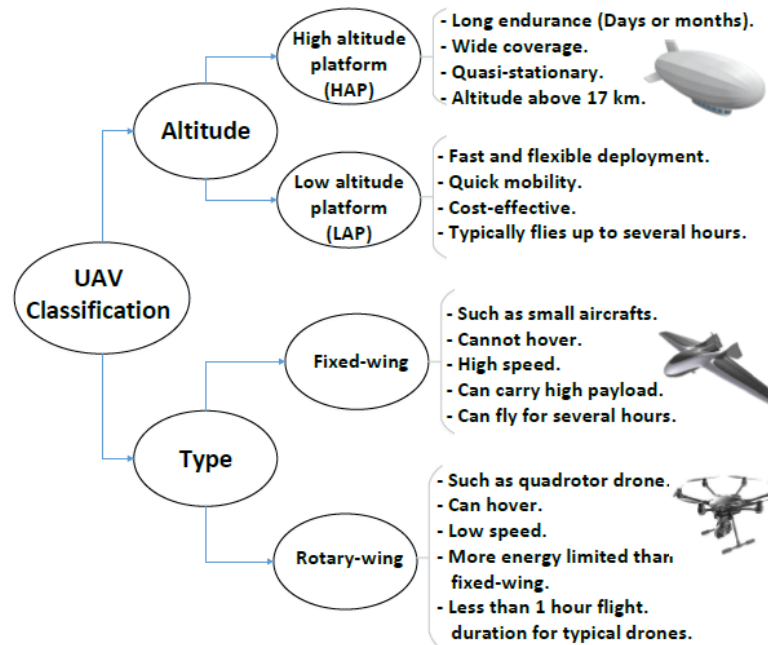
### **1.2 Κατηγορίες Μη Επανδρωμένων Οχημάτων, Εφαρμογές και Κανονιστικά Πλαίσια Λειτουργίας**

Τα UAVs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση αρκετά από τα χαρακτηριστικά στα οποία διαφοροποιούνται. Ένα από αυτά είναι και το ύψος πτήσεως, βάσει του οποίου τα UAVs κατατάσσονται σε Πλατφόρμες Μεγάλου Ύψους (High Altitude Platforms - HAPs) και σε Πλατφόρμες Χαμηλού Ύψους (Low Altitude Platforms - LAPs).

Μία γενικότερη ταξινόμηση των UAVs παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Επομένως οι κατηγορίες των μη επανδρωμένων ιπταμένων οχημάτων UAVs με βάση το σχήμα είναι οι ακόλουθες:

- Κατηγοριοποίηση με βάση το ύψος πτήσεως (Altitude):
  - Πλατφόρμες Μεγάλου Ύψους (High Altitude Platforms - HAPs)
  - Πλατφόρμες Μικρού Ύψους (Low Altitude Platforms - LAPs)
- Κατηγοριοποίηση με βάση τον τύπο της πτητικής συσκευής (Type):
  - Σταθερής Πτέρυγας (Fixed Wing)

ο Περιστροφικής Πτέρυγας (Rotary Wing)



Σχήμα 1: Κατηγοριοποίηση των UAVs με βάση το ύψος πτήσεως και τον τύπο τους [6]

Οι ιπτάμενες συσκευές μπορεί να διαφέρουν σε μέγεθος, από μικρής κλίμακας με διαστάσεις που δεν ξεπερνούν το μέγεθος της ανθρώπινης παλάμης, μέχρι την κλίμακα ενός μεγάλου στρατιωτικού αεροσκάφους (General Atomics MQ-9 Reaper – Predator), με άνοιγμα πτερυγίων της τάξης των 15 m [4]. Η εμβέλεια και η πτητική ικανότητα των UAVs επίσης εξαρτάται από το μέγεθος και τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται. Τα μικρής κλίμακας UAVs χρησιμοποιούν συσσωρευτές (μπαταρίες) για την τροφοδότηση των ηλεκτρικών κινητήρων τους. Οι συσσωρευτές προσφέρουν αυτονομία πτήσης μέχρι και 3 ώρες ανάλογα με το μέγεθος της ιπτάμενης συσκευής και τις καταναλώσεις της. Τα μεγαλύτερης κλίμακας UAVs σχεδιάζονται με αυτονομίες κινητήρων μεγάλης διάρκειας πτήσης (30 ωρών ή/και περισσότερο). Η εμβέλεια των πτήσεων, επίσης εξαρτάται από την κλίμακα και την τεχνολογία επικοινωνίας και ελέγχου του κάθε UAV και κυμαίνεται από αποστάσεις μερικών εκατοντάδων μέτρων έως και πολλών (εκατοντάδων) χιλιομέτρων.

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους δεν υπάρχει διεθνής τυποποίηση και προδιαγραφές λειτουργίας για τα UAVs. Πολλοί οργανισμοί έχουν αναπτύξει προδιαγραφές και πρότυπα για την κατηγοριοποίηση των UAVs, σύμφωνα με το μέγεθος τους, εισάγοντας τις κατηγορίες μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας. Στις Η.Π.Α. η ομοσπονδιακή Διεύθυνση για τον Έλεγχο των πτήσεων (Federal Aviation Administration – FAA) έχει εισάγει κανόνες για τα μικρής κλίμακας UAVs με βάρος μικρότερο από 25 kg [5]. Μέσα σε αυτούς τους κανόνες περιλαμβάνονται:

- η απευθείας οπτική επικοινωνία του ιπτάμενου αντικειμένου και του χειριστή του (Line of Sight – LOS),
- ο καθορισμός της πτήσης με βάση τις συνθήκες φωτεινότητας (ημέρα – νύκτα και έναρξη/τερματισμός της δυνατότητας πτήσης), επιβάλλοντας ακόμη και φώτα όγκου των ιπτάμενων οχημάτων για την αποφυγή συγκρούσεων.

Επιπλέον οι κανόνες αυτοί ορίζουν τα 122 m (400 ft) ως μέγιστο ύψος πτήσης και μέγιστη ταχύτητα της τάξης των 100 mph (161 km/h ή 81 κόμβοι). Κανόνες περιορισμού επίσης αφορούν τις πτήσεις σε περιοχές κοντά σε αεροδρόμια και στρατιωτικές εγκαταστάσεις και γενικά βασίζονται στο ότι ο χειριστής της ιπτάμενης συσκευής είναι υπεύθυνος για τον ασφαλή έλεγχο και την πτήση αυτής.

Στις εφαρμογές των UAVs συγκαταλέγονται οι παρακάτω τομείς:

- Στρατιωτικές εφαρμογές (Military)
- Παρακολούθηση και Επιτήρηση (Surveillance and Monitoring)
- Τηλεπικοινωνίες (Telecommunications)
- Μεταφορά Αγαθών και Φαρμάκων (Delivery of supplies – medical supplies)
- Επιχειρήσεις Διάσωσης (Rescue operations)

Η πρόοδος της τεχνολογίας δίνει τη δυνατότητα χρήσεως των UAVs σε μορφή μικρών ιπτάμενων συσκευών (drones), σταθερής αιώρησης (μπαλονιών - balloons) ή με τη μορφή αερόπλοιων (airships), για εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών [6]. Ειδικότερα, εφόσον τα UAVs τύχουν του σωστού χειρισμού μπορούν να παρέχουν αξιόπιστες λύσεις μειωμένου κόστους για μία πληθώρα πραγματικών σεναρίων διασύνδεσης. Από τη μία πλευρά, τα drones μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναέριοι σταθμοί βάσης (Aerial Base Stations - BS) που μπορούν να παρέχουν αξιόπιστες, μειωμένου κόστους και ad-hoc (δυναμικές) ασύρματες διασυνδέσεις σε καθορισμένες γεωγραφικές περιοχές. Από την άλλη πλευρά, τα drones ως εναέριος εξοπλισμός (Aerial User Equipment - UE), μπορούν να αποτελέσουν κυψελωτά συνδεδεμένα UAVs (Cellular-connected UAVs), σε χειρισμό από σταθμούς βάσης (ως drones επιτήρησης). Το τεράστιο πεδίο των εφαρμογών των drones επιβάλλει μία επανατοποθέτηση των ερευνητικών θεμάτων και προκλήσεων που σχετίζονται με τις ασύρματες επικοινωνίας και τα δίκτυα μετάδοσης δεδομένων. Αυτοί οι τομείς θα πρέπει να εξετασθούν συνεπικουρικά με τα θέματα ελέγχου και πλοήγησης της ιπτάμενης συσκευής.

Ειδικότερα στην περίπτωση όπου τα UAVs χρησιμοποιηθούν ως ιπτάμενοι σταθμοί βάσης, αυτά μπορούν να υποστηρίξουν τη διασύνδεση των υπάρχοντων επίγειων ασύρματων δικτύων (κυψελωτά και δίκτυα ευρείας ζώνης). Σε σύγκριση με τα υπάρχοντα δίκτυα επίγειας κάλυψης, το πλεονέκτημα της χρήσης των UAVs ως ιπτάμενοι κόμβοι είναι η ικανότητα τους να μεταβάλλουν τη θέση και το ύψος

πτήσεως τους, να αποφεύγουν εμπόδια, και να αυξάνουν τη δυνατότητα επίτευξης οπτικής επικοινωνίας με τον αποδέκτη (Line of Sight – LoS). Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζεται μία σύγκριση μεταξύ των επίγειων δικτύων καθώς και των δικτύων που επιτυγχάνονται με τη χρήση των UAVs:

Πίνακας 1: Σύγκριση μεταξύ UAV και επίγειων σταθμών βάσης [6]

<b>UAV Base Stations</b>	<b>Terrestrial Base Stations</b>
• Deployment is naturally three-dimensional.	• Deployment is typically two-dimensional.
• Short-term, frequently changing deployments.	• Mostly long-term, permanent deployments.
• Mostly unrestricted locations.	• Few, selected locations.
• Mobility dimension.	• Fixed and static.

Τα UAVs ως κόμβοι δικτύου απαιτούν τρισδιάστατο καθορισμό θέσης/τοποθέτησης σε σχέση με τα παραδοσιακά επίγεια δίκτυα που είναι δισδιάστατης τοποθέτησης. Η χρήση των UAVs, λόγω των θεμάτων κατανάλωσης τους, είναι βραχυπρόθεσμη σε αντίθεση με τους επίγειους σταθμούς που διαθέτουν εξωτερικές προσβάσεις σε απρόσκοπτη τροφοδότηση ισχύος. Η πτήση των UAVs μπορεί να τα τοποθετήσει και σε μη ασφαλείς περιοχές σε αντίθεση με τους επίγειους σταθμούς βάσης που είναι προστατευμένοι σε κτιριακές υποδομές και πύργους ελέγχου. Η κινητικότητα των UAVs επιβάλλει αλλαγές στον τρόπο και στους ρυθμούς διασύνδεσης που μπορούν να επιτύχουν, ενώ τα επίγεια δίκτυα εμφανίζουν σταθερή συμπεριφορά λειτουργίας.

Πίνακας 2: Σύγκριση μεταξύ UAV και επίγειων δικτύων [6]

<b>UAV Networks</b>	<b>Terrestrial Networks</b>
• Spectrum is scarce.	• Spectrum is scarce.
• Elaborate and stringent energy constraints and models.	• Well-defined energy constraints and models.
• Varying cell association.	• Mainly static association.
• Hover and flight time constraints.	• No timing constraints, BS always there.

Αυτό που γίνεται φανερό από τους πίνακες σύγκρισης είναι ότι τα δίκτυα UAVs διαθέτουν την εγγενή ικανότητα για κινητικότητα (mobility), ευελιξία (flexibility), και προσαρμοστικότητα στο ύψος (adaptive altitude). Οι σταθμοί βάσης που βασίζονται στα UAVs, μπορούν να συμπληρώσουν αποδοτικά τα υπάρχοντα κυψελωτά δίκτυα παρέχοντας επιπρόσθετη χωρητικότητα για μετάδοση δεδομένων (capacity) σε καθορισμένες γεωγραφικές περιοχές παρέχοντας κάλυψη σε αγροτικές περιοχές. Μία άλλη σημαντική εφαρμογή των UAVs αφορά στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), στο οποίο οι συσκευές που μετέχουν συνήθως έχουν μικρά επίπεδα ισχύος για εκπομπή και λήψη και για το λόγο αυτό δεν μπορούν να επικοινωνούν συνεχώς και σε μεγάλες αποστάσεις. Τα UAVs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενδιάμεσοι κόμβοι (relays) για τη βελτίωση των επιπέδων συνδεσιμότητας και κάλυψης σήματος για επίγειες συσκευές καθώς επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε

εφαρμογές παρακολούθησης. Το τελευταίο αποτελεί ένα κομβικό σημείο για τη λειτουργία και διασύνδεση στο IoT. Επίσης, εξαιρετικά σημαντική είναι η χρήση των UAVs για τον σχηματισμό δικτύων σε διασυννοριακά όρια όπου η κάλυψη με ένα πλήρες κυψελωτό δίκτυο είναι δαπανηρή, ενώ η χρήση των UAVs είναι εξαιρετικά αποδοτική και φθηνή λύση (αποφυγή εγκατάστασης πύργων επικοινωνιών).

Από βιομηχανικής πλευράς ένα παράδειγμα που κάνει χρήση της τεχνολογίας των drones για την ασύρματη διασύνδεση είναι το project Google Loon. Στα πλαίσια αυτών των πρακτικών διασύνδεσης, τα UAVs χρησιμοποιούνται για την παροχή διασύνδεσης Internet σε αναπτυσσόμενες χώρες και παρέχουν πλήρη ασύρματη εναέρια διασύνδεση. Επιπρόσθετα, εταιρείες όπως οι Qualcomm και η AT&T σχεδιάζουν να χρησιμοποιήσουν τα UAVs για τις εφαρμογές ασύρματων διασυνδέσεων μεγάλης κλίμακας σε συνδυασμό με τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Εταιρείες όπως η Amazon (Prime Air) και η Google (Project Wing) αποτελούν επίσης ένα πολυ υποσχόμενο παράδειγμα για κυψελωτά διασυνδεόμενα UAVs.

### **1.2.1 Κανονιστικά – Νομικά Πλαίσια για τα UAVs**

Τα κανονιστικά ζητήματα είναι σημαντικοί περιοριστικοί παράγοντες που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας που βασίζονται σε UAVs. Παρά τις πολλά υποσχόμενες εφαρμογές των UAVs σε ασύρματα δίκτυα, υπάρχουν πολλά θέματα προς καθορισμό, που αφορούν το απόρρητο, τη δημόσια ασφάλεια, την ασφάλεια των επικοινωνιών, την αποφυγή σύγκρουσης των ιπταμένων συσκευών καθώς και την προστασία των δεδομένων. Από την άποψη αυτή, οι κανονισμοί που αφορούν τα UAVs αναπτύσσονται συνεχώς για τον έλεγχο των λειτουργιών τους, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορους παράγοντες όπως οι τύποι των UAVs, το φάσμα για τον έλεγχο, την πλοήγηση και τα κανάλια επικοινωνίας, το επιτρεπτό ύψος κίνησης καθώς και την ταχύτητα τους. Γενικά, πέντε βασικά κριτήρια – κατευθύνσεις λαμβάνονται υπόψιν κατά την ανάπτυξη Κανονισμών που αφορούν τη χρήση UAVs [44], [45]:

- Εφαρμογή: αφορά στον προσδιορισμό του πεδίου (λαμβάνοντας υπόψιν τον τύπο, το βάρος και τον ρόλο του ιπτάμενου οχήματος – UAV)
- Λειτουργικοί περιορισμοί: σχετίζονται με περιορισμούς στις τοποθεσίες κίνησης και πτήσεως των UAVs
- Νομικές διαδικασίες: ειδικές νομικές διαδικασίες που απαιτούνται για τη λειτουργία ενός UAV
- Τεχνικές απαιτήσεις: περιλαμβάνουν επικοινωνίες, έλεγχο και μηχανικές δυνατότητες των drones

- Εφαρμογή ηθικών περιορισμών: σχετίζονται με την προστασία των προσωπικών δεδομένων

Οι κανονισμοί που εφαρμόζονται στα UAVs διαφέρουν μεταξύ χωρών και γεωγραφικών περιοχών (π.χ. αστικές ή αγροτικές). Στις Ηνωμένες Πολιτείες οι κανονισμοί για τις λειτουργίες των UAVs εκδίδονται από την ομοσπονδιακή αεροπορική αρχή (FAA) και την εθνική αεροναυτική επιτροπή για τη διοίκηση του διαστήματος (NASA). Η NASA σχεδιάζει να αναπτύξει πλαίσια ελέγχου των UAVs σε συνεργασία με τις άλλες ομοσπονδιακές αρχές που διέπουν τα πλαίσια επικοινωνίας και την ασφάλεια λειτουργίας των υλικών (FCC και FAA). Η FCC μελετά τη χρήση του υπάρχοντος φάσματος καθώς και την ανάθεση του για επέκταση των επικοινωνιακών δυνατοτήτων σε UAVs για την ανάπτυξη δικτύων ad-hoc.

Τα κανονιστικά πλαίσια (legislation) για τις παραμέτρους πτήσεως και εμβέλειας, διαφέρουν κατά γεωγραφικές περιοχές, χωρίς να υπάρχει ένα κοινό και διεθνώς εναρμονισμένο πλαίσιο. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ανάλογα κανονιστικά πλαίσια για διάφορες παραμέτρους πτήσεως σε σχέση με την γεωγραφική περιοχή:

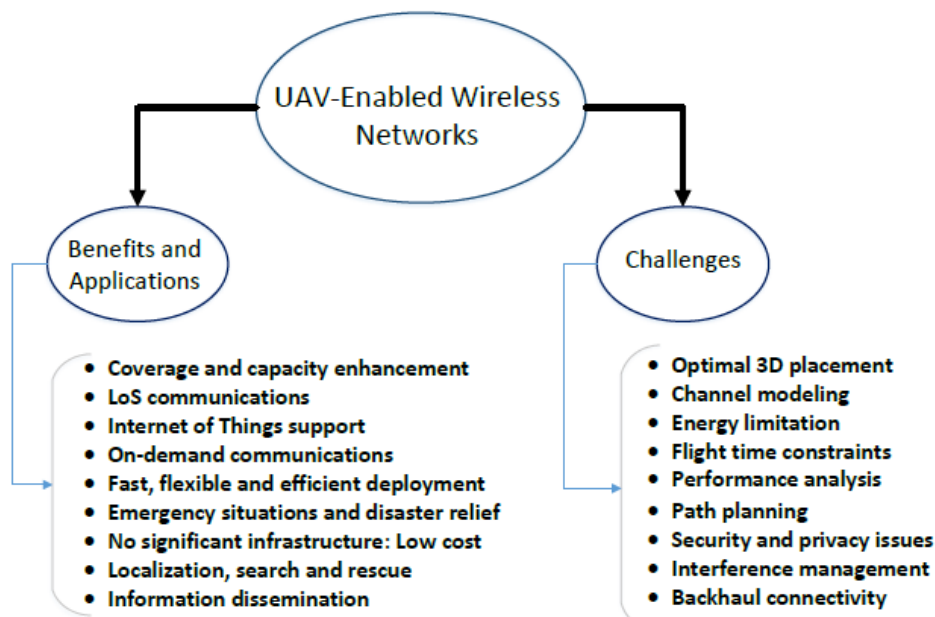
Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση των UAVs βάσει ιδιαίτερων χαρακτηριστικών πτήσης ανά γεωγραφική περιοχή [6]

Country	Maximum altitude	Minimum distance to people	Minimum distance to airport
US	122 m	N/A	8 km
Australia	120 m	30 m	5.5 km
South Africa	46 m	50 m	10 km
UK	122 m	50 m	N/A
Chile	130 m	36 m	N/A

### 1.3 Ανοικτά Θέματα για Έρευνα στην επικοινωνία με χρήση UAVs

Στο παρακάτω τμήμα παρουσιάζεται ένα σύνολο από τις κατευθύνσεις της έρευνας για την ανάπτυξη και χρήση των UAVs ως ιπτάμενες πλατφόρμες με ικανότητα διασύνδεσης με τα δίκτυα κορμού για τη μετάδοση δεδομένων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι προκλήσεις (challenges) καθώς και το επίπεδο της τεχνολογίας και των ερευνών για την ικανοποίησή τους.

Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται μία συνολική εικόνα των εφαρμογών και των προκλήσεων για την υποστήριξη ασύρματων δικτύων με χρήση UAVs:



Σχήμα 2: Εφαρμογές και σχετιζόμενες τεχνολογικές προκλήσεις για τη χρήση των UAVs ως κόμβους για την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων [6]

### 1.3.1 Μοντελοποίηση του καναλιού Αέρος – Εδάφους

Η ασύρματη διάδοση των σημάτων επηρεάζεται από το μέσο μεταξύ του πομπού (Transmitter) και του δέκτη (Receiver). Τα χαρακτηριστικά του καναλιού μετάδοσης Αέρος – Εδάφους (Air to Ground Channel – A2G) διαφοροποιούνται σημαντικά από τα κλασικά κανάλια επίγειας μετάδοσης, τα οποία με τη σειρά τους καθορίζουν την απόδοση των συνδέσεων των UAVs με αυτά, ως προς τη χωρητικότητα (capacity) και την κάλυψη [7] -[10]. Επίσης, σε σύγκριση με τα κανάλια επικοινωνίας αέρος – αέρος τα οποία βιώνουν διαρκείς συνθήκες LoS (Line of Sight), τα κανάλια A2G είναι πιο ευαίσθητα σε συνθήκες μπλοκαρίσματος (blockage). Σαφώς, ο βέλτιστος σχεδιασμός και ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας που βασίζονται σε drone, απαιτούν τη χρήση ενός ακριβούς μοντέλου καναλιού A2G. Ενώ η τεχνική ανίχνευσης ακτίνων είναι μια λογική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση των καναλιών, η μέθοδος δεν διαθέτει ακρίβεια, ιδίως σε λειτουργίες χαμηλής συχνότητας [11]. Ένα ακριβές μοντέλο καναλιού A2G είναι σημαντικό, ειδικά όταν τα UAVs χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως βελτίωση κάλυψης (coverage enhancement), κυψελωτές επικοινωνίες διασύνδεσης UAVs – UEs και επικοινωνίες τύπου IoT.

Τα χαρακτηριστικά του καναλιού A2G διαφέρουν σημαντικά από τα επίγεια κανάλια επικοινωνίας [12]. Συγκεκριμένα, κάθε κίνηση ή δόνηση από τα UAV μπορεί να επηρεάσει τα χαρακτηριστικά του καναλιού. Επιπλέον, το κανάλι A2G εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ύψος πτήσης και τον τύπο του UAV, τη γωνία ανύψωσης και τον τύπο του περιβάλλοντος διάδοσης. Επομένως, η εύρεση ενός γενικού μοντέλου καναλιού για επικοινωνίες UAV-to-ground, χρειάζεται ολοκληρωμένες



προσομοιώσεις και μετρήσεις σε διάφορα περιβάλλοντα. Επιπλέον, τα αποτελέσματα επίδρασης του υψομέτρου πτήσης ενός UAV, οι κινήσεις των προσαρτημένων κεραιών και οι σκιάσεις που προκαλούνται από την άτρακτο του UAV, πρέπει να ληφθούν υπόψιν στη μοντελοποίηση του καναλιού. Σαφώς, η συμπερίληψη τέτοιων παραγόντων αποτελεί μία σημαντική πρόκληση για την μοντελοποίηση ενός A2G καναλιού.

### **1.3.2 Βέλτιστη ένταξη των UAVs ως ιπτάμενοι σταθμοί βάσης**

Η τρισδιάστατη ανάπτυξη των UAVs στο χώρο είναι μία από τις βασικές προκλήσεις στις επικοινωνίες που βασίζονται σε σταθμούς βάσεων απαρτιζόμενους από UAVs. Στην πραγματικότητα, όπως αναφέρεται στους Πίνακες 2 και 3, το ρυθμιζόμενο ύψος των UAVs και η πιθανή κινητικότητα τους, παρέχουν επιπλέον βαθμούς ελευθερίας για αποτελεσματική ανάπτυξη. Ως αποτέλεσμα, η βέλτιστη ανάπτυξη των UAVs στο χώρο αποτελεί σημαντικό θέμα σχεδιασμού [13] - [23], κατά τη χρήση των UAVs για την κάλυψη και τη μεγιστοποίηση χωρητικότητας των διαύλων, τη δημόσια ασφάλεια, την ένταξη τους στις έξυπνες πόλεις (smart cities), τη διαδικασία προσωρινής αποθήκευσης της διαδικτυακής πληροφορίας για μετάδοση (caching) και τις εφαρμογές του IoT. Η βέλτιστη 3D τοποθέτηση των UAVs είναι μια δύσκολη εργασία, καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως, το περιβάλλον ανάπτυξης (π.χ. γεωγραφική περιοχή), τις τοποθεσίες των χρηστών εδάφους και τα χαρακτηριστικά του UAV-to-ground καναλιού μετάδοσης, χαρακτηριστικά στα οποία επίσης επιδρά σημαντικά το υψόμετρο πτήσης ενός UAV. Επιπλέον, η ταυτόχρονη ανάπτυξη πολλαπλών UAVs γίνεται πιο δύσκολη, λόγω του αντίκτυπου των παρεμβολών μεταξύ τους, κατά τις παράλληλες μεταδόσεις, επηρεάζοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος. Στην πραγματικότητα, η ανάπτυξη των UAVs στο χώρο, είναι πολύ πιο δύσκολο ζήτημα από το αντίστοιχο της τοποθέτησης των σταθμών εδάφους για ένα δίκτυο, που αποτελεί ένα κλασικό ζήτημα προς επίλυση στο σχεδιασμό κυψελοειδούς δικτύου. Σε αντίθεση με τους επίγειους σταθμούς βάσης, τα UAVs πρέπει να αναπτυχθούν στο συνεχή τρισδιάστατο χώρο, λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση του υψομέτρου πτήσης στα χαρακτηριστικά του καναλιού A2G. Επιπλέον, για την ανάπτυξη των UAVs θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν, ο χρόνος πτήσης και οι ενεργειακοί περιορισμοί τους. Τα τελευταία αποτελούν επίσης δύσκολα χαρακτηριστικά που πρέπει να συνυπολογισθούν για τη συνεχή ραδιοκάλυψη μεταξύ περιοχών.

### **1.3.3 Βελτιστοποίηση Τροχιάς Πτήσης των UAVs**

Ο βέλτιστος σχεδιασμός των διαδρομών πτήσης (τροχιές πτήσης) για τα UAVs είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση στα συστήματα επικοινωνίας που βασίζονται σε

ιπτάμενους κόμβους UAVs. Συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση της τροχιάς των UAVs είναι σημαντική κατά τη χρήση τους για την παροχή υπηρεσιών δικτυακής διασύνδεσης για έξυπνες πόλεις, για drone-UE και για σενάρια προσωρινής αποθήκευσης (caching). Η τροχιά ενός UAV επηρεάζεται σημαντικά από διαφορετικούς παράγοντες όπως, ο χρόνος πτήσης, οι περιορισμοί ενέργειας, οι απαιτήσεις των χρηστών εδάφους και η αποφυγή σύγκρουσης τόσο μεταξύ τους όσο και των εκπομπών των ραδιοσημάτων τους. Φυσικά, η βελτιστοποίηση της διαδρομής πτήσης των UAVs είναι πρόκληση, καθώς απαιτεί πολλούς φυσικούς περιορισμούς και παραμέτρους προς ρύθμιση. Για παράδειγμα, κατά την εύρεση των τροχιών των UAVs για βελτιστοποίηση απόδοσης, πρέπει να εξεταστούν διάφοροι βασικοί παράγοντες όπως, η διακύμανση του επιπέδου ισχύος του καναλιού λόγω της κινητικότητας, η δυναμική πτήσης του UAV, η κατανάλωση ενέργειας των UAVs καθώς και οι γενικότεροι περιορισμοί πτήσης. Επιπλέον, η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης μέσω καθορισμού συνεχών τροχιών για τα UAVs είναι γνωστό ότι είναι αναλυτικά εξαιρετικά δύσκολο να λυθεί, καθώς περιλαμβάνει την εύρεση ενός άπειρου αριθμού μεταβλητών βελτιστοποίησης (δηλ. τοποθέτησης των UAVs) [24]. Επιπρόσθετα, ο καθορισμός τροχιάς βελτιστοποίησης με χρήση UAVs σε ασύρματα δίκτυα, απαιτεί καταγραφή και σύζευξη μεταξύ της κινητικότητας τους και διαφόρων μετρήσεων QoS (Quality of Service) για να διασφαλιστεί η ασύρματη επικοινωνία.

#### **1.3.4 Ανάλυση της απόδοσης των Δικτύων από UAVs**

Μία θεμελιώδης ανάλυση της απόδοσης για ασύρματα δίκτυα που παρέχονται από UAVs απαιτεί την αξιολόγηση της επίδρασης κάθε παραμέτρου σχεδίασης στο σύνολο του συστήματος [25], [26]. Συγκεκριμένα, η απόδοση των ασύρματων δικτύων από UAVs πρέπει να αναλυθεί με χρήση μετρήσεων ποιότητας (QoS) όπως, η πιθανότητα κάλυψης μίας περιοχής, η απόδοση, η καθυστέρηση μετάδοσης ή η αξιοπιστία (π.χ., για κινητά συνδεδεμένα drone). Οι αξιολογήσεις αυτών των μετρικών επίδοσης μπορούν επίσης να αποκαλύψουν τους εγγενείς συμβιβασμούς που ένας σχεδιαστής θα πρέπει να κάνει κατά το σχεδιασμό συστημάτων που βασίζονται σε UAVs.

Σαφώς, κατά το σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνίας που βασίζονται σε UAVs, πρέπει να γίνει μια θεμελιώδης ανάλυση απόδοσης προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού ως προς τις συνολικές επιδόσεις του συστήματος. Φυσικά, για να υπάρξει μία θεμελιώδης ανάλυση της απόδοσης ενός ασύρματου δικτύου από UAVs, αυτή είναι σαφές ότι θα διαφέρει ουσιαστικά από τα συμβατικά επίγεια δίκτυα, λόγω της κίνησης των UAVs σε διαφορετικά ύψη πτήσεως και της πιθανής κινητικότητας τους, καθώς και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των καναλιών μετάδοσης. Οι αυστηροί περιορισμοί ενέργειας πτήσης των UAV εισάγουν επίσης μοναδικές προκλήσεις. Η περιορισμένη διαθέσιμη ενσωματωμένη ενέργεια των UAVs από τους συσσωρευτές τους, που με τη σειρά της οδηγεί στη μικρή διάρκεια

πτήσης, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση της χρήσης των ασύρματων επικοινωνιών μέσω δικτύων UAVs. Πράγματι, η ανάλυση της απόδοσης ενός σύνθετου ετερογενούς εναέριου - επίγειου ασύρματου δικτύου που αποτελείται από συνδυασμό σταθμών βάσης στο έδαφος και στον αέρα, είναι μια πρόκληση. Στην πραγματικότητα, υπάρχει ανάγκη για μια ολοκληρωμένη ανάλυση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων με δυνατότητα να συμπεριλάβει διάφορες πτυχές των UAVs, συμπεριλαμβανομένης της κινητικότητας τους και των ειδικών χαρακτηριστικών των A2G καναλιών σε συνύπαρξη με τα επίγεια δίκτυα. Επιπλέον, ο χαρακτηρισμός απόδοσης των κυψελοειδών δικτύων από drones με ιπτάμενους χρήστες και σταθμούς βάσης, έχει τη δική του πολυπλοκότητα λόγω της διαρκούς κινητικότητας και της εξαιρετικά δυναμικής φύσης αυτού του τύπου δικτύου.

### 1.3.5 Σχεδιασμός Κυψελωτών Δικτύων και η συνεισφορά των UAVs

Ο σχεδιασμός δικτύου περιλαμβάνει την αντιμετώπιση ενός αριθμού βασικών προβλημάτων όπως η θέση των σταθμών βάσης, η εκτίμηση της κινητικότητας των συνδεδεμένων στο δίκτυο, η κατανομή συχνοτήτων μεταξύ των κυψελών για την αποφυγή παρεμβολών, η συσχέτιση και διασύνδεση των γειτονικών σταθμών βάσης, η ανασυγκρότηση και διαχείριση των κυψελών, η σηματοδότηση και ο περιορισμός παρεμβολών. Ο σχεδιασμός ενός δικτύου που αποτελείται από UAVs είναι ιδιαίτερα σημαντικός, όταν τα UAVs χρησιμοποιούνται για την κάλυψη και την ενίσχυση της χωρητικότητας στους κόμβους του δικτύου. Σε ένα κυψελοειδές δίκτυο από UAVs, ο σχεδιασμός του δικτύου αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση λόγω των διαφόρων ιδιοτήτων των UAVs, συμπεριλαμβανομένων της κινητικότητας, των παρεμβολών LoS, των περιορισμών ενέργειας και της συνδεσιμότητας backhaul. Για παράδειγμα, κοινός σχεδιασμός ραδιοκάλυψης και backhaul απαιτείται κατά την ανάπτυξη και το σχεδιασμό ενός δικτύου από UAVs [27]. Επιπλέον, ο προγραμματισμός της πτήσης των drone-UEs απαιτεί νέες εκτιμήσεις για το δίκτυο. Από την μία πλευρά, η παρεμβολή τύπου LoS που προκύπτει από ένα πιθανά μεγάλο αριθμό drone-UEs στο δίκτυο, σε ανερχόμενη ζεύξη επηρεάζει σημαντικά τη σχεδίαση ενός τέτοιου δικτύου. Από την άλλη πλευρά, οι σταθμοί βάσης εδάφους πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με κατάλληλους τύπους κεραιών (λαμβάνοντας υπόψιν τα διαγράμματα ακτινοβολίας και την κλίση των λοβών της κεραίας), έτσι ώστε να εξυπηρετούν τα συνδεδεμένα drone UEs στο downlink. Μια άλλη διαφορά μεταξύ του σχεδιασμού από τα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα σε σχέση με τα δίκτυα από UAVs, αφορά γενικά τη σηματοδότηση που απαιτείται για τη διαχείριση των κόμβων του δικτύου. Σε αντίθεση με τα στατικά επίγεια δίκτυα, στην περίπτωση ασύρματων δικτύων από UAVs, υπάρχει ανάγκη για δυναμική σηματοδότηση, η οποία θα παρακολουθεί συνεχώς τη θέση και τον αριθμό των UAVs που είναι ενταγμένα στο δίκτυο. Τέτοιου τύπου δυναμική σηματοδότηση μπορεί επίσης να απαιτεί την καταχώρηση των διάφορων UAVs, ως χρήστες ή σταθμούς βάσης στο κυψελοειδές σύστημα. Σαφώς, ο χειρισμός τέτοιων

σηματοδοτήσεων πρέπει γενικά να ληφθεί υπόψιν στον προγραμματισμό του δικτύου κινητής τηλεφωνίας που διασυνδέεται με τα UAVs.

