



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



U A S M E R A
Combat Systems and Naval Operations Laboratory of the Hellenic Naval Academy

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΤΙΤΛΟΣ:

Δίκτυα Επικοινωνιών UAV μέσω Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας 4G LTE/5G & Ευρυζωνικών Ασυρμάτων Ζεύξεων (Wideband Wireless Links).

ΤΙΤΛΟΣ ΑΓΓΛΙΚΑ:

UAV Networking via 4G LTE/5G Cellular Networks & Wideband Wireless Links

Ονοματεπώνυμο Σπουδαστή:

Χρυσοβαλάντης Πατσιάδης

Ονοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:

κ. Ιωάννης Αλέξανδρος Κούκος

ΔΙΑΤΡΙΒΗ

MΑΡΤΙΟΣ 2023:

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

κ. Ιωάννης – Αλέξανδρος Κούκος

κ. Μιχαήλ Παπουτσιδάκης

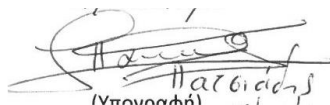
κ. Αβραάμ Χατζόπουλος

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Χρυσοβαλάντης Πατσιάδης του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 8096612 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα και Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο δηλών


Χρυσοβαλάντης Πατσιάδης
(Υπογραφή)

Ημερομηνία

21/03/2023

Δίκτυα Επικοινωνιών UAV μέσω Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας 4G LTE/5G & Ευρυζωνικών Ασυρμάτων Ζεύξεων (Wideband Wireless Links)

Χρυσοβαλάντης Πατσιάδης

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα και Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Περίληψη

Η αναδύομενη τεχνολογία των UAV (Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα) προσφέρει γόνιμες επιχειρηματικές ευκαιρίες σε όλο το φάσμα τις επιχειρηματικής δραστηριότητας. Προκειμένου, λοιπόν, να υποστηριχθούν αυτές οι λειτουργίες, απαιτούνται γρήγορες, ανθεκτικές και αξιόπιστες συνδέσεις επικοινωνίας. Με την έλευση του Δικτύου Κινητής Τηλεφωνίας Πέμπτης Γενιάς (5G) (και του προκατόχου του 4G LTE Cellular Network) τα UAV θα μπορούν να επεκτείνουν τις δυνατότητές τους στις πραγματικές εφαρμογές.

Από αυτή την άποψη, στόχο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη ενσωμάτωσης και να λειτουργίας του δικτύου κινητής τηλεφωνίας 5G στα UAV ως το κύριο κανάλι επικοινωνίας για το C2 (Command & Control) και το ωφέλιμο φορτίο (Payload). Επομένως, τα UAV θα μπορούν να λειτουργούν ελεγχόμενα BVLOS, εντός των περιορισμών του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, διασφαλίζοντας απρόσκοπτη και αξιόπιστη επικοινωνία. Αυτή η εφαρμογή πρέπει πάντα να γίνεται σε σχέση με τις τυποποιημένες τυποποιήσεις της 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

Στο πλαίσιο, λοιπόν, της ερευνάς αυτής παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάλυση του μοντέλου διάδοσης των μικροκυμάτων, οι επικοινωνιακές απαιτήσεις που θέτει η 3GPP καθώς και έτερες μελέτες μετά συμπερασμάτων τους στον εν λόγω τομέα. Ιδιαίτερη έμφαση δε, δίνεται στις προκλήσεις που έχουν προκύψει στις έρευνες αυτές καθώς και τρόπους για την αντιμετώπισή τους για την επαύξηση της ποιότητας των υπηρεσιών των UAV από το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.

Προς αυτή την κατεύθυνση υλοποιείται ένα 4G LTE/5G UAV ώστε να μελετηθεί και να αναλυθεί αν ένα κυψελοειδές δικτυωμένο drone (με την υπάρχουσα υποδομή) είναι σε θέση να εκπληρώσει τις απαιτήσεις στις σημερινές και μελλοντικές πολιτικές εφαρμογές.

Λέξεις Κλειδιά: Cellular Networks, 4G LTE/5G, UAV, Communications, Civil applications

Abstract

The emerging technology of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) is offering fertile business opportunities in a proliferation of fields. In this manner, in order to support these operations, fast, resilient and reliable communication links are demanded. With the advent of Fifth Generation (5G) Cellular Network (and its predecessor 4G LTE Cellular Network) UAVs will be able to extend their capabilities in the real world applications.

In this regard, our goal is to integrate and operate the 5G Cellular Network in UAVs as the primary communication channel for C2 (Command & Control) and Payload. To this end, UAVs will be able to operate BVLOS, within Cellular Network limitations ensuring seamless and reliable communication. This implementation must always be in respect to 3GPP (3rd Generation Partnership Project) standing standardizations.

In the context of this research, the necessary theoretical background for the analysis of the microwave propagation model, the communication requirements set by 3GPP as well as other studies with their conclusions in this field are presented. Particular emphasis is placed on the challenges that have arisen in these investigations as well as ways to address them to enhance the quality of UAV services. from the telecommunications network.

In this direction we implement a 4G LTE/5G UAV in order to study and analyze whether a cellular networked drone (with the current infrastructure) is able to fulfil the requirements in nowadays and future civil applications.

Keywords: Cellular Networks, 4G LTE/5G, UAV, Communications, Civil applications

Πρόλογος

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη που μου δίνει σε οποιαδήποτε επιλογή κάνω και για τη σωστή καθοδήγηση έτσι ώστε να θέτω τους σωστούς στόχους στη ζωή μου.