Η συνδεσιμότητα backhaul για τα UAVs, είναι μία άλλη βασική πρόκληση στο σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνίας με χρήση κόμβων UAVs. Λόγω της ολοκληρωμένης φύσης των σταθμών βάσης, θα πρέπει να υποστηριχθούν μηχανισμοί ασύρματης σύνδεσης για τη σύνδεση τους στο κεντρικό δίκτυο. Το Wi-Fi και οι δορυφορικές τεχνολογίες, είναι πολλά υποσχόμενες λύσεις για την υποστήριξη μίας τέτοιας ασύρματης ανασυγκρότησης [28]. Οι δορυφορικές συνδέσεις μπορούν να προσφέρουν ευρύτερη κάλυψη σε σύγκριση με ένα τυπικό Wi-Fi δίκτυο. Ωστόσο, οι συνδέσεις Wi-Fi έχουν τα πλεονεκτήματα του χαμηλότερου κόστους και του χαμηλότερου χρόνου διασύνδεσης, σε σύγκριση με μία δορυφορική διασύνδεση. Άλλες πολλά υποσχόμενες λύσεις αφορούν στις τεχνολογίες μικροκυμάτων και οπτικών επικοινωνιών (FSO) για διασύνδεση με σταθμούς εδάφους [29] – [32]. Οι εναέριοι σταθμοί βάσης μπορούν να προσαρμόσουν το ύψος τους, να αποφύγουν πιθανά εμπόδια, και να δημιουργήσουν συνδέσεις επικοινωνίας τύπου LoS με τους σταθμούς εδάφους. Αυτή η δυνατότητα για επικοινωνία LoS, αποτελεί βασική απαίτηση για μικροκυματικές επικοινωνίες (FSO) που μπορούν να παρέχουν υψηλή χωρητικότητα για ασύρματες υπηρεσίες backhauling. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ασύρματο backhauling μέσω UAVs, εξακολουθεί να είναι ένα δύσκολο πρόβλημα της επικοινωνίας των UAVs, και για το λόγο αυτό περαιτέρω μελέτες πρέπει να γίνουν ώστε να βρεθεί μια αποτελεσματική λύση για την ανασυγκρότηση ενός τέτοιου δικτύου.

### **1.3.6 Διαχείριση Πόρων και Επιδόσεις Ισχύος των καναλιών**

Η διαχείριση των πόρων και οι επιδόσεις ισχύος απαιτούν σημαντική προσοχή κατά τη λειτουργία ασύρματων δικτύων από UAVs, στα βασικά σενάρια διασύνδεσης όπως το IoT, η δημόσια ασφάλεια και τα κινητά ασύρματα δίκτυα. Ενώ η διαχείριση πόρων είναι μια μεγάλη πρόκληση για τα κυψελοειδή δίκτυα [33] – [35], τα δίκτυα από UAVs παρουσιάζουν μοναδικές προκλήσεις λόγω:

- Αλληλεπίδρασης μεταξύ του χρόνου πτήσης, της διαθέσιμης ισχύος κατά την πτήση, του σχεδίου πτήσης των UAVs και της φασματικής αποδοτικότητας των καναλιών των UAVs
- Αυστηρών περιορισμών ισχύος κατά την πτήση των UAVs,
- Παρεμβολών LoS που προέρχονται από τις συνδέσεις μέσω των καναλιών AzG και AzA και
- Κινητικότητας των UAVs.

Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη βελτιστοποίησης και διαχείρισης της κατανομής των πόρων σε ασύρματα δίκτυα, που είναι υποβοηθούμενα από UAVs που λειτουργούν πάνω σε ετερογενείς ζώνες φάσματος και συνυπάρχουν με τα δίκτυα εδάφους. Στην πραγματικότητα, η διαχείριση πόρων και η κατανομή φάσματος [36] πρέπει να χρησιμοποιηθούν σωστά μαζί με την εγγενή δυναμική των ασύρματων δικτύων που είναι υποκείμενα σε παρεμβολές που ποικίλλουν στο χρόνο και στα πρότυπα κυκλοφορίας, λόγω της κινητικότητας και των περιορισμών ισχύος των UAVs. Φυσικά, τα ιπτάμενα οχήματα που διαθέτουν περιορισμένη ισχύ θα πρέπει να την διαθέσουν τόσο για μετάδοση, κίνηση και έλεγχο του οχήματος, όσο και επεξεργασία των δεδομένων και τη μεταφορά των απαιτούμενων τους φορτίων [37]. Κατά συνέπεια, η διάρκεια πτήσης των drones είναι συνήθως μικρή και ανεπαρκής για την παροχή κάλυψης ενός μακροπρόθεσμου, συνεχούς ασύρματου δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας του UAV εξαρτάται επίσης από το ρόλο/αποστολή του UAV, τις καιρικές συνθήκες και τη διαδρομή πλοήγησης. Τέτοιοι ενεργειακοί περιορισμοί, με τη σειρά τους, οδηγούν σε περιορισμένη διάρκεια πτήσης και αιώρησης. Ως εκ τούτου, όταν σχεδιάζονται συστήματα επικοινωνίας με UAVs, οι περιορισμοί ενέργειας και πτήσης τους πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη. Συνεπώς, η ενεργειακή απόδοση των UAVs απαιτεί προσεκτική εξέταση καθώς επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της επικοινωνίας στα UAV συστήματα. Στην πραγματικότητα, η περιορισμένη ενέργεια επί του σκάφους των UAVs αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη και την κινητικότητα των UAVs σε διάφορες εφαρμογές.

### **1.3.7 Χρήστες drone – UEs σε ασύρματα δίκτυα από UAVs**

Πέρα από τη χρήση των drones ως εναέριοι σταθμοί βάσης, αυτά μπορούν επίσης να λειτουργούν ως χρήστες που κινούνται καθ' ύψος, ως μέρος των κυψελοειδών δικτύων. Συγκεκριμένα, τα drone-UEs έχουν καθοριστικό ρόλο σε εφαρμογές παράδοσης από αέρος, όπως το Amazon Prime Air και σε εφαρμογές παρακολούθησης. Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των drone-UEs είναι η εικονική πραγματικότητα (VR) [38] – [40] όπου τα αεροσκάφη συλλαμβάνουν επιθυμητές πληροφορίες σχετικά με μια συγκεκριμένη περιοχή, μεταδίδοντας αυτήν την πληροφορία σε απομακρυσμένους VR χρήστες. Ωστόσο, τα τρέχοντα κυψελοειδή δίκτυα είναι κυρίως σχεδιασμένα για την υποστήριξη επίγειων συσκευών, των οποίων τα χαρακτηριστικά διαφέρουν σημαντικά από το drone-UEs. Φυσικά, κλασικές ασύρματες προκλήσεις όπως η ανάλυση απόδοσης, η διαχείριση των παρεμβολών, η διαχείριση της κινητικότητας, της διαθέσιμης ισχύος και της απόδοσης του φάσματος, αναμένεται να επιδεινωθούν περαιτέρω από τη χρήση των drone-UEs. Αυτό οφείλεται σε παράγοντες όπως, το σχετικά μεγάλο ύψος πτήσεως των drone-UEs, τους περιορισμούς ενέργειας, της δυναμικότητας των ρόλων τους, τη δυνητικά τεράστια ανάπτυξη κλίμακας στο δίκτυο από μαζική συμμετοχή και διασύνδεσή τους και τη σχεδόν ανεξέλεγκτη κινητικότητά τους. Συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση των drone-UEs

σε κυψελοειδή δίκτυα εισάγει μοναδικές προκλήσεις όπως η διαχείριση παρεμβολών uplink στη μαζική ανάπτυξη των drone-UEs και η μοντελοποίηση του καναλιού εδάφους - αέρα, για επικοινωνία και σχεδίαση BS-to-drone με κατάλληλες κεραίες BS που μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλα ύψη (δηλαδή, μεγάλη γωνία ανύψωσης). Επιπλέον, απαιτούνται drone-UEs τα οποία είναι εξαιρετικά αξιόπιστα για επικοινωνίες με μικρό χρόνο καθυστέρησης (URLLC) έτσι ώστε να ελέγχουν γρήγορα τις λειτουργίες τους, και να διασφαλίζουν την ασφαλή και αποτελεσματική πλοήγηση τους. Σαφώς, μια τέτοια ανάγκη για URLLC επίσης οδηγεί σε νέες προκλήσεις ασύρματης δικτύωσης.

Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση των μηχανισμών διαπομπής (handover) κατά την ανάπτυξη ενός εναέριου δικτύου που μετέχουν drone-UEs και drone-BS. Η διαπομπή είναι μια βασική διαδικασία στα ασύρματα δίκτυα, η οποία αλλάζει τη συσχέτιση των χρηστών για να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα τους στα πλαίσια της κινητής τηλεφωνίας. Εν τω μεταξύ, η διαχείριση της διαπομπής οδηγεί σε ειδική σηματοδότηση στα ασύρματα δίκτυα [41]. Αυτή η σηματοδότηση διαπομπής εξαρτάται από το μέγεθος του δικτύου, την κινητικότητα του δικτύου (κινήσεις χρηστών και BS), τις τοποθεσίες των χρηστών και των σταθμών βάσης και τις παραμέτρους που έχουν ορισθεί από το δίκτυο για την εκκίνηση των μηχανισμών διαπομπής [41] - [43]. Σε συστήματα επικοινωνίας που βασίζονται σε UAVs, η διαχείριση της διαπομπής πρέπει να γίνει προκειμένου να μειωθεί η απαιτούμενη σηματοδότηση και επίσης για να παρέχει σωστή συνδεσιμότητα όταν τα UAVs μεταβαίνουν σε συνθήκες που δεν επιτρέπουν μεταδόσεις τύπου LoS (BVLoS). Η διαχείριση της διαπομπής στις επικοινωνίες των UAVs είναι σημαντικά πιο δύσκολο πρόβλημα από τα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα. Αυτό οφείλεται στον εξαιρετικά δυναμικό χαρακτήρα των drone-UEs και drone-BS. Ειδικότερα, θα πρέπει να μελετηθούν αποτελεσματικοί μηχανισμοί διαπομπής, οι οποίοι να είναι ικανοί να χειριστούν τρισδιάστατες κινήσεις και για τους δύο τύπους drone δηλ., των drone-UEs και των drone-BS. Οι νέοι αυτοί μηχανισμοί θα διασφαλίζουν ταυτόχρονα την επίτευξη επικοινωνίας χαμηλής καθυστέρησης (low latency) και καλύτερο έλεγχο της εξυπηρέτησης των drone-UEs. Αυτός ο σχεδιασμός διαπομπής για ιπτάμενες συσκευές πρέπει να γίνει από κοινού με τους υπάρχοντες μηχανισμούς διαπομπής για χρήστες κινητής τηλεφωνίας.

Επιπλέον, για το drone-UEs, όλες οι προαναφερθείσες προκλήσεις πρέπει επίσης να λάβουν υπόψιν, το γεγονός ότι οι σταθμοί από αέρος θα πρέπει να έχουν κεκλιμένες κεραίες για τη μεγιστοποίηση της κάλυψης των χρηστών εδάφους. Ως αποτέλεσμα, είναι επιτακτική η ανάγκη να κατανοηθεί η επίδραση της κλίσης της κεραίας στην απόδοση των UAVs-UEs, ενώ θα πρέπει να μελετηθεί επίσης πώς μπορούν να ξεπεραστούν περιορισμοί μέσω προσαρμοστικής μορφής δέσμης (adaptive beam-forming) για το σχεδιασμό των UAVs-UEs που στοχεύουν σε κάλυψη αναγκών εδάφους.

Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιασθούν οι προσφερόμενες τεχνολογίες για την κάλυψη των αναγκών των UAVs, με στόχο τη δημιουργία δικτυακών κόμβων για την κάλυψη των αναγκών μετάδοσης δεδομένων.

#### **1.4 Τεχνολογίες για την κάλυψη των ανοικτών θεμάτων**

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν τα ειδικότερα χαρακτηριστικά που αφορούν τη χρήση των UAVs ως ιπτάμενοι κόμβοι για την κάλυψη επικοινωνίας και μετάδοσης δεδομένων. Τα τεχνικά θέματα είναι αρκετά και σημαντικά. Η έρευνα με τις άλλες προσφερόμενες τεχνολογίες παρέχουν λύσεις οι οποίες κατά ένα σημαντικό μέρος μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και στα συγκεκριμένα θέματα. Οι παράγραφοι που ακολουθούν παρουσιάζουν αναλυτικά τις προσφερόμενες λύσεις καθώς και τις τρέχουσες τάσεις της έρευνας στα θέματα που παρουσιάστηκαν

##### **1.4.1 Μοντελοποίηση του καναλιού Αέρος - Εδάφους**

Ένα από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα απώλειας διαδρομής (path loss) για το κανάλια A2G σε ιπτάμενες πλατφόρμες που κινούνται σε χαμηλά υψόμετρα παρουσιάζεται στην αναφορά [7] με σημαντικές λεπτομέρειες. Όπως φαίνεται στη συγκεκριμένη ερευνητική εργασία, η απώλεια διαδρομής μεταξύ ενός UAV και μιας επίγειας συσκευής, εξαρτάται από τις τοποθεσίες των UAVs και των επίγειων συσκευών, καθώς και τη μορφολογία του περιβάλλοντος διάδοσης (π.χ. αγροτικό, προαστιακό, αστικό, αστικό με υψηλά κτίρια, κ.λπ.). Σε αυτήν την περίπτωση, ανάλογα με το περιβάλλον, η επικοινωνία με χρήση του καναλιού A2G μπορεί να είναι είτε LoS ή NLoS (Non-LoS). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, χωρίς πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις ακριβείς τοποθεσίες, τα ύψη και τον αριθμό των εμποδίων, πρέπει να εξεταστεί η τυχαιότητα που σχετίζεται με τις καταστάσεις LoS και NLoS. Ως αποτέλεσμα, μεγάλο μέρος της υπάρχουσας βιβλιογραφίας στην επικοινωνία των UAVs (π.χ. [14], [29], [20], [46], [47], [48], [21], [49], [50], [51], [52]) υιοθετούν το μοντέλο πιθανότητας απώλειας διαδρομής (probability path loss model) που παρουσιάζεται στις εργασίες [15] και [7]. Όπως αναφέρεται και στις συγκεκριμένες εργασίες, οι συνθήκες LoS και non-LoS (NLoS) μπορούν να εξεταστούν ξεχωριστά, με διαφορετικές πιθανότητες εμφάνισης. Η πιθανότητα εμφάνισης των συνθηκών είναι συνάρτηση του περιβάλλοντος, της πυκνότητας και του ύψους των κτιρίων καθώς και της γωνίας ανύψωσης μεταξύ του UAV και της επίγειας συσκευής. Το κοινό πιθανοτικό μοντέλο LoS βασίζεται στις γενικές γεωμετρικές στατιστικές διαφόρων περιβάλλοντων όπως αυτά έχουν μελετηθεί και παρέχονται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU-R) [53]. Ειδικότερα, για διάφορους τύπους περιβάλλοντος, η ITU-R παρέχει ορισμένες παραμέτρους που εξαρτώνται από το περιβάλλον, την πυκνότητα, τον αριθμό και το

ύψος των κτιρίων (εμπόδια). Για παράδειγμα, σύμφωνα με τη [53], τα ύψη των κτιρίων μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας μια κατανομή Rayleigh ως:

$$f(h_B) = \frac{h_B}{\gamma^2} \exp\left(-\frac{h_B}{\gamma^2}\right) \quad (\text{Εξ. 1.1})$$

όπου το  $h_B$  είναι το ύψος των κτιρίων (m) και αποτελεί μια παράμετρο εξαρτώμενη από το περιβάλλον [15]. Προφανώς, λόγω της τυχαιότητας (αβεβαιότητας) που σχετίζεται με το ύψος των κτιρίων, λαμβάνοντας υπόψιν και την οπτική γωνία που προκύπτει από την τροχιά κίνησης του UAV, πρέπει να θεωρηθεί μία κατάσταση LoS μέσω ενός μοντέλου πιθανοτήτων για το σχεδιασμό της επικοινωνίας που βασίζεται σε ένα UAV. Επομένως, χρησιμοποιώντας τις στατιστικές παραμέτρους που παρέχονται από την ITU-R, άλλες ερευνητικές εργασίες όπως οι [15] και [7] εξάγουν μία μαθηματική έκφραση για την πιθανότητα LoS, η οποία δίνεται και στις [14], [7], [20], [46], [21] [52]:

$$P_{\text{LoS}} = \frac{1}{1 + C \exp[-B(\theta - C)]} \quad (\text{Εξ. 1.2})$$

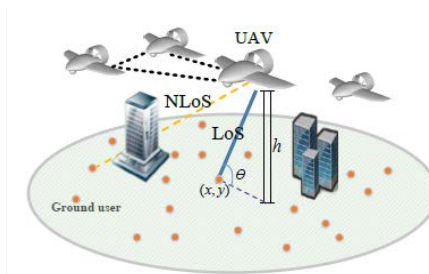
όπου οι ποσότητες  $C$  και  $B$  είναι σταθερές τιμές που εξαρτώνται από το περιβάλλον (αγροτικό, αστικό, πυκνά αστικό ή άλλο) και  $\theta$  είναι η γωνία ανύψωσης σε μοίρες. Όπου:

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \sin^{-1}\left(\frac{h}{d}\right) \quad (\text{Εξ. 1.3})$$

με το  $h$  να είναι το υψόμετρο πτήσεως του UAV, και  $d$  η απόσταση μεταξύ του UAV από έναν δεδομένο χρήστη στο έδαφος. Σε αυτήν την περίπτωση, η πιθανότητα NLoS δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{NLoS}} = 1 - P_{\text{LoS}} \quad (\text{Εξ. 1.4})$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο πιθανότητας απώλειας διαδρομής στην εργασία (2) για τα κανάλια A2G προτείνεται επίσης από το 3GPP [12].



Σχήμα 3: Μοντέλο πιθανότητας απωλειών διαδρομής [6]

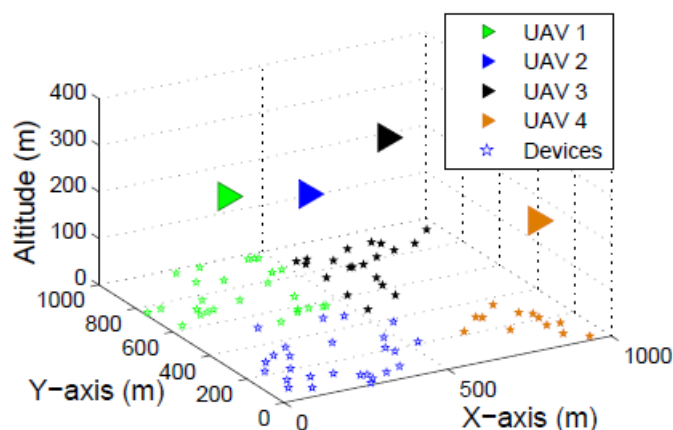
Η εξίσωση για το PLoS δίνει την πιθανότητα σύνδεσης σε κατάσταση LoS μεταξύ του εναέριου σταθμού βάσης και των χρηστών εδάφους. Η πιθανότητα αυτή είναι αυξανόμενη συναρτήσει της γωνίας ανύψωσης. Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, αυξάνοντας τη γωνία ανύψωσης μεταξύ του δέκτη και του πομπού, το φαινόμενο



αποκλεισμού (blockage) μειώνεται και η σύνδεση επικοινωνίας πηγαίνει προς κατάσταση LoS. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μικρής κλίμακας εξασθένιση (fading) στο κανάλι A2G μπορεί να μοντελοποιηθεί από το Rician fading μοντέλο [54]. Ο συντελεστής Rician K που αντιπροσωπεύει τη δύναμη του στοιχείου LoS είναι συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης και του υψόμετρου πτήσης του UAV.

#### 1.4.2 Η βέλτιστη τοποθέτηση των UAVs ως ιπτάμενοι σταθμοί βάσης

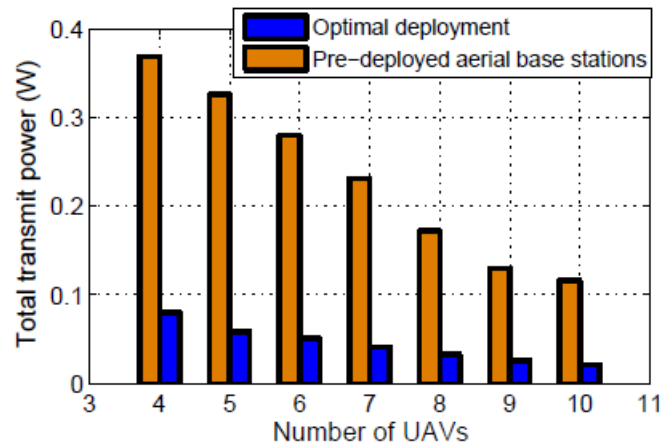
Στην ερευνητική εργασία [13], προτείνεται ένα πλαίσιο για τη δυναμική ανάπτυξη με βάση την κινητικότητα των UAVs για την επίτευξη αξιόπιστων και ενεργειακά αποδοτικών επικοινωνιών για το IoT. Στο Σχήμα 4, παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα για τη βέλτιστη τοποθέτηση σε τρισδιάστατη τοποθέτηση (3D) των UAVs. Σε αυτήν την περίπτωση, αναπτύσσονται τέσσερα UAVs για τη συλλογή δεδομένων (στον ανερχόμενο κόμβο), από συσκευές τύπου IoT που κατανέμονται ομοιόμορφα σε μια γεωγραφική περιοχή μεγέθους 1 km. Χρησιμοποιώντας εργαλεία από τη θεωρία βελτιστοποίησης για προβλήματα εγκατάστασης, εντοπίστηκαν οι βέλτιστες θέσεις 3D των UAVs, καθώς και των συσχετίσεων επίγειων συσκευών - UAVs, έτσι ώστε η συνολική ισχύς μετάδοσης του uplink των συσκευών να ελαχιστοποιείται, ενώ παράλληλα να εξασφαλίζονται αξιόπιστες επικοινωνίες. Ως αποτέλεσμα, οι επίγειες συσκευές μπορούν να στείλουν τα δεδομένα τους στα συσχετισμένα UAVs με χρήση ελάχιστης συνολικής ισχύος μετάδοσης. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι τα UAVs μπορεί να αναπτυχθούν με βέλτιστο τρόπο ώστε να επιτρέπουν αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία σε δίκτυα IoT.



Σχήμα 4: Βέλτιστη τοποθέτηση 3D των UAVs για εφαρμογές IoT [13]

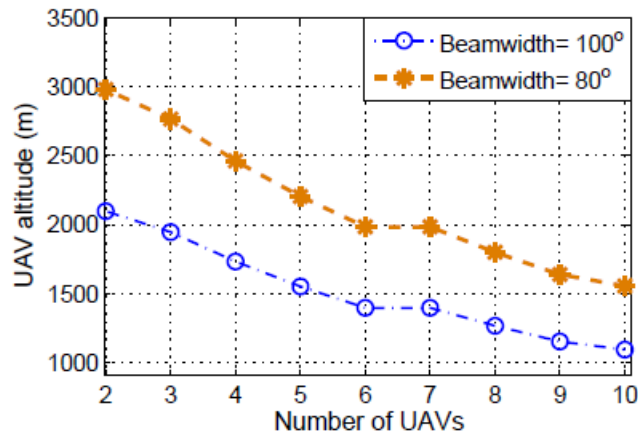
Το Σχήμα 5 παρουσιάζει τη μέση ισχύ μετάδοσης των συσκευών στο βέλτιστο σενάριο ανάπτυξης των UAVs στην περίπτωση όπου οι σταθμοί βάσης UAVs έχουν προαναπτυχθεί, χωρίς βελτιστοποίηση των τοποθεσιών τους. Όπως είναι εμφανές, η μέση

ισχύς μετάδοσης των συσκευών μπορεί να μειωθεί κατά 78% με τη βέλτιστη ανάπτυξη των UAVs σταθμών βάσης. Το Σχήμα 5 καταδεικνύει επίσης ότι η απαιτούμενη ισχύς για τη ζεύξη μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των UAVs που μετέχουν στο δίκτυο ως σταθμοί βάσης. Σαφώς, η ενεργειακή απόδοση του δικτύου IoT βελτιώνεται σημαντικά αξιοποιώντας την ευελιξία των drones για βελτιστοποίηση των θέσεων τους.



Σχήμα 5: Συνολικά επίπεδα εκπομπής ισχύος των επίγειων συσκευών συναρτήσει των ιπτάμενων κόμβων UAVs (για κάλυψη επίγειων συσκευών IoT) [6]

Στη συνέχεια, μελετάται ένα άλλο βασικό αποτέλεσμα για την ανάπτυξη πολλαπλών UAVs με στόχο τη μεγιστοποίηση της ασύρματης κάλυψης. Στην ερευνητική εργασία [17], θεωρείται ότι πολλαπλά UAV-BS πρέπει να παρέχουν μία ασύρματη υπηρεσία downlink, σε μία κυκλική γεωγραφική περιοχή ακτίνας 5 km, υποθέτοντας ότι τα UAVs είναι πανομοιότυπα και έχουν την ίδια ισχύ μετάδοσης και διατηρούν το ίδιο υψόμετρο πτήσης. Στο θεωρούμενο μοντέλο, κάθε UAV χρησιμοποιεί μια κατευθυντική κεραία με ένα συγκεκριμένο πλάτος δέσμης και επιπλέον ότι τα UAVs λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Στόχος είναι η βέλτιστη ανάπτυξη των UAVs στο 3D χώρο, έτσι ώστε η συνολική τους περιοχή κάλυψης να μεγιστοποιείται ενώ αποφεύγεται η αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ τους. Για το σκοπό αυτό, αξιοποιείται η θεωρία συσκευασίας κύκλων (circle packing theory) [55]. Τα αποτελέσματα παρέχουν αυστηρές οδηγίες για τον τρόπο βελτιστοποίησης για την τοποθεσία και, συγκεκριμένα, για το υψόμετρο πτήσης των UAVs, με βάση το εύρος δέσμης κεραιών, το μέγεθος της περιοχής κάλυψης και το πλήθος των διαθέσιμων UAVs.



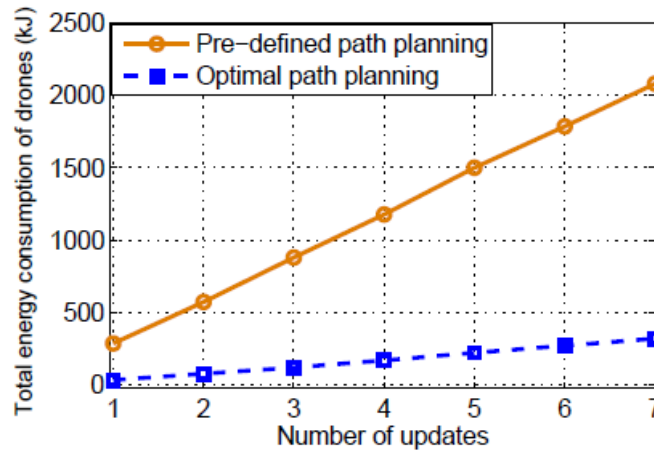
Σχήμα 6: Μεταβολή του ύψους τοποθέτησης των UAVs συναρτήσει του πλήθους που μετέχουν στο σχηματισμό [6]

Στο Σχήμα 6, παρουσιάζεται ένα αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα από την ερευνητική εργασία [17]. Ειδικότερα, το Σχήμα 6 δείχνει πώς το βέλτιστο υψόμετρο τοποθέτησης των UAVs ποικίλλει αλλάζοντας το πλήθος των UAVs που μετέχουν στην κάλυψη της περιοχής. Διαισθητικά, για την αποφυγή παρεμβολών, το ύψος των UAVs πρέπει να μειωθεί καθώς αυξάνεται το πλήθος των UAVs. Σε αυτήν την περίπτωση, για μεγαλύτερο πλήθος από UAVs, η ακτίνα κάλυψης κάθε UAV πρέπει να μειωθεί, μειώνοντας το ύψος τους, για να αποφευχθεί η αλληλοεπικάλυψη (ή παρεμβολή) μεταξύ των περιοχών κάλυψης. Για παράδειγμα, αυξάνοντας το πλήθος των UAVs από 3 σε 6, μειώνεται το βέλτιστο ύψος πτήσης από τα 2000 m στα 1300 m. Αυτό το ύψος δείχνει επίσης ότι τα UAVs πρέπει να τοποθετούνται σε χαμηλότερα ύψη όταν αυτά χρησιμοποιούν κατευθυντικές κεραίες με μεγαλύτερο εύρος δέσμης.

#### 1.4.3 Βελτιστοποίηση επιλογής τροχιών πτήσης για τα UAVs

Ένα αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα για την βελτιστοποίηση των τροχιών πτήσης των UAVs παρουσιάζεται στην ερευνητική εργασία [13]. Συγκεκριμένα, στην εργασία περιγράφεται ένα σενάριο κάλυψης για χρήστες IoT με τη βοήθεια drones, στο οποίο χρησιμοποιούνται 5 drones για τη συλλογή δεδομένων από τις επίγειες IoT συσκευές. Ένα σύνολο 500 συσκευών IoT κατανομούνται ομοιόμορφα σε περιοχή με γεωγραφική επιφάνεια 1 km × 1 km. Στο σενάριο μελετήθηκε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο δίκτυο IoT, στο οποίο το σύνολο των ενεργών συσκευών IoT, μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, με βάση την κατανομή beta [56]. Ως εκ τούτου, για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των συσκευών IoT, τα drones πρέπει να ενημερώνουν τις τοποθεσίες πτήσεως τους σύμφωνα με τις τοποθεσίες των ενεργών συσκευών. Σε αυτό το μοντέλο, μελετήθηκαν προκαθορισμένες χρονικές περίοδοι κατά τη διάρκεια των οποίων τα drones συλλέγουν δεδομένα από ενεργές συσκευές IoT. Στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος (δηλαδή, χρονική στιγμή ενημέρωσης), τα drones ενημερώνουν τις τοποθεσίες τους με βάση το μοτίβο ενεργοποίησης των IoT συσκευών. Δεδομένου

ενός τέτοιου δικτύου που μεταβάλλεται χρονικά, ο στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη τροχιά των drones, έτσι ώστε να μπορούν να καλύψουν τις γεωγραφικές τοποθεσίες με ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Ως εκ τούτου, τα drones κινούνται σε βέλτιστες διαδρομές ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ισχύος λόγω της κινητικότητας τους, ενώ ταυτόχρονα εξυπηρετούνται συσκευές IoT.



Σχήμα 7: Συνολική Κατανάλωση Ισχύος λόγω κινητικότητας των drones συναρτήσει του αριθμού ενημερώσεων θέσεων [6]

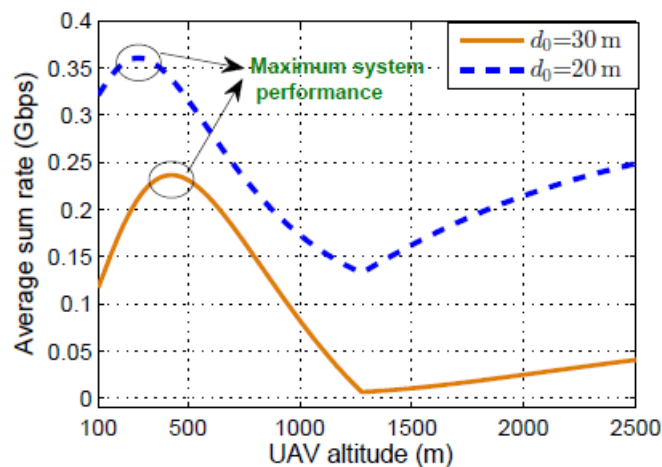
Το Σχήμα 7 παρουσιάζει τη συνολική κατανάλωση ισχύος των drones ως συνάρτηση του αριθμού των ενημερώσεων θέσης. Όπως αναμενόταν, όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ενημερώσεων όπως απαιτεί η μεγαλύτερη κινητικότητα των drones, τόσο μεγαλύτερη η κατανάλωση ισχύος. Στο διάγραμμα συγκρίνεται η απόδοση του σχεδιασμού βέλτιστης διαδρομής για τα drones έναντι της αντίστοιχης κατανάλωσης για προκαθορισμένες διαδρομές. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, χρησιμοποιώντας τον βέλτιστο σχεδιασμό διαδρομών, η μέση συνολική κατανάλωση ισχύος των drones μειώνεται κατά 74% σε σύγκριση με τη μη βέλτιστη περίπτωση. Στην πραγματικότητα, για την αποτελεσματική χρήση των UAVs σε ασύρματα δίκτυα, η τροχιά πτήσης των UAVs θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψιν ασύρματες μετρήσεις για μεγέθη όπως, η απόδοση και η κάλυψη καθώς και οι περιορισμοί ισχύος των UAVs. Βελτιστοποιώντας από κοινού την τροχιά μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των ασύρματων δικτύων με χρήση UAVs.

#### 1.4.4 Ανάλυση των Επιδόσεων Ασύρματων Δικτύων που βασίζονται σε UAVs

Σύμφωνα με την ερευνητική εργασία [25], θεωρείται μία κυκλική περιοχή στην οποία κατανέμεται ένας αριθμός χρηστών κάνοντας χρήση PPP πρωτοκόλλου [57], ενώ ο εναέριος σταθμός βάσης UAV χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση ενός υποσυνόλου από αυτούς τους χρήστες. Στο εξεταζόμενο δίκτυο, υπάρχουν δύο τύποι χρηστών: χρήστες downlink και D2D χρήστες. Εδώ, μπορεί να θεωρηθεί το σενάριο downlink ότι αφορά το UAV σταθμό βάσης ενώ οι χρήστες D2D λειτουργούν με μεταξύ τους

επικοινωνία. Επιπλέον, για ένα χρήστη D2D ο δέκτης συνδέεται στον αντίστοιχο πομπό D2D που βρίσκεται σε σταθερή απόσταση μακριά από αυτόν [58]. Ως εκ τούτου, ένας δέκτης D2D λαμβάνει το επιθυμητό σήμα από το ζεύγος πομπού D2D, καθώς και παρεμβολές από το σταθμό UAV και τους άλλους D2D πομπούς.

Τα λαμβανόμενα σήματα από έναν χρήστη της «κάτω ζεύξης», περιλαμβάνουν το επιθυμητό σήμα από το σταθμό UAV καθώς και παρεμβολές από όλους τους πομπούς D2D. Για αυτό το δίκτυο UAV-D2D, δημιουργήθηκαν αναλυτικές εκφράσεις για την κάλυψη (ανάλυση ποσοστών) για δύο τύπους σεναρίων ως προς το UAV: στατικά και κινητά [25]. Στο Σχήμα 8, παρουσιάζεται ο μέσος ρυθμός μετάδοσης έναντι του ύψους πτήσεως του UAV, μεταξύ ενός πομπού D2D / ζεύγος δέκτη.