Αμέσως μετά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ομότιμο Καθηγητή της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων κ. Ιωάννη – Αλέξανδρο Κούκο για την βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε στα πλαίσια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, τίποτα από όσα εκπονήθηκαν δε θα ήταν δυνατά δίχως την υλικοτεχνική παροχή του Εργαστηρίου Συστημάτων Μάχης και Ναυτικής Τακτικής της ΣΝΔ (Σχολή Ναυτικών Δοκίμων) και του προσωπικού της UAS Team.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Υποστήριξη επικοινωνιών UAV με αξιοποίηση κατά το δοκούν τηλεπικοινωνιακών μέσων εξασφαλίζοντας seamless connectivity στις επιχειρήσεις των UAVs. Πηγή: Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang (2019). Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond. Proc. IEEE, submitted, arXiv/1903.05289.	28
Εικόνα 2 Διάγραμμα ακτινοβολίας ενός BS με 16 X-POL στοιχεία, ημίσεια ισχύς στις 65° και στραμμένα στοιχεία με κλίση 12° προς το έδαφος (ηλεκτρονικώς) από τον ορίζοντα. Πηγή (A. Kammoun 2014).	42
Εικόνα 3 UAVs - BSs με εφαρμογή τεχνολογιών aaUAV και mMIMOnulls. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).	50
Εικόνα 4 (a) Μέσος όρος περιπτώσεων, (b) 95% των περιπτώσεων τις UL ζεύξης με ένα, δύο, τρία, τέσσερα και πέντε UAVs εν πτήση αντίστοιχα. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).....	51
Εικόνα 5 Οι 3 use - cases του 5G μετά τεχνικών βελτιώσεων. Πηγή ITU-R Recommendation M.2083-0. September 2015.	53
Εικόνα 6 Χρήση UAV ως relay station του 5G δικτύου. Πηγή: Shah Khalid Khan (2020), Mathematical framework for 5G-UAV relay https://doi.org/10.1002/ett.4194	56
Εικόνα 7 Εφαρμογές μικροκυμάτων στα UAVs. Πηγή: ITU-R Recommendation M.2083-0. September 2015.	57
Εικόνα 8 Δομή MEC δια μέσου UAVs δικτυωμένων με 5G δίκτυο. Πηγή: Y. Yazid, Imad Ez – Zazi, Antonio – Guerro Gonzalez (2021), UAV-Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on AI: A Comprehensive Review https://doi.org/10.3390/drones5040148	58
Εικόνα 9 Διαφορετικά σενάρια παρεμπόδισης σήματος. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).....	61
Εικόνα 10 Κανάλι διάδοσης A – A vs A -G. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).....	66

Εικόνα 11 Ray tracing σε δύο διαφορετικά λογισμικά, (a) Altair Windrop και (b) Remcom Wireless Insite. Πηγή: David Matolak , , Hani Mehrpouyan, 2019, Detection, Localization, and Tracking of Unauthorized UAS and Jammers.....	68
Εικόνα 12 Γενικό περίγραμμα Ultra Dense Network. Πηγή: International Journal of Advanced Computer Science and Applications 9(11) DOI: 10.14569/IJACSA.2018.091123.....	71
Εικόνα 13 MIMO eNB beamforming. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).	72
Εικόνα 14 Διασύνδεση όλων των επί μέρους υπόσυστημάτων στην IMU, CubePilot.	78
Εικόνα 15 Διασύνδεση RPi Model 4 - CubePilot (Pixhawk).	79
Εικόνα 16 Συνδεσμολογία RPi με CubePilot στο UAS MERA.	79
Εικόνα 17 Τοπολογία δικτύου.	80
Εικόνα 18 Rpi camera v2 (8MP, 1080p). Πηγή https://grobotronics.com/raspberry-pi-camera-module-v2-8mp-1080p.html	80
Εικόνα 19 Διασύνδεση 4G LTE/5G Router με το RPi.....	81
Εικόνα 20 Δημιουργία VPN με δύο κόμβους (α) UAV και (β) GCS.....	83
Εικόνα 21 Το Mission Planner ως λογισμικό διακίνησης και έλεγχου C2 δεδομένων.....	84
Εικόνα 22 Δομή ενός MAVLINK frame.	85
Εικόνα 23 PRTG Network monitoring. Λογισμικό επιτήρησης και ανάλυσης QoS του τηλεπικοινωνιακού δικτύου που δημιουργήθηκε κατά τις δοκιμές.	86
Εικόνα 24 Πρώτη σύνδεση στο περιβάλλον του Mission Planner.	87
Εικόνα 25 Απόσταση UAS MERA με GCS.....	89
Εικόνα 26 Περιβάλλον προβολής Video κατά τη διάρκεια της δοκιμής.....	91
Εικόνα 27 Υποτύπωση θέσης UAS MERA κατά τη διάρκεια του trial #2... ..	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Επικοινωνιακές απαιτήσεις οριζόμενες από την 3GPP. Πηγή : 3GPP TR 36.777.	23
Πίνακας 2 Πιθανότητα επικοινωνιακής κάλυψης συναρτήσει ύψους πτήσης και terrain. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).....	37
Πίνακας 3 Πίνακας συλλεχθέντων στοιχείων από το trial #2.	89

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 Throughput συναρτήσει ύψους πτήσης UAV. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).....	33
Διάγραμμα 2 Πιθανότητα επικοινωνιακής κάλυψης συναρτήσει γωνίας Beamwidth. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).....	35
Διάγραμμα 3 Throughput συναρτήσει συναρτήσει γωνίας Beamwidth. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).....	36
Διάγραμμα 4 6 καμπύλες προσομοίωσης, οι οποίες καταδεικνύουν τη σχέση SINR ανά PRB, coupling loss συναρτήσει του ύψους πτήσης του UAV. Οι καμπύλες χωρίζονται σε τρεις περιπτώσεις: 5% καλύτερων επιδόσεων, μέσες επιδόσεις και 5% χειρότερες επιδόσεις. Πηγή (A. Kammoun 2014).....	43
Διάγραμμα 5 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ενός καναλιού C2 συναρτήσει του ύψους ενός SU UAV. Την επιθυμητή τιμή αποτελούν τα 100 kbps (3GPP Standardization). Πηγή (A. Kammoun 2014).....	44
Διάγραμμα 6 (6) καμπύλες προσομοίωσης BS με χρήση MIMO κεραιών, οι οποίες καταδεικνύουν τη σχέση SINR ανά PRB, coupling loss συναρτήσει του ύψους πτήσης του UAV. Οι καμπύλες χωρίζονται σε τρεις περιπτώσεις: 5% καλύτερων επιδόσεων, μέσες επιδόσεις και 5% χειρότερες επιδόσεις. Πηγή (A. Kammoun)....	46
Διάγραμμα 7 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ενός καναλιού C2 συναρτήσει του ύψους ενός mMIMO UAV. Την επιθυμητή τιμή αποτελούν τα 100 kbps (3GPP Standardization). Πηγή (A. Kammoun 2014).	47
Διάγραμμα 8 Διάγραμμα συλλεχθέντων στοιχείων από το trial #2.....	90

Συντμήσεις

AI:	Artificial Intelligence
BS:	Base Station
BW:	Bandwidth
CONOPS:	Concept of Operations
DL:	Down – Link
EW:	Electronic Warfare
GCS:	Ground Control Station
GU:	Ground User
GUE:	Ground User Equipment
MEC:	Machine end Computing
MIMO:	Multiple Input – Multiple Output
ML:	Machine Learning
MSL:	Mean Sea Level
OFDM:	Orthogonal frequency-division multiplexing
POC:	Proof of Concept
QoS:	Quality of Service
RB:	Resource Block
RNN:	Recurrent Neural Network
SDR:	Software Defined Radio
SINR:	Signal - Interference Noise Ratio
SONs:	Self-organizing networks
UAV:	Unmanned Aerial Vehicle
UDN:	Ultra Dense Networks
UL:	Up – Link
VPN:	Virtual Private Network

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	6
Abstract	7
Πρόλογος	8
Πίνακας Εικόνων	9
Κατάλογος Πινάκων	11
Κατάλογος Διαγραμμάτων	12
Συντμήσεις	13
Πίνακας περιεχομένων	14
1. Εισαγωγή	18
1.1 Κίνητρο	18
1.2 Σκοπός και Στόχος Εργασίας	19
1.3 Μεθοδολογία	20
1.4 Σχετικά έργα	21
1.5 Βασικό Θεωρητικό Πλαίσιο	22
1.5.1 Επικοινωνίες UAV & Φασματικές Απαιτήσεις	22
1.5.2 Πρότυπο 3GPP εξυπηρέτησης UAVs από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας	24
1.5.3 Πιθανές Υφιστάμενες Τεχνολογίες Ευριζωνικών Επικοινωνιών UAV	25
Direct Link	25
Satellite	26
Cellular Network	27
1.6 Νέες Ευκαιρίες και Προκλήσεις	28
1.6.1 Ύψος πτήσεως UAV	29
1.6.2 Υψηλή LOS πιθανότητα ζεύξης	29

1.6.3	Υψηλή Κινητικότητα και SWaP _____	30
2	Ανάλυση Απόδοσης Cellular – Connected UAVs _____	30
2.1	Επικοινωνιακές Απαιτήσεις των UAVs. _____	31
2.3	Σχεδιαστικές παράμετροι _____	33
2.3.1	Επιρροή ύψους πτήσης UAV _____	33
2.3.2	Επιρροή Beamwidth κεραίας του UAV _____	34
2.3.3	Επιρροή γωνίας κλίσης της κεραίας του UAV _____	36
2.3.4	Επιρροή περιβάλλοντος πτήσης UAV _____	37
2.3.5	Πύκνωση δικτύου _____	38
2.4	Διαπιστώσεις αξιοποίησης υφιστάμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου	38
3	Αναβάθμιση τηλεπικοινωνιακής ζεύξης δια μέσου χρήσης κεραιών Massive MIMO _____	40
3.1	Τοπολογία δικτύου _____	40
3.1	Αξιολόγηση προσομοιώσεων _____	41
3.1.1	SU Downlink C2 επιδόσεις _____	41
3.1.2	mMIMO SU Downlink C2 επιδόσεις _____	46
3.4	Μελλοντικές δυνατότητες χρήσης MIMO _____	49
3.5	Επιδόσεις UL καναλιού _____	50
4.	Μικροκυματικές επικοινωνίες (mmWave) UAV _____	52
4.1	Εφαρμογές χρήσης μικροκυμάτων στις επικοινωνίες των UAVs _____	55
4.1.1	Τα UAVs στο υπάρχον τηλεπικοινωνιακό δίκτυο _____	55
4.1.2	Εφαρμογές των UAVs στο μικροκυματικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο 57	
4.2	Μοντέλα καναλιών μικροκυματικών δικτύων _____	59
4.2.1	Επίδραση ατμοσφαιρικών συνθηκών _____	59
4.2.2	Παρεμποδίσεις κατά τη διάδοση _____	61

4.3	Βασικό μοντέλο διάδοσης μικροκυμάτων	64
4.4	Μοντέλο διάδοσης μικροκυμάτων A-A	65
4.5	Μοντέλο διάδοσης μικροκυμάτων A-G	66
4.6	System Design Implications	69
4.6.1	Συνύπαρξη με το υπάρχον τηλεπικοινωνιακό δίκτυο	69
4.6.2	Διαμοιρασμός διατιθέμενου φάσματος	70
4.6.3	Υπέρ – Πυκνά Δίκτυα	71
4.6.4	Beamforming μέσω μηχανικής μάθησης	72
4.7	5G ως μέσω Ηλεκτρονικού πολέμου	73
5	Ενσωμάτωση 4G LTE/5G δικτύου σε UAV	76
5.1	Ομάδα Εργασίας	76
5.1	Διασυνδέσεις Hardware	77
5.2	Απαιτήσεις Software	82
5.2.1	Zero Tier VPN	82
5.2.2	Mission Planner	84
5.2.3	MAVlink	85
5.2.4	PRTG Network Monitor	85
5.3	UAS MERA Trials	86
5.3.1	1 st Trial	87
5.3.2	2 nd Trial	88
6.	Συμπεράσματα	92
7.	Future Work	94
	Βιβλιογραφία	96

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΩΣ ΚΕΝΗ/PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

1. Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο

Είναι γεγονός ότι τα Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα Εναέρια οχήματα ήδη έχουν αποκτήσει πρωταγωνιστικό ρόλο σε πληθώρα εφαρμογών, στρατιωτικών και πολιτικών. Πιο συγκεκριμένα, ο εν λόγω τομέας αναμένεται να έχει έσοδα 500 δισεκατομμυρίων δολαρίων στην παγκόσμια αγορά B2B έως και το 2028, προερχόμενα κυρίως από τον κατασκευαστικό τομέα, τη γεωργία, την πολιτική προστασία και την άμυνα. Η συγκεκριμένη εκτίμηση, δεν πρέπει να προκαλεί εντυπώσεις καθ' ότι αν αναλογιστεί κανείς τις προοπτικές της αξιοποίησης των υφιστάμενων τεχνολογιών (AI, τηλεπικοινωνίες, αισθητήρες κ.ο.κ) στην πληθώρα εφαρμογών.