Σχήμα 8: Μέσος ρυθμός μετάδοσης χρηστών σε δίκτυο UAV και D2D συναρτήσει του ύψους πτήσεως του UAV [6]

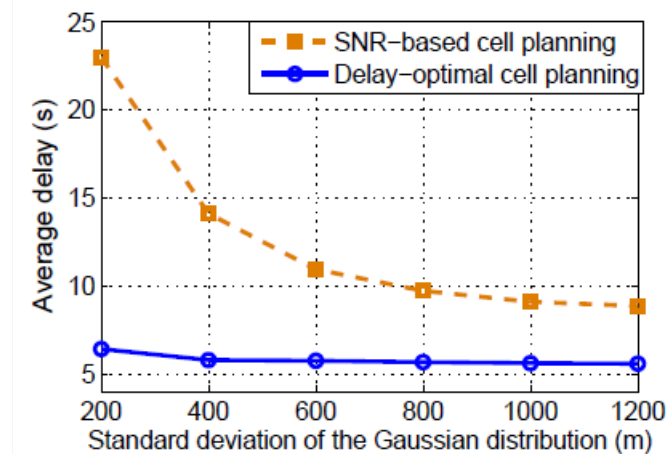
Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, ο συνολικός μέσος όρος μεγιστοποιείται όταν το ύψος πτήσεως του UAV είναι κοντά στα 300 m για  $d_0 = 20$  m. Από το Σχήμα 8, προκύπτει ότι για ύψος πτήσεως πάνω από 1300 m, ο συνολικός μέσος όρος αρχίζει να αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, καθώς το ύψος πτήσεως του UAV υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή, οι χρήστες κάτω ζεύξης δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν ενώ η παρεμβολή στους χρήστες D2D μειώνεται, αυξάνοντας έτσι το μέσο όρο. Επιπλέον, για ύψη πτήσεως από 300 m έως 1300 m, η απόδοση μειώνεται λόγω της επίδρασης των παρεμβολών LoS από το UAV στους χρήστες D2D. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, το βέλτιστο ύψος πτήσεως για το UAV εξαρτάται από το  $d_0$ . Για παράδειγμα, το συνολικό ποσοστό μεγιστοποιείται σε ύψος πτήσεως 400 m για  $d_0 = 30$  m.

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, στη βιβλιογραφία, υπάρχουν επιπλέον αποτελέσματα για την απόδοση της επικοινωνίας σε ασύρματα δίκτυα από UAVs. Για παράδειγμα, η ερευνητική εργασία [59] κατέδειξε για downlink επικοινωνία, πως η πιθανότητα κάλυψης ποικίλλει ως συνάρτηση του ορίου SIR για το δίκτυο πολλαπλών UAV-BS. Στην ερευνητική εργασία [20], οι ερευνητές παρουσίασαν την επίδραση του ύψους πτήσεως ενός UAV για την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης, που

εξασφαλίζει την κάλυψη των επίγειων συσκευών. Στην ερευνητική εργασία [60], η απόδοση δικτύου κινητής τηλεφωνίας που υποστηρίζεται από ένα δίκτυο από UAVs προσδιορίζεται ως συνάρτηση του αριθμού των σταθμών βάσης που μετέχουν στο δίκτυο.

#### 1.4.5 Σχεδιασμός Κυψελωτών Δικτύων και η παροχή συνδεσιμότητας με δίκτυο UAVs

Όσον αφορά τον σχεδιασμό ενός δικτύου, στην ερευνητική εργασία [61], μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης συσχέτισης των κυψελών για ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης στο δίκτυο που υποστηρίζεται από σταθμούς βάσης UAVs. Συγκεκριμένα, η ερευνητική εργασία θεωρεί μια γεωγραφική περιοχή μεγέθους 4 km x 4 km στην οποία 4 UAVs (ως εναέριοι σταθμοί βάσης) και 2 επίγειοι σταθμοί βάσης αναπτύσσονται σύμφωνα με μια παραδοσιακή ανάπτυξη τοποθέτησης για την ραδιοκάλυψη. Σε αυτήν την περιοχή, κατανέμονται επίγειοι χρήστες σύμφωνα με μια περικομμένη Gaussian κατανομή με τυπική απόκλιση  $\sigma$ , με τιμή η οποία είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση μιας περιοχής hotspot. Η κύρια μέτρηση απόδοσης είναι η καθυστέρηση μετάδοσης (delay latency), η οποία είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση ενός δεδομένου αριθμού bits σε επίγειους χρήστες. Στόχος είναι ο συνδυασμός του βέλτιστου αριθμού κυψελών (συσχέτιση κυψελών) για την οποία η μέση καθυστέρηση δικτύου ελαχιστοποιείται.



Σχήμα 9: Μέση καθυστέρηση μετάδοσης δικτύου για ρυθμό μετάδοσης 1Mb [6]

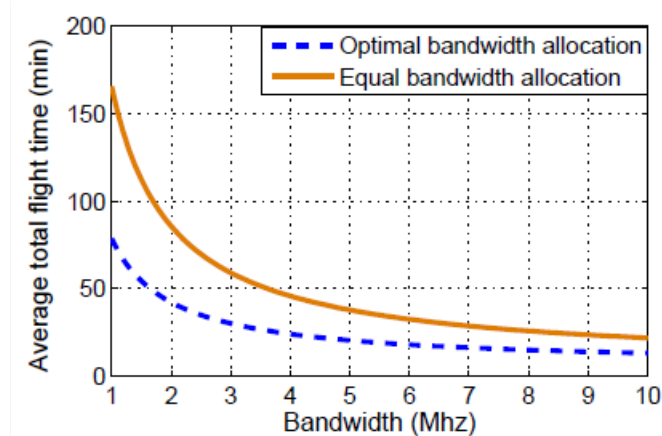
Στο Σχήμα 9, συγκρίνεται η μέση καθυστέρηση για κλασική συσχέτιση των κυψελών που βασίζεται στο SNR. Για τη χωρική κατανομή των χρηστών, μπορεί να θεωρηθεί περικομμένη Κατανομή Gauss με κέντρο (1300 m, 1300 m) και τυπική απόκλιση που κυμαίνεται από 200 m έως 1200 m. Οι χαμηλότερες τιμές του αντιστοιχούν σε περιπτώσεις στις οποίες οι χρήστες προκαλούν συμφόρηση γύρω από ένα κέντρο hotspot. Αυτό το σχήμα δείχνει ότι ο βέλτιστος συσχετισμός κυψελών ξεπερνά σημαντικά τον κλασικό με συσχέτιση SNR και αποφέρει έως και 72% χαμηλότερο

μέσο όρο καθυστέρησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στην προτεινόμενη προσέγγιση, λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της συμφόρησης του δικτύου. Στην πραγματικότητα, σε αντίθεση με τον συσχετισμό κυψελών που βασίζεται στο SNR, η προτεινόμενη προσέγγιση αποφεύγει τη δημιουργία πολύ «φορτωμένων» κυψελών που προκαλούν καθυστέρηση στο δίκτυο. Ως εκ τούτου, σε σύγκριση με την συσχέτιση που βασίζεται στο SNR, η προτεινόμενη συσχέτιση αποδεικνύεται πιο ισχυρή έναντι της συμφόρησης του δικτύου και μειώνει σημαντικά τη μέση καθυστέρηση.

Είναι σαφές ότι η απόδοση των ασύρματων δικτύων με χρήση σταθμών βάσης UAVs εξαρτάται σημαντικά από τον προγραμματισμό του δικτύου. Γενικά, ο σχεδιασμός δικτύου επηρεάζει πολλές βασικές μετρήσεις όπως η απόδοση, η καθυστέρηση, το λειτουργικό κόστος και η κατανάλωση ενέργειας.

#### 1.4.6 Χειρισμός των πόρων του δικτύου και Επίπεδα Ισχύος

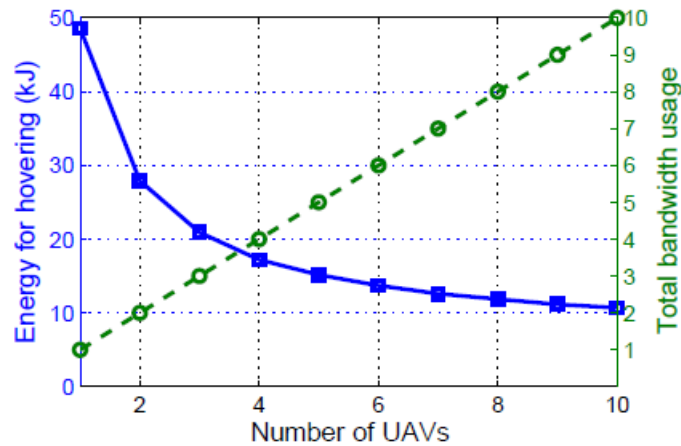
Στην ερευνητική εργασία [62], μελετήθηκε το πρόβλημα της διάθεσης και διαχείρισης πόρων με έμφαση στην βέλτιστη κατανομή του εύρους ζώνης σε ασύρματα δίκτυα που χρησιμοποιούν UAVs. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ένα σενάριο στο οποίο 5 UAVs αναπτύσσονται ως εναέριοι σταθμοί βάσης σε μια ορθογώνια περιοχή διαστάσεων 1 km x 1 km, για την παροχή υπηρεσιών σε 50 επίγειους χρήστες. Αυτά τα UAVs πρέπει να ίπτανται πάνω από την περιοχή μέχρι να λάβουν όλοι οι επίγειοι χρήστες τους την επιθυμητή υπηρεσία (ως προς τον αριθμό των bits) μέσω της διασύνδεσης τους. Στόχος είναι να μοιραστεί σε αυτούς βέλτιστα το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης.



Σχήμα 10: Μέσος Χρόνος Πτήσεως συναρτήσεως του προσφερόμενου εύρους ζώνης [6]

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται ο μέσος συνολικός χρόνος πτήσης των UAVs έναντι του εύρους ζώνης μετάδοσης. Εδώ, ο συνολικός χρόνος πτήσης αντιπροσωπεύει το χρόνο που απαιτείται για την παροχή υπηρεσιών σε όλους τους επίγειους χρήστες, καθένας από τους οποίους απαιτεί δεδομένα συνολικού όγκου των 100 Mb. Μελετώνται δύο σχήματα κατανομής εύρους ζώνης, η βέλτιστη κατανομή του εύρους ζώνης και η ίση κατανομή εύρους ζώνης. Σαφώς, αυξάνοντας το εύρος ζώνης, ο συνολικός χρόνος

πτήσης που απαιτούν τα UAV για την εξυπηρέτηση των επίγειων χρηστών τους μειώνεται. Φυσικά, ένα υψηλότερο εύρος ζώνης μπορεί να παρέχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και επομένως οι χρήστες μπορούν να εξυπηρετηθούν σε μικρότερη χρονική διάρκεια. Από το Σχήμα 10, διαφαίνεται ότι η βέλτιστη κατανομή εύρους ζώνης μπορεί να οδηγήσει σε 51% μικρότερο χρόνο πτήσης σε σύγκριση με την ίση κατανομή εύρους ζώνης. Αυτό συμβαίνει επειδή, με τον βέλτιστο τρόπο η εκχώρηση του εύρους ζώνης σε κάθε χρήστη με βάση το φορτίο και την τοποθεσία, ελαχιστοποιεί το συνολικό χρόνο πτήσης των UAVs.



Σχήμα 11: Κατανάλωση ισχύος των UAVs λόγω πτήσεως και επίδραση της κατανομής εύρους ζώνης [6]

Στο Σχήμα 11, παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ισχύος λόγω πτήσεως των UAVs ως συνάρτηση του αριθμού των UAVs. Το αποτέλεσμα αυτό αντιστοιχεί στο σενάριο χωρίς παρεμβολές, στο οποίο τα UAVs λειτουργούν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Ως εκ τούτου, συνολικά η χρήση του εύρους ζώνης αυξάνεται γραμμικά αυξάνοντας τον αριθμό των UAVs. Είναι σαφές ότι η συνολική κατανάλωση ισχύος μειώνεται ενώ ο αριθμός των UAV αυξάνεται. Ένας μεγαλύτερος αριθμός από σταθμούς βάσης UAVs αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο αριθμό κατατμήσεων των κυψελών μετάδοσης. Ως αποτέλεσμα, η εμβέλεια κάθε κυψέλης μειώνεται και οι χρήστες θα έχουν μικρότερη απόσταση από τους σταθμούς βάσης των UAVs. Αύξηση του αριθμού των UAVs οδηγεί σε υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης, οπότε μειώνει το χρόνο πτήσεως και κατά συνέπεια την κατανάλωση ισχύος από την ιπτάμενη συσκευή. Για παράδειγμα, από το σχήμα προκύπτει ότι όταν ο αριθμός των UAVs αυξάνεται από 2 σε 6, η συνολική κατανάλωση ισχύος των UAVs μειώνεται κατά 53%. Παρ' όλα αυτά, η ανάπτυξη περισσότερων UAVs στο σενάριο χωρίς παρεμβολές, απαιτεί περισσότερο εύρος ζώνης. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια θεμελιώδης ανταλλαγή (trade-off) μεταξύ της κατανάλωσης ισχύος των UAVs για την πτήση και την αποδοτικότητα ως προς το εύρος ζώνης.

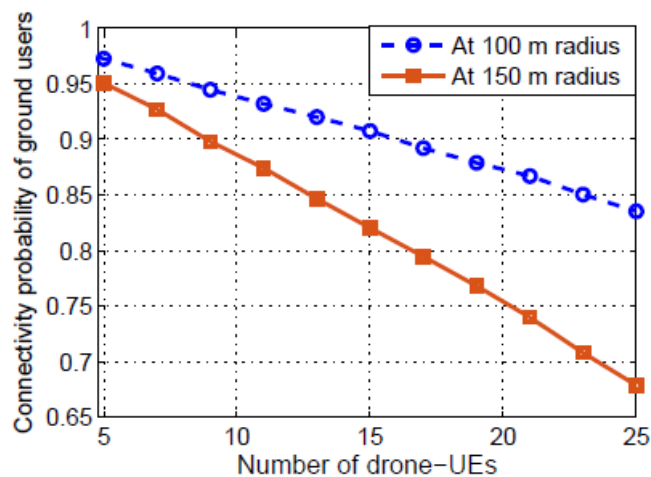
Συνοπτικά, για την αποτελεσματική χρήση των UAVs ως σταθμούς βάσης για ασύρματα δίκτυα, πρέπει κανείς να διαχειριστεί αποτελεσματικά τους διαθέσιμους



πόρους του συνολικού συστήματος, όπως η ισχύς, το εύρος ζώνης και το χρόνο πτήσεως. Στην πραγματικότητα, η απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας UAVs επηρεάζεται σημαντικά από στρατηγικές κατανομής των πόρων και τους περιορισμούς ισχύος των UAV.

#### 1.4.7 Τα drone-UEs στα ασύρματα δίκτυα

Με τα drone-UEs στα ασύρματα δίκτυα μελετήθηκε πώς οι παρεμβολές uplink που προέρχονται από drone-UEs, επηρεάζουν τη συνδεσιμότητα των επίγειων χρηστών. Για το σκοπό αυτό θεωρήθηκε ένας αριθμός ιπτάμενων drone-UEs, τα οποία αναπτύσσονται ομοιόμορφα σε περιοχή ακτίνας 1000 m σε ύψος πτήσης 100 m πάνω από μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή. Εν τω μεταξύ, οι επίγειοι χρήστες προσπαθούν να συνδεθούν σε επίγειο σταθμό βάσης που βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής. Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται η πιθανότητα σύνδεσης των επίγειων χρηστών (σε δεδομένη ακτίνα από το σταθμό βάσης) καθώς ο αριθμός των drone-UEs ποικίλλει. Σαφώς, η συνδεσιμότητα των επίγειων χρηστών μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των drones. Αυτό οφείλεται στις κυρίαρχες παρεμβολές LoS που προκαλούνται από τα drone-UEs. Για παράδειγμα, η πιθανότητα συνδεσιμότητας σε ακτίνα 150 m μειώνεται κατά 18% όταν ο αριθμός των UE drones αυξάνεται από 5 σε 15. Το αποτέλεσμα στο Σχήμα υπογραμμίζει την ανάγκη για αποτελεσματική υιοθέτηση τεχνικών διαχείρισης των παρεμβολών σε σενάρια drone-UEs [13], [25], [63] - [65].



Σχήμα 12: Η επίδραση των drone-UEs στην περιγραφή της συνδεσιμότητας των επίγειων χρηστών [6]

### **1.5 Συμπεράσματα από τη συμβολή των τεχνολογιών για την κάλυψη των ανοικτών θεμάτων**

Η συμβολή των ερευνητικών εργασιών και των τεχνολογιών για την κάλυψη των ανοικτών θεμάτων για δίκτυα με UAVs μπορεί να οδηγήσει στα ακόλουθα συμπεράσματα.

Παρά τους πολλά υποσχόμενους ρόλους των UAVs σε ασύρματα δίκτυα, ο αριθμός πολλών και σημαντικών προκλήσεων σχεδιασμού πρέπει να μελετηθεί. Στην πραγματικότητα, κάθε θέμα εισάγει τις δικές του προκλήσεις και ευκαιρίες. Για παράδειγμα, για τους σταθμούς βάσης πτήσης, μια εξέχουσα πρόκληση είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου με βάση τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των UAVs όπως, ο χρόνος πτήσης, τα μοντέλα καναλιού αέρας - εδάφους καθώς και η κινητικότητα. Οι βασικές προκλήσεις για δίκτυα κυψελών που συνδέουν UAVs-UEs περιλαμβάνουν τη συνύπαρξη των επίγειων δικτύων, τη διαχείριση της κινητικότητας και παράδοσης και τον περιορισμό των παρεμβολών. Επιπροσθέτως, κατά την πτήση ad-hoc μεταξύ των κόμβων των δικτύων, της δρομολόγησης και του σχεδιασμού διαδρομών για τα UAVs συνιστούν σημαντικές σχεδιαστικές προκλήσεις.

Ο σχεδιασμός ασύρματων δικτύων με χρήση UAVs απαιτεί τη χρήση μοντέλων καναλιών για επικοινωνίες αέρος - εδάφους και αέρος - αέρος. Η μοντελοποίηση των καναλιών σε επικοινωνίες UAV αποτελεί μια σημαντική κατεύθυνση της έρευνας και μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας διάφορες προσεγγίσεις, όπως η τεχνική ανίχνευσης ακτίνων, οι εκτεταμένες μετρήσεις και η μηχανική μάθηση.

Η βελτιστοποίηση των τρισδιάστατων θέσεων των drones είναι βασικός παράγοντας καθώς επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των ασύρματων δικτύων. Οι ρήσεις των Drones είναι ιδιαίτερα σημαντικές για κάλυψη και ενίσχυση της χωρητικότητας, τη δημόσια ασφάλεια, για εφαρμογές IoT και προσωρινή αποθήκευση. Βελτιστοποιώντας τις θέσεις των drones, διάφοροι παράγοντες όπως το κανάλι A2G, οι τοποθεσίες των χρηστών και η ισχύς μετάδοσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η τροχιά των UAVs, πολλοί περιορισμοί και παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Οι τροχιές των UAVs καθορίζονται με βάση τις απαιτήσεις QoS των χρηστών, την κατανάλωση ισχύος των UAVs, τον τύπο των UAVs, καθώς και το σχήμα και τις θέσεις των εμποδίων στο περιβάλλον.

Η απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας UAVs μπορεί να αναλυθεί ως προς διάφορες μετρήσεις όπως η πιθανότητα κάλυψης, η φασματική απόδοση κάθε περιοχής, η αξιοπιστία και η καθυστέρηση μετάδοσης. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να συνδεθούν μοναδικά με τις παραμέτρους των UAVs όπως το ύψος, η τροχιά και ο χρόνος πτήσης.

Ο σχεδιασμός δικτύων υποβοηθούμενων από UAVs απαιτεί την αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων που σχετίζονται με την ανάπτυξη εναέριων και επίγειων

σταθμών βάσης, τη διαμοίραση συχνότητας, τη διαχείριση των παρεμβολών και τη σύνδεση των χρηστών. Ο σχεδιασμός του δικτύου πρέπει να γίνει αποτελεσματικά, έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει τη συνολική απόδοση του συστήματος σε όρους κάλυψης, χωρητικότητας και λειτουργικού κόστους.

Δεδομένης της περιορισμένης ισχύος των ιπταμένων συσκευών, η αποτελεσματικότητα των συστημάτων επικοινωνίας που βασίζονται σε drones απαιτούν προσεκτική εξέταση. Στην πραγματικότητα, ο χρόνος πτήσης και οι περιορισμοί ισχύος μετάδοσης των drones θα επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση των ασύρματων δικτύων που βασίζονται σε αυτά. Η κατανάλωση ισχύος ενός drone μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με σχεδιασμό διαδρομών και σχέδια επικοινωνίας μεταξύ των drones.

Η χρήση των UAVs-UEs που συνδέονται με κινητές συσκευές εισάγει σενάρια νέων προκλήσεων. Για παράδειγμα, τα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα που έχουν σχεδιαστεί πρωταρχικά για κάλυψη επίγειων χρηστών μπορεί να μην είναι σε θέση να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τις απαιτήσεις συνδεσιμότητας και χαμηλής καθυστέρησης των UAVs-UEs. Στην πραγματικότητα, υπάρχει ανάγκη για σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού κυψελοειδούς δικτύου με συστήματα UAVs που μπορούν να υποστηρίξουν εξαιρετικά αξιόπιστα τις απαιτήσεις επικοινωνιών μικρής καθυστέρησης, την κινητικότητα και διαχείριση παράδοσης, καθώς την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα επίγειων και εναέριων χρηστών.

## 2. Αρχιτεκτονικές για την ανάπτυξη δικτύων μετάδοσης με χρήση των UAVs. Τα δίκτυα FANETs

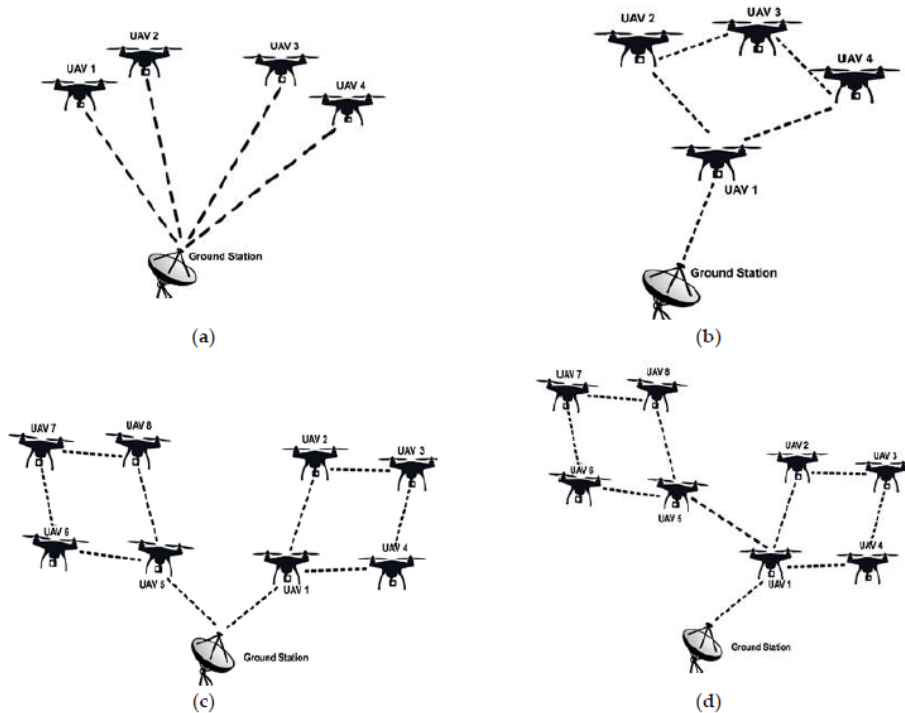
### 2.1 Αρχιτεκτονικές Διασύνδεσης Σμήνους και πολλαπλών επιπέδων για τη συγκρότηση ενός FANET

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν τα βασικά θέματα των επικοινωνιών μεταξύ των UAVs, για τη διαμόρφωση των καναλιών A2A και A2G. Η διασύνδεση των ιπτάμενων οχημάτων, που μετέχουν ως σταθμοί βάσεως σε ένα δίκτυο μετάδοσης δεδομένων, συνιστά επίσης ένα πρόβλημα, το οποίο αφορά στην αρχιτεκτονική διασύνδεσης μεταξύ των οντοτήτων για τον σχηματισμό του δικτύου. Στις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές για τη διασύνδεση των συμμετεχουσών συσκευών στο FANET (Flying Ad-Hoc Network), λαμβάνεται υπόψιν, τόσο το πλήθος των ομάδων ιπταμένων συσκευών (Multi Group UAV Ad-Hoc Network), όσο και τα πολλαπλά επίπεδα διασύνδεσης, για τη δημιουργία ενός κυψελωτού δικτύου επικοινωνιών (Multi Layer UAV Ad-Hoc Network).

Στο FANET, τα UAVs διατηρούν δύο βασικές λειτουργίες για την εκτέλεση διαφόρων εργασιών, την επικοινωνία UAV-to-UAV (U2U) και τη συλλογή πληροφοριών δικτύου. Εκτός αυτού, τα UAVs εκτελούν επίσης δύο επιπλέον καθήκοντα: (α) λειτουργούν ως μονάδες απομακρυσμένης πρόσβασης για να επεκτείνουν την κάλυψη των υποδομών, και (β) συμμετέχουν στην ανάπτυξη ενός δυναμικού δικτύου με ετερογενείς πόρους. Σύμφωνα με τους ρόλους που εκτελούνται από τα UAVs σε μία αρχιτεκτονική FANET, απαιτείται η ενεργοποίηση δύο τρόπων δικτύωσης: (α) UAV-to-UAV (U2U) και (β) UAV-to-Infrastructure (U2I). Για το σκοπό αυτό, ένα από τα UAVs αναφέρεται ως το "backbone UAV", καθώς παίζει το ρόλο μιας πύλης (Gateway) στην αρχιτεκτονική FANET. Το backbone UAV συλλέγει δεδομένα από τα μέλη UAVs (μέσω U2U) και στη συνέχεια μεταδίδει τα συγκεντρωτικά δεδομένα στο σταθμό εδάφους (GS) χρησιμοποιώντας Επικοινωνία U2I.

Οι Li et al. [67] παρουσίασαν δύο τύπους αρχιτεκτονικών για τη σύνδεση πολλαπλών UAVs, την κεντρική και την αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική. Η κεντρική αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τον επίγειο σταθμό ως κεντρικό κόμβο, ενώ όλα τα UAVs συνδέονται άμεσα με αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13α. Έτσι, η μετάδοση δεδομένων μεταξύ δύο UAVs, πρέπει να διέλθει μέσω του σταθμού εδάφους (GS). Αντίθετα, τα UAVs μπορούν να επικοινωνούν απευθείας ή έμμεσα στην αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική, χωρίς να βασίζονται σε μία κεντρική πύλη GS. Οι ερευνητές εισήγαγαν περαιτέρω τρεις τύπους αποκεντρωμένων αρχιτεκτονικών: UAV ad-hoc network, multi-group UAV ad-hoc network, και δίκτυο ad-hoc πολλαπλών επιπέδων UAV. Ομοίως, στην μελέτη [68], οι ερευνητές μελέτησαν τέτοιες αρχιτεκτονικές για την ανάπτυξη του FANET δικτύου. Οι τρεις αρχιτεκτονικές συζητούνται στις ακόλουθες παραγράφους.

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές διασύνδεσης του FANET, με βάση τις αρχές διασύνδεσης του Multi Group και Multi Layer:



Σχήμα 13: Αρχιτεκτονικές Διασύνδεσης FANET (α) Κεντροποιημένη Αρχιτεκτονική (Centralized Architecture) (β) Τυπικό UAV δίκτυο (UAV ad-hoc network) (γ) Δίκτυο με συμμετοχή πολλών ομάδων UAVs (Multi Group UAV Ad-hoc network) (δ) Πολυ-επίπεδο UAV δίκτυο (Multi Layer UAV ad-hoc network) [66]

Για την υλοποίηση ενός FANET, οι αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές κρίνονται ως πιο αποδοτικές, δεδομένου ότι επιτυγχάνουν διασύνδεση μεταξύ όλων των μελών του FANET. Η χρήση πολλών κεραιών σε κάθε ιπτάμενο μέλος, με τεχνικές αναπήδησης ανά κεραία (antenna hopping), μπορεί να επιτύχει σημαντικές επιδόσεις στα πλαίσια των επιπέδων μετάδοσης και του ρυθμού δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, η τεχνική του σχήματος (β) μπορεί να κριθεί προτιμότερη, όταν το πλήθος των UAVs είναι μικρό και οι ιπτάμενες συσκευές είναι ομοιογενείς, δηλ. διαθέτουν τα ίδια χαρακτηριστικά. Οι αρχιτεκτονικές των Πολλαπλών Ομάδων – Επιπέδων (σχήματα γ και δ) μπορούν να κριθούν προτιμότερες, όταν το πλήθος των UAVs που μετέχουν στο σχηματισμό του FANET, είναι μεγάλο ή/και χρησιμοποιούνται UAVs με διαφορετικά – ετερογενή χαρακτηριστικά. Οι πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές, συγκρινόμενες με τις πολλαπλές ομάδες, μπορούν να επιτύχουν καλύτερες επιδόσεις στις περιπτώσεις που η εγκατάσταση των επικοινωνιών του σμήνους είναι δυναμική (on-the-fly), διότι παρέχουν ανθεκτικότητα λόγω των πολλαπλών διασυνδέσεων στην αστοχία επικοινωνίας ενός κόμβου.

### **2.1.1 UAV Ad-Hoc Network**

Σε ένα UAV ad-hoc δίκτυο, κάθε UAV συμβάλλει στη διαδικασία προώθησης δεδομένων, για όλα τα άλλα UAVs του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13b. Το backbone UAV χρησιμεύει ως πύλη μεταξύ του GS και του μέλος UAV σε αυτήν τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική. Ο σταθμός βάσης UAV, είναι συνήθως εξοπλισμένος με δύο συχνότητες επικοινωνίας: χαμηλής ισχύος μικρής εμβέλειας και υψηλής ισχύος μεγάλης εμβέλειας. Χρησιμοποιείται συχνότητα μετάδοσης μικρής ισχύος μικρής εμβέλειας για επικοινωνία μεταξύ των UAVs, και απαιτείται συχνότητα μεγάλης εμβέλειας για επικοινωνία με το GS. Δεδομένου ότι μόνο ένα βασικό UAV είναι συνδεδεμένο με το GS στην αρχιτεκτονική UAV ad-hoc, η περιοχή κάλυψης από το δίκτυο, επεκτείνεται ουσιαστικά. Επιπλέον, καθώς η απόσταση μεταξύ των UAVs είναι σχετικά μικρή, ο πομποδέκτης που είναι τοποθετημένος στα UAVs, μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικός και ελαφρύς, γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικά ελκυστικά για υλοποίηση με χρήση UAVs μικρού μεγέθους. Ωστόσο, για να εγκατασταθεί ένα σταθερό δίκτυο, τα χαρακτηριστικά των UAVs όπως, τα προφίλ κινητικότητας, οι ταχύτητες κίνησης, τα ύψη και οι κατευθύνσεις πτήσης, από όλα τα συνδεδεμένα UAVs πρέπει να είναι παρόμοια. Επομένως, μία τέτοια αρχιτεκτονική δικτύωσης, ταιριάζει καλύτερα για επιτήρηση, λειτουργία παρακολούθησης και άλλες τέτοιες αποστολές, όπου ένας μικρός αριθμός ομοιογενών UAVs απαιτούνται για ανάπτυξη της εφαρμογής.

### **2.1.2 Multi-Group UAV Ad-Hoc Network**

Ένα ad-hoc δίκτυο πολλαπλών ομάδων είναι, κατά κύριο λόγο, μια ενοποίηση ενός ad-hoc δικτύου UAVs σε μια κεντρική αρχιτεκτονική δικτύου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 13c. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, τα UAVs εντός ομάδας σχηματίζουν ένα ad-hoc δίκτυο και το backbone UAV κάθε ομάδας, συνδέεται περαιτέρω με το GS με κεντρικό τρόπο. Η επικοινωνία εντός της ομάδας πραγματοποιείται σε ένα ad-hoc δίκτυο UAV, χωρίς τη συμμετοχή του GS, ενώ η επικοινωνία μεταξύ ομάδων πραγματοποιείται μέσω των backbone UAVs. Αυτή η αρχιτεκτονική ταιριάζει καλύτερα σε αποστολές, όπου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός ετερογενών UAVs. Ωστόσο, η αρχιτεκτονική δικτύωσης δεν συγκροτεί ένα σταθερό δίκτυο, λόγω του ημισυγκεντρωτικού χαρακτήρα της.

### 2.1.3 Multi-Layer UAV Ad-Hoc Network

Μια άλλη αρχιτεκτονική με τη μορφή δικτύωσης πολλαπλών ομάδων ετερογενών UAVs είναι το δίκτυο UAV ad-hoc πολλαπλών επιπέδων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 13d. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, η δικτύωση μεταξύ των UAVs μελών εντός μιας συγκεκριμένης ομάδας, σχηματίζει ένα ad-hoc δίκτυο από UAVs, στο οποίο αντιστοιχεί το κάτω επίπεδο του δικτύου. Τα UAVs κορμού όλων των ομάδων, συνδέονται μεταξύ τους και έρχονται κάτω από το ανώτερο στρώμα. Ωστόσο, μόνο ένα βασικό UAV από μια ομάδα συνδέεται περαιτέρω με το GS. Επιπλέον, μόνο το GS διατηρεί τις πληροφορίες που αποστέλλονται σε αυτό, έτσι ώστε να μειωθεί η επικοινωνία και το φορτίο υπολογισμού στο GS. Επομένως, αυτή η αρχιτεκτονική είναι κατάλληλη για αποστολές που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό ετερογενών UAVs.