Μια από αυτές τις τεχνολογίες αποτελούν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G) και τα ευρυζωνικά δίκτυα. Ειδικότερα, η αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία αποτελεί σημείο κλειδί για την αξιοποίηση των UAV στο σύνολο των εφαρμογών που δύναται να εξυπηρετήσουν, με ασφάλεια, εφ' όσον εξασφαλίζεται ο έλεγχος της αποστολής, η συνεχής (seamless) και αμφίδρομη επικοινωνία με το όχημα. Τέτοιες εφαρμογές αποτελούν η διανομή πακέτων, η έρευνα & διάσωση, η άσκηση & επιβολή του νόμου, η γεωργία ακριβείας και οι επιθεωρήσεις εγκαταστάσεων είναι γόνιμα πεδία για την αξιοποίηση των δικτύων 5G από τα UAV. Τα δίκτυα των UAV αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του ευρύτερου συνόλου IOT στους αιθέρες, το οποίο αναμένεται να διαδραματίσει καίριο ρόλο στις μέλλουσες Smart cities.

Η ανάπτυξη αυτών των συστημάτων αποσκοπεί στην ενσωμάτωση των υφιστάμενων τηλεπικοινωνιακών υποδομών στις επικοινωνίες των UAV, αποτελώντας το δίκτυο κορμού τους, αυξάνοντας σημαντικά τις επιχειρησιακές τους δυνατότητες. Ένα τέτοιο εγχείρημα πρόκειται να εξοικονομήσει σημαντικό κεφάλαιο από την παγκόσμια αγορά (η επένδυση στην ανάπτυξη παρόμοιου δικτύου αποκλειστικά για χρήση UAV έχει απαγορευτικό κόστος) ενώ επιτρέπει τις ασφαλείς

και πιστοποιημένες¹ BVLOS πτήσεις των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών, γεγονός το οποίο θα δημιουργήσει πρόσφορο έδαφος στην παγκόσμια αγορά.

1.2 Σκοπός και Στόχος Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της ανάπτυξης δικτύων επικοινωνιών UAV μέσω των υφιστάμενων δικτύων LTE/4G, μελλοντικών υποδομών δικτύων κινητής τηλεφωνίας 5G και Ευρυζωνικών Ασυρμάτων Ζεύξεων.

Αρχικά, θα αναλυθούν οι δυνατότητες που προσδίδουν οι εν λόγω τεχνολογίες στη ζεύξη και μεταφορά δεδομένων των UAS προκειμένου οι πτήσεις τους να καθίστανται ασφαλείς και σύμφωνα με τα πρότυπα της 3GPP. Δευτερευόντως, θα αναλυθούν οι προκλήσεις στην υλοποίηση του εν λόγω εγχειρήματος μέσα από την παρουσίαση υφιστάμενων μελετών και πειραματικών διατάξεων. Ακολούθως, αποτυπώνονται τα συμπεράσματα της μελέτη των ερευνών αυτών ενώ διατυπώνονται προβληματισμοί.

Παράλληλα, εξετάζεται μέσα από τη διαμόρφωση του UAS MERA του Εργαστηρίου Συστημάτων Μάχης και Ναυτικής Τακτικής της ΣΝΔ (Σχολή Ναυτικών Δοκίμων) η αξιοποίηση του υφιστάμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου LTE - 5G επαληθεύοντας τα συμπεράσματα από τις προαναφερθέντες μελέτες και των ανωτέρω προσομοιώσεων.

Συγκεκριμένα, μέσα από μια σειρά δοκιμών και τη χρήση κατάλληλου software και hardware επιτυγχάνεται η δικτύωση μέσω 4G LTE/5G του UAS MERA. Μέσα λοιπόν από τις εν λόγω δοκιμές προκύπτουν τα απαιτούμενα συμπεράσματα τα οποία απαντούν στο θεμελιώδες ερώτημα της παρούσας εργασίας, δηλαδή, αν το υφιστάμενο τηλεπικοινωνιακό (και μελλοντικό ολοκληρωμένο δίκτυο 5^{ης} γενιάς) δύναται να υποστηρίξει επαρκώς τις αποστολές των UAV.

¹ Κατά τα πρωτόκολλα 3GPP.

1.3 Μεθοδολογία

Στην υπόψη εργασία περιγράφονται τα «*Δίκτυα Επικοινωνιών UAV μέσω Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας 4G LTE/5G & Ευρυζωνικών Ασυρμάτων Ζεύξεων (Wideband Wireless Links)*». Συγκεκριμένα, εξετάζεται η ενσωμάτωση του υφιστάμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου και ιδιαίτερο του δικτύου 5^{ης} γενιάς ως βασικό δίκτυο επικοινωνίας των UAV στην υποστήριξη αφενός του C2 δικτύου και αφετέρου του ωφέλιμου φορτίου.

Η μελέτη αυτή αποτελείται από 2 στάδια, όπως παρακάτω:

1^ο Στάδιο: Τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προς συλλογής καίριων για την υφιστάμενη έρευνα δεδομένων ώστε να περιγραφεί το ευρύτερο θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας. Σε αυτό το στάδιο συμπεριλαμβάνεται η παρουσίαση συμπερασμάτων υφιστάμενων μελετών σχετικών με την παρούσα προς τη μετέπειτα σύγκρισή τους.

2^ο Στάδιο: Διαμόρφωση του UAS MERA ως UAV 4G LTE/5G enabled. Δηλαδή, η κατάλληλη τοποθέτηση software και hardware στο εν λόγω drone καθώς και η διεκπεραίωση μιας σειράς δοκιμών προς εξαγωγή στοιχείων.

3^ο Στάδιο: Ανάλυση των συλλεχθέντων από τις δοκιμές στοιχείων προς εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων. Παράλληλα πραγματοποιείται ο σχολιασμός των εν λόγω συμπερασμάτων καθώς και η σύγκρισή τους με τις υφιστάμενες μελέτες. Τέλος παρουσιάζονται οι προκλήσεις και οι προοπτικές αξιοποίησης της εν λόγω τεχνολογίας βασιζόμενοι πάντα στα εξαχθέντα στοιχεία.

1.4 Σχετικά έργα

Οι πρώτες έρευνες εξέτασαν σε πρώτη φάση την έκταση της γεωγραφικής τηλεπικοινωνιακής κάλυψης στα UAVs καθώς και την ποιότητα των υπηρεσιών τους. Για παράδειγμα, στην έρευνα (M. M. Azari, F. Rosas, and S. Pollin, 2019) προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε χαμηλά ύψη τα drones παρουσιάζουν QoS πανομοιότυπη με εκείνη των επίγειων χρηστών (σχετικά παραπλήσια ύψη). Ωστόσο, σε υψηλά ύψη, περισσότερο επιζήμια για την ζεύξη αποδείχτηκε η αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ BS και UAVs παρά το γεγονός ότι τα τελευταία εξυπηρετούνταν, κυρίως, από πλευρικού λοβούς των BSs. Η έρευνα αυτή, έδειξε επίσης, πως η εξυπηρέτηση ενός UAV από έναν απομακρυσμένο BS (καταπιέζοντας και απορρίπτοντας τα σήματα των κοντινών BSs ενδέχεται να περιορίσει σημαντικά τις παρεμβολές, ενώ θα επιτρέψει την LOS, επικοινωνία του κύριου λοβού του BS με τα UAVs.

Εκτός από τις πανεπιστημιακές έρευνες, σημαντικές εξίσου, μετά των συμπερασμάτων τους αποτέλεσαν και οι βιομηχανικές έρευνες. Πιο συγκεκριμένα, ο Αμερικανικός πολυεθνικός κολοσσός Qualcomm (Qualcomm, 2017) ανέφερε ότι τα UAV είναι ικανά να επικοινωνούν με πλήθος BS, όσο αυξάνουν το ύψος τους, λόγω της ευκολίας LOS ζεύξης τους ενώ τα επίπεδα παρεμβολών παραμένουν υψηλά. Επίσης, προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι omnidirectional κεραίες των UAVs έχουν χαμηλή απόδοση σε χαμηλά ύψη έναντι των υψηλών.

Η Bell Labs (G. Giordano, 2018) στο Δουβλίνο εξέτασε την αξιοποίηση της τεχνολογίας MIMO μέσω ενσωμάτωσης των αντίστοιχων κεραιών προκειμένου να αμβλυνθούν τα επίπεδα παρεμβολών σε μεγάλα ύψη, μέσα από μια σειρά προσομοιώσεων. Πράγματι, η χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας, απέδειξε στις προσομοιώσεις, πως είναι ικανή να “σηκώσει” το συνολικό φορτίο (C2 – Payload) ικανοποιητικά, σεβόμενη της υπάρχουσες θεσμοθετήσεις. Επομένως, η παρούσα μελέτη, καταδεικνύει την πολλά υποσχόμενη τεχνολογία MIMO στα 5G δίκτυα των UAVs, ώστε να έχουν αξιόπιστες, αδιάλειπτες και γρήγορες επικοινωνίες.

1.5 Βασικό Θεωρητικό Πλαίσιο

Στις παρακάτω παραγράφους θα αναπτυχθεί το βασικό θεωρητικό πλαίσιο, το οποίο απαιτείται για την κατανόηση των βασικών ερευνητικών ερωτημάτων της εργασίας καθ' ότι και των ευρύτερων ερευνητικών ερωτημάτων.

1.5.1 Επικοινωνίες UAV & Φασματικές Απαιτήσεις

Οι τηλεπικοινωνίες αποτελούν θεμέλιο τμήμα των συστημάτων UAV. Πράγματι, μέσω αυτών, καθίσταται εφικτή η ανταλλαγή κρίσιμων για την ασφάλεια της πτήσης πληροφοριών καθώς και σημαντικά για την αποστολή δεδομένα. Πρόκειται, λοιπόν για τα εξής δίκτυα :

- Εκείνα που επικεντρώνονται και εξυπηρετούν πληροφορίες ασφαλείας (critical – safety info) με διάφορους συντελεστές (πλότους, κοντινά μη επανδρ. Οχήματα, Air traffic controllers για να διασφαλίσουν το ασφαλές αξιόπλοο της πτήσης. Οι εν λόγω επικοινωνίες αποτελούν τις CNPC – Non Payload Communication (ή αλλιώς C2 – Command & Control).
- Ανάλογα τις επιχειρησιακές απαιτήσεις απαιτείται η ανταλλαγή δεδομένων (timely mannered data) όπως φωτογραφίες, υψηλής ποιότητας βίντεο, δεδομένα αισθητήρων (π.χ. RADAR's κ.ο.κ) πακέτα από διάφορα gateways κλπ. Επομένως, γίνεται λόγος για Payload Communication.

Τα ανωτέρω δίκτυα στις 03 Μαΐου του 2017 μέσα από την τεχνική αναφορά της 3GPP (TR 36.777 3GPP) προσδιορίστηκαν ως ελάχιστες τιμές ως αναγράφονται στον κατωτέρω πίνακα (Πίνακας 1):

	Data Type	Data Rate	Reliability	Latency
DL (ground station to UAV)	Command and control	60–100 kbps	10^{-3} packet error rate	50 ms
UL (UAV to ground station)	Command and control	60–100 kbps	10^{-3} packet error rate	N/A
	Application Data	Up to 50 Mbps	N/A	Similar to ground user

Πίνακας 1 Επικοινωνιακές απαιτήσεις οριζόμενες από την 3GPP. Πηγή : 3GPP TR 36.777.

Κατ' αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία των CNCP δικτύων ειδικά κατά τη μαζική χρήση UAVs. Επιπλέον ο ITU έχει κατηγοριοποιήσει τα CNCP δίκτυα σε 3 ξεχωριστές κατηγορίες:

1. **Command & Control (C2):** Αφορά την τηλεμετρία του οχήματος (π.χ. flight status) από τον χειριστή προς το Control Station (και αντιστρόφως) καθ' ότι και Update του Mission Status (π.χ. προσθαφαίρεση Waypoints κ.ο.κ.)
2. **ATC:** Εφόσον τα UAV επιχειρούν σε περιβάλλον πυκνού αεροπορικού traffic και πλησίον επανδρωμένων αεροσκαφών είναι εξίσου καίριο να διατηρείται επικοινωνία με το ATC ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια πτήσεων.
3. **Sense & Avoid:** Εξασφαλίζει ότι το UAV κινείται ασφαλώς από έτερα UAV-A/Φ, terrain και εμπόδια.

Μετά από μελέτη του ITU προέκυψε το συμπέρασμα ότι προκειμένου να εξυπηρετηθεί ο μελλοντικός αριθμός UAV, τηρώντας την TR 36.777, απαιτείται Bandwidth 34 MHz (terrestrial) και 56 MHz (satellite) για αμφότερες LOS & BLOS επικοινωνίες για τα CNCP δίκτυα. Γι' αυτό το λόγο, στη συνεδρίαση WRC – 12 θεσπίστηκε το εύρος συχνοτήτων C – Band (5030–5091MHz) για τη φιλοξενία των CNCP δικτύων.