### 2.2 Ασύρματες Τεχνολογίες για την υποστήριξη της διασύνδεσης των FANETs

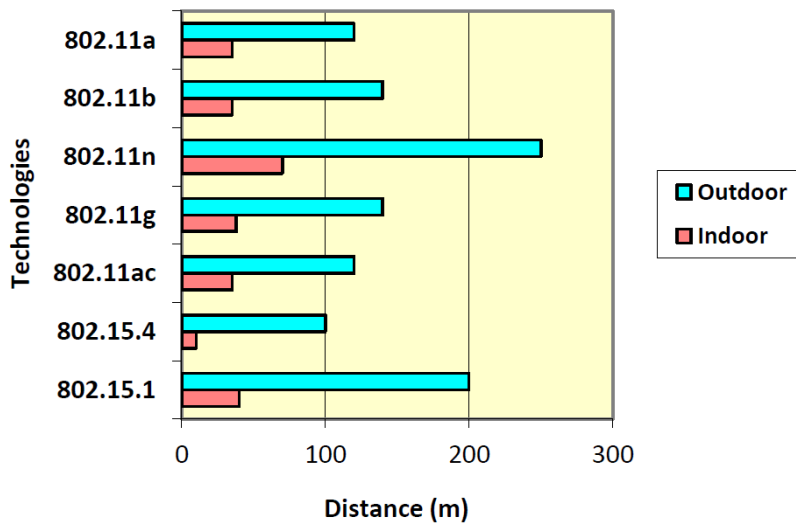
Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν οι πιθανές αρχιτεκτονικές για τη διασύνδεση των ιπτάμενων κόμβων – UAVs, τόσο μεταξύ τους όσο επίσης και με τα δίκτυα κορμού. Τα προτεινόμενα μοντέλα διασύνδεσης επιβάλλουν συνδέσεις δύο τύπων: μεταξύ ιπτάμενων οχημάτων (UAV 2 UAV – U2U) καθώς επίσης και διασύνδεση μεταξύ των ιπτάμενων οχημάτων και του δικτύου κορμού (UAV 2 Infrastructure – U2I). Οι προσφερόμενες τεχνολογίες για την ασύρματη δικτύωση, είναι πολλές και αυτό οφείλεται στην εξέλιξη των τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας διασύνδεσης εξαρτάται από τον τύπο των εφαρμογών, που η διάταξη των ιπτάμενων οχημάτων – UAVs καλείται να υποστηρίξει. Η διασύνδεση αφορά, τόσο την υποστήριξη της κίνησης δεδομένων για το επίπεδο των εφαρμογών, αλλά και για την πλοήγηση και τον έλεγχο του ιπτάμενου σμήνους των κόμβων, που παρέχει και υποστηρίζει τη δεδομένη υπηρεσία. Οι απαιτήσεις πλοήγησης και ελέγχου, δεν απαιτούν σημαντικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (throughput) και μπορεί να υποστηριχθούν σχεδόν από όλες τις προσφερόμενες τεχνολογίες. Οι ασύρματες επικοινωνίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους:

- Ασύρματες επικοινωνίες ζεύξης μικρής απόστασης (short range)
- Ασύρματες επικοινωνίες ζεύξης μεγάλης απόστασης (long range)

Προφανώς, οι επικοινωνίες ζεύξης μικρής απόστασης μπορούν να διασυνδέουν τα μέλη του σμήνους, όταν αυτά βρίσκονται και διατηρούν σχετικά μικρές αποστάσεις, ενώ οι επικοινωνίες ζεύξης μεγάλων αποστάσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη διασύνδεση των μελών του ιπτάμενου σμήνους αλλά και για τη διασύνδεση των κεντρικών κόμβων με τα δίκτυα κορμού (infrastructure).

Στις τεχνολογίες ζεύξης short range, συγκαταλέγεται όλη η ομάδα προσφερόμενων ασύρματων τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί με βάση τα πρωτόκολλα της IEEE

802.xx. Στη συνέχεια, το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει αυτές τις τεχνολογίες καθώς και τις υποστηριζόμενες μέγιστες αποστάσεις για την επίτευξη των ασύρματων διασυνδέσεων.



Σχήμα 14: Τεχνολογίες για short range ζεύξη και μέγιστες αποστάσεις διασύνδεσης (σε εφαρμογές εντός κλειστού – ανοικτού χώρου) [66]

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας συνολικός πίνακας [Πίνακας 4], ο οποίος περιγράφει όλες τις διαθέσιμες ασύρματες τεχνολογίες για τη διασύνδεση (short και long range):

Πίνακας 4: Ασύρματες Τεχνολογίες Ζεύξης και Τεχνικά Χαρακτηριστικά [66]

Communication Technology	IEEE Standard	Frequency/Medium	Spectrum Type	Device Mobility	Theoretical Data Rate	Range Indoor-Outdoor	Network Typology	Latency	Advantages	Limitations
Wi-Fi [7,8]	802.11	2.4 GHz IR	Unlicensed	Yes	Up to 2 Mbps	20 m–100 m	Ad-hoc, star, mesh, hybrid	<5 ms	High speed and cheap	Limited range
	802.11a	5 GHz	Unlicensed	Yes	Up to 54 Mbps	35 m–120 m	Ad-hoc, star, mesh, hybrid			
	802.11b	2.4 GHz	Unlicensed	Yes	Up to 11 Mbps	35 m–140 m	Ad-hoc, star, mesh, hybrid			
	802.11n	2.4/5 GHz	Unlicensed	Yes	Up to 600 Mbps	70 m–250 m	Ad-hoc, star, mesh, hybrid			
	802.11g	2.4 GHz	Unlicensed	Yes	Up to 54 Mbps	38 m–140 m	Ad-hoc, star, mesh, hybrid			
	802.11ac	5 GHz	Unlicensed	Yes	Up to 3466 Mbps	35 m–120 m	Ad-hoc, star, mesh, hybrid			
Bluetooth 5 [9–12]	802.15.1	2.4 GHz	Unlicensed	Yes	Up to 2 Mbps	40 m–200 m	Ad-hoc, piconet	3 ms	Energy-efficient	Low data rate
ZigBee [13–15]	802.15.4	2.4 GHz	Unlicensed	Yes	250 Kbps	10 m–100 m	Ad-hoc, star, mesh, tree, cluster	15 ms	Low cost	Low data rate
WiMAX [16–18]	802.16a	2 to 11 GHz	Licensed	Yes	Up to 75 Mbps	Up to 48 km	Wide-area wireless backhaul	30 ms	High throughput	Interference issues
LTE [19–22]	LTE	Up to 20 MHz	Licensed	Yes	Up to 300 Mbps	Up to 100 km	Flat, IP based	5 ms	High bandwidth	Expensive
5G [23–29]	5G (eMBB)	28 GHz	Licensed	Yes	Up to 20 Gbps	Wide Area	IP based	1 ms	High data rate	Expensive
Satellite [30,31]	Satellite	Up to 40 GHz	Licensed	Yes	Up to 1 Gbps	World Wide	-	550 ms	Wide coverage	High delay and high cost

Ο πίνακας περιλαμβάνει τα σημαντικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά, που αφορούν τις προτεινόμενες τεχνολογίες διασύνδεσης. Μέσα σε αυτά παρουσιάζονται, οι συχνότητες των φερόντων (carrier frequencies), η ανοικτή ή δεσμευμένη χρήση της συχνοτικής περιοχής με βάση την οργάνωση για τη Διαχείριση του Ραδιοφάσματος, η δυνατότητα υποστήριξης κινητικότητας στους διασυνδεόμενους κόμβους (mobility capabilities), οι μέγιστοι επιτεύξιμοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων (max throughput),



η μέγιστη εμβέλεια απόστασης για την επίτευξη ασύρματης διασύνδεσης των κόμβων, η δυναμικότητα διασύνδεσης, τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα από τη χρήση κάθε ασύρματης τεχνολογίας. Στις long range ασύρματες τεχνολογίες συγκαταλέγονται οι WiMAX, LTE, 5G καθώς και οι δορυφορικές διασυνδέσεις (Satellite), οι οποίες επιτρέπουν μεγάλη εμβέλεια διασύνδεσης, φτάνοντας τις εκατοντάδες – χιλιάδες χιλιόμετρα. Επιπρόσθετα, οι long range τεχνολογίες επιτρέπουν σαφώς σημαντικότερους ρυθμούς μετάδοσης και λήψης δεδομένων.

Μία σημαντική παράμετρος για τη διασύνδεση των μελών του FANET είναι η κατανάλωση ισχύος. Βελτιστοποίηση στο σχήμα κατανάλωσης ισχύος, μπορεί να επιτευχθεί από το πλαίσιο διασύνδεσης των μελών του FANET, ανάλογα με τις αποστάσεις και την κατάσταση ισχύος του κάθε μέλους. Για τον βελτιστοποιημένο χειρισμό ισχύος, οι διαδικασίες προσομοίωσης προσφέρουν μία αναλυτική βάση υπολογισμού. Επιπρόσθετα, στην κατανάλωση ισχύος κάθε UAV συμβάλλει και το μέγεθος της ιπτάμενης συσκευής. Προφανώς, τα μεγάλων διαστάσεων UAVs απαιτούν σημαντικό μέρος της ισχύος για τη διασφάλιση της πτητικής τους κατάστασης. Από την άλλη πλευρά, τα UAVs μικρότερων διαστάσεων δαπανούν ένα σημαντικό μέρος της ισχύος τους για τις διορθωτικές κινήσεις που απαιτούνται για τη διασφάλιση του ύψους και της θέσεως, που υπόκεινται σε διαταραχές από την επίδραση φυσικών φαινομένων (π.χ. άνεμος).

Συμπερασματικά, το πρόβλημα της διαχείρισης ισχύος ενός FANET αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα, το οποίο επιδρά στην ανάπτυξη και τον καθορισμό των διασυνδέσεων μεταξύ του σμήνους, καθώς και στην ανάπτυξη της εφαρμογής για την οποία το FANET προορίζεται.

### **2.2.1 Wi-Fi (IEEE 802.11)**

Το Wi-Fi ή Wireless Fidelity είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας μικρής εμβέλειας που αποτελείται από ένα σετ προτύπων για το σχεδιασμό WLAN (ασύρματο τοπικό δίκτυο) στις ακόλουθες ζώνες συχνοτήτων: 2,4 GHz, 3,6 GHz, 5 GHz και 6 GHz. Για την παροχή της απαιτούμενης απόδοσης για δεδομένα μεγάλου μεγέθους πακέτων, όπως βίντεο και εικόνες, παραλλαγές του IEEE 802.11a / b / g / n / ac, μπορεί να είναι η κορυφαία επιλογή για πολλές εφαρμογές FANET. Η απόσταση μετάδοσης ενός παραδοσιακού συστήματος Wi-Fi είναι περίπου 100 m. Ωστόσο, η απόσταση μετάδοσης μπορεί να επεκταθεί έως και αρκετά χιλιόμετρα με τη βοήθεια ad-hoc δικτύωσης μεταξύ των UAVs. Σε ένα τυπικό δίκτυο 802.11, οι πελάτες (clients), βάσει ανταλλαγής μηνυμάτων ανακοίνωσης από τα σημεία πρόσβασης (APs) μπορούν να ανιχνεύσουν και να συσχετισθούν με αυτόματο τρόπο με ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) [69]. Με αυτόν τον τρόπο, μια συσκευή συμπεριφέρεται είτε ως πελάτης (client) είτε ως σημείο εξυπηρέτησης (Access Point – AP). Επιπλέον, αυτοί οι ρόλοι εκχωρούνται δυναμικά και μπορούν ακόμη και να εκτελεστούν ταυτόχρονα από την

ίδια συσκευή. Στην ερευνητική εργασία [70], στην οποία διερευνήθηκαν μετρήσεις απόδοσης σε όρους απόστασης, RSSI (Receive Signal Strength Indicator) και απόστασης ασύρματης σύνδεσης από UAV προς τον GS κόμβο, προτείνεται ότι η εφαρμογή ασύρματου δικτύου τύπου 802.11a μεταξύ UAVs και GS είναι εξαιρετικά χρήσιμη και αξιόπιστη.

### **2.2.2 Bluetooth (IEEE 802.15.1)**

Το Bluetooth λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 2,4 GHz χωρίς άδεια με απόσταση επικοινωνίας 10 έως 200 m. Η τεχνολογία Bluetooth μπορεί να βρεθεί σε πολλές εκδόσεις, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που κυμαίνεται από 1 έως 3 Mbps. Ωστόσο, ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων, μπορεί να ανέλθει έως και 24 Mbps. Η ομάδα προτυποποίησης του Bluetooth (SIG) προτείνει επίσης τη χρήση Bluetooth χαμηλής ενέργειας (BLE) στο πρότυπο Bluetooth 4.0. Το πρότυπο Bluetooth 5 [71] είναι η τελευταία έκδοση των βασικών προδιαγραφών Bluetooth. Το Bluetooth 5 εστιάζει κυρίως στη βελτίωση σε ταχύτητα, απόσταση μετάδοσης, την ενεργειακή απόδοση και τη συνύπαρξη με άλλες τεχνολογίες μικρής εμβέλειας. Επιπλέον, το Bluetooth 5 μπορεί επίσης να μεταδίδει δεδομένα μεγάλης πυκνότητας, τα οποία εκτείνονται πολύ πέρα από την τοποθεσία και περιλαμβάνει αρχεία πολυμέσων και διευθύνσεων URL. Λαμβάνοντας υπόψιν τις σημαντικές βελτιώσεις, φαίνεται ότι το Bluetooth 5 είναι ένας πιθανός υποψήφιος λόγω του χαμηλού κόστους και της χαμηλής ισχύος του για την ανάπτυξη μελλοντικών FANETs. Οι Asghar et al. [72] προτείνουν ένα υβριδικό σχήμα, χρησιμοποιώντας το 802.15.1 για το FANET. Στο προτεινόμενο σχήμα, η μετάδοση δεδομένων μεταξύ των μελών UAVs του δικτύου γίνεται με βάση το 802.15.1. Στην ερευνητική εργασία [73], οι μελετητές περιέγραψαν την εφαρμογή μιας πλατφόρμας ασύρματου δικτύου, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Bluetooth μέσω ενός αλγόριθμου χρονοπρογραμματισμού round robin. Το καθιερωμένο δίκτυο UAVs που βασίζεται σε Bluetooth περιλαμβάνει ένα κύριο σταθμό βάσης UAV και έως επτά σταθμούς clients UAVs. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η προτεινόμενη πλατφόρμα παρέχει αξιόπιστη επικοινωνία με χαμηλή υπολογιστική ισχύ. Οι Hoffmann et al. [74] διεξήγαγαν μια δοκιμαστική βάση χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνολογία για πολλαπλά UAVs.

### **2.2.3 Zigbee(IEEE 802.15.4)**

Η τεχνολογία ZigBee χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, που απαιτούν υψηλή διάρκεια ζωής της μπαταρίας και ασφαλή δικτύωση. Καλύπτει απόσταση που κυμαίνεται από 10 έως 100 m. Σε σύγκριση με το Bluetooth και το Wi-Fi, είναι λιγότερο ακριβό και απλούστερο. Λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων 2,4 GHz με ρυθμό δεδομένων 250 kbps. Διαθέτει 16 κανάλια και το

καθένα απαιτεί εύρος ζώνης 5 MHz. Στην ερευνητική εργασία [75], οι ερευνητές παρουσίασαν τον εντοπισμό ενός quadcopter σε κλειστό χώρο, χρησιμοποιώντας το ZigBee. Τα αποτελέσματα πιστοποιούν ότι το σύστημα εντοπισμού, χρησιμοποιώντας το ZigBee, είναι αποτελεσματικό και εύκολο στην ανάπτυξη. Οι Jiang et al. [76] χρησιμοποίησαν το Zigbee για προσγειώσεις UAVs, δοκιμάζοντας την ικανότητα επικοινωνίας και εκτίμησης θέσης. Η μελέτη καταδεικνύει σημαντική μείωση του σφάλματος εκτίμησης της θέσης. Οι Zafar et al. [77] πρότειναν ένα υβριδικό σχήμα όπου το ZigBee χρησιμοποιήθηκε για επικοινωνία εντός συμπλέγματος μικρού πλήθους κόμβων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποκαλύπτουν ότι το ZigBee μπορεί να είναι πιθανός υποψήφιος για εφαρμογές FANET χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.

#### **2.2.4 WiMAX (IEEE 802.16)**

Το WiMAX είναι ένα τεχνολογικό πρότυπο, που στοχεύει στην παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης σε μεγάλες αποστάσεις, με διάφορους τρόπους, που κυμαίνονται από συνδέσμους από σημείο σε σημείο έως πλήρη πρόσβαση κινητού τύπου. Η τεχνολογία αυτή έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί, τόσο σταθερές όσο και κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές. Υποστηρίζει ένα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως 75 Mbps για τις σταθερές εφαρμογές (20 έως 30 Mbps ανά συνδρομητή) και για κινητές εφαρμογές, ο ρυθμός δεδομένων εκτείνεται σε 30 Mbps (3 έως 5 Mbps ανά συνδρομητή) [78]. Το WiMAX έχει αναπτυχθεί για παροχή υψηλής ποιότητας πακέτων φωνής και βίντεο, διατηρώντας παράλληλα την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Όσον αφορά τα UAVs, το WiMAX θεωρείται η καταλληλότερη τεχνολογία για UAVs συστήματα διάσωσης σε εχθρικά περιβάλλοντα [79]. Στην ερευνητική εργασία [80], οι ερευνητές παρείχαν μία μεθοδολογία για το σχεδιασμό του δικτύου, όσον αφορά τον αριθμό και τη θέση των UAVs. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν την πιθανότητα για τον υπολογισμό των διαστάσεων γεωγραφικής κλίμακας του δικτύου, δηλαδή της θέσης και του ύψους πτήσης κάθε UAV, με εγγύηση ενός συγκεκριμένου QoS χρησιμοποιώντας τη διασύνδεση WiMAX.

#### **2.2.5 Long Term Evolution (LTE)**

Το LTE προσφέρει ασφαλή ασύρματη συνδεσιμότητα, κινητικότητα και υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, κάτι που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τον έλεγχο και την ασφάλεια, πέρα από τις περιπτώσεις χρήσης σε συνθήκες LOS. Το LTE είναι βελτιστοποιημένο για χρήση IP με κλιμάκωση εύρους ζώνης 20 MHz, 15 MHz, 10 MHz έως και λιγότερο από 5 MHz. Υποστηρίζει και τις δύο πολυπλέξεις (duplexing) διαίρεσης συχνότητας (FDD) (ζεύγη) και φάσματα duplexing διαίρεσης χρόνου (TDD) (χωρίς ζεύγη). Το βέλτιστο μέγεθος κυψέλης για ραδιοκάλυψη είναι 5 km, παρόλο που

μπορεί να επιτύχει μια λογική απόδοση εντός 30 km και να παρέχει αποδεκτή απόδοση έως και 100 km από την κυψέλη. Το δίκτυο LTE για χρήση σύνδεσης UAVs, έχει σημειώσει άνοδο τα τελευταία τρία χρόνια. Στην ερευνητική εργασία [81], το πρωτόκολλο LTE χρησιμοποιείται για διασύνδεση UAVs που πετούν σε χαμηλό ύψος. Η εργασία επισημαίνει ότι το υπάρχον δίκτυο LTE για κινητά μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποδοτικά σε σενάρια αντιμετώπισης καταστροφών, όταν χρησιμοποιηθούν UAVs. Οι Qazi et al [82] απέδειξαν την αποτελεσματικότητα ροής βίντεο παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, που βασίζεται σε διασυνδέσεις μέσω UAVs με το δίκτυο 4G-LTE. Η μελέτη διερεύνησε την απόδοση του δικτύου, σε σχέση με τις φυσικές πτυχές διάδοσης του ασύρματου δικτύου, χρησιμοποιώντας το Network Simulator-3. Ομοίως, στην ερευνητική εργασία [83], οι ερευνητές εξέτασαν δύο σενάρια στα οποία τα UAVs λειτουργούν είτε ως σταθμοί βάσης, που εκπέμπουν στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink), είτε ως εξοπλισμός χρήστη για μετάδοση στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink), χρησιμοποιώντας το δίκτυο LTE. Η εργασία επισημαίνει ότι το υπάρχον δίκτυο LTE, απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις για την ομαλή ενσωμάτωση των UAVs, ως τεχνολογία διασύνδεσής τους. Οι Nguyen et al. [84] διερεύνησαν την απόδοση της εναέριας συνδεσιμότητας σε αγροτικό δίκτυο LTE. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ορισμένα σύνθετα σχήματα παρέμβασης έχουν καλές δυνατότητες για την ανάπτυξη συνδεσιμότητας σε δίκτυα LTE σε αγροτικές περιοχές.

### 2.2.6 Δίκτυα 5<sup>ης</sup> Γενιάς (5G)

Μετά το 2G (GSM), το 3G (UMTS) και το 4G (LTE/WiMAX), η πέμπτη γενιά ή 5G επικοινωνιών είναι η τελευταία εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά του δικτύου περιλαμβάνουν υψηλό ρυθμό δεδομένων, μειωμένη καθυστέρηση, εξοικονόμηση ενέργειας, βελτιωμένη χωρητικότητα συστήματος και πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα. Αυτός ο τύπος διασύνδεσης παρέχει, ανά χρήστη, ταχύτητα 100 GB/s με χωρητικότητα έως και 1000 φορές μεγαλύτερη από τους προηγούμενους τύπους δικτύων [85]. Λόγω των προσφερόμενων χαρακτηριστικών της, η τεχνολογία 5G είναι έτοιμη να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στα συστήματα επικοινωνίας των UAVs και να υποστηρίξει μέσω αυτών, νέες εφαρμογές. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των UAVs σε περιβάλλον 5G, λιγότερο δυναμικά τμήματα δικτύου της αρχιτεκτονικής FANET, θα μπορούσαν να διασυνδεθούν με τον πυρήνα επίγειων δικτύων. Αυτό θα διευκολύνει την παροχή υπηρεσιών, όπως την παρακολούθηση ροής πολυμέσων, την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα [86] – [88]. Τις ενέργειες όπως η σύνδεση των UAVs με τη μονάδα βάσης (BBU) και τη συμμετοχή ενός σταθμού βάσης μακρο-κυψελών (MBS), διασφαλίζοντας την εκπλήρωση της απαίτησης για δυναμική ανασυγκρότηση ενός τέτοιου δικτύου. Επιπλέον, η συνδεσιμότητα, διαφέρει ανάλογα με τους παράγοντες που σχετίζονται με την παροχή υπηρεσιών και το υπό σχεδίαση δίκτυο. Στην ερευνητική εργασία [89], οι ερευνητές πρότειναν μια ιεραρχική αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων με κατανομημένα

χαρακτηριστικά, που επιτρέπει ομαλά την ενσωμάτωση UAVs σε δίκτυα ασύρματης επικοινωνίας νέας γενιάς. Επιπλέον, σύμφωνα με την εργασία [90], οι ερευνητές παρείχαν μια επισκόπηση για μερικές από τις πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες στο πεδίο διασύνδεσης των UAVs, αντιμετωπίζοντας την τεχνολογία 5G από την οπτική γωνία του φυσικού στρώματος, του επίπεδο δικτύου, την κοινή επικοινωνία, την επεξεργαστική ισχύ και την προσωρινή αποθήκευση. Η περίπτωση όπου UAVs συνδέονται ως σταθμοί βάσης (BS) για την παροχή συνδεσιμότητας δικτύου 5G σε αγροτικές περιοχές, διερευνώνται στην ερευνητική εργασία [91].

### 2.2.7 Δορυφορικά Δίκτυα (SATCOM)

Το SATCOM χρησιμοποιείται για αποστολή ηλεκτρομαγνητικών σημάτων από επίγειους σταθμούς σε διαστημικούς σταθμούς ή δορυφόρους, και το αντίστροφο. Στο SATCOM, διάφορες ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται από διαφορετικούς δορυφόρους. Οι ζώνες C, οι οποίες εξακολουθούν να είναι συνδεδεμένες με ορισμένα συστήματα, χρησιμοποιούν μια ζώνη ανερχόμενης ζεύξης 6 GHz και μια ζώνη κατερχόμενης ζεύξης στα 4 GHz. Οι X-Bands, από την άλλη πλευρά, που συνήθως χρησιμοποιούνται από τον στρατό και τα κυβερνητικά συστήματα, χρησιμοποιούν τα 8 GHz για uplink και τα 7 GHz για downlink. Οι Ku-Bands, λειτουργούν στα 14 GHz για uplink και 11-12 GHz για downlink. Επιπλέον, αυτές οι ζώνες συχνοτήτων γίνονται επίσης κορεσμένες. Ως εκ τούτου, οι Ka-Bands εξελίσσονται για να εφαρμοστούν ως εναλλακτικές για τη διασύνδεση. Οι Ka-Bands λειτουργούν σε ζεύξη ανόδου 30 GHz και 20 GHz για την ζεύξη καθόδου. Στην ερευνητική εργασία [92], οι ερευνητές μελέτησαν βασικές προδιαγραφές, όπως η δορυφορική ζεύξη για σύνδεση των UAVs σε uplink για μετάδοση εικόνας. Η δορυφορική σύνδεση επιτυγχάνει ένα μεγαλύτερο εύρος κάλυψης και παρέχει μετάδοση εικόνας με υψηλή ποιότητα ανάλυσης. Επιπλέον, στην ερευνητική εργασία [93], οι ερευνητές υπογράμμισαν τα κύρια προβλήματα πίσω από την εφαρμογή του SATCOM, για ζωντανή μετάδοση εικόνας και βίντεο, με τη βοήθεια micro και mini UAS. Τα δύο σημαντικά ζητήματα που προέκυψαν είναι το ανεπαρκές εύρος ζώνης και το υψηλό κόστος μετάδοσης δεδομένων.

Από την παραπάνω ανάλυση, γίνεται αντιληπτό ότι οι τεχνολογίες επικοινωνίας μικρής εμβέλειας όπως το Bluetooth, το ZigBee ή το Wi-Fi μπορεί να ληφθούν υπόψη για εφαρμογές FANET μεσαίου εύρους, βάσει των αποστάσεων και των απαιτήσεων απόδοσης. Ωστόσο, εάν η περιοχή κάλυψης είναι μεγάλη και αυτές οι μικρής εμβέλειας τεχνολογίες δεν είναι σε θέση να υποστηρίξουν τις απαραίτητες απαιτήσεις απόδοσης, μία επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας με τεχνολογίες όπως τα WiMAX, LTE, 5G και SATCOM μπορεί να είναι πολύ πιο κατάλληλες.

Συνοπτικά, με βάση τα χαρακτηριστικά μετάδοσης, υπάρχουν έγκυροι λόγοι για την επιλογή αυτών των τεχνολογιών:

- Λειτουργούν στο φάσμα χωρίς άδεια
- Δεν απαιτούν αυστηρή απώλεια
- Προσφέρουν σημαντικά ποσοστά κάλυψης
- Μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε μικρό πλήθος UAVs

Επιπλέον, λόγω του ότι σημαντικές βελτιώσεις επέρχονται στην τεχνολογία Bluetooth 5 ως προς την ταχύτητα, την κατανάλωση ενέργειας, την χωρητικότητα και την κάλυψη, αυτή η τεχνολογία διασύνδεσης συνιστά την καλύτερη επιλογή μεταξύ των προαναφερόμενων ασύρματων τεχνολογιών μικρής εμβέλειας. Ωστόσο, για βελτιστοποιημένες δυνατότητες, το Wi-Fi είναι ενσωματωμένο στο Bluetooth 5 και αποτελεί επίσης μία σημαντική επιλογή διασύνδεσης για τα FANETs δίκτυα.

### **2.3 Προτεινόμενο μοντέλο διασύνδεσης για την ανάπτυξη του FANET**

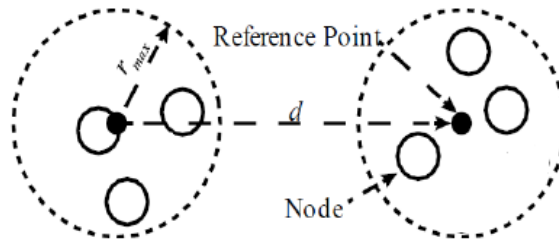
Για την ανάπτυξη της διασύνδεσης του FANET, προτείνεται ένα υβριδικό σχήμα (hybrid scheme), με χρήση τεχνολογιών διασύνδεσης Wi-Fi (802.11) και Bluetooth (802.15.1). Ο βασικός λόγος για την επιλογή αυτών των τεχνολογιών διασύνδεσης, είναι ότι προσφέρουν τα χαρακτηριστικά του χαμηλού κόστους (low-cost), χαμηλής κατανάλωσης ισχύος (low-power), σχετικά μεγάλης εμβέλειας (high range) και υψηλής ταχύτητας (high-speed). Για τη διασύνδεση στο σχήμα εισάγονται οι όροι: Bluetooth Slave (BS), Bluetooth Master (BM), και κεντρικού κόμβου διασύνδεσης Gateway (GW). Για τον εντοπισμό θέσεως κάθε UAV στο σχήμα, θεωρείται ότι γίνεται χρήση του συστήματος εντοπισμού GPS.

Το μοντέλο κινητικότητας προβλέπει την νομαδική κίνηση των κόμβων (nomadic community), η οποία επιτρέπει τυχαία μετακίνηση όλων των μελών του FANET, λαμβάνοντας υπόψιν τις εμβέλειες διασύνδεσης κάθε μέλους του σμήνους.

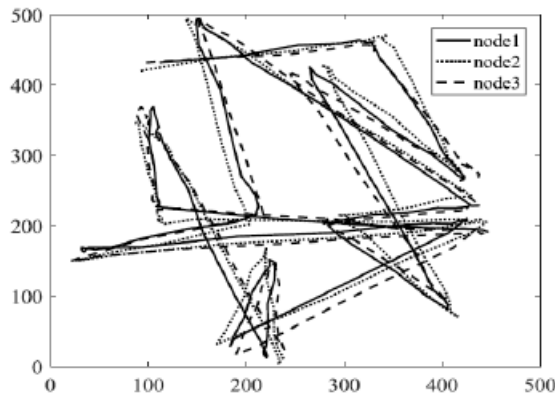
Τα μοντέλα κινητικότητας ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες: καθαρά τυχαιοποιημένη, εξαρτώμενη από το χρόνο, προγραμματισμένη διαδρομή, ομάδα και υβριδικό [94]. Για να διασφαλιστεί η κίνηση των UAVs σε μια συγκεκριμένη περιοχή, υπάρχουν πολλές καταστάσεις όπου μια ομάδα UAVs κινείται μαζί, ακολουθώντας ένα κοινό σημείο στο σύστημα FANET. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιείται κινητικότητα ομάδας σημείων αναφοράς (Reference Point Group Mobility RPGM) [95] για την προσομοίωση μιας ομάδας UAVs στο προτεινόμενο σχήμα. Στο μοντέλο RPGM, τα UAVs ομαδοποιούνται για να επιτύχουν μια συλλογική ενέργεια μετακινούμενα μαζί γύρω από ένα λογικό σημείο αναφοράς, δηλαδή, γύρω από έναν «αρχηγό» της ομάδας. Η συμπεριφορά της κίνησης του σημείου αναφοράς ορίζει την κίνηση ολόκληρης της ομάδας, συμπεριλαμβανομένης της τοποθεσίας, του ύψους

πτήσεως, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του σμήνους. Συνήθως, τα UAVs είναι ομοιόμορφα καταναμημένα εντός του γεωγραφικού πεδίου μιας ομάδας. Ο «αρχηγός» της ομάδας ακολουθεί ένα τυχαίο σημείο (Random WayPoint) RWP μοντέλο κινητικότητας, και τα άλλα UAVs κινούνται γύρω από το κέντρο με το δικό τους προφίλ κινητικότητας (βλέπε Σχήμα 16b) [96]. Αυτό το μοντέλο κινητικότητας έχει πολλές παραλλαγές, όπως η στήλη (CLMN) [95], η νομαδική κοινότητα (NC) [96] και το μοντέλο PRS.

Στο προτεινόμενο σχήμα, το BM-UAV κάθε ομάδας, βρίσκεται στο σημείο αναφοράς. Το ύψος πτήσης, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του BS-UAV, εξαρτώνται από ένα τέτοιο σημείο αναφοράς. Επιπλέον, η θέση των BS-UAVs ενημερώνεται σύμφωνα με το BM-UAV.



Σχήμα 15: Μοντέλο νομαδικής κινητικότητας RWP με έμφαση στις εμβέλεις διασύνδεσης (Nomadic Community – NC) [66]



Σχήμα 16: Μοντέλο κινητικότητας χρησιμοποιώντας σημείο αναφοράς (Reference Point Group Mobility – RPGM) [66]

Για την απαιτούμενη ισχύ του FANET, προτείνεται ένα μοντέλο διάδοσης ανάλογο αυτών που χρησιμοποιούνται για τα επίπεδα σήματος κατά τις ασύρματες μεταδόσεις. Το μοντέλο διάδοσης βασίζεται στις σχέσεις:

$$P_1(\text{dB}) = \begin{cases} 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) & \text{if } d \leq d_0 \\ 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 40 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

με παραμέτρους την απόσταση μεταξύ των μελών και το μήκος κύματος για την ασύρματη διασύνδεση. Για τη ζεύξη γίνεται χρήση του ελεύθερου μοντέλου διάδοσης (Friis equation):

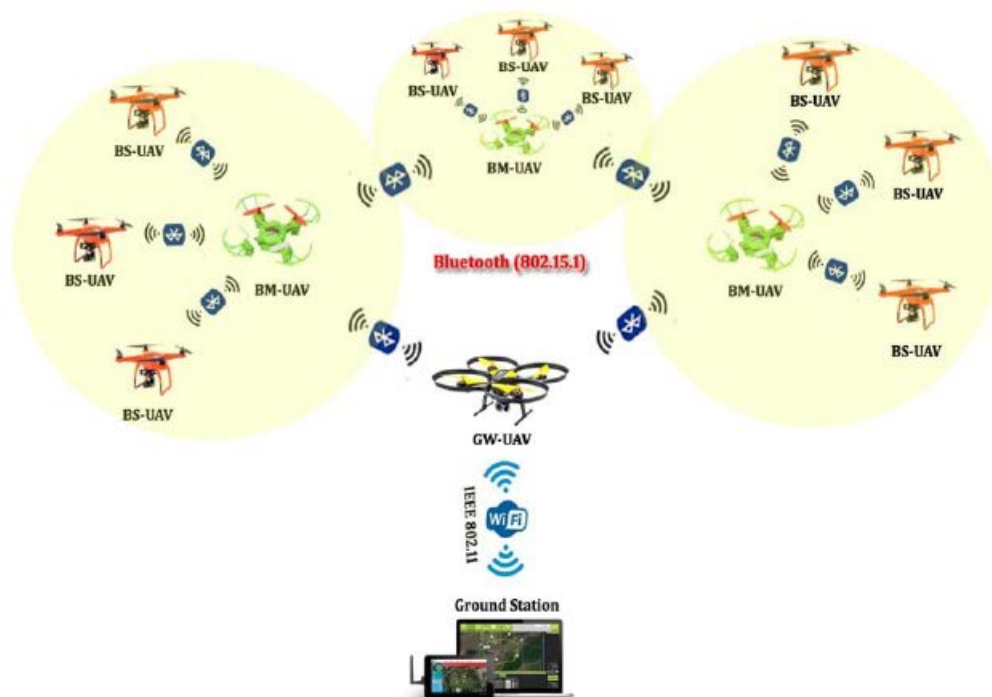
$$P_r = \frac{P_t G_t(\theta_t, \phi_t) G_r(\theta_r, \phi_r) \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (\text{Εξ. 2.2})$$

$$P_r = P_t G_t(\theta_t, \phi_t) G_r(\theta_r, \phi_r) \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (\text{Εξ. 2.3})$$

το οποίο λαμβάνει υπόψιν, τα κέρδη των κεραιών που μετέχουν στη ζεύξη.