1.5.2 Πρότυπο 3GPP εξυπηρέτησης UAVs από δίκτυα κινητής τηλεφωνίας

Η αξιοποίηση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου για υποστήριξη των επικοινωνιών των UAVs στις C&C – Payload ζεύξεις βρίσκεται στο διεθνές επίκεντρο ερευνών, εφ' όσον το δίκτυο 5^{ης} γενιάς παρέχει εξαιρετικές δυνατότητες και προοπτικές. Την τάση, λοιπόν, αυτή μελέτησε και η 3GPP στο πλαίσιο της υφιστάμενης LTE (και μελλοντικά 5G) υποδομής, της δικτυακής κατηγοριοποίησης και των επικοινωνιακών απαιτήσεων. Τα πρώτα πρωτόκολλα έκαναν την εμφάνιση τους το 2017 τα οποία μεταξύ λαμβάνοντας υπόψιν τις μελλοντικές προκλήσεις κατηγοριοποίησαν τα δίκτυα των UAVs σε δύο κατηγορίες (Command and Control – Application Data) ως αναφέρθηκε και πρωτότερα.

Όπως ορίζει το πόρισμα της μελέτης αυτής (τεχνικό πρωτόκολλο 3GPP (TR 36.777 3GPP) για την εξαγωγή των συμπερασμάτων έγιναν οι εξής παραδοχές:

- 1) C&C: Μέγεθος πακέτων περί τα 1.250 bytes, one – way latency = 50ms και αξιοπιστία 10^{-3} (error loss)
- 2) Application data (Payload): Τεχνικές προδιαγραφές ως ορίζονται και στους LTE επίγειους χρήστες (επίπεδο packet size & latency) ενώ μοναδική διαφορά αποτελεί το UL κανάλι το οποίο πρέπει να είναι στα 50 Mbps.

Το ανωτέρω πόρισμα προέκυψε μέσω προσομοιώσεων που πραγματοποίησε η επιστημονική ομάδα. Γενικώς, το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι η υφιστάμενη υποδομή τηλεπικοινωνιακού δικτύου LTE δύναται να εξυπηρετήσει τους αναériους χρήστες, υπό προϋποθέσεις, σε χαμηλό ύψος πτήσης, όχι έντονη κινητικότητα και μικρό αριθμό. Αξίζει να σημειωθεί, επιπλέον, πως θέτει την απαίτηση αναγνώρισης εναέριων χρηστών από το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο για τη βέλτιστη εξυπηρέτηση αυτών.

1.5.3 Πιθανές Υφιστάμενες Τεχνολογίες Ευριζωνικών Επικοινωνιών UAV

Προκειμένου, λοιπόν, να υποστηριχθούν τα CNCP και τα Payload δίκτυα (ακολουθώντας τα υφιστάμενα επικοινωνιακά πρότυπα 3GPP) στο σύνολο των εφαρμογών των UAV είναι επιβεβλημένη η χρήση κατάλληλων ασύρματων δικτύων. Αυτά τα δίκτυα είναι απαραίτητο να παρέχουν συνεχή (seamless) και αξιόπιστη συνδεσιμότητα καθ' ότι και υψηλό throughput σε κάθε μορφή επικοινωνίας στο 3D περιβάλλον. Λαμβάνοντας αυτά υπόψιν, τις διαθέσιμες επιλογές ασύρματων δικτύων αποτελούν :

- Direct Link
- Satellite
- Ad – hoc Network
- Cellular Network

Direct Link

Εξ' αιτίας της απλότητας σχεδίασης, η απευθείας point to point επικοινωνία μεταξύ UAV χρησιμοποιώντας μόνο μια μπάντα συχνοτήτων (2.4 GHz). Η εν λόγω ζεύξη αποτελεί την συνηθέστερη επιλογή επικοινωνιών μεταξύ UAV και χειριστή καθότι γίνεται χρήση των IEEE 802.11 πρωτοκόλλων (εύκολη συμβατότητα). Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα αποτελεί η περιορισμένη εμβέλεια της ζεύξης (LOS) η οποία εξαρτάται από τη γεωμορφολογία του εδάφους (terrain), την ύπαρξη εμποδίων, τις καιρικές συνθήκες, παρεμβολές από έτερες συσκευές κ.ο.κ. Συνεπώς, αυτά τα δίκτυα

δε θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τον επερχόμενο όγκο πληροφοριών της ανάπτυξης των UAV στο μέλλον.

Satellite

Αποτελεί μια βιώσιμη λύση για τις επικοινωνίες των Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων εφ' όσον παρέχουν παγκόσμια κάλυψη (global coverage). Πράγματι, στις περιοχές όπου το υπάρχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, οι περιοχές κάλυψης WiFi καθώς και οι λοιπές τεχνολογίες δικτύων δεν παρέχουν τηλεπικοινωνιακή κάλυψη, οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν μοναδική λύση. Λαμβάνοντας το γεγονός αυτό υπόψιν, η WRC – 15 θεσμοθέτησε ορισμένες μπάντες συχνοτήτων, εντός της Ku/Ka μπάντες, προς αποκλειστική εκμετάλλευσή τους μεταξύ δικτύωσης UAV – Satellite. Ήδη, το εν λόγω φάσμα αξιοποιείται από τηλεπικοινωνιακούς κολοσσούς (π.χ. Inmarsat) για υπηρεσίες σε UAV.

Αν και οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν φαινομενικά ιδανική λύση, στην πραγματικότητα παρουσιάσουν σημαντικές ελλείψεις για τον έλεγχο των UAV. Συγκεκριμένα, οι δορυφορικές επικοινωνίες υπόκεινται σε σοβαρότατες απώλειες (propagation losses) καθώς και καθυστερήσεις (delay – latency) μεταξύ Low Altitude UAVs/Control Stations & Satellites. Επομένως, δεν πληρούνται οι απαιτήσεις περί αξιόπιστης (ultra reliable) και delay sensitive CNCP ζεύξης.

Παραλλήλως, ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την εγκατάσταση δορυφορικών επικοινωνιών (κεραία, τροφοδοσία, oscillators, switches, routers κ.ο.κ) υπερβαίνουν κατά πολύ τα SWaP² constraints. Επομένως, μειώνουν δραστικά την αυτονομία των οχημάτων, τη δυνατότητα ελιγμών καθώς και το εύρος αξιοποίησής τους περιοριζόμενα σε UAV μεγάλων κατηγοριών. Αξιοσημείωτο δε, το επιχειρησιακό κόστος για civilian application χρήση, περιορίζει ακόμη περισσότερο τα περιθώρια κέρδους για τις επιχειρήσεις. Συνεπώς οι δορυφορικές ζεύξεις δεν αποτελούν βιώσιμη λύση για τα UAVs.