#### 2.4 Αρχιτεκτονική και εφαρμογές του FANET

Η Αρχιτεκτονική διασύνδεσης για το FANET παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, δηλ. με χρήση των τεχνολογιών που επιλέχθηκαν και το ρόλο των κόμβων (Slave/Master/Gateway). Στο μοντέλο προτείνεται η διασύνδεση πολλαπλών ομάδων, υποστηρίζοντας παράλληλα, πολλά επίπεδα (multi-group multi-layer). Η διασύνδεση προβλέπει UAVs που διασφαλίζουν την τοπική διασύνδεση σε κάθε ομάδα του σμήνους, καθώς και ένα κεντρικό κόμβο δρομολόγησης (Gateway), ο οποίος υποστηρίζει τη διασύνδεση του σμήνους με το δίκτυο κορμού (Infrastructure):



Σχήμα 17: Απλή τοπολογία για την υποστήριξη ενός Πολυ-επίπεδου Πολλών-Ομάδων FANET [66]



## 2.5 Προσομοίωση του FANET και αποτελέσματα

Το προτεινόμενο σχήμα σχεδιάστηκε και μοντελοποιήθηκε στο περιβάλλον OPNET<sup>®</sup>. Οι μετρικές επιδόσεων του FANET, αφορούν στα χαρακτηριστικά:

- Ρυθμός Μετάδοσης (Throughput)
- Καθυστέρηση Μετάδοσης (delay - latency)

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για τη διαδικασία της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

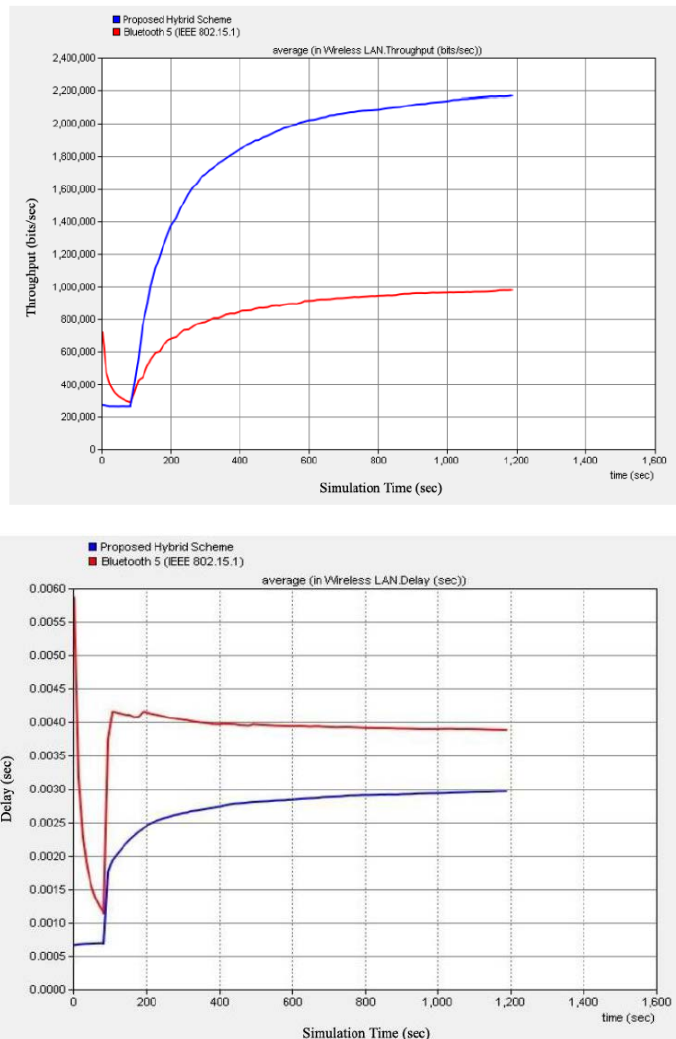
Πίνακας 5: Παράμετροι του Μοντέλου προσομοίωσης στο περιβάλλον OPNET<sup>®</sup> [66]

Parameter	Value
Area Dimensions	1 km × 1 km
Altitude of UAVs	25 m
Number of UAVs	42
Directional Gain	10 dBi
Frequency	2.4 GHz
Data Rates	2 Mbps, 11 Mbps
Packet Interval (s)	Exponential (1)
Packet Size(byte)	1024
Simulation Time	1600 s
Node Type	Mobile
Mobility Model	RPGM, RWP
Speed of UAVs	15 m/s
Transmission Power	-97 dBm

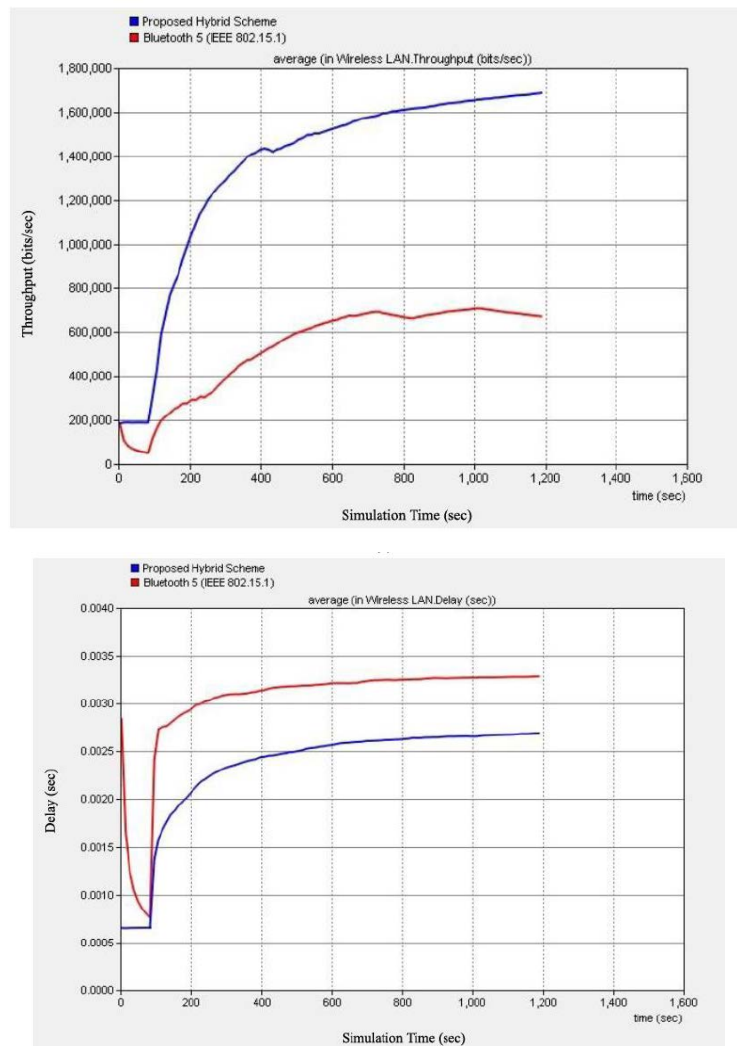
Το FANET κάλυψε μία περιοχή 1 km × 1 km με χρήση 42 UAVs. Προσομοιώθηκαν και τα δύο μοντέλα κινητικότητας που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (NC RWP και RPGM). Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση για τις μετρικές επίδοσης που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν. (Σχήμα 18-19)

Τα σχήματα απεικονίζουν την απόδοση του FANET σε όρους throughput και end-to-end delay, σύμφωνα με τα μοντέλα κινητικότητας RPGM και RWP, αντίστοιχα. Στα γραφήματα, ο άξονας x αναφέρεται στον χρόνο προσομοίωσης (sec), και ο άξονας y δηλώνει το throughput (bits/sec) και το delay (sec). Το προτεινόμενο σχήμα δοκιμάστηκε σε έκταση 1 km × 1 km με 42 UAVs. Επτά ζώνες θεωρήθηκαν, με την κάθε μία να αποτελείται από 6 UAVs. Πέντε από τα έξι UAVs ήταν εξοπλισμένα με 802.15.1, ενώ ένα UAV επικοινωνούσε και με τα δύο πρωτόκολλα (802.11 και 802.15.1). Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικά σενάρια για να μιμηθούν μια ομάδα UAVs, τόσο σε RPGM όσο και σε RWP. Ο Πίνακας 5 καθορίζει τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων. Από τα αποτελέσματα προσομοίωσης, είναι προφανές ότι οι επιθυμητές απαιτήσεις QoS πληρούνται από το προτεινόμενο σχήμα. Δηλαδή, παρέχει σημαντικές βελτιώσεις απόδοσης σε σύγκριση με το IEEE 802.15.1 όσον αφορά το

throughput και το end-to-end delay (Σχήμα 18). Στο αρχικό στάδιο της σύνδεσης, δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ του Bluetooth και του προτεινόμενου μοντέλου. Η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων του Wi-Fi είναι σχετικά χαμηλή λόγω της μεγάλης διάρκειας του χρόνου εγκατάστασης της σύνδεσης για την τεχνολογία Wi-Fi. Ως αποτέλεσμα, το προτεινόμενο υβριδικό υπερνικά τις αδυναμίες του μεγάλου αρχικού χρόνου σύνδεσης στο Wi-Fi, καθώς και τη χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης Bluetooth. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ελαφρά μείωση της απόδοσης του δικτύου, ιδίως σε σχέση με την αναφορά στο throughput και το delay, σύμφωνα με το μοντέλο κινητικότητας RWP (Σχήμα 19). Μπορεί να παρατηρηθεί, από το Σχήμα 18, ότι το RPGM παρέχει υψηλότερη απόδοση και ελάχιστη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και για τα δύο πρωτόκολλα IEEE 802.15.1 και το προτεινόμενο υβριδικό σχήμα, σε σύγκριση με το μοντέλο κινητικότητας RWP (Σχήμα 19). Αυτό συμβαίνει επειδή η κίνηση των UAVs, βάσει του μοντέλου RPGM, διέπεται από τον καθορισμό μιας συγκεκριμένης τροχιάς γύρω από ένα σημείο αναφοράς, δηλαδή, του «αρχηγού» της ομάδας.



Σχήμα 18: Μέσο throughput και delay για το RPGM Μοντέλο κινητικότητας [66]



Σχήμα 19: Μέσο throughput και delay για το RWP Μοντέλο κινητικότητας [66]

## 2.6 Εναλλακτικές τεχνικές διαμόρφωσης για τη διασύνδεση UAVs στο FANET.

### Το πρωτόκολλο LoRa

Το πρωτόκολλο LoRa [97], αποτελεί ένα σχήμα τεχνικής διαμόρφωσης διευρυμένου φάσματος (spread spectrum modulation), σχήμα το οποίο είναι βασισμένο στους μηχανισμούς τεμαχισμού με γρήγορους παλμούς (Chirp Spread Spectrum Modulation – CSS). Η διαμόρφωση συσχετίζει τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης (data rate) με την ευαισθησία που θέλει να επιτύχει για τη μετάδοση, για το δεδομένο εύρος ζώνης ενός καναλιού (bandwidth). Η τεχνική επιτυγχάνει ένα μεταβαλλόμενο ρυθμό μετάδοσης, χρησιμοποιώντας ορθογωνικούς κώδικες (orthogonal spreading factors), με στόχο την εκπομπή με σταθμιζόμενα επίπεδα ισχύος για το δεδομένο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση.

Το πρωτόκολλο LoRa είναι ένα πρωτόκολλο μετάδοσης χαμηλού επιπέδου (αντιστοιχεί στο φυσικό επίπεδο της διαστρωμάτωσης κατά OSI – PHY), χωρίς να

επιρεάζει τους μηχανισμούς μετάδοσης και λήψης από τα υψηλότερα επίπεδα της πρωτοκολλικής στοίβας. Επομένως, το συγκεκριμένο πρωτόκολλο φυσικού επιπέδου μπορεί να ενσωματωθεί για χρήση με τα ήδη υπάρχοντα ανώτερα επίπεδα μίας διαστρωμάτωσης.

### 2.6.1 Βασικές Αρχές Μετάδοσης σε κανάλι με θόρυβο

Κατά τη μετάδοση ψηφιακού σήματος σε κανάλι, παρουσία προσθετικού θορύβου, σημαντικό εργαλείο εκτίμησης του επιτυγχανόμενου ρυθμού μετάδοσης (bits/sec) είναι το θεώρημα των Shannon – Hartley. Ο υπολογιζόμενος θεωρητικός ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί για αξιόπιστη μετάδοση ονομάζεται χωρητικότητα του καναλιού μετάδοσης και υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$C = B * \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{Εξ. 2.4})$$

όπου:

C είναι η χωρητικότητα του καναλιού (bits/sec)

B ορίζει το bandwidth του καναλιού (Hz)

S είναι η μέση ισχύς εκπομπής σήματος (Watts)

N είναι η μέση ισχύς θορύβου που παρουσιάζεται στο κανάλι (Watts)

S/N είναι ο σηματοθορυβικός λόγος της μετάδοσης (αδιάστατος)

Θεωρώντας ότι ο σηματοθορυβικός λόγος S/N θα κρατηθεί σε μικρές τιμές, η εξίσωση λαμβάνει την προσεγγιστική μορφή:

$$\frac{C}{B} = 1.433 * \frac{S}{N} \quad (\text{Εξ. 2.5})$$

Από την παραπάνω μορφή προσεγγιστικά παρατηρούμε τη σχέση διασύνδεσης των μεγεθών:

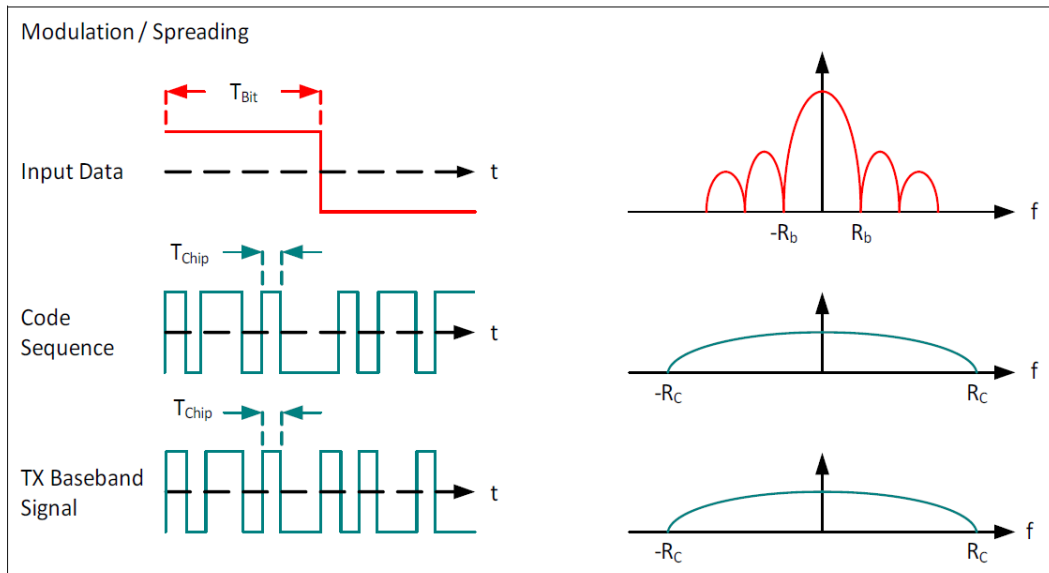
$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \quad (\text{Εξ. 2.6})$$

από την οποία μπορεί να εξαχθεί η σχέση:

$$\frac{N}{S} \approx \frac{B}{C} \quad (\text{Εξ. 2.7})$$

Από την τελευταία σχέση παρατηρούμε ότι για ένα κανάλι με δεδομένα επίπεδα θορύβου η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί μέσω του bandwidth που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση.

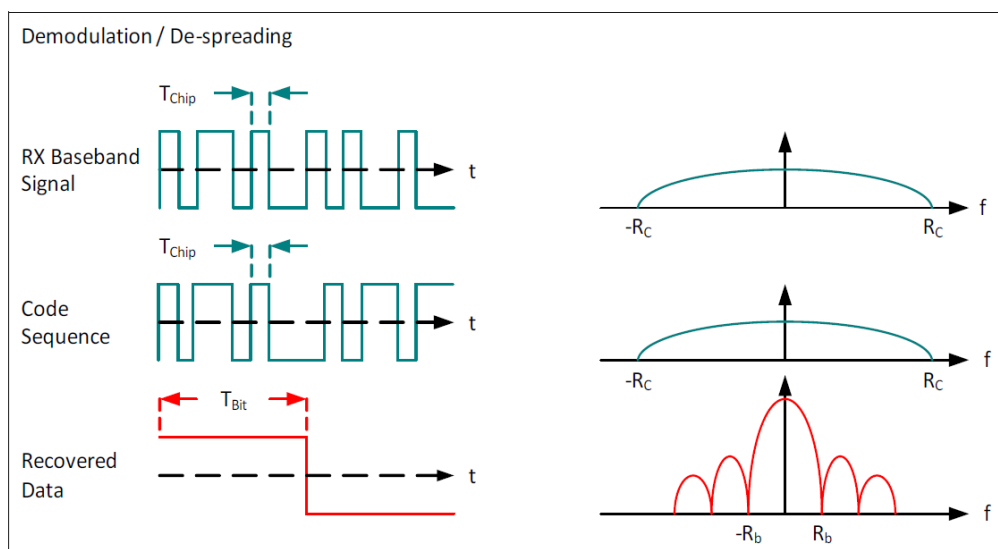
Για την εφαρμογή της τεχνικής διαμόρφωσης διευρυμένου φάσματος, χρησιμοποιείται ένας γρήγορος ορθογωνικός κώδικας με τη μορφή τετραγωνικών παλμών, ο οποίος πολλαπλασιάζει το σήμα προς μετάδοση. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η επίδραση της τεχνικής ως προς το εύρος ζώνης του σήματος που παράγεται.



Σχήμα 20: Τεχνική διαμόρφωσης διευρυμένου φάσματος με χρήση ορθογωνικού κώδικα [97]

Από το σχήμα παρατηρείται ότι ο ορθογωνικός κώδικας που τεμαχίζει σε chips τα ψηφιακά δεδομένα προς μετάδοση έχει ως αποτέλεσμα να επεκτείνει και να χαμηλώνει το πλάτος για το παραγόμενο φάσμα.

Η διαδικασία της ανάκτησης του διαμορφωμένου σήματος απαιτεί τον πολλαπλασιασμό με τον ορθογωνικό κώδικα, παράγοντας το αρχικό ψηφιακό σήμα όπως παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 21: Τεχνική αποδιαμόρφωσης διευρυμένου φάσματος με χρήση ορθογωνικού κώδικα [97]

Για τη σωστή εφαρμογή των τεχνικών απαιτείται γνώση του ορθογωνικού κώδικα και καλός συγχρονισμός (ορθογωνικού κώδικα και εισερχόμενου σήματος στον δέκτη). Ο ρυθμός τεμαχισμού (chip rate) σχετιζόμενος με το ρυθμό μετάδοσης (bit rate), αποτελεί ένα μέτρο για το εισαγόμενο κέρδος της διαμόρφωσης, όπως παρουσιάζεται υπολογιζόμενο σε (dB) από τη φόρμουλα:

$$G_p = 10 * \log_{10} \left( \frac{R_c}{R_b} \right) \text{ (dB)} \quad \text{(Εξ. 2.8)}$$

όπου:

$R_c$  είναι ο ρυθμός τεμαχισμού (chips/sec)

$R_b$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (bits/sec)

Η τεχνική της διαμόρφωσης διευρυμένου φάσματος έχει ως αποτέλεσμα την απόρριψη σημάτων παρεμβολής (interference), εκτοπίζοντας την επίδρασή τους εκτός του bandwidth που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση πληροφορίας. Η τεχνική αυτής της διαμόρφωσης με χρήση chip παλμών έχει χρησιμοποιηθεί από τη δεκαετία του 1940 σε στρατιωτικές εφαρμογές μετάδοσης – λήψης σημάτων. Η διαμόρφωση έχει αποδειχθεί εξαιρετικά εύρωστη σε μεταβολές του καναλιού μετάδοσης, οι οποίες αφορούν τα φαινόμενα της όδευσης πολλαπλών διαδρομών (multipath), των διαλείψεων (fading), του φαινομένου Doppler και των σκόπιμων παρεμβολών (jamming) στο κανάλι μετάδοσης.

### 2.6.2 Η τεχνική Διαμόρφωσης LoRa

Στη διαμόρφωση LoRa η εξάπλωση του φάσματος επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός chirp σήματος τεμαχισμού, το οποίο διαρκώς μεταβάλλεται στη συχνότητα. Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι οι ολισθήσεις στο χρόνο και στη συχνότητα (timing and frequency offsets), μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ισοδύναμες, μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα για κατασκευή κυκλωμάτων συγχρονισμού στους δέκτες. Το εύρος συχνοτήτων του σήματος chirp, είναι ισοδύναμο με το εύρος μετάδοσης (bandwidth) του σήματος πληροφορίας. Το σήμα πληροφορίας εξακολουθεί να διαμορφώνει με χρήση το σήμα chirp, το οποίο είναι μεγαλύτερης συχνότητας. Η διαμόρφωση για το ρυθμό μετάδοσης  $R_b$  προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$R_b = SF * \frac{1}{\left[ \frac{2^{SF}}{BW} \right]} \text{ bits/sec} \quad \text{(Εξ. 2.9)}$$

όπου:

SF είναι ο παράγοντας εξάπλωσης (spreading factor) με τιμές εκτεινόμενες από 7-12

BW είναι το εύρος ζώνης (Hz)

Η περίοδος μετάδοσης συμβόλου δίνεται από τη σχέση:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \text{ sec s} \quad (\text{Εξ. 2.10})$$

Οπότε, ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλου δίνεται από τη σχέση:

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \text{ symbols / sec} \quad (\text{Εξ. 2.11})$$

καταλήγοντας στο ρυθμό των chips παλμών:

$$R_c = R_s * 2^{SF} \text{ chips / sec} \quad (\text{Εξ. 2.12})$$

Οπότε προκύπτει ότι:

$$R_c = R_s * 2^{SF} \quad (\text{Εξ. 2.13})$$

$$R_c = \frac{BW}{2^{SF}} * 2^{SF} \text{ chips / sec} \quad (\text{Εξ. 2.14})$$

αποδεικνύοντας ότι ο ρυθμός του κώδικα ισούται με το χρησιμοποιούμενο Bandwidth. Ορίζοντας την ποσότητα ρυθμού κώδικα (rate code) μέσω της σχέσεως:

$$\text{Rate Code} = \frac{4}{4 + CR} \quad (\text{Εξ. 2.15})$$

όπου:

CR είναι το code rate που κυμαίνεται μεταξύ (1-4)

Προκύπτει ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι:

$$R_b = SF * \frac{4}{\left[ \frac{2^{SF}}{BW} \right] + CR} \quad (\text{Εξ. 2.16})$$

### 2.6.3 Βασικά χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης LoRa

Η διαμόρφωση LoRa είναι κλιμακούμενη ως προς το εύρος ζώνης (bandwidth) και τη συχνότητα (frequency). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση στενής ζώνης με τεχνική αναπήδησης συχνότητας (frequency hopping) καθώς και για εφαρμογές ευρείας ζώνης. Η προσαρμοστικότητα της διαμόρφωσης LoRa την καθιστά εξαιρετική για διάφορους τύπους υπηρεσιών και εφαρμογών. Η διαμόρφωση LoRa όπως και η FSK (Frequency Shift Keying), αποτελεί μία διαμόρφωση σταθερής περιβάλλουσας –

πλάτους (constant envelope). Τα διαμορφωμένα σήματα με την τεχνική LoRa είναι πολύ ανεκτικά σε παρεμβολές τόσο εντός όσο και εκτός ζώνης συχνοτήτων μετάδοσης (in-band and out-band interference). Οι παλμοί chirp που χρησιμοποιεί είναι ευρείας ζώνης και κατά συνέπεια η χρήση της LoRa προσφέρει ανοσία (immunity) σε οδεύσεις σήματος πολλαπλών διαδρομών (Multipath), καθώς και σε διαλείψεις (fading). Τα φαινόμενα Doppler έχουν μικρή επίδραση χρονικής ολίσθησης στα λαμβανόμενα σήματα από την διαμόρφωση LoRa. Αυτό ελαχιστοποιεί την ανάγκη για κυκλώματα ακρίβειας χρονικής αναφοράς (time reference) και συγχρονισμού στο δέκτη. Η LoRa είναι ιδανική για μεταδόσεις σε κινητά και ασύρματα συστήματα (mobile and wireless systems). Για καθορισμένη ισχύ μετάδοσης και ρυθμό (throughput), η κατανάλωση ισχύος (Link budget) ξεπερνά σημαντικά σε απόδοση τη συμβατική FSK διαμόρφωση. Η χρήση ορθογωνικών κωδίκων επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση σημάτων εντός του ίδιου καναλιού, στις ίδιες χρονικές περιόδους, χωρίς υποβάθμιση και παρεμβολή των παράλληλων μεταδόσεων. Η εγγενής ιδιότητα της διαμόρφωσης και η διακριτότητα που επιτρέπει, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας, την καθιστά κατάλληλη για χρήση σε εφαρμογές radar με στόχο τον εντοπισμό θέσης σε πραγματικό χρόνο.

Συνολικά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διαμόρφωσης LoRa είναι:

- Κλιμάκωση με βάση το εύρος συχνοτήτων (bandwidth scalable)
- Σταθερό Πλάτος/Χαμηλή Ισχύς μετάδοσης (Constant Envelope/Low power)
- Αξιοπιστία (High robustness)
- Ανοχή σε πολλαπλές διαδρομές σήματος/Διαλείψεις (Multipath/Fading Resistant)
- Ανοχή στο φαινόμενο Doppler (Doppler Resistant)
- Ικανότητα μετάδοσης σε μεγάλη απόσταση (Long Range Capability)
- Αυξημένη χωρητικότητα διαύλου μετάδοσης (Enhanced Network Capacity)
- Διακριτότητα στο πεδίο χρόνου/συχνότητας (Ranging/Localization)

#### 2.6.4 Σύγκριση επιπέδων ευαισθησίας μεταξύ των διαμορφώσεων LoRa και FSK

Θεωρώντας θορυβική επίδραση ανάλογη του εύρους συχνοτήτων που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση, για τη διαμόρφωση LoRa, το επίπεδο θορύβου δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Noise Floor} = 10 * \log_{10}(k * T * B * 1000)(\text{dBm}) \quad (\text{Εξ. 2.17})$$

όπου:

K η σταθερά Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$ )

T η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin



Όταν ο υπολογισμός για το επίπεδο θορύβου γίνεται σε dBm, η σχέση απλοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος στη μορφή:

$$\text{Noise Floor} = -174 + 10 * \log_{10}(B) (\text{dBm}) \quad (\text{Εξ. 2.18})$$

Η αντίστοιχη σχέση για τον προσδιορισμό του επιπέδου θορύβου για τη μετάδοση με χρήση της διαμόρφωσης FSK, ορίζεται ως TXVR Noise Floor και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{TXVR Noise Floor} = -174 + (B * 1.5) + D_{\text{SNR}} + \text{NF} \quad (\text{dBm}) \quad (\text{Εξ. 2.19})$$

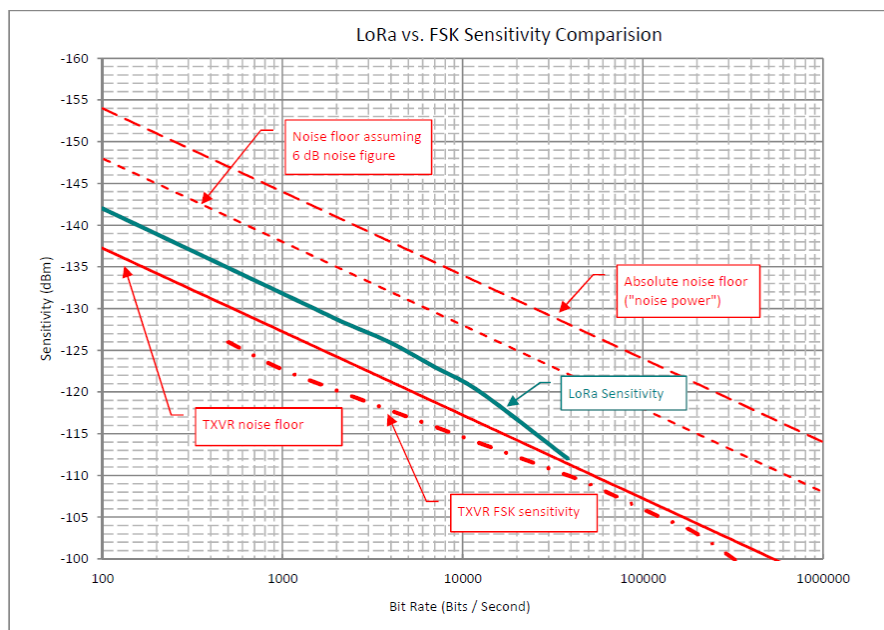
όπου:

$B * 1.5$  είναι το ιδανικό εύρος συχνοτήτων (bandwidth) για διαμόρφωση GFSK

$D_{\text{SNR}}$  είναι ο απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος για την αποδιαμόρφωση (περίπου 10 dB)

NF είναι η εικόνα θορύβου (noise figure) για το δέκτη (περίπου 6 dB)

Με σύγκριση των ευαισθησιών θορύβου για τις δύο διαμορφώσεις συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης, προκύπτει το διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 22: Σύγκριση του επιπέδου ευαισθησίας για τις διαμορφώσεις LoRa και FSK [97]

Από το διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί, ότι η διαμόρφωση LoRa προσφέρει μία τυπική βελτίωση της τάξης των 10 dB, σε σχέση με τη διαμόρφωση GFSK και για το λόγο αυτό παρουσιάζει μία σημαντική βελτίωση της ευαισθησίας για το δέκτη σε σχέση με την FSK. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι εάν η εικόνα θορύβου (NF) προστεθεί στην απόλυτη εικόνα θορύβου του διαγράμματος, η ευαισθησία που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση της διαμόρφωσης LoRa είναι μεταξύ του επιπέδου των 6 dB σε σχέση με το επίπεδο θορύβου.

### 2.6.5 Ανάλυση απωλειών ισχύος μετάδοσης (Link Budget)

Η ανάλυση απωλειών ισχύος κατά τη μετάδοση σε ένα ασύρματο σύστημα ή σε ένα δίκτυο, αποτελεί ένα μέτρο όλων των κερδών και απωλειών από τον πομπό, διαμέσου του καναλιού μετάδοσης, προς το δέκτη. Τα κέρδη και οι απώλειες συμπεριλαμβάνουν τα εισαγόμενα κέρδη από τις διατάξεις που μετέχουν στη μετάδοση (ενισχυτές, κεραίες, κ.λπ.), καθώς επίσης και τις απώλειες που σχετίζονται με το κανάλι μετάδοσης (propagation channel). Οι απώλειες του καναλιού – διαύλου μετάδοσης μπορεί να βασίζονται σε πραγματικές μετρήσεις ή μοντέλα εκτίμησης του καναλιού.

Η εξίσωση για την ανάλυση των απωλειών ισχύος κατά τη μετάδοση δίνεται από τη σχέση:

$$P_{RX} \text{ (dBm)} = P_{TX} \text{ (dBm)} + G_{SYSTEM} \text{ (dB)} - L_{SYSTEM} \text{ (dB)} - I_{CHANNEL} \text{ (dB)} - M \text{ (dB)} \quad (\text{Εξ. 2.20})$$

όπου:

$P_{RX}$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος που προκύπτει στο δέκτη

$P_{TX}$  είναι ο σηματοθορυβικός λόγος στον πομπό μετάδοσης

$G_{SYSTEM}$  είναι τα εισαγόμενα κέρδη κατά τη μετάδοση που σχετίζονται με τις συσκευές

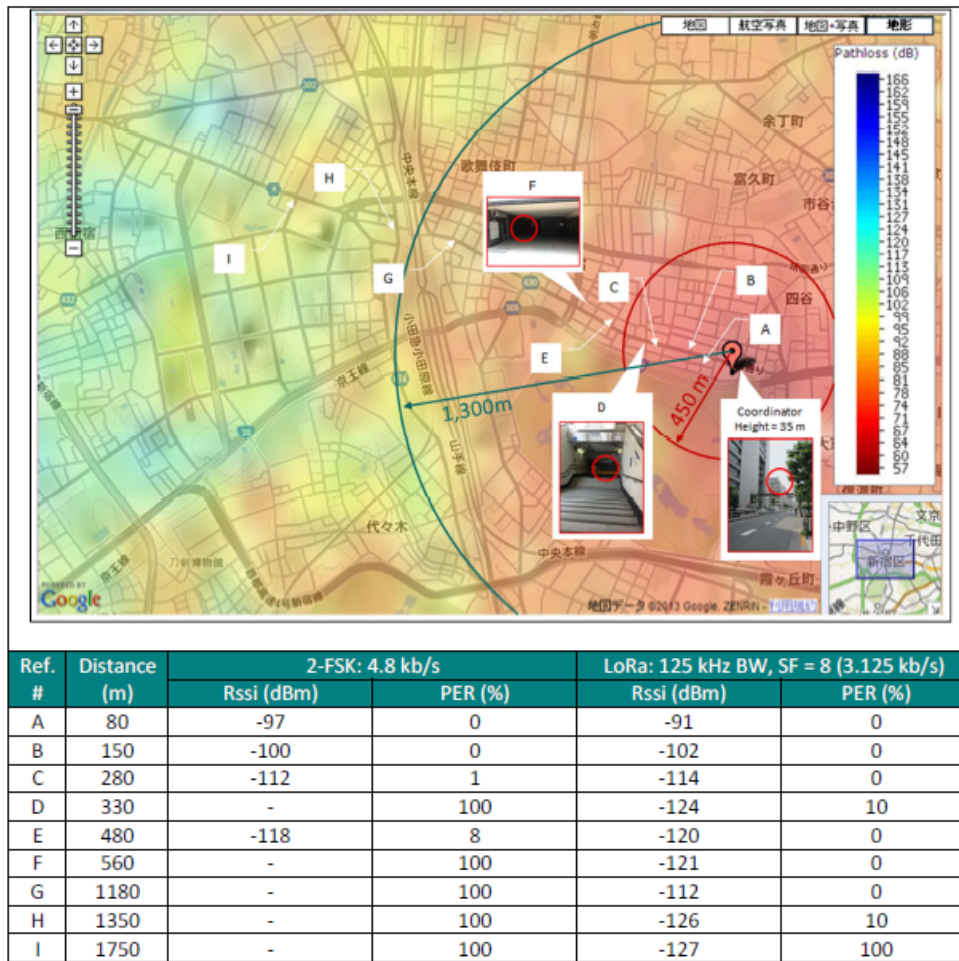
$L_{SYSTEM}$  είναι οι εισαγόμενες απώλειες κατά τη μετάδοση που σχετίζονται με τις συσκευές

$L_{CHANNEL}$  είναι οι απώλειες που σχετίζονται με το κανάλι μετάδοσης

$M$  είναι το επίπεδο εξασθένησης (διάλειψης)

### 2.6.6 Δοκιμές Δικτύου και σύγκριση επιδόσεων της διαμόρφωσης LoRa

Για τον έλεγχο της αποδοτικότητας της διαμόρφωσης LoRa σε σχέση με την FSK, έγιναν μετρήσεις πραγματικού δικτύου σε αστικό περιβάλλον, στην περιοχή Shinjuku (μητροπολιτική περιοχή στο Τόκυο), στην Ιαπωνία. Μία κάτοψη της περιοχής των δοκιμών παρουσιάζεται στο χάρτη:



Σχήμα 23: Περιοχή Shinjuku για την εφαρμογή μετρήσεων δικτύου [97]

Κατά την εφαρμογή μετρήσεων στο δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν οι δύο τύποι διαμορφώσεων LoRa και FSK. Για τις μετρήσεις μεταδόθηκαν πακέτα μικρού μεγέθους με ισχύ εξόδου στα +13 dBm. Όπως μπορεί να γίνει εμφανές από το χάρτη περιγραφής της περιοχής, πρόκειται για ένα αστικό και ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον, όπου η διαμόρφωση LoRa έχει σχεδόν τριπλάσια απόδοση σε σχέση με την FSK.