² SWaP: Size, Weight and Power.

Cellular Network

Έχοντας υπόψιν τα προαναφερθέντα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι καμία από τις ανωτέρω προ υπάρχουσες τεχνολογίες δε δύνανται να υποστηρίξουν μαζικές επιχειρήσεις UAV με cost effective manner τρόπο. Επιπροσθέτως, η ανάπτυξη νέου δικτύου, αυτού καθαυτού για υπηρεσίες Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών, είναι οικονομικά απαγορευτικό καθόσον αφενός δεν αφήνει περιθώρια κέρδους και αφετέρου προκύπτουν νομικές επιπλοκές (bandwidth allocation issues). Αντ' αυτών, λοιπόν, μια πολλά υποσχόμενη λύση αποτελεί η αξιοποίηση της υφιστάμενης υποδομής τηλεπικοινωνιακών δικτύων για τον έλεγχο των UAVs.

Πράγματι, η υφιστάμενη υποδομή τηλεπικοινωνιών παρέχει ευρεία κάλυψη, η οποία δύναται να εξυπηρετήσει και τους πιο απομακρυσμένους χρήστες. Επιπλέον, εκτός των κεραιών, διαθέτει και ένα ευρύ backhaul δίκτυο οπτικών ινών το οποίο σε συγκερασμό με το πρώτο παρέχει αυξημένες δυνατότητες παροχής CNCP και payload δικτύων, ανεξαρτήτως αριθμού UAV. Μάλιστα, αν αναλογιστεί κανείς τις τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν επιφέρει και θα συνεχίζουν να επιφέρουν τα 5^{ης} γενιάς δίκτυα (eMBB, URLLC, mMTC) εύκολα κατανοεί ότι όχι μόνο υπερκαλύπτονται οι απαιτήσεις της 3GPP αλλά αυξάνεται και το εύρος εφαρμογών των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών.

Παρά τα προτερήματα του υφιστάμενου LTE/5G δικτύου, πρέπει να σημειωθεί ότι η κάλυψή του αίρεται σε ορισμένες, δυσπρόσιτες περιοχές ή οι υπηρεσίες παρέχουν μειωμένο QoS. Επομένως, προκειμένου να γίνει λόγος για seamless connectivity, με κύριο κανάλι επικοινωνίας το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, θα πρέπει να εξεταστεί η εγκατάσταση εφεδρικού. Σε μια τέτοια περίπτωση, ως εφεδρικό δίκτυο θα μπορούσαν να είναι τα προαναφερθέντα (direct link, satellite) ή και ακόμα αυτοτελή δίκτυα (ad – hoc networks) μέσω FANET. Συνεπώς, έτσι θα εξασφαλιστεί η πανταχού παρούσα δικτυακή κάλυψη στον τρισδιάστατο χώρο , φέροντας εις πέρας τις εκάστοτε αποστολές των UAVs.



Εικόνα 1 Υποστήριξη επικοινωνιών UAV με αξιοποίηση κατά το δοκούν τηλεπικοινωνιακών μέσων εξασφαλίζοντας *seamless connectivity* στις επιχειρήσεις των UAVs. Πηγή: Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang (2019). *Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond*. Proc. IEEE, submitted, arXiv/1903.05289.

Στην Εικόνα 1 διαφαίνονται παραδείγματα συνδυασμού διάφορων τηλεπικοινωνιακών μεθόδων για την εξασφάλιση των επικοινωνιών των UAV.

1.6 Νέες Ευκαιρίες και Προκλήσεις

Η ενσωμάτωση των UAV στο ευρύτερο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δεν αποτελεί εύκολη υπόθεση. Οι προκλήσεις και τα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να εξασφαλιστούν επικοινωνιακές απαιτήσεις είναι πολλές. Ειδικότερα, όσον αφορά τις προκλήσεις γίνεται λόγος για την υψηλή κινητικότητα των UAVs, την ύπαρξη μεγάλης πιθανότητας LOS ζεύξης (λόγω υψομέτρου), των περιορισμών των κεραιών του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, τις ανάγκες μικρού SWaP κ.α. Ωστόσο, η επίλυση τέτοιων ζητημάτων δημιουργούν πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη ευρείας κλίμακας χρήση Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων σε πολιτικές εφαρμογές.

1.6.1 Ύψος πτήσεως UAV

Συγκρίνοντας το ύψος των πομπών και δεκτών των κλασσικών επίγειων τηλεπικοινωνιακών επικοινωνιών (BS – GU) με εκείνα των UAVs. παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική υψομετρική διαφορά. Πιο ειδικά, οι προ υπάρχουσες υποδομές LTE και οι υπό αναβάθμιση 5G, έχουν σχεδιαστεί, κυρίως για την εξυπηρέτηση GU, οι οποίοι εξυπηρετούνται σε χαμηλά ύψη. Γι' αυτό το λόγο, οι τηλεπικοινωνιακές κεραίες έχουν σχεδιαστεί να έχουν μια κλίση προς το έδαφος, είτε ηλεκτρονικώς είτε μηχανικώς εξυπηρετώντας τους GU χρήστες, περιορίζοντας σημαντικά τις αμοιβαίες παρεμβολές (inner cell interference). Απεναντίας, τα UAV δεν επιχειρούν, μόνο, σε αυτά τα ύψη (θεσμοθετημένο όριο τα 120m από την 3GPP). Επομένως, εξυπηρετούνται κυρίως από τους πλευρικού λοβούς των BS, ειδικά όσο αυξάνεται το ύψος πτήσεως. Συνεπώς, το QoS μειώνεται σημαντικά σε υψηλά ύψη, γεγονός το οποίο περιορίζει τις δυνατότητες των UAV.