Για τις μετρήσεις μετάδοσης χρησιμοποιήθηκαν 12 FSK κανάλια στενής ζώνης, με ρυθμό μετάδοσης 1.2 Kbps σε κάθε κανάλι, επιτυγχάνοντας συνολικά ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των  $12 \times 1.2 = 14.4$  Kbps. Για τη μετάδοση με χρήση της διαμόρφωσης LoRa χρησιμοποιήθηκε ένα κανάλι των 125 kHz, λαμβάνοντας το πλεονέκτημα της χρήσεως των ορθογώνιων κωδικών μετάδοσης. Η ισοδύναμη χωρητικότητα για το κανάλι υπολογίστηκε στα 21.531 Kbps.

Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις δικτύου ως προς την απώλεια ισχύος μετάδοσης (Link budget) στα σημεία των δεκτών, θεωρώντας μία ευαισθησία στους δέκτες της τάξεως των -122 dBm (τυπική ευαισθησία για ένα δέκτη FSK) παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6: Απώλειες Ισχύος μετάδοσης για τα σημεία των δεκτών [97]

Mode	Equivalent bit rate (kb/s)	Sensitivity (dBm)	$\Delta$ (dB)
FSK	1.2	-122	-
LoRa SF = 12	0.293	-137	+15
LoRa SF = 11	0.537	-134.5	+12.5
LoRa SF = 10	0.976	-132	+10
LoRa SF = 9	1757	-129	+7
LoRa SF = 8	3125	-126	+4
LoRa SF = 7	5468	-123	+1
LoRa SF = 6	9375	-118	-3

Από τον πίνακα προκύπτει ότι ακόμη και για τετραπλάσιους ρυθμούς μετάδοσης η διαμόρφωση LoRa προσφέρει ίδια επίπεδα ευαισθησίας με ένα συμβατικό σύστημα FSK. Στους ίδιους ρυθμούς μετάδοσης και για τις δύο διαμορφώσεις, η LoRa προσφέρει μία αύξηση της ευαισθησίας της τάξης των 7 – 10 dB. Οι μεταδόσεις πακέτων ίδιου μήκους με χρήση της διαμόρφωσης LoRa, λόγω του υψηλότερου ρυθμού απασχολούν το δίκτυο για το  $\frac{1}{4}$  του αντίστοιχου χρόνου σε σχέση με την FSK. Επομένως, κατά την εφαρμογή ενός συστήματος με διαμοίραση στο πεδίο του χρόνου [Time Division Duplexing (TDD)], η διαμόρφωση LoRa προσφέρει δυνατότητα διασύνδεσης τετραπλάσιου αριθμού συσκευών σε σχέση με την FSK.

### 2.6.7 Η χρήση της LoRa ως τεχνολογία διασύνδεσης των μελών UAVs ενός FANET

Από τις προηγούμενες παραγράφους γίνεται εμφανές ότι η διαμόρφωση LoRa αποτελεί ένα σοβαρό υποψήφιο για την αντικατάσταση των τεχνολογιών επικοινωνίας φυσικού στρώματος, με ιδιαίτερα καλά χαρακτηριστικά. Η χρήση της δεδομένης τεχνολογίας διαμόρφωσης επιλύει σημαντικά προβλήματα που εμφανίζονται κατά την δικτυακή διασύνδεση των μελών ενός FANET, όπως:

- Η επίδραση θορύβου καναλιού στους πομποδέκτες
- Τα φαινόμενα σκίασης λόγω κινητικότητας
- Η απόρριψη των φαινομένων Doppler κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας ενός κινούμενου οχήματος
- Η ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής – λήψεως
- Η ενοποίηση των καναλιών πλοήγησης και μετάδοσης δεδομένων

Για το λόγο αυτό, εκτός από τα πρωτόκολλα διασύνδεσης τύπου Wi-Fi, εναλλακτικά η διαμόρφωση LoRa μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία και διασύνδεση των μελών UAVs ενός FANET. Τα αναπτυσσόμενα κανάλια με αυτό τον τύπο διαμόρφωσης είναι ικανά να φιλοξενήσουν τόσο τη μετάδοση της επικοινωνίας

δεδομένων, όσο και τα δεδομένα πλοήγησης και κατεύθυνσης που απαιτούνται για τον έλεγχο πτήσης των UAVs.

## 2.7 Νέα πρωτόκολλα για την κάλυψη των αναγκών διασύνδεσης των UAVs σε FANETs

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που αφορούν σε FANETs προέρχονται από διαφορετικές πηγές και χώρους πρωτυποποίησης. Η διαστρωμάτωση κατά OSI των προτεινόμενων πρωτοκόλλων για FANETs, παρουσιάζεται στον πίνακα [99] που ακολουθεί:

Πίνακας 7: Διαμόρφωση στοίβας πρωτοκόλλων επικοινωνίας για τα δίκτυα FANET [99]

Non-safety Applications IMC Protocol [15]	Safety Applications SAE J2735
Transport Layer TCP/UDP	WSMP IEEE 1609.2 (Security) IEEE 1609.3
Network Layer IPv6 Routing Protocol of [13]	
LLC IEEE 802.2	
MAC Layer IEEE 802.11p IEEE 1609.4 USMP [12] AMUAV [14]	
Physical Layer IEEE 802.11p USMP [12]	

Η διαστρωμάτωση για την εφαρμογή υπηρεσιών δικτύου για FANETs είναι πιο παραδοσιακή και κάνει χρήση ήδη έτοιμων πρωτοκόλλων που έχουν αναπτυχθεί για τη διασύνδεση στα δίκτυα κορμού κινητής – σταθερής επικοινωνίας και μετάδοσης δεδομένων. Το πρωτόκολλο USMP (UAV Search Mission Protocol) αποτελεί ένα πρωτόκολλο που συνδυάζει την ενδο-επικοινωνία μεταξύ UAVs και των γεωγραφικών διασυνδέσεων δρομολόγησης. Η ενημέρωση θέσης (Location Updates) και η αποφυγή συγκρούσεων (way point conflict resolution) αποτελούν σημαντικά πεδία έρευνας. Η διαδικασία του Location Update όπως υποστηρίζεται από το USMP πρωτόκολλο, βασίζεται στις ακόλουθες δύο σχεδιαστικές μεθοδολογίες: Στην πρώτη βάση σχεδίασης τα μηνύματα διέρχονται μέσω των γειτονικών UAVs, ενώ στη δεύτερη βάση σχεδίασης χρησιμοποιείται η διάχυση (broadcasting) της πληροφορίας μέσω της τεχνικής Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) για την ενημέρωση του Location Update. Το USMP πρωτόκολλο βασίζεται σε σημαντικούς παραμέτρους όπως είναι η ισχύς εκπομπής (transmission power), το πλήθος των συμμετεχόντων UAVs στο σμήνος (swarm size), οι τύποι των αισθητήρων καθώς και η αρχική θέση κάθε μέλους του σμήνους.

Σημαντικός επίσης, είναι ο τύπος των κεραιών επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε κάθε ιπτάμενο όχημα. Προφανώς, έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί ευρυγώνιες αλλά και κατευθυντικές κεραιές στις διάφορες μελέτες. Οι κεραιές αυτών των τύπων μπορούν να συνυπάρχουν στο UAV ταυτόχρονα και η αλλαγή της σύνδεσης από την μία κεραία στην άλλη μπορεί να γίνει με χρήση του πρωτοκόλλου πληροφορίας (Information Table). Η διπλή χρήση κεραιών διαφορετικών τύπων υποστηρίζεται ότι μπορεί να λύσει με αποδοτικό τρόπο το πρόβλημα συνεχούς διασύνδεσης μεταξύ των UAVs που απαρτίζουν το σμήνος των ιπταμένων κόμβων, χωρίς να παρεμβάλλεται επίγειος σταθμός. Το πρωτόκολλο αυτό μπορεί να συνδυαστεί με το Global Positioning System – GPS και το Inertial Measurement Unit – IMU, για την ενημέρωση των θέσεων πτήσης (Location Update). Η μετάδοση των πακέτων επικοινωνίας σε φυσικό επίπεδο χρησιμοποιεί το IEEE 802.11 πρότυπο. Το επίπεδο MAC χειρίζεται και το ύψος πτήσεως των UAVs.

Τα νέα αυτά πρωτόκολλα, υποδηλώνουν την ανάγκη για επέκταση των λειτουργιών των συστημάτων, έτσι ώστε να μπορούν να υποστηριχθούν τα χαρακτηριστικά των κινούμενων UAVs σε ένα περιβάλλον δικτύου FANET για τη μετάδοση δεδομένων. Είναι σαφές και έχει επισημανθεί και στις προηγούμενες ενότητες, ότι τα υπάρχοντα πρωτόκολλα (σε οποιοδήποτε επίπεδο της διαστρωμάτωσης κατά OSI και αν απευθύνονται), έχουν σχεδιαστεί με φιλοσοφία ενός επίγειου δικτύου κάλυψης, όπου οι σταθμοί βάσης για την παροχή των υπηρεσιών δικτύου είναι σταθεροί, ενώ οι χρήστες αυτού του δικτύου είναι κινούμενοι. Η φιλοσοφία στα δίκτυα FANETs είναι εντελώς διαφορετική. Στα δίκτυα FANETs και οι σταθμοί βάσης (μερικώς) αλλά και οι χρήστες μπορεί να είναι κινούμενοι ταυτόχρονα. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη δημιουργίας νέων πρωτοκόλλων για την κάλυψη των ιδιαίτερων αναγκών των δικτύων FANETs.

### 3. Πειραματικές Μετρήσεις σε δίκτυα FANETs μικρής κλίμακας

#### 3.1 Ανάπτυξη του δικτύου FANET μικρής κλίμακας. Μεθοδολογία και Εξοπλισμός

Κατά την εκπόνηση της ερευνητικής εργασίας των *Perez et al.* [100], για την εφαρμογή ενός δικτύου FANET μικρής κλίμακας χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά προϊόντα, τόσο για τις ιπτάμενες συσκευές (drones), όσο επίσης και για τον εξοπλισμό που απαιτείται για την κάλυψη και ανάπτυξη ενός δικτύου Wi-Fi [100]. Η πλατφόρμα Intel Galileo χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του κεντρικού συστήματος. Η αναπτυξιακή πλατφόρμα βασίζεται στον επεξεργαστή SoC X1000 Intel® 32 bit στα 400 MHz. και χρησιμοποιούσε λειτουργικό Linux quark 3.19.8 yocto-standard. Για την τροφοδοσία του συστήματος χρησιμοποιήθηκε μία μπαταρία 10400 mAh., που επιτρέπει 15 ώρες συνεχόμενης χρήσης για το αναπτυξιακό. Για την ασύρματη δικτύωση χρησιμοποιήθηκε η κάρτα Intel Dual Band Wireless-AC 7260, η οποία συνδεόταν στην αναπτυξιακή πλατφόρμα μέσω διαύλου PCI Express®. Η κάρτα για την ασύρματη δικτύωση επιτρέπει μέγιστο ρυθμό επικοινωνίας 867 Mbps και υποστηρίζει τα πρωτόκολλα ασύρματης δικτύωσης 802.11a/b/g/n/ac. Για τη διασύνδεση χρησιμοποιήθηκε μία κεραία ευρέος λοβού με κέρδος 5 dBi. Για την εκτίμηση των μοντέλων επικοινωνίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ανοικτού χώρου Friis και το μοντέλο Wireless World Initiative New Radio (WINNER) D1. Με βάση αυτά τα εργαλεία, υπολογίστηκε η ραδιοκάλυψη για πολλές εκδοχές των πρωτοκόλλων ασύρματης δικτύωσης Wi-Fi.

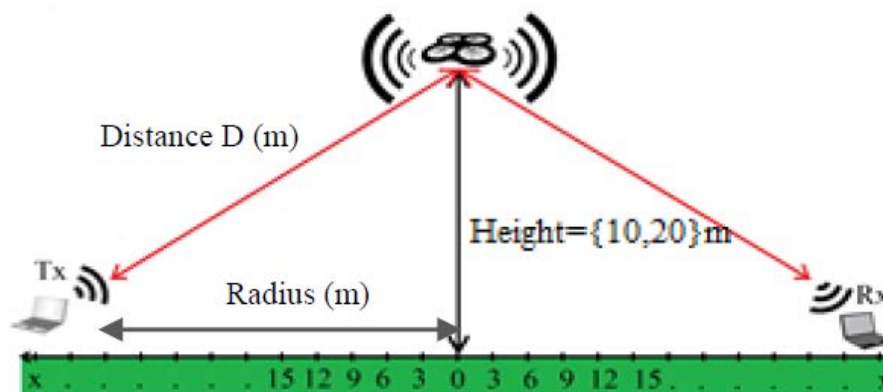
Για τη διασύνδεση των συσκευών χρησιμοποιήθηκε τόσο το Access Point Mode, όπου η κεντρική συσκευή εκτελεί χρέη router, καθώς και η απευθείας διασύνδεση μεταξύ κόμβων που επιτρέπουν, τόσο διεργασίες σε επίπεδο terminal και router για κάθε συσκευή ταυτόχρονα. Η χρήση αυτού του μοντέλου έγινε για να μπορεί να υποστηρίξει ad-hoc εφαρμογές για το πειραματικό δίκτυο FANET.

Για τη διασύνδεση δύο τέτοιων ιπτάμενων συσκευών επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν και δύο επίγειες βάσεις (end devices), οι οποίες ήταν δύο φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές (laptops) που βασίζονται σε λειτουργικό Ubuntu Linux. Τα laptops υποστήριζαν ασύρματη διασύνδεση Wi-Fi, με βάση τα IEEE 802.11a/b/g/n πρωτόκολλα. Η συσκευή με την αναπτυξιακή κάρτα Intel Galileo ήταν πάντοτε το κεντρικό σύστημα (κεντρικός κόμβος). Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο BATMAN για ad-hoc δρομολόγηση. Οι μετρικές για την επίδοση του δικτύου υπολογίστηκαν με χρήση του εργαλείου iPerl3.

Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν προφίλ μετάδοσης σταθερού ρυθμού (Constant Bit Rate – CBR communication profiles). Η διάρκεια των μεταδόσεων ήταν 30 sec και

χρησιμοποιήθηκαν ρυθμοί μετάδοσης των 1, 3, 5, 7, 9 και 11 Mbps. Τα επίπεδα σήματος μετρήθηκαν με χρήση του Rhode&Schwarz FSH3 αναλυτή φάσματος. Τα UAV που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εμπορικά drones Idea-Fly IFLY-4S, ικανά να μεταφέρουν φορτίο 700 g και η τοποθέτηση τους έγινε σε ύψη 10 και 20 m κατά τις φάσεις διεξαγωγής των πειραμάτων. Για τη μέτρηση της καταναλισκόμενης ισχύος χρησιμοποιήθηκε διάταξη αμπερομέτρου-βολτομέτρου επί των γραμμών της τροφοδοσίας της διάταξης (αναπτυξιακό Galileo).

Για τη μέτρηση κάλυψης περιοχής, θεωρήθηκε επίπεδη περιοχή χωρίς εμπόδια που διασφαλίζει συνεχώς συνθήκες LoS.



(a) Diagram



(b) Real snapshot

Σχήμα 24: Περιοχή κάλυψης και πεδίο μετρήσεων [100]

### 3.1.1 Θεωρητική Ανάλυση των μοντέλων διάδοσης

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται τόσο η θεωρητική μελέτη της περιοχής κάλυψης στην οποία μπορεί να φτάσει ένα UAV με ένα ενσωματωμένο Intel Galileo, όσο και τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Για τη θεωρητική μελέτη, θεωρήθηκε ότι το αναπτυσσόμενο σενάριο ήταν μια ανοιχτή περιοχή, χωρίς εμπόδια ή οποιαδήποτε άλλη πηγή παρεμβολών, εξ'ου και η υπάρχουσα μόνιμη οπτική



επαφή μεταξύ του ενδιάμεσου κόμβου (UAV) και των τελικών σημείων επικοινωνίας. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ανάλυση της απώλειας διάδοσης σήματος πραγματοποιήθηκε μέσω δύο γνωστών μοντέλων διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή του μοντέλου Ελεύθερου Χώρου (Friis) [101] και του μοντέλου WINNER D1 [102]. Το μοντέλο Free Space χρησιμοποιείται συνήθως για να προβλέψει την ισχύ του σήματος όταν υπάρχει LOS μεταξύ πομπού και δέκτη και δεν υπάρχουν κοντινά αντικείμενα που ενδέχεται να εμποδίσουν την επικοινωνία. Αυτό το μοντέλο ορίζεται από την μαθηματική έκφραση που ακολουθεί. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί αυστηρά αυτό το μοντέλο, πρέπει να εφαρμοστεί υπό ακριβείς συνθήκες σε πολύ μακρινή απόσταση. Αυτός ο όρος πληρείται στο εξεταζόμενο περιβάλλον λόγω του μικρού μεγέθους των χρησιμοποιημένων κεραιών και των μεγάλων αποστάσεων που καλύπτονται από το προτεινόμενο σύστημα [101].

Με τη σειρά του, το μοντέλο καναλιού WINNER είναι ένα στοχαστικό μοντέλο που προβλέπει απώλειες που εισάγονται από το κανάλι για διαφορετικούς τύπους περιβάλλοντος. Η παραλλαγή WINNER D1 ήταν το συγκεκριμένο μοντέλο που επιλέχθηκε, λόγω των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών του υπό μελέτη σεναρίου, δηλαδή ενός ανοιχτού εξωτερικού περιβάλλοντος χωρίς εμπόδια και με τον σταθμό βάσης να βρίσκεται σε υπερυψωμένη θέση. Έτσι, διασφαλίζεται η συνθήκη LOS μεταξύ του UAV και των άλλων κόμβων που συνθέτουν το δίκτυο. Οι εξισώσεις διάδοσης σήματος βασίστηκαν στο WINNER D1 και υπολογίστηκαν με τιμές για τις παραμέτρους  $A=21.5$ ,  $B=44.2$  και  $C=20$ .

$$\begin{aligned} L_{\text{PROP}} &= 10 \log_{10} (4\pi d / \lambda)^2 = \\ &= 20 \log_{10} (d(\text{m})) + 20 \log_{10} (f(\text{Hz})) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right) \\ &= 20 \log_{10} (d(\text{m})) + 20 \log_{10} (f(\text{Hz})) - 27.55 \end{aligned} \quad (1) \quad (\text{Εξ. 3.1.1-2})$$

$$L_{\text{PROP}} = A \cdot \log_{10} (d(\text{m})) + B + C \cdot \log_{10} \left( \frac{f_c(\text{GHz})}{5.0} \right) \quad (2)$$

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψιν μια ισχύ μετάδοσης τόσο για την ανερχόμενη όσο και για την κατερχόμενη ζεύξη, των 20 dBm (100 mW) και τις χαρακτηριστικές τιμές κέρδους και ευαισθησίας κάθε ασύρματης κάρτας, όπως ορίζεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών, υπολογίζονται οι μέγιστες αποστάσεις κάλυψης για τις διάφορες εκδόσεις και λειτουργίες bitrate του προτύπου IEEE 802.11. Αυτά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** και Πίνακας 9, για το downlink και το uplink αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σενάριο για αυτούς τους υπολογισμούς παρουσιάζεται στο Σχήμα 24, υποθέτοντας ότι το drone βρίσκεται σε ύψος 10 m. Μετά από αυτήν τη θεωρητική μελέτη, η ισχύς του σήματος αξιολογήθηκε επίσης στο πραγματικό πείραμα όπως περιγράφηκε προηγουμένως.

Πίνακας 8: Συγκρίσεις για τη ραδιοκάλυψη (uplink – downlink) [100]

Standard		Rate (Mbps)	Prop. Mod	Radius (m)	Max D (m)
2.4 GHz	802.11b	11	Friis	6719	6718,9
			Winner D1	4613	4612,9
	802.11g	54	Friis	950	949,95
			Winner D1	747	746,93
	802.11n	144	Friis	754	753,93
			Winner D1	603	602,92
300		Friis	534	533,91	
		Winner D1	438	437,89	
5GHz	802.11a	6	Friis	2562	2561,9
			Winner D1	1882	1881,9
		54	Friis	362	361,86
			Winner D1	305	304,84
	802.11ac	78	Friis	182	181,73
			Winner D1	161	160,69
	802.11n	144	Friis	145	144,65
			Winner D1	130	129,61
		300	Friis	115	114,56
			Winner D1	105	104,52
	802.11ac	200	Friis	102	101,51
			Winner D1	94	93,47
866		Friis	65	64,23	
		Winner D1	62	61,19	

Standard		Rate (Mbps)	Prop. Mod	Radius (m)	Max D (m)
2.4 GHz	802.11b	11	Friis	2440	2439,9
			Winner D1	2227	2226,9
	802.11g	54	Friis	487	486,90
			Winner D1	402	401,88
	802.11n	72.2	Friis	274	273,82
			Winner D1	235	234,79
300		Friis	194	193,74	
		Winner D1	171	170,71	
5GHz	802.11a	6	Friis	1475	1474,9
			Winner D1	1126	1125,9
	54	Friis	234	233,79	
		Winner D1	203	202,75	

### 3.2 Μετρήσεις

Για τις μετρήσεις του ρυθμού μετάδοσης χρησιμοποιήθηκαν μεταδόσεις των 30 sec με CBR προφίλ μετάδοσης. Έγιναν δύο πειράματα στα οποία το αναπτυξιακό Galileo χρησιμοποιήθηκε ως ενδιάμεσος κόμβος με τερματικά σημεία τα δύο laptops.

Στο πρώτο πείραμα, το οποίο έγινε σε συνθήκες εργαστηρίου, έγιναν 4 διαφορετικά setups (configurations), σε infrastructure και ad-hoc modes, με πακέτα μεγέθους των 512 και 1024 bytes. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 9: Σύγκριση των μέγιστων ρυθμών μετάδοσης [100]

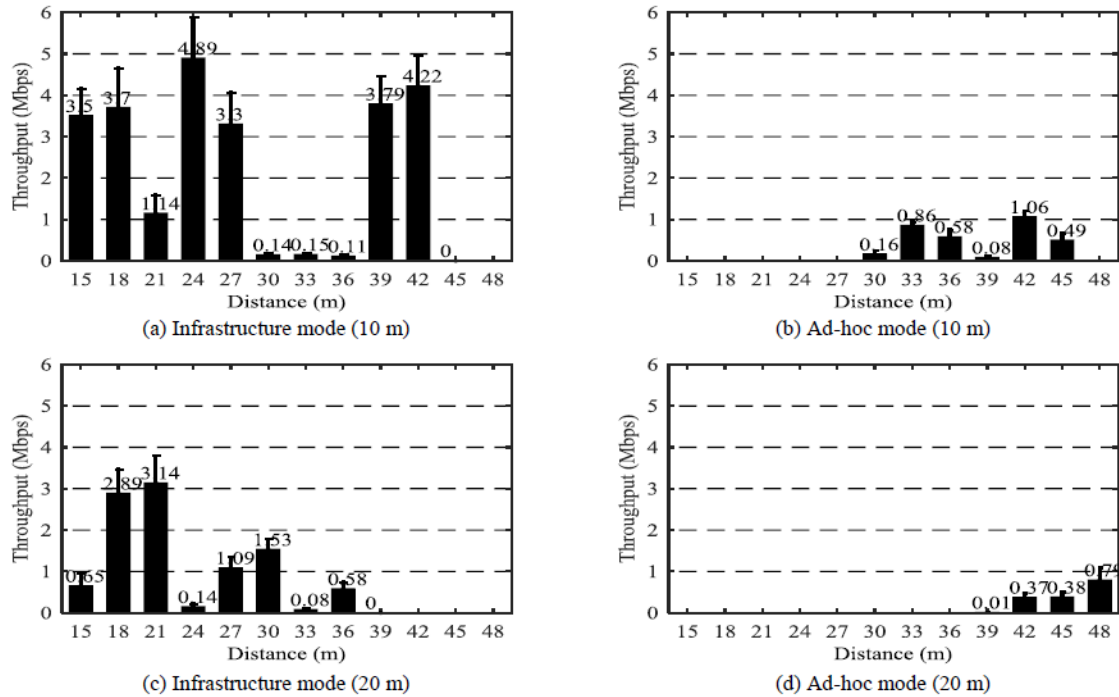
Operation Mode	Packet Size (Bytes)	Max. Throughput (Mbps)
AP	512	10.5
	1024	11
Ad-hoc	512	4.5
	1024	7.5

Το Σχήμα 25 συγκρίνει το επίπεδο του λαμβανόμενου σήματος και στους δύο τρόπους λειτουργίας (infrastructure, Σχήμα 25(α) και Σχήμα 25 (γ), και ad-hoc, Σχήμα 25(β) και Σχήμα 25(δ)) σε δύο ύψη 10 m και 20 m αντίστοιχα. Αξίζει να παρατηρηθεί η αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των αναμενόμενων θεωρητικών τιμών και των πραγματικών επιτευχθέντων αριθμών.

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από πολλά στοιχεία που επηρεάζουν το πραγματικό πείραμα: όπως η αστάθεια του drone, οι παρεμβολές που προκαλούνται από το πλαίσιο του drone, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κ.λπ. Συγκρίνοντας και τους δύο τρόπους λειτουργίας, εντοπίζουμε ότι το επίπεδο του λαμβανόμενου σήματος στη λειτουργία infrastructure (Σχήμα 25( α) και Σχήμα 25(γ)) ήταν σημαντικά υψηλότερο από ότι στην κατάσταση ad-hoc (Σχήμα 25(β) και Σχήμα 25(δ)). Αυτή η αύξηση του επιπέδου σήματος για τη λειτουργία infrastructure αντικατοπτρίστηκε επίσης στην καλύτερη απόδοση, όπως εξηγείται στην επόμενη υποενότητα. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι ο μειωμένος αριθμός σημείων μέτρησης για τη λειτουργία ad-hoc [Σχήμα 25(β) και Σχήμα 25(δ)] μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι μόνο οι μετρήσεις που ελήφθησαν όταν το drone ενήργησε ως ενδιάμεσο σημείο μεταξύ των δύο τελικών σημείων επικοινωνίας συμπεριλήφθηκαν, αγνοώντας τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν όταν ο πομπός και ο φορητός υπολογιστής δέκτης ήταν άμεσα συνδεδεμένοι. Με άλλα λόγια, ενώ η απόσταση μεταξύ των τελικών σημείων επικοινωνίας ήταν μικρότερη από 60 m (drone που πετούσε σε ύψος 10 m) ή 80 m (drone που πετούσε σε ύψος 20 m), το UAV δεν ενήργησε ως ενδιάμεσος κόμβος στη λειτουργία ad-hoc.

Παρατηρήθηκε ότι οι ρυθμοί που επιτυγχάνονται σε infrastructure mode είναι σαφώς υψηλότεροι σε σχέση με το ad-hoc mode. Προφανώς ήταν πιο πλεονεκτικό για τη μετάδοση να χρησιμοποιηθούν τα πακέτα μεγαλύτερου μήκους (1024 bytes).

Τα παραπάνω επαληθεύτηκαν και σε ένα δεύτερο πείραμα το οποίο έγινε σε πραγματικές συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 25: Μέσος ρυθμός μετάδοσης και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετάδοση Rx – Tx [100]

Από την ανάλυση των παραπάνω διαγραμμάτων παρατηρείται και πάλι ότι οι ρυθμοί μετάδοσης σε infrastructure mode είναι σαφώς υψηλότεροι αυτών σε Ad-hoc mode. Τα μεγέθη των πακέτων για αυτό το πείραμα ήταν 512 bytes. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές διαφέρουν σημαντικά από τις τιμές που προέκυψαν από τη διεξαγωγή του πειράματος σε συνθήκες εργαστηρίου. Αυτό προφανώς οφείλεται στην κίνηση του drone και σε παρεμβολές από τον εξωτερικό χώρο.

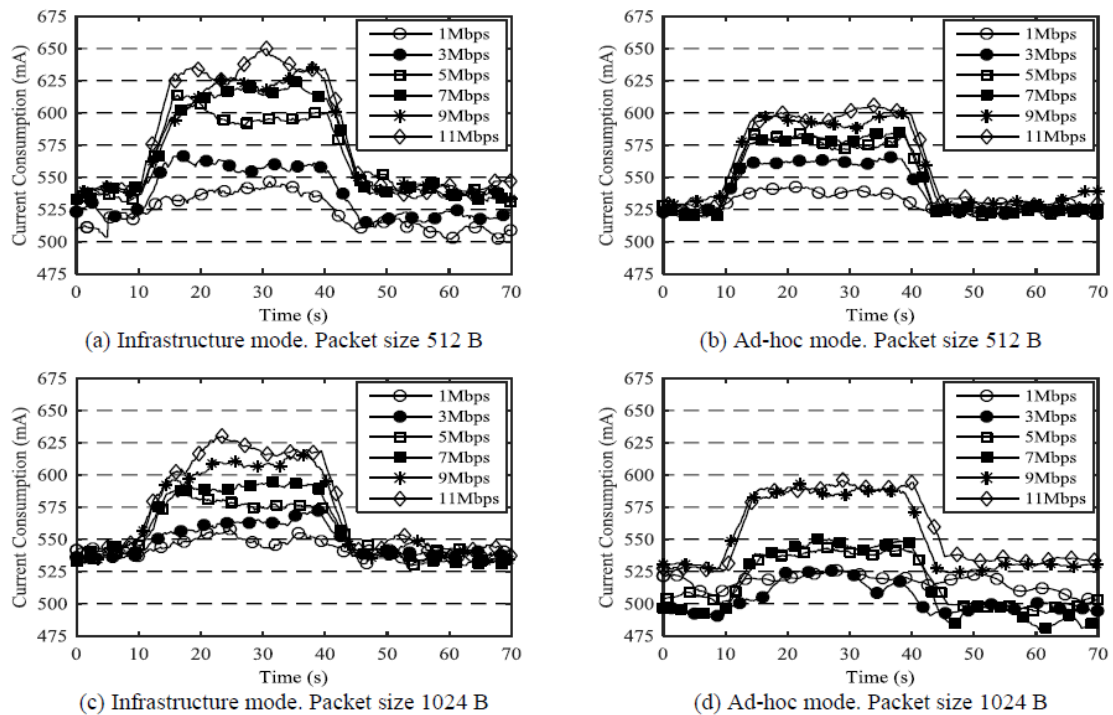
Επίσης μετρήθηκαν και οι μέγιστοι ρυθμοί που μπορούν να υποστηριχθούν από τις κάρτες ασύρματου δικτύου (Wi-Fi), λαμβάνοντας υπόψιν τις καταστάσεις των γραμμών σε πραγματικές συνθήκες. Οι κάρτες μετάδοσης επιλέγουν τις ρυθμίσεις τους αυτόματα, επιλέγοντας το πρωτόκολλο μετάδοσης ανάλογα με την κατάσταση της γραμμής (link state). Σε αυτές τις μετρήσεις οι κάρτες χρησιμοποίησαν αυτόματα τα πρωτόκολλα 802.11g και 802.11n. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 10: Λειτουργικοί Ρυθμοί Μετάδοσης (Operational Bandwidth) σε αυτόματη επιλογή με βάση το link state [100]

Distance(m)	Drone at 10 m high		Drone at 20 m high	
	Infrastructure	Ad-hoc	Infrastructure	Ad-hoc
15	54 Mbps	--	45 Mbps	--
18	60 Mbps	--	135 Mbps	--
21	54 Mbps	--	90 Mbps	--
24	90 Mbps	--	30 Mbps	--
27	81 Mbps	--	54 Mbps	--
30	5 Mbps	6 Mbps	30 Mbps	--
33	5 Mbps	6 Mbps	40 Mbps	--
36	5 Mbps	11Mbps	30 Mbps	--
39	81 Mbps	5.5 Mbps	30 Mbps	5.5 Mbps
42	81 Mbps	11 Mbps	81 Mbps	5.5 Mbps
45	5 Mbps	1 Mbps	5 Mbps	1 Mbps

Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα, γίνεται αντιληπτή η πτώση στην απόδοση του ρυθμού, η οποία αναγκάζει τις κάρτες δικτύου να μεταβούν σε πιο συντηρητικές συνθήκες μετάδοσης και κατά συνέπεια να μειώσουν τους ρυθμούς μετάδοσης.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος είναι η κατανάλωση ισχύος από το σύστημα. Οι μετρήσεις κατανάλωσης ισχύος βασίστηκαν στην αναπτυξιακή πλατφόρμα με χρήση της διάταξης μετρήσεων. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες συνθήκες πειραμάτων με τους ίδιους ρυθμούς μετάδοσης μεταξύ των endpoint laptops. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συνθήκες κατανάλωσης:



Σχήμα 26: Σύγκριση των καταναλώσεων των Wi-Fi κόμβων για πακέτα 512 και 1024 bytes [100]

Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζεται η διάρκεια των μετρήσεων (test) στο χρόνο, έχοντας ως εκκίνηση την αρχική κατάσταση μη μετάδοσης (IDLE), συνεχίζοντας σε μετάδοση 30 sec και μετά επιστρέφοντας και πάλι στην κατάσταση IDLE. Παρατηρείται ότι η κατανάλωση αυξάνει κατά τη φάση μετάδοσης, όπως άλλωστε αναμενόταν. Το Ad-hoc mode φαίνεται να καταναλώνει λιγότερο σε σχέση με το infrastructure mode. Επιπλέον συμφέρει σημαντικά η χρήση μεγάλων πακέτων σε σχέση με τα μικρότερα. Συμπερασματικά, το infrastructure mode προσφέρει επιδόσεις ως προς την κάλυψη και τους ρυθμούς μετάδοσης, ενώ του ad-hoc mode παρουσιάζει μικρότερα επίπεδα κατανάλωσης.

### 3.3 Ενεργειακή Απόδοση

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του ενσωματωμένου συστήματος είναι η τρέχουσα κατανάλωσή του. Με τη χρησιμοποίηση της πλατφόρμας Intel η τρέχουσα ζήτηση του Galileo στο πλαίσιο των λειτουργιών, μπορεί να διαστασιολογήσει το μέγεθος των απαιτούμενων συσσωρευτών (μπαταρίας) του ιπτάμενου οχήματος. Ο περιορισμός ισχύος είναι ένας κρίσιμος παράγοντας συνήθως, λόγω των αυστηρών περιορισμών για το φορτίο που μπορεί να μεταφερθεί από ένα drone. Κατά συνέπεια, η μελέτη της στιγμιαίας τρέχουσας κατανάλωσης της Intel Galileo πλατφόρμας, μελετήθηκε και στα δύο σενάρια λειτουργίας. Αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και σε κατάσταση αδράνειας αλλά και σε μετάδοση κίνησης με σταθερό ρυθμό (CBR), χρησιμοποιώντας τον ίδιο ελεγχόμενο εργαστηριακό εξοπλισμό δοκιμής, όπως στην

προηγούμενη υποενοότητα (δηλαδή, οι δύο φορητοί υπολογιστές ως τελικά σημεία επικοινωνίας και ενδιάμεση συσκευή – κόμβος διασύνδεσης). Κάθε μετάδοση CBR διήρκεσε 30 δευτερόλεπτα και δοκιμάστηκαν αρκετοί ρυθμοί μετάδοσης (1, 3, 5, 7, 9 και 11 Mbps).

### **3.4 Συμπεράσματα**

Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένας κεντρικός ιπτάμενος κόμβος (UAV) για τη διασύνδεση δύο σταθερών endpoints (laptops). Εφαρμόστηκαν δύο τύποι πειράματος σε συνθήκες εργαστηρίου και πραγματικού χώρου. Η μελέτη επικεντρώθηκε στις επιδόσεις για το ρυθμό μετάδοσης, τη ραδιοκάλυψη και την κατανάλωση ισχύος. Η μελέτη αποκάλυψε ότι σημαντικές επιδόσεις μπορούν να επιτευχθούν για το Infrastructure Mode για το επίπεδο ρυθμού μετάδοσης και επιπέδου ισχύος σήματος, με τίμημα την αυξημένη ισχύ κατανάλωσης.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα πειραματικά αποτελέσματα από τη χρήση των νέων και πιο εξελιγμένων πρωτοκόλλων ασύρματης διασύνδεσης IEEE 802.11n/ac.

### **3.5 Η χρήση των πρωτοκόλλων IEEE 802.11n και 802.11ac για τη διασύνδεση των UAVs σε FANETs**

Η ερευνητική εργασία [98] παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα από μετρήσεις με χρήση των τεχνολογιών 802.11ac και 802.11n. Επιπλέον, αναλύεται η δυνατότητα δίκαιης εκπομπής μεταξύ ενός συστήματος που διαθέτει παράλληλη λειτουργία από πολλαπλούς κόμβους (fairness). Η ανάλυση των επιδόσεων για το δίκτυο περιλαμβάνει τους μηχανισμούς προσαρμογής των ρυθμών μετάδοσης (rate adaptation mechanisms) σε σενάρια κλειστού και ανοικτού χώρου με διασφαλισμένη την οπτική επαφή για τους κόμβους μετάδοσης (Line-Of-Sight).

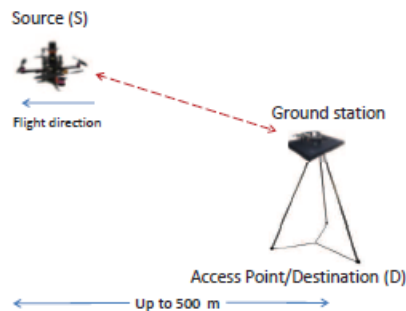
#### **3.5.1 Το πειραματικό σύστημα**

Στην ερευνητική εργασία μελετάται η επικοινωνία μεταξύ κόμβων που ίπτανται (air communication channels), χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα 802.11n/ac. Οι αρχικές μετρήσεις έγιναν σε στατικό εσωτερικό περιβάλλον (indoor experiment). Η κινητικότητα μελετήθηκε στο δεύτερο πειραματικό σενάριο σε εξωτερικό χώρο (outdoor experiment). Και στις δύο περιπτώσεις το σύστημα υποστήριζε τόσο απλές όσο και ταυτόχρονες πολλαπλές μεταδόσεις (multi-sender).

Ο εξοπλισμός των πειραμάτων περιελάμβανε δύο AscTec Pelican UAVs. Όλες οι συσκευές ήταν εφοδιασμένες με τα συστήματα WLE300NX 802.11abgn μινι-κάρτες τεχνολογίας PCIe, για την υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας με τα επιθυμητά

πρωτόκολλα. Για τα πειράματα με το 802.11ac χρησιμοποιήθηκαν οι μινι-κάρτες PCIe WLE900N5-18 και Double Labs ACM-5500-1 802.11ac 5 GHz. Τα πειράματα δείχνουν και τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του καναλιού των 5 GHz αντί του 2.4 GHz. Όλες οι συσκευές ρυθμίστηκαν για επικοινωνία στα HT40 και 48 κανάλια. Για την επικοινωνία χρησιμοποιήθηκαν οι κεραίες MOTOROLA dipole ML-5299-APA1-01R, οι οποίες τοποθετήθηκαν οριζόντια στην άτρακτο των UAVs, όπως επίσης και στο σταθμό βάσης. Τα UAVs διέθεταν μικροεπεξεργαστή Atom 1.6 GHz και 1 Gb RAM. Όλες οι συσκευές χρησιμοποιούσαν λειτουργικό σύστημα Ubuntu Kernel 3.2. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε το iw tool για την ανάλυση των μετρήσεων και την επεξεργασία – αποσφαλμάτωση (debugging).

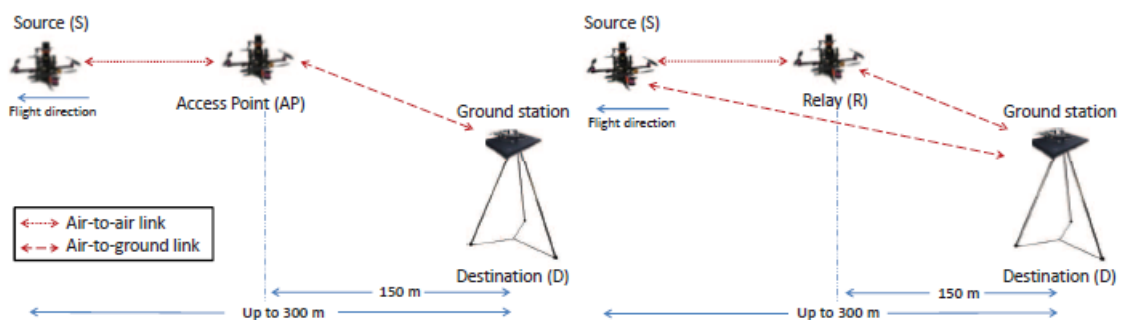
Αρχικά στα πειράματα έγινε χρήση του πρωτοκόλλου 802.11a η οποία επιτρέπει απλή μετάδοση, με στόχο να συγκριθούν τα αποτελέσματα με χρήση των πρωτοκόλλων 802.11n/ac που επιτρέπουν πολλαπλές μεταδόσεις. Η τοπολογία του πειράματος παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 27: Απλό σύστημα μετάδοσης μεταξύ ενός UAV και σταθμού βάσης [98]

Η κίνηση αποστέλλεται από το UAV προς το σταθμό βάσης. Ο σταθμός βάσης τοποθετήθηκε σε σταθερή πτήση σε ύψος 2 m, ενώ το UAV πετούσε σε ύψος 50 m σε απόσταση 500 m από το σταθμό βάσης. Η λειτουργία του σταθμού βάσης είναι ισοδύναμη με ένα Access Point (AP).

Για την ανάλυση της δίκαιης δυνατότητας εκπομπής χρησιμοποιήθηκαν οι τοπολογίες των σχημάτων:



Σχήμα 28: Σύστημα πολλαπλής μετάδοσης μεταξύ UAV και σταθμού βάσης [98]



Στην περίπτωση αυτή, δύο UAVs στέλνουν κίνηση προς το σταθμό βάσης. Οι αποστάσεις κίνησης κυμαίνονται σε 150 m προς το σταθμό βάσης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η απόσταση κυμαίνεται σε 0 – 300 m προς το σταθμό βάσης. Όλα τα πειράματα εκτελούνται με διασφαλισμένη την οπτική επαφή μεταξύ των κόμβων και του σταθμού βάσης. Η ισχύς μετάδοσης  $P_{Tx}$  καθορίστηκε στα +12 dBm, αλλά μπορεί να μειωθεί και περαιτέρω στα +10 dBm.

### 3.5.2 Πείραμα σε εσωτερικό χώρο (Indoor)

Για το πείραμα εσωτερικού χώρου χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός ασύρματης μετάδοσης σε σταθερή απόσταση 2 m. Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

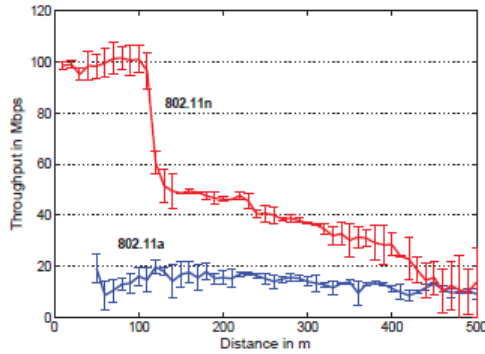
Πίνακας 11: Μετρήσεις στο πείραμα εσωτερικού χώρου [98]

Parameters	802.11n	802.11ac
Recorded Rx Data Rate (Mbps)	450	1170
TCP Throughput (Mbps)	260	345
UDP Throughput (Mbps)	350	480
Packet loss (%)	48	28
Rx Sensitivity (dBm)	-75±2	-70±2
MCS	23 (40 MHz)	8 (80 MHz)
No. of transmitted streams	3	3

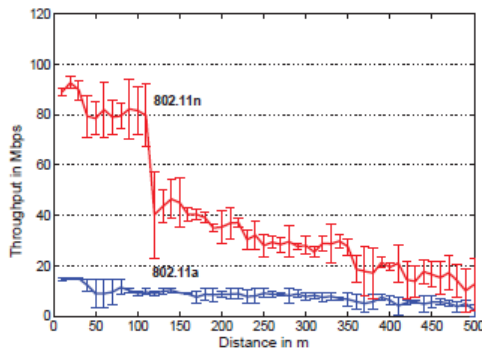
Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο λογισμικού iperf. Ο πίνακας δείχνει μία υψηλή απόδοση για το 802.11ac τόσο με πρωτόκολλο μετάδοσης TCP, όσο και με UDP, σε σχέση με το 802.11n. Το ίδιο αποτέλεσμα διαφαίνεται και για το ποσοστό απώλειας πακέτων. Ο ρυθμός μετάδοσης για το 802.11ac είναι 2.5 φορές καλύτερος σε σχέση με το 802.11n. Τα ευρήματα αυτά δικαιολογούνται δεδομένου ότι το 802.11ac χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 80 MHz για το κανάλι μετάδοσης, σε αντίθεση με το 802.11n που χρησιμοποιεί 40 MHz.

### 3.5.3 Πείραμα εξωτερικού χώρου (outdoor) για σύγκριση 802.11a και 802.11n

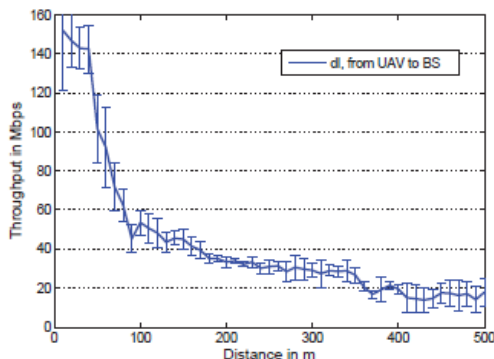
Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε η τοπολογία ενός UAV με ένα κόμβο σταθμού βάσης. Η ισχύς μετάδοσης  $P_{Tx}$  καθορίστηκε στα +12 dBm και χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο TCP. Τα αποτελέσματα από τις συνθήκες μετάδοσης για το πείραμα παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν:



(a) AP mode @ 12dBm, TCP traffic.



(b) Mesh mode @ 12dBm, TCP traffic.



(c) 802.11n, mesh mode @ 10dBm, UDP traffic.

Σχήμα 29: Μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης για το απλό σχήμα UAV με σταθμό βάσης με χρήση των πρωτοκόλλων 802.11n και 802.11a [98]

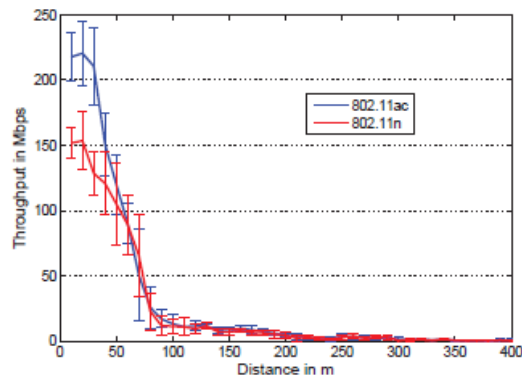
Στα διαγράμματα παρουσιάζεται ο μέσος ρυθμός μετάδοσης με την τυπική απόκλιση  $\sigma$  που εμφανίζεται κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Ο ρυθμός μετάδοσης του 802.11n είναι 5 φορές μεγαλύτερος του αντίστοιχου για το 802.11a. Η πτώση της απόδοσης ρυθμού για το 802.11n είναι απότομη και εκδηλώνεται στα 150 – 300 m απόσταση από το σταθμό βάσης. Στα 500 m απόσταση, οι ρυθμοί μετάδοσης έχουν σχεδόν εξισωθεί. Στο τρίτο σχήμα, παρουσιάζεται ο ρυθμός μετάδοσης σε τοπολογία πολλαπλών μεταδόσεων (mesh). Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο UDP αντί του TCP λόγω γνωστών θεμάτων που ανακύπτουν από τη χρήση του τελευταίου. Η πτώση του ρυθμού μετάδοσης συμβαίνει ήδη σε απόσταση

50 m από το σταθμό βάσης σε ποσοστό 47 – 50%. Η μείωση του ρυθμού μετάδοσης μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας τη σχετική χρονική απόσταση μετάδοσης, μεταξύ των πακέτων (inter-packet interval). Το φαινόμενο της μείωσης του ρυθμού μετάδοσης σταθεροποιείται και εξαφανίζεται μετά την αύξηση της απόστασης πάνω από 100 m.

Το συμπέρασμα από το πείραμα αυτό είναι ότι παρά το γεγονός ότι το πρωτόκολλο 802.11n έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης σε κοντινές αποστάσεις, η αύξηση της απόστασης μετάδοσης καθιστά την απόδοση του συγκρίσιμη με το 802.11a.

### 3.5.4 Πείραμα εξωτερικού χώρου (outdoor) για σύγκριση 802.11ac και 802.11n

Για το πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκε η τοπολογία ενός UAV με ένα κόμβο σταθμού βάσης. Τα αποτελέσματα από το πείραμα παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



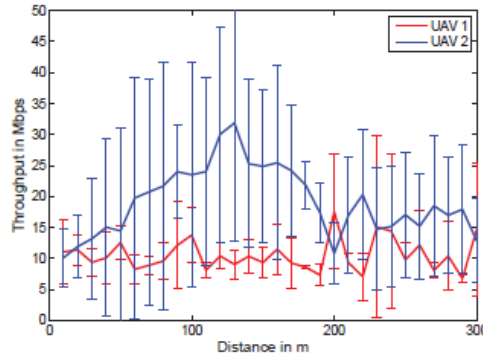
Σχήμα 30: Μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης για το απλό σχήμα UAV με σταθμό βάσης και χρήση των πρωτοκόλλων 802.11ac και 802.11n [98]

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το UDP πρωτόκολλο μετάδοσης. Οι επιδόσεις και των δύο πρωτοκόλλων μετάδοσης 802.11ac και 802.11n φαίνονται να γίνονται ισοδύναμες με την αύξηση της απόστασης στα 50 m για το UAV και το σταθμό βάσης. Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη (Rx Signal Strength – RSS) για το 802.11ac ήταν -74 dBm, ενώ για το 802.11n ήταν -70 dBm. Η επιλογή του καναλιού μετάδοσης, το εύρος ζώνης της μετάδοσης καθώς και η χρήση 3 κεραιών για τη διασύνδεση με το 802.11ac επιδρούν σημαντικά για τις επιδόσεις στις μικρότερες αποστάσεις.

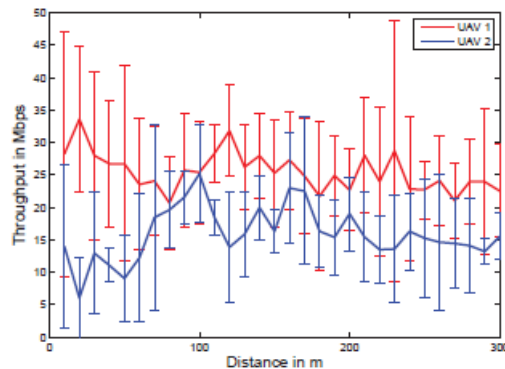
### 3.5.5 Πείραμα εξωτερικού χώρου (outdoor) για δίκαιη ταυτόχρονη μετάδοση με χρήση 802.11n

Στην περίπτωση αυτού του πειράματος μελετήθηκε με χρήση UDP, η δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης από πολλαπλούς σταθμούς (Multi-sender) χρησιμοποιώντας το 802.11n. Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιείται ένα UAV, το UAV<sub>1</sub> ως AP, το οποίο

αιωρείται σε σταθερή θέση στον αέρα, δημιουργώντας την κίνηση μετάδοσης, καθώς επίσης η κίνηση προωθείται στο δεύτερο UAV, το UAV2. Η κίνηση από το UAV1 παρουσιάζεται ως συμπαγής κόκκινη γραμμή ενώ η κίνηση από το UAV2 εμφανίζεται ως συμπαγής μπλε γραμμή στα διαγράμματα.



(a) AP mode @ 10 dBm.



(b) Mesh mode @ 10 dBm.

Σχήμα 31: Μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης για ταυτόχρονη μετάδοση με χρήση του 802.11n [98]

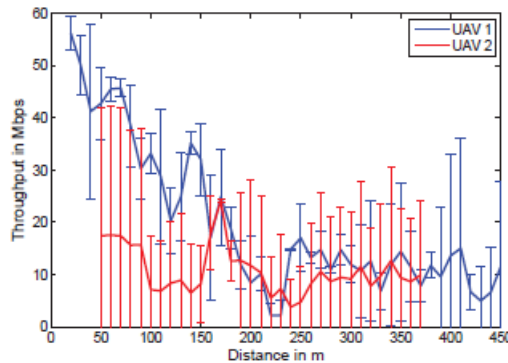
Η κίνηση του UAV1 αν και παραμένει σε σταθερή απόσταση από το BS, κατά μέσο όρο παραμένει σε ρυθμό 10 Mbps. Η κίνηση από το UAV2 αυξάνεται καθώς είναι πιο κοντά στο AP στα 150 m και μειώνεται καθώς η απόσταση αυξάνει στα 300 m.

Τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται καθώς έχουμε ταυτόχρονη μετάδοση με μεταβαλλόμενες αποστάσεις μεταξύ των UAV1 και UAV2. Αρχικά το UAV1 έχει πιο σταθερή σύνδεση ενώ η κίνηση του UAV2 επιδρά στις συνθήκες σύνδεσης. Καθώς το πείραμα εξελισσόταν, το UAV2 κατορθώνει να διεκδικήσει το δίκαιο διαμοιρασμό του καναλιού.

### 3.5.6 Πείραμα εξωτερικού χώρου (outdoor) για ταυτόχρονη μετάδοση με δύο κινούμενα UAVs

Σε αυτό το πείραμα και τα δύο UAVs είναι κινούμενα και στέλνουν την κίνηση τους με χρήση του UDP πρωτοκόλλου προς το σταθμό βάσης. Η κίνηση για το UAV1

απεικονίζεται με χρήση της μπλε συμπαγούς γραμμής, ενώ του UAV2 απεικονίζεται με χρήση της συμπαγούς κόκκινης γραμμής. Το UAV1 ξεκινά το πείραμα σε απόσταση 20 m από το σταθμό βάσης BS και απομακρύνεται μέχρι τα 450 m, ενώ το UAV2 ξεκινά από τα 50 m και καταλήγει σε μέγιστη απόσταση 370 m από το BS. Όλοι οι κόμβοι έχουν οριστεί με δυνατότητες πολλαπλής μετάδοσης, χωρίς να υπάρχει απώλεια της σύνδεσης με το BS. Σε όλες τις φάσεις το UAV1 που είναι πιο κοντά στο BS, διεκδικεί έναν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 32: Μετρήσεις ρυθμού μετάδοσης για ταυτόχρονη μετάδοση για δύο κινούμενα UAVs [98]

### 3.5.7 Συμπεράσματα

Από τη συγκεκριμένη μελέτη προκύπτει ότι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης με χρήση του 802.11n μπορούν να προκύψουν τόσο σε τοπολογία infrastructure (AP) όσο και σε τοπολογία mesh (Πολλοί κόμβοι – πολλαπλή μετάδοση). Αυτό παρατηρήθηκε επίσης και σε φάσεις ταυτόχρονης μετάδοσης για τους κόμβους, αποδεικνύοντας ότι επικρατεί μία σχετικά δίκαιη μετάδοση μεταξύ των κόμβων. Η υψηλή κινητικότητα των κόμβων επιδρά σημαντικά στους ρυθμούς μετάδοσης.

Η χρήση του 802.11ac δείχνει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης για μετρήσεις εσωτερικού χώρου (Indoor). Στα πειράματα εξωτερικού χώρου όμως παρουσιάζεται μία σημαντική και σχετικά γρήγορη πτώση των ρυθμών μετάδοσης καθώς η απόσταση αυξάνει σε σχέση με το BS.

## 4. Συμπεράσματα

### 4.1 Συμπεράσματα από την Μελέτη των FANETs

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη μελέτη σχετικά με τη χρήση των UAVs σε ασύρματα δίκτυα FANETs. Διερευνήθηκαν οι περιπτώσεις χρήσης των UAVs, ως εναέριοι σταθμοί βάσης που συνδέονται τόσο με επίγειους όσο και με εναέριους χρήστες ως κινητές συσκευές (UAV-UE). Για κάθε περίπτωση χρήσης των UAVs, έχουν παρουσιασθεί οι βασικές προκλήσεις, οι εφαρμογές των FANETs καθώς και τα θεμελιώδη ανοιχτά προβλήματα. Επιπλέον, έχουν παρουσιαστεί τα σημαντικότερα επίπεδα τεχνολογίας που σχετίζονται με προκλήσεις στα ασύρματα δίκτυα FANETs. Επίσης παρουσιάστηκαν τα μαθηματικά εργαλεία και οι τεχνικές που απαιτούνται για την αντιμετώπιση των προκλήσεων στην ανάλυση των ασύρματων δικτύων. Η μελέτη για την επικοινωνία και τη δικτύωση μέσω UAVs εισάγει μοναδικά θέματα βελτιστοποίησης, σχεδιασμού και λειτουργίας.

Προκειμένου να δοθούν τρόποι για έξυπνες υπηρεσίες, τα FANET πρέπει να προσφέρουν ασύρματη συνδεσιμότητα σε όλο το χώρο κάλυψης. Ένα προφανές αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση νέων δυνατοτήτων στη μορφή ταχείας, αποτελεσματικής και χαμηλού κόστους ανάπτυξης μελλοντικών δικτύων ad-hoc. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάστηκαν διαφορετικές αρχιτεκτονικές και ασύρματες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επίτευξη συνδέσεων μεταξύ των UAVs και των σταθμών εδάφους - αέρος. Μια υβριδική ασύρματη επικοινωνία για να διασφαλίζει χαμηλή κατανάλωση μέσω Bluetooth (802.15.1) και τεχνολογίας Wi-Fi (802.xx) καλύπτει τις ανάγκες μετάδοσης δεδομένων σε υψηλό ρυθμό. Το προτεινόμενο υβριδικό σχήμα, δεν καλύπτει το backhaul link για το σύστημα FANET. Τα υπάρχοντα συστήματα FANET βασίζονται κυρίως σε επικοινωνία σημείου προς σημείο με χρήση της ζώνης φάσματος που δεν απαιτεί αδειοδότηση (π.χ. ISM 2,4 GHz).

Εναλλακτικά, εκτός από τη δυνατότητα διασύνδεσης με χρήση της οικογένειας πρωτοκόλλων 802.xx μελετήθηκε και η χρήση άλλων διαμορφώσεων, όπως η διαμόρφωση LoRa. Η διαμόρφωση LoRa είναι μια απλή εφαρμογή επιπέδου PHY, που παρέχει σημαντική βελτίωση συνδεσιμότητας σε σχέση με τη συμβατική διαμόρφωση στενής ζώνης. Επιπλέον, η ενισχυμένη στιβαρότητα και η επιλεκτικότητα που παρέχεται από τη διαμόρφωση φάσματος εξάπλωσης, επιτρέπει μεγαλύτερη απόσταση μετάδοσης, ακόμη και σε δύσκολα περιβάλλοντα. Η διαμόρφωση LoRa χρησιμοποιεί ορθογώνιους παράγοντες διάδοσης. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση πολλαπλών πακέτων διαφορετικής εξάπλωσης που βρίσκονται στο ίδιο κανάλι, βελτιώνοντας σημαντικά την αποδοτικότητα του δικτύου και τη μετάδοση των δεδομένων.

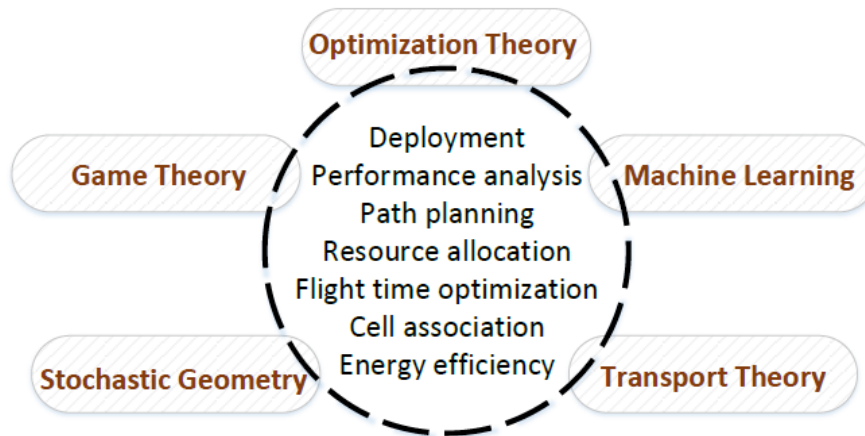
Στην διπλωματική αυτή εργασία παρουσιάστηκαν και πειραματικά δεδομένα που σχετίζονται με μετρήσεις και ζεύξη μεταξύ συστημάτων UAVs. Το δίκτυο στο οποίο εκτελέστηκαν οι μετρήσεις ήταν μικρής κλίμακας και δίνει μία σαφή αίσθηση των ρυθμών μετάδοσης καθώς και των ενεργειακών καταναλώσεων των UAV συστημάτων. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν εμπορικές πλατφόρμες ανάπτυξης (Intel Galileo), κατάλληλα διαμορφωμένες και εξοπλισμένες για να λειτουργούν ως κόμβοι Wi-Fi (είτε ως AP σε λειτουργία infrastructure είτε ως ενδιάμεσο hop στην κατάσταση ad-hoc) σε ένα UAV. Για τη θεωρητική μελέτη κάλυψης του κόμβου Wi-Fi χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο διάδοσης ελεύθερου χώρου και τα μοντέλα απώλειας διάδοσης WINNER D1 (το τελευταίο ήταν πιο περιοριστικό). Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν δύο τρόποι λειτουργίας Wi-Fi σε πειραματικά σενάρια που αφορούσαν στην κάλυψη, την απόδοση και την ενεργειακή κατανάλωση. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν καλύτερη απόδοση του τρόπου Infrastructure, όσον αφορά στην ισχύ σήματος και το εύρος ζώνης, αλλά μια χειρότερη συμπεριφορά όσον αφορά στην τρέχουσα κατανάλωση σε σύγκριση με τη λειτουργία ad-hoc.

Η χρήση των UAVs και οι σχετικές εφαρμογές τους, αναμένεται να εξελιχθούν σημαντικά στο εγγύς μέλλον. Αυτό τονίζει περαιτέρω την ανάγκη ανάπτυξης νέων υβριδικών τεχνολογιών αλλά και νέων πρωτοκόλλων διασύνδεσης, που θα συμπεριλάβουν την κινητικότητα των ιπτάμενων σταθμών βάσης στο δυναμικό δίκτυο.

Πολλά ανοικτά θέματα έχουν ανακύψει. Τα θέματα αυτά αναμένουν την μελλοντική συνδρομή πολλών επιστημονικών κλάδων που εκκινούν από τη μαθηματική θεμελίωση της βελτιστοποίησης, ως την εφαρμογή των τεχνολογιών διαμορφώσεων και διασυνδέσεων. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζονται οι μαθηματικές μελλοντικές εξελίξεις των επιστημονικών κλάδων, που αναμένεται να συμβάλλουν καθοριστικά στην επίλυση του προβλήματος διαστασιολόγησης και διασύνδεσης των μελών σμήνους ενός FANET.

#### **4.2 *Επιστημονικοί Τομείς για την κάλυψη των Ανοικτών Θεμάτων που σχετίζονται με τη χρήση των UAVs ως σταθμοί βάσης σε δίκτυα FANETs***

Έχοντας εντοπίσει τις ερευνητικές κατευθύνσεις, τις σχετικές τους προκλήσεις και τα ανοικτά προβλήματα, στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν τα αναλυτικά πλαίσια που απαιτούνται για το σχεδιασμό, την ανάλυση και βελτιστοποίηση της χρήσης των UAVs για σκοπούς ασύρματης δικτύωσης. Πράγματι, αυτός ο τομέας της έρευνας είναι εξαιρετικά διεπιστημονικός και απαιτεί τη χρήση εργαλείων από συμβατικά πεδία, όπως τη θεωρία επικοινωνιών, τη θεωρία βελτιστοποίησης, το σχεδιασμό δικτύων, καθώς και αναδυόμενα πεδία όπως η στοχαστική γεωμετρία, η μηχανική μάθηση και η θεωρία παιγνίων, όπως παρουσιάζονται και στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 33: Μαθηματικά εργαλεία για το σχεδιασμό δικτύων FANETs με χρήση UAVs [6]

#### 4.2.1 Γενικευμένη θεωρία βελτιστοποίησης

Κατά την πρώτη φάση της ανάπτυξης των FANETs με χρήση των UAVs ως σταθμοί βάσης, παρά την εγγενή αυτονομία του σχήματος επικοινωνίας, θα πρέπει όλα τα UAVs που μετέχουν στο σχήμα να βασίζονται σε κεντρικό έλεγχο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές, όπως η αύξηση της χωρητικότητας των διαύλων συνεπικουρικά με το υπάρχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Οι πάροχοι αυτού του τύπου επικοινωνίας, ενδέχεται να μην είναι πρόθυμοι να εγκαταλείψουν τον έλεγχο του παραδοσιακού δικτύου τους, κατά τη φάση της πρώιμης εισαγωγής μιας τεχνολογίας όπως τα FANETs. Σε τέτοιες καταστάσεις, πολλά από τα αναγνωρισμένα ερευνητικά προβλήματα, περιλαμβάνουν φυσικά την ανάγκη διαμόρφωσης και επίλυσης προκλήσεων με ανάπτυξη συγκεντρωτικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Τέτοια προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν στο επίπεδο διαμόρφωσης επικοινωνίας, μέσω ενός cloud [103] ή στο επίπεδο μιας βάσης μακρο-κυψελών ως σταθμοί εδάφους, που είναι ικανοί να ελέγχουν κάποια από τα UAVs του FANET.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι γνώσεις που μπορούν να αντληθούν από τα συμβατικά προβλήματα βελτιστοποίησης επίγειου κυψελοειδούς δικτύου, μπορεί να αποδειχθούν εξαιρετικά χρήσιμες στην επικοινωνία μεταξύ των UAVs ενός FANET. Για παράδειγμα, η κλασική προσέγγιση όπως η διαδοχική κυρτή βελτιστοποίηση (successive convex optimization technique) [104], μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της 3D θέσης και της τροχιάς των UAVs. Ωστόσο, πολλά από τα προβλήματα που εντοπίστηκαν στα πλαίσια παρουσίασης της διπλωματικής, θα απαιτήσουν πιο προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης. Όπως, το πρόβλημα συσχέτισης των χρηστών, το οποίο για να επιλυθεί θα απαιτήσει την ανάπτυξη δύσκολων προβλημάτων μικτού ακέραιου προγραμματισμού (mixed integer programming), που δεν μπορούν να λυθούν χρησιμοποιώντας τους παραδοσιακούς αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την κυρτή βελτιστοποίηση. Από την άποψη αυτή, εξελίσσονται μαθηματικά



εργαλεία, όπως η βέλτιστη θεωρία μεταφοράς (optimal transfer theory) [105], που μπορεί να παρέχει λύσεις για ευρεία τοποθέτηση συνθηκών, δημιουργώντας προβλήματα συσχέτισεων, που επιδιώκουν τη βελτιστοποίηση του χρόνου πτήσης, της απόδοσης των UAVs και την ενεργειακή απόδοση ασύρματων δικτύων.

#### 4.2.2 Βέλτιστη Θεωρία Μεταφοράς

Η βέλτιστη θεωρία μεταφοράς [105], επιτρέπει την εξαγωγή λύσεων για εξαιρετικά δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης, που συνδέονται με τα προβλήματα συσχέτισης των χρηστών ενός δικτύου, της κατανομής πόρων του δικτύου και τη βελτιστοποίηση του χρόνου πτήσης των UAVs σε δίκτυα FANETs. Αξιοποιώντας τις νέες ιδέες από τη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστικής, η βέλτιστη θεωρία μεταφοράς επιτρέπει τη διανομή των ιπτάμενων συσκευών UAVs, οι οποίες με τη σειρά τους, επιτρέπουν μία βαθύτερη ανάλυση της απόδοσης του δικτύου, βελτιστοποιώντας τα υπάρχοντα δεδομένα. Η βέλτιστη μεταφορά είναι ένα μαθηματικό πεδίο που μελετά σενάρια στα οποία οι πόροι του δικτύου μεταφέρονται μεταξύ διαφόρων τοποθεσιών.

Είναι αξιοσημείωτο ότι ένα τέτοιο μαθηματικό πλαίσιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ορισμένων πολύπλοκων προβλημάτων στις επικοινωνίες, μεταξύ των UAVs σε ένα δίκτυο FANET. Για παράδειγμα, σε μια ημιδιακριτή βέλτιστη περίπτωση μεταφοράς, ο βέλτιστος χάρτης μεταφοράς θα χωρίσει τη συνεχή διανομή και θα αντιστοιχίσει κάθε τμήμα, σε ένα σημείο στο διακριτό χώρο, καθορίζοντας ένα μέτρο πιθανότητας. Σαφώς, τέτοια βέλτιστα τμήματα μπορεί να θεωρηθούν ως η βέλτιστη συσχέτιση των κυψελών μεταξύ UAV και χρήστη (σενάρια τοποθέτησης των σταθμών βάσης UAV), καθώς και BS σε κάθε UAV (ή σε drone-UEs). Επομένως, μέσα στο πλαίσιο της βέλτιστης θεωρίας μεταφοράς, μπορεί κανείς να αντιμετωπίσει τα προβλήματα κυψελοειδούς συσχέτισης για οποιαδήποτε γενική χωρική κατανομή των χρηστών και των UAVs. Στην πραγματικότητα, η βέλτιστη θεωρία μεταφοράς επιτρέπει την παραγωγή ανιχνεύσιμων λύσεων, για ποικιλία κατανομής πόρων συσχέτισης χρηστών, τη διαχείριση της ενέργειας και τα προβλήματα βελτιστοποίησης των πτήσεων των UAVs. Συγκεκριμένα, δεδομένης οποιασδήποτε χωρικής κατανομής χρηστών εδάφους, μπορεί κανείς να εκμεταλλευτεί τη βέλτιστη θεωρία μεταφοράς για να επιτύχει τη βέλτιστη συσχέτιση των κυψελών και τη διαχείριση των πόρων, οδηγώντας στη μέγιστη απόδοση του συστήματος με κριτήρια την ενεργειακή απόδοση, το throughput και το delay μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς του χρόνου πτήσης των UAVs [61], [62].

#### 4.2.3 Ανάλυση Επιδόσεων με χρήση της τεχνικής στοχαστικής γεωμετρίας

Οι τεχνικές στοχαστικής γεωμετρίας έχουν αναδειχθεί ως ισχυρά εργαλεία για την ανάλυση απόδοσης ad-hoc κυψελοειδών δικτύων [57]. Η βασική αρχή της τεχνικής

είναι να δοθεί η δυνατότητα εντοπισμού θέσης των συσκευών (χρήστες και σταθμοί βάσης), και στη συνέχεια, να αξιολογηθούν οι βασικές μετρήσεις απόδοσης, όπως η κάλυψη, ο ρυθμός ή η καθυστέρηση μετάδοσης. Η στοχαστική γεωμετρία έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση μόνο των δισδιάστατων ετερογενών κυψελοειδών δικτύων, αλλά μπορεί δυνητικά να υιοθετηθεί για να χαρακτηρίσει την απόδοση για 3D δίκτυα που συνίστανται από UAVs [59]. Παρ' όλα αυτά, για να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα, πρέπει κανείς να χρησιμοποιήσει ρεαλιστικές διαδικασίες εντοπισμού σημείων για τη μοντελοποίηση των τοποθεσιών των UAVs. Για παράδειγμα, οι κατανομές Binomial και Poisson [106] είναι πιο κατάλληλες, όταν αναπτύσσουν τα UAVs σε hotspots χρήστη, και ο στόχος τους είναι να εξυπηρετήσουν ένα μεγάλο αριθμό χρηστών σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Η διαδικασία με απώθηση μεταξύ σημείων (Matern hard core process [57]), είναι πιο κατάλληλη για την περίπτωση στην οποία τα UAVs δεν επιτρέπεται να είναι πιο κοντά από μια συγκεκριμένη απόσταση. Επομένως, αξιοποιώντας εργαλεία από τη στοχαστική γεωμετρία με κατάλληλες διαδικασίες, μπορεί να αξιολογηθεί η απόδοση δικτύων FANETs. Αυτό, με τη σειρά του, μπορεί να δώσει κατευθυντήριες γραμμές για τον βασικό σχεδιασμό που κάνουν χρήση δικτύων από UAVs.

#### 4.2.4 Τεχνικές Μηχανικής Εκμάθησης

Η μηχανική εκμάθηση (machine learning) επιτρέπει στα συστήματα να βελτιώσουν την απόδοσή τους, μαθαίνοντας αυτόματα από το περιβάλλον τους και την προηγούμενη εμπειρία τους. Η μηχανική εκμάθηση μπορεί να αξιοποιηθεί δυνητικά, για να σχεδιάσει και να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία δικτύων FANETs, που βασίζονται σε UAVs [107], [108]. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους εκμάθησης, τα drones μπορούν να προσαρμόσουν δυναμικά τις θέσεις τους, τις κατευθύνσεις πτήσης και τον έλεγχο κίνησης που εξυπηρετούν τους χρήστες εδάφους. Σε αυτήν την περίπτωση, τα drones μπορούν να προσαρμοστούν γρήγορα σε δυναμικά περιβάλλοντα σε μια «αυτο-οργάνωση» που βελτιστοποιεί αυτόνομα την πορεία τους. Επιπλέον, αξιοποιώντας τις τεχνικές νευρωνικών δικτύων και με επεξεργασία των αναλυτικών δεδομένων (analytics), μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά των χρηστών εδάφους και να προκύψει αποτελεσματικότερη ανάπτυξη και λειτουργία των drones. Τα εργαλεία εκμάθησης επιτρέπουν την πρόβλεψη της κινητικότητας των χρηστών και του φορτίου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση της βέλτιστης ανάπτυξης για τα drones. Τέτοιες πληροφορίες σχετικά με τους χρήστες, για τον τρόπο κινητικότητας τους και την κατανομή της κυκλοφορίας τους, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για το σχεδιασμό συστημάτων drones με δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης (caching). Η μηχανική εκμάθηση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση των χαρτών του περιβάλλοντος και να οικοδομηθεί ένα μοντέλο τρισδιάστατου καναλιού για τα UAVs. Τέτοιοι χάρτες περιβάλλοντος για τα κανάλια

μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη βέλτιστη ανάπτυξη και λειτουργία UAV συστημάτων επικοινωνίας.

#### 4.2.5 Θεωρία Παιγνίων

Η καταναμεμημένη λήψη αποφάσεων είναι αναπόσπαστο στοιχείο για ένα δίκτυο από UAVs. Ως εκ τούτου, μαζί με τη χρήση της μηχανικής εκμάθησης, η θεωρία παιγνίων (Game Theory) [109], [110] μπορεί να προσφέρει σημαντική βάση για την καταναμεμημένη λήψη αποφάσεων. Η θεωρία των παιγνίων είναι ένα φυσικό εργαλείο για την ανάλυση σε προβλήματα διαχείρισης πόρων και βελτιστοποίησης της τροχιάς μέσω του οποίου, η απόφαση λαμβάνεται στο επίπεδο της οντότητας κάθε UAV. Σε τέτοιες περιπτώσεις, κάθε UAV έχει τον δικό του, ατομικό στόχο (συνάρτηση που καταγράφει το δικό της QoS). Εδώ, η έμφυτη σύζευξη των αντικειμενικών λειτουργιών ενός UAV, λόγω παραγόντων όπως, οι παρεμβολές ή συγκρούσεις, παρακινούν έντονα τη χρήση της game theoretic ανάλυσης για βέλτιστη διαχείριση των πόρων. Σε δίκτυα FANETs που βασίζονται σε UAVs, τα προβλήματα διαχείρισης καταναμεμημένων πόρων περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους «παικτών» (UAV, BS, UE), καθώς και πολυδιάστατους στρατηγικούς χώρους που περιλαμβάνουν τις παραμέτρους της ενέργειας, το φάσμα, το χρόνο πτήσης και τις τοποθεσίες 3D στο χώρο. Αυτό με τη σειρά του, παρακινεί στη χρήση των προηγμένων θεωρητικών μηχανισμών παιγνίων, όπου η αναδυόμενη έννοια ενός «πολλαπλού παίγνιου» [111] εκτείνεται πέρα από τις κλασικές δομές των θεωρητικών παιγνίων που χρησιμοποιούνται συμβατικά στα προβλήματα διαχείρισης πόρων [112]. Συγκεκριμένα, τα πολλαπλά παίγνια επιτρέπουν τη σύλληψη του γεγονότος ότι, σε ένα FANET από πολλά UAVs, πολλαπλά παίγνια μπορεί να συνυπάρχουν, όπως ένα παίγνιο μεταξύ των UAVs και ένα παίγνιο μεταξύ των επίγειων BS, και, ως εκ τούτου, προκύπτει ένα σενάριο για ανάλυση πολλαπλών παιγνίων.

Επιπλέον, όταν υποτίθεται ότι τα UAVs λειτουργούν αυτόνομα, είναι επιτακτική η ανάγκη να βελτιστοποιηθεί από κοινού η επικοινωνία τους. Μια τέτοια βελτιστοποίηση πρέπει να διανεμηθεί και να γίνει στο επίπεδο κάθε αυτόνομου UAV, εισάγοντας έτσι και πάλι τη χρήση της θεωρίας παιγνίων. Εδώ, τα στοχαστικά διαφορικά παίγνια (stochastic differential games) [113] αποτελούν σημαντικό εργαλείο δεδομένου, ότι μπορούν να ενσωματώσουν την επικοινωνία και τον έλεγχο. Έτσι μπορούν να συμπεριληφθούν οι στόχοι επικοινωνίας στις λειτουργίες, ενώ η δυναμική του συστήματος ελέγχου μπορεί να τεθεί ως περιορισμός διαφορικών εξισώσεων. Επιπλέον, στα μεγάλης κλίμακας κυψελοειδή δίκτυα, ο αριθμός των UAVs θα απαιτήσει εργαλεία για την ανάλυση της απόδοσης του συστήματος. Για το σκοπό αυτό, εργαλεία και πάλι προερχόμενα από τη θεωρία παιγνίων [114] - [116] είναι χρήσιμα για την εκτέλεση μίας τόσο μεγάλης ανάλυσης συστήματος.

Επιπλέον, η συνεργατική συμπεριφορά είναι μια άλλη σημαντική πτυχή επικοινωνίας μεταξύ των UAVs, δηλαδή, πώς τα μεμονωμένα UAVs δυναμικά σχηματίζουν σμήνη και επιτρέπουν τον συντονισμό τους. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό ανοιχτό πρόβλημα. Για την αντιμετώπισή του, μπορεί κανείς να αξιοποιήσει εργαλεία από τη θεωρία παιγνίων συνασπισμού (coalitional game theory), όπως αυτές που αναπτύχθηκαν στις μελέτες [117] - [119] για ασύρματα δίκτυα, και γενικά στις [120], [121] για συστήματα UAVs. Επιπλέον, η συνεργασία μηχανικής εκμάθησης, της βέλτιστης θεωρίας μεταφορών, της θεωρίας βελτιστοποίησης, και της θεωρίας παιγνίων μπορούν να συνδυαστούν για μια ποικιλία προβλημάτων στα συστήματα επικοινωνίας με χρήση UAVs.

Όπως γίνεται αντιληπτό ο χώρος εφαρμογής των UAVs ως δικτυακών κόμβων σε ένα δίκτυο FANET, αποτελεί ένα ανοιχτό ερευνητικό θέμα, το οποίο αναμένεται να μετεξελιχθεί με την πρόοδο των επιστημών, των τεχνολογιών και των αλγορίθμων στο εγγύς μέλλον. Η εφαρμογή των UAVs ως σταθμών βάσης σε ένα δίκτυο αναμένεται να συμβάλει μαζί με τις νέες τεχνολογίες στην δημιουργία ενός καθολικού δικτύου κάλυψης. Το δίκτυο αυτό θα επιτρέπει τη δυναμική διασύνδεση των χρηστών και θα αναπροσαρμόζεται δυναμικά λαμβάνοντας υπόψιν τις σχετικές θέσεις χρηστών και σταθμών βάσης μεταξύ τους.

## Βιβλιογραφία

- [1] C. Bluemm, C. Heller, B. Fourestie, and R. Weigel, “Air-to-ground channel characterization for OFDM communication in C-band,” in Proc. Int. Conf. Signal Processing Commun. Sys. (ICSPCS), 2013, pp. 1–8.
- [2] Qualcomm, “Leading the world to 5G: Evolving cellular technologies for safer drone operation,” accessed: 2017-05-17. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/invention/technologies/lte/advanced-pro/cellular-drone-communication>
- [3] T. Patterson, “Google, Facebook, SpaceX, OneWeb plan to beam internet everywhere,” accessed: 2017-05-17. [Online]. Available: <https://edition.cnn.com/2015/10/30/tech/pioneers-google-facebook-spacex-oneweb-satellite-drone-balloon-internet/index.html>
- [4] V. Vahidi and E. Saberinia, “Orthogonal frequency division multiplexing and channel models for payload communications of unmanned aerial systems,” in Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016, pp. 1156–1161.
- [5] Federal Aviation Administration, “FAA small unmanned aircraft regulations,” accessed: 2017-07-03. [Online]. Available: [https://www.faa.gov/news/fact sheets/news story.cfm?newsId=20516](https://www.faa.gov/news/fact%20sheets/news%20story.cfm?newsId=20516)
- [6] M. Mozarffari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam, M. Debbah, A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems, cs.IT, 1803.00680v217 Mar 2019
- [7] A. Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, “Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments,” in Proc. Of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Austin, TX, USA, Dec. 2014.
- [8] A. Zaji’c, Mobile-to-mobile wireless channels. Artech House, 2012.
- [9] Y. Zheng, Y. Wang, and F. Meng, “Modeling and simulation of pathloss and fading for air-ground link of HAPs within a network simulator,” in Proc. of IEEE International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), Beijing, China, Oct. 2013.
- [10] J. Holis and P. Pechac, “Elevation dependent shadowing model for mobile communications via high altitude platforms in built-up areas,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 4, pp. 1078–1084, April 2008.
- [11] Z. Yun and M. F. Iskander, “Ray tracing for radio propagation modeling: principles and applications,” IEEE Access, vol. 3, pp. 1089–1100, 2015.
- [12] 3GPP, “Enhanced LTE support for aerial vehicles,” TR 36.777, May 2017.

- [13] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of Things communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 11, pp. 7574–7589, Nov. 2017.
- [14] R. Yaliniz, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, "Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks," in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, May. 2016.
- [15] A. Hourani, K. Sithamparanathan, and S. Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Wireless Communication Letters*, vol. 3, no. 6, pp. 569–572, Dec. 2014.
- [16] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis," in *Proc. of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, USA, Dec. 2015.
- [17] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1647–1650, Aug. 2016.
- [18] M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum, and H. Yanikomeroglu, "3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 434–437, Aug. 2017.
- [19] M. Alzenad, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, "3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station for maximum coverage of users with different QoS requirements," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 38–41, Feb. 2018.
- [20] A. M. Hayajneh, S. A. R. Zaidi, D. C. McLernon, and M. Ghogho, "Drone empowered small cellular disaster recovery networks for resilient smart cities," in *Proc. of IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops)*, June 2016.
- [21] E. Kalantari, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, "On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference*, 2016.
- [22] J. Kosmerl and A. Vilhar, "Base stations placement optimization in wireless networks for emergency communications," in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, Australia, June. 2014.
- [23] E. Kalantari, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and A. Yongacoglu, "Backhaul-aware robust 3D drone placement in 5G+ wireless networks," in *Proc. of IEEE*

International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), May 2017, pp. 109–114.

[24] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36–42, May 2011.

[25] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 6, pp. 3949–3963, June 2016.

[26] P. Sudheesh, M. Mozaffari, M. Magarini, W. Saad, and P. Muthuchidambaram, “Sum-rate analysis for high altitude platform (HAP) drones with tethered balloon relay,” *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 6, pp. 1240–1243, 2018.

[27] X. Xu, W. Saad, X. Zhang, X. Xu, and S. Zhou, “Joint deployment of small cells and wireless backhaul links in next-generation networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2250–2253, Dec. 2015.

[28] S. Chandrasekharan, K. Gomez, A. Al-Hourani, S. Kandeepan, T. Rasheed, L. Goratti, L. Reynaud, D. Grace, I. Bucaille, T. Wirth, and S. Allsopp, “Designing and implementing future aerial communication networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 26–34, May 2016.

[29] I. Bor-Yaliniz and H. Yanikomeroglu, “The new frontier in ran heterogeneity: Multi-tier drone-cells,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 11, pp. 48–55, 2016.

[30] J. Horwath, N. Perlot, M. Knappek, and F. Moll, “Experimental verification of optical backhaul links for high-altitude platform networks: Atmospheric turbulence and downlink availability,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 25, no. 5, pp. 501–528, 2007.

[31] F. Fidler, M. Knappek, J. Horwath, and W. R. Leeb, “Optical communications for high-altitude platforms,” *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 16, no. 5, pp. 1058–1070, 2010.

[32] M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and M. Alouini, “FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 1, pp. 218–224, Jan. 2018.

[33] S. Mumtaz, S. Huq, K. Mohammed, A. Radwan, J. Rodriguez, and R. L. Aguiar, “Energy efficient interference-aware resource allocation in LTE-D2D communication,” in *Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, Australia, June. 2014.

- [34] A. Taleb Zadeh Kasgari, W. Saad, and M. Debbah, "Brain-aware wireless networks: Learning and resource management," in Proc. Of IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2017.
- [35] A. Taleb Zadeh Kasgari and W. Saad, "Stochastic optimization and control framework for 5G network slicing with effective isolation," in Proc. of Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Princeton, USA, Mar. 2018.
- [36] F. Pantisano, M. Bennis, W. Saad, and M. Debbah, "Spectrum leasing as an incentive towards uplink macrocell and femtocell cooperation," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 30, no. 3, pp. 617–630, April 2012.
- [37] B. Uragun, "Energy efficiency for unmanned aerial vehicles," in Proc. of IEEE 10th International Conference on Machine Learning and Applications and Workshops (ICMLA), vol. 2, Honolulu, HI, USA, Dec. 2011, pp. 316–320.
- [38] M. Chen, W. Saad, and C. Yin, "Virtual reality over wireless networks: quality-of-service model and learning-based resource management," available online: [arxiv.org/abs/1703.04209](https://arxiv.org/abs/1703.04209), 2017.
- [39] J. Chakareski, "Aerial UAV-IoT sensing for ubiquitous immersive communication and virtual human teleportation," in 2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), May 2017, pp. 718–723.
- [40] M. Chen, W. Saad, and C. Yin, "Echo state learning for wireless virtual reality resource allocation in UAV-enabled LTE-U networks," in Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Kansas city, USA, May 2018.
- [41] H. Zhang, W. Ma, W. Li, W. Zheng, X. Wen, and C. Jiang, "Signalling cost evaluation of handover management schemes in lte-advanced femtocell," in Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 2011.
- [42] G. Go'dor, Z. Jako', A'. Knapp, and S. Imre, "A survey of handover management in LTE-based multi-tier femtocell networks: Requirements, challenges and solutions," Computer Networks, vol. 76, pp. 17–41, 2015.
- [43] R. Arshad, H. Elsayy, S. Sorour, T. Y. Al-Naffouri, and M. Alouini, "Handover management in 5G and beyond: A topology aware skipping approach," IEEE Access, vol. 4, pp. 9073–9081, 2016.
- [44] A. Fotouhi, H. Qiang, M. Ding, M. Hassan, L. G. Giordano, A. Garcia- Rodriguez, and J. Yuan, "Survey on uav cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges," available online: [arxiv.org/abs/1809.01752](https://arxiv.org/abs/1809.01752), 2018.
- [45] C. Stöcker, R. Bennett, F. Nex, M. Gerke, and J. Zevenbergen, "Review of the current state of UAV regulations," Remote sensing, vol. 9, no. 5, p. 459, 2017.



- [46] K. Gomez, A. Hourani, L. Goratti, R. Riggio, S. Kandeepan, and I. Bucaille, "Capacity evaluation of aerial LTE base-stations for public safety communications," in Proc. IEEE European Conference on Networks and Communications (EuCNC), June 2015.
- [47] M. Chen, M. Mozaffari, W. Saad, C. Yin, M. Debbah, and C. S. Hong, "Caching in the sky: Proactive deployment of cache-enabled unmanned aerial vehicles for optimized quality-of-experience," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 5, pp. 1046–1061, May 2017.
- [48] U. Challita and W. Saad, "Network formation in the Sky: Unmanned aerial vehicles for multi-hop wireless backhauling," in Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Singapore, Dec. 2017.
- [49] H. Shakhathreh, A. Khreishah, J. Chakareski, H. B. Salameh, and I. Khalil, "On the continuous coverage problem for a swarm of UAVs," in Proc. of IEEE 37th Sarnoff Symposium, Sep. 2016, pp. 130–135.
- [50] M. M. Azari, F. Rosas, K. C. Chen, and S. Pollin, "Joint sum-rate and power gain analysis of an aerial base station," in Proc. of IEEE GLOBECOM Workshops, Dec. 2016.
- [51] A. M. Hayajneh, S. A. R. Zaidi, D. C. McLernon, and M. Ghogho, "Optimal dimensioning and performance analysis of drone-based wireless communications," in Proc. of IEEE GLOBECOM Workshops, Dec. 2016.
- [52] S. Jia and Z. Lin, "Modeling unmanned aerial vehicles base station in ground-to-air cooperative networks," IET Communications, 2017.
- [53] ITU-R, "Rec. p.1410-2 propagation data and prediction methods for the design of terrestrial broadband millimetric radio access systems," Series, Radiowave propagation, 2003
- [54] D. W. Matolak and R. Sun, "Airground channel characterization for unmanned aircraft systems part i: Methods, measurements, and models for over-water settings," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 1, pp. 26–44, Jan. 2017
- [55] Z. G'asp'ar and T. Tarnai, "Upper bound of density for packing of equal circles in special domains in the plane," Periodica Polytechnica. Civil Engineering, vol. 44, no. 1, p. 13, 2000.
- [56] 3GPP, "Study on RAN improvements for machine type communication," TR 37.868, Sept. 2011.
- [57] M. Haenggi, Stochastic geometry for wireless networks. Cambridge University Press, 2012.

- [58] N. Lee, X. Lin, J. G. Andrews, and R. Heath, "Power control for D2D underlaid cellular networks: Modeling, algorithms, and analysis," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 1, pp. 1–13, Feb. 2015.
- [59] V. V. Chetlur and H. S. Dhillon, "Downlink coverage analysis for a finite 3-D wireless network of unmanned aerial vehicles," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 10, pp. 4543–4558, Oct. 2017.
- [60] C. Zhang and W. Zhang, "Spectrum sharing for drone networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 1, pp. 136–144, Jan. 2017.
- [61] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Optimal transport theory for cell association in UAV-enabled cellular networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 9, pp. 2053–2056, Sep. 2017.
- [62] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Wireless communication using unmanned aerial vehicles (UAVs): Optimal transport theory for hover time optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 12, pp. 8052–8066, Dec. 2017.
- [63] O. Semiari, W. Saad, S. Valentin, M. Bennis, and B. Maham, "Matching theory for priority-based cell association in the downlink of wireless small cell networks," in *Proc. of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, May 2014, pp. 444–448.
- [64] F. Pantisano, M. Bennis, W. Saad, M. Debbah, and M. Latva-aho, "Interference alignment for cooperative femtocell networks: A game-theoretic approach," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 11, pp. 2233–2246, Nov. 2013.
- [65] N. Zhao, F. Cheng, F. R. Yu, J. Tang, Y. Chen, G. Gui, and H. Sari, "Caching uav assisted secure transmission in hyper-dense networks based on interference alignment," *IEEE Transactions on Communications*, Early access, 2018.
- [66] M. Khan, I. Qureshi, F. Khanzada, A Hybrid Communication Scheme for Efficient and Low-Cost Deployment of Future Flying Ad-Hoc Network (FANET), *Drones*, 2019,3,16;doi:10.3390/drones3010016
- [67] Li, J.; Zhou, Y.; Lamont, L. Communication architectures and protocols for networking unmanned aerial vehicles. In *Proceedings of the 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Atlanta, GA, USA, 9–13 December 2013; pp. 1415–1420.
- [68] Khan, M.A.; Qureshi, I.M.; Safi, A.; Khan, I.U. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Review of Communication architectures, and Routing protocols. In *Proceedings of the 2017 First International Conference on Latest Trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*, Karachi, Pakistan, 15–16 November 2017; pp. 692–699.

- [69] Joh, H.; Yang, I.; Ryoo, I. The internet of everything based on energy efficient P2P transmission technology with Bluetooth low energy. *Peer-to-Peer Netw. Appl.* **2015**, *9*, 520–528. [[CrossRef](#)]
- [70] Cheng, C.-M.; Hsiao, P.-H.; Kung, H.T.; Vlah, D. Performance measurement of 802.11a wireless links from UAV to ground nodes with various antenna orientations. In *Proceedings of the 15th International Conference on Computer Communications and Networks*, Arlington, VA, USA, 9–11 October 2006; pp. 303–308.
- [71] Bluetooth Core Specification, Bluetooth Special Interest Group (SIG). 2016. Available online: <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification> (accessed on 6 October 2018).
- [72] Khan, M.A.; Khan, I.U.; Qureshi, I.M.; Alam, M.K.; Shah, S.B.; Shafiq, M. Deployment of reliable, simple, and cost-effective medium access control protocols for multi-layer flying ad-hoc networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS '18)*, Amman, Jordan, 26–27 June 2018; p. 49
- [73] Afonso, J.A.; Coelho, E.T.; Carvalhal, P.; Ferreira, M.J.; Santos, C.; Silva, L.F.; Almeida, H. Distributed sensing and actuation over Bluetooth for unmanned air vehicles. In *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, FL, USA, 15–19 May 2006.
- [74] Hoffmann, G.; Rajnarayan, D.G.; Waslander, S.L.; Dostal, D.; Jang, J.S.; Tomlin, C.J. The Stanford testbed of autonomous rotorcraft for multi agent control (STARMAC). In *Proceedings of the 23rd Digital Avionics Systems Conference (IEEE Cat. No.04CH37576)*, Salt Lake City, UT, USA, 28 October 2004.
- [75] Yut, L.; Fei, Q.; Geng, Q. Combining Zigbee and inertial sensors for quadrotor UAV indoor localization. In *Proceedings of the 2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Hangzhou, China, 12–14 June 2013; pp. 1912–1916.
- [76] Jiang, Y.; Cao, J.; Du, Y. Unmanned air vehicle landing based on Zigbee and vision guidance. In *Proceedings of the 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, 21–23 June 2006; pp. 10310–10314.
- [77] Zafar, W.; Khan, B.M. A reliable, delay bounded and less complex communication protocol for multicluster FANETs. *Digit. Commun. Netw.* **2017**, *3*, 30–38. [[CrossRef](#)]
- [78] Banerji, S.; Chowdhury, R.S. Wi-Fi & WiMAX: A comparative study. *Indian J. Eng.* **2013**, *2*.
- [79] Rahman, M.A. Enabling drone communications with WiMAX Technology. In *Proceedings of the IISA 2014, The 5th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*, Chania, Greece, 7–9 July 2014; pp. 323–328.

- [80] Dalmaso, I.; Galletti, I.; Giuliano, R.; Mazzenga, F. WiMAX networks for emergency management based on UAVs. In Proceedings of the 2012 IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL), Rome, Italy, 2–5 October 2012; pp. 1–6.
- [81] Lin, X.; Yajnanarayana, V.; Muruganathan, S.; Gao, S.; Asplund, H.; Maattanen, H.; Bergstrom, M.; Euler, S.; Wang, Y. The Sky Is Not the Limit: LTE for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Commun. Mag.* **2018**, *56*, 204–221. [[CrossRef](#)]
- [82] Qazi, S.; Siddiqui, A.S.; Wagan, A.I. UAV based real time video surveillance over 4G LTE. In Proceedings of the 2015 International Conference on Open Source Systems & Technologies (ICOSST), Lahore, Pakistan, 17–19 December 2015; pp. 141–145.
- [83] Van der Bergh, B.; Chiumento, A.; Pollin, S. LTE in the sky: Trading off propagation benefits with interference costs for aerial nodes. *IEEE Commun. Mag.* **2016**, *54*, 44–50. [[CrossRef](#)]
- [84] Nguyen, H.C.; Amorim, R.; Wigard, J.; Kovács, I.Z.; Sørensen, T.B.; Mogensen, P.E. How to Ensure Reliable Connectivity for Aerial Vehicles Over Cellular Networks. *IEEE Access* **2018**, *6*, 12304–12317. [[CrossRef](#)]
- [85] Jiang, D.; Liu, G. An Overview of 5G Requirements—5G Mobile Communications; Springer: Cham, Switzerland, 2017; pp. 3–26. [[CrossRef](#)]
- [86] Bor-Yaliniz, I.; Yanikomeroglu, H. The new frontier in ran heterogeneity: Multi-tier drone-cells. *IEEE Commun. Mag.* **2016**, *54*, 48–55. [[CrossRef](#)]
- [87] Dong, Y.; Hassan, M.; Cheng, J.; Hossain, M.; Leung, V. An edge computing empowered radio access network with uav-mounted fso fronthaul and backhaul: Key challenges and approaches. *arXiv*, 2018; arXiv:1803.06381. [[CrossRef](#)]
- [88] Sharma, V.; Song, F.; You, I.; Chao, H.-C. Efficient management and fast handovers in software defined wireless networks using uavs. *IEEE Netw.* **2017**, *31*, 78–85. [[CrossRef](#)]
- [89] Huo, Y.; Dong, X.; Lu, T.; Xu, W.; Yuen, M. Distributed and multilayer UAV network for the next-generation wireless communication. *arXiv*, 2018; arXiv:1805.01534.
- [90] Li, B.; Fei, Z.; Zhang, Y. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *IEEE Internet Things J.* **2018**, in press. [[CrossRef](#)]
- [91] Amorosi, L.; Chiaraviglio, L.; D’Andreagiovanni, F.; Blefari-Melazzi, N. Energy-efficient mission planning of UAVs for 5G coverage in rural zones. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering (EE), Milan, Italy, 12–14 March 2018; pp. 1–9.

- [92] Ma, D.; Yang, S. UAV image transmission system based on satellite relay. In Proceedings of the ICMMT 4<sup>th</sup> International Conference on, Proceedings Microwave and Millimeter Wave Technology, Nanjing, China, 18–21 August 2004; pp. 874–878.
- [93] Skinnemoen, H. UAV & satellite communications live mission critical visual data. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology, Yogyakarta, Indonesia, 13–14 November 2014; pp. 12–19.
- [94] Bujari, A.; Calafate, C.T.; Cano, J.C.; Manzoni, P.; Palazzi, C.E.; Ronzani, D. Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2017**, *13*, 1–17. [[CrossRef](#)]
- [95] Hong, X.; Gerla, M.; Pei, G.; Chiang, C.-C. A group mobility model for ad hoc wireless networks. In Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Seattle, WA, USA, 20 August 1999; pp. 53–60.
- [96] Guillen-Perez, A.; Cano, M.D. Flying Ad Hoc Networks: A New Domain for Network Communications. *Sensors* **2018**, *18*, 3571. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [97] AN1200.22 LoRa Modulation Basics Semtech Wireless Sensing and Timing Products, Application Note
- [98] S. Hayat, E. Yanmaz C. Bettstetter, Experimental Analysis of Multipoint – to – Point UAV Communications with IEEE 802.11n and 802.11ac, 2015 IEEE 26<sup>th</sup> International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications- (PIMRC): Mobile and Wireless Networks
- [99] P.Singh, R. Silva, I. Seher, Comparison of Communication Protocols for UAVs and VANETs, International Conference of Computing, Communication and Automation, (ICCCA2016)
- [100] A. Perez, R. Iborra, M. Cano, J Aarnoutse, J. Haro, Wi-Fi Networks on Drones, 978-92-61-20431-0/CFP1688P-ART © 2016 ITU
- [101] H. T. Friis, “A note on a simple transmission formula,” in *IRE’46*, 1946, vol. 34 (5), pp. 254–256.
- [102] Winner and I. S. Technologies, “IST-4-027756 WINNER II. D1.1.2 V1.2. WINNER II Channel Models,” 2008.
- [103] M. Peng, Y. Sun, X. Li, Z. Mao, and C. Wang, “Recent advances in cloud radio access networks: System architectures, key techniques, and open issues,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 2282–2308, thirdquarter 2016.
- [104] A. V. Fiacco and G. P. McCormick, *Nonlinear programming: sequential unconstrained minimization techniques*. Siam, 1990, vol. 4.

- [105] C. Villani, Topics in optimal transportation. American Mathematical Soc., 2003, no. 58.
- [106] F. Baccelli and B. Błaszczyszyn, “Stochastic geometry and wireless networks: Volume II applications,” Foundations and Trends in Networking, vol. 4, no. 1–2, pp. 1–312, 2010.
- [107] M. Chen, U. Challita, W. Saad, C. Yin, and M. Debbah, “Machine learning for wireless networks with artificial intelligence: A tutorial on neural networks,” available online: [arxiv.org/abs/1710.02913](https://arxiv.org/abs/1710.02913), 2017.
- [108] U. Challita, A. Ferdowsi, M. Chen, and W. Saad, “Machine learning for wireless connectivity and security of cellular-connected UAVs,” IEEE Wireless Communications Magazine, Special Issue on Integrating UAVs into 5G and Beyond, to appear, 2018.
- [109] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Bas, ar, and A. Hjørungnes, Game theory in wireless and communication networks: theory, models, and applications. Cambridge University Press, 2012.
- [110] G. Bacci, S. Lasaulce, W. Saad, and L. Sanguinetti, “Game theory for networks: A tutorial on game-theoretic tools for emerging signal processing applications,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 33, no. 1, pp. 94–119, 2016.
- [111] K. Hamidouche, W. Saad, and M. Debbah, “A multi-game framework for harmonized LTE-U and Wi-Fi coexistence over unlicensed bands,” IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 6, pp. 62–69, 2016.
- [112] A. Ferdowsi, A. Sanjab, W. Saad, and T. Bas, ar, “Generalized Colonel Blotto game,” in Proc. IEEE American Control Conference, Milwaukee, WI, USA, June 2018.
- [113] T. Bas, ar and G. J. Olsder, Dynamic noncooperative game theory. Siam, 1999, vol. 23.
- [114] J. Apaloo, Advances in Dynamic and Mean Field Games: Theory, Applications, and Numerical Methods. Birkhauser, 2018.
- [115] S. Samarakoon, M. Bennis, W. Saad, M. Debbah, and M. Latva-Aho, “Ultra dense small cell networks: Turning density into energy efficiency,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 5, pp. 1267–1280, 2016.
- [116] K. Hamidouche, W. Saad, M. Debbah, and H. V. Poor, “Mean-field games for distributed caching in ultra-dense small cell networks,” in Proc. IEEE American Control Conference (ACC), Boston, MA, USA, July 2016, pp. 4699–4704.
- [117] W. Saad, Z. Han, M. Debbah, A. Hjørungnes, and T. Bas, ar, “Coalitional game theory for communication networks,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 26, no. 5, pp. 77–97, Sep. 2009.

- [118] W. Saad, Z. Han, M. Debbah, and A. Hjørungnes, "A distributed coalition formation framework for fair user cooperation in wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 9, pp. 4580–4593, Sep. 2009.
- [119] W. Saad, Z. Han, M. Debbah, A. Hjørungnes, and T. Basar, "Coalitional games for distributed collaborative spectrum sensing in cognitive radio networks," in *Proc. of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Rio de Janeiro, Brazil, April 2009, pp. 2114–2122.
- [120] W. Saad, Z. Han, T. Basar, M. Debbah, and A. Hjørungnes, "A selfish approach to coalition formation among unmanned air vehicles in wireless networks," in *Proc. of the International Conference on Game Theory for Networks (GameNets)*, 2009, pp. 259–267.
- [121] W. Saad, Z. Han, T. Basar, M. Debbah, and A. Hjørungnes, "Hedonic coalition formation for distributed task allocation among wireless agents," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 9, pp. 1327–1344, Sep. 2011.