1.6.2 Υψηλή LOS πιθανότητα ζεύξης

Το ύψος πτήσης των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών επιτρέπει την εύκολη LOS επικοινωνία με τους BS περιορίζοντας σημαντικά τα φαινόμενα multipath και shadowing που υπόκεινται οι επίγειοι χρήστες, εφόσον δεν παρουσιάζονται εμπόδια. Έτσι, παρέχεται καλύτερη, πιο αξιόπιστη ποιότητα ζεύξης μεταξύ BS - UAV με καλύτερη κατανομή πόρων (resource allocation) από τις συχνά εναλλασσόμενες ζεύξεις των GU λόγω fading. Απεναντίας, η LOS επικοινωνία δημιουργεί σοβαρές αμοιβαίες παρεμβολές αφενός στα UAV και αφετέρου στους δέκτες, εφ' όσον πολλά BS επικοινωνούν LOS με ένα UAV. Επί παραδείγματι, ένα UAV σε συγκεκριμένο ύψος (ήτοι 100m) δύναται να επιφέρει στο UL κανάλι τους (UAV προς BS) σημαντικές παρεμβολές καθότι τα BS θα λαμβάνουν πολλαπλά σήματα ίδιας συχνότητας.

Αντιστρόφως, στο DL κανάλι του (BS προς UAV) πολλαπλά BS στέλνουν ίδιας συχνότητας σήματα στο UAV, δημιουργώντας παρεμβολές. Επιπροσθέτως, η πλειάδα των LOS air – ground ζεύξεων καθιστά το κανάλι επικοινωνίας ευάλωτο σε

παρεμβολές 3^{ov} και κυβερνοεπιθέσεις (eavesdropping attacks) εν συγκρίσει με τις επίγειες ζεύξεις. Άρα, η κυβερνοάμυνα των εν λόγω ζεύξεων αποτελεί ακόμη μια πρόκληση για τα δίκτυα των UAVs.

1.6.3 Υψηλή Κινητικότητα και SWaP

Εκτός από το ύψος πτήσης των UAV μια ακόμη ειδοποιός διαφορά με τους επίγειους χρήστες αποτελεί η υψηλή κινητικότητά τους (high mobility). Πράγματι, τα drones έχοντας πάσα ελευθερία κινήσεων στον 3D χώρο, κινούμενα με υψηλές ταχύτητες. Αυτό έχει ως απόρροια την συχνή εναλλαγή δικτύωσης με αντίστοιχα BS (handovers). Επιπλέον, μέσα από το προφίλ πτήσεως ενός drone (ύψος, ταχύτητα σε κάθε άξονα, θέση) δύναται να προβλεφθεί η τροχιά του, άρα και αλληλουχία των δικτύωσης με BS οδηγώντας στον βέλτιστο προγραμματισμό κατανομής πόρων (resource allocation).

Παραλλήλως, τα UAV έχουν σημαντικά περιορισμένη αυτονομία εξαρτώμενη πάντα από τα ενεργειακά αποθέματα και το βάρος απογειώσεως τους. Επομένως, είναι εξοπλισμένα με energy efficient επικοινωνιακά συστήματα, προδιαγραφές τις οποίες πληροί ο εξοπλισμός των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Απεναντίας, οι BSs/Gus δεν έχουν παρόμοιους περιορισμούς διότι παρέχεται σταθερή ενέργεια από τις υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές.

2 Ανάλυση Απόδοσης Cellular – Connected UAVs

Είναι γεγονός ότι η διεκπεραίωση του συνόλου των πολιτικών εφαρμογών έχει θέσει πολύ υψηλά τον πήχη στις τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις, όπως άλλωστε διαφαίνονται και στις προδιαγραφές που έχει θέσει η 3GPP. Οι τελευταίες, αποσκοπούν κυρίως στην εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας, πτήσεως και ελέγχου των Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων παρέχοντας εν παραλλήλω τις απαιτούμενες υπηρεσίες της κάθε εφαρμογής. Βεβαίως, ένα τέτοιο εγχείρημα

αποτελεί τεράστια πρόκληση για την ευρύτερη αγορά, εφ' όσον οι υφιστάμενες τηλεπικοινωνιακές δομές έχουν σχεδιαστεί για την παροχή υπηρεσιών σε επίγειους χρήστες. Επομένως, διεγείρεται το ερευνητικό ερώτημα αν το δίκτυο αυτό δύναται να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις των UAVs. Τα συμπεράσματα από τις έρευνες, αφού ανέλυσαν και εξέτασαν πληθώρα θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υπό προϋποθέσεις, τα νέα δίκτυα 5^{ης} γενιάς, είναι ικανά να εντάξουν τις αποστολές των UAVs στο ευρύτερο IOT περιβάλλον διαμορφώνοντας τις μελλοντικές smart cities (Industry 4.0). Στις ακόλουθες παραγράφους θα αναλυθούν οι υφιστάμενες αυτές έρευνες μετά των συμπερασμάτων τους παραθέτοντας το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο.

2.1 Επικοινωνιακές Απαιτήσεις των UAVs.

Τα δίκτυα των UAVs πρέπει να εξυπηρετούν δύο σκοπούς. Τον πρώτο, αποτελεί οι υπηρεσίες C2 (command & control) ενώ τον δεύτερο η μεταφορά δεδομένων (payload communication). Εκτός αυτών, η παροχή των εν λόγω υπηρεσιών θα πρέπει να πληροί δύο σημαντικά κριτήρια.

- 1) Να παρέχουν ευρεία κάλυψη και συνεχή ζεύξη για να εξασφαλίσουν την αξιοπιστία της ζεύξης (δίχως διαλείψεις) και τον έλεγχο των αυτόνομων (και μη) αεροχημάτων.
- 2) Γρήγορη και ανθεκτική ζεύξη (low latency & robust) για να εξασφαλίσουν τον real time απομακρυσμένο έλεγχο.

Επιπλέον, είναι σπουδαίας σημασίας διότι μερικές από τις εφαρμογές των UAVs, έχουν υψηλότερες επικοινωνιακές απαιτήσεις. Αυτές αποτελούν:

- Υψηλό throughput για να επιτραπεί η μετάδοση/αναμετάδοση υψηλής ποιότητας real time video.

- Ασφαλής επικοινωνιακές ζεύξεις για την προστασία των χρηστών και των δεδομένων.
- Επιβεβαίωση τοποθεσίας για τον βέλτιστο έλεγχο αεροχώρου (ATC).
- Πιστοποιημένο φάσμα συχνοτήτων για αποκλειστική χρήση από Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη για αποφυγή αμοιβαίων παρεμβολών.
- Δυνατότητα αναβάθμισης του δικτύου για την υποστήριξη του αναπτυσσόμενου αριθμού UAVs καθώς και της τεχνολογικής εξέλιξης τους.
- Θεσμοθέτηση και αναπροσαρμογή νομοθετικών διατάξεων για την εξασφάλιση της εύρυθμης και ασφαλούς λειτουργίας των αεροχημάτων.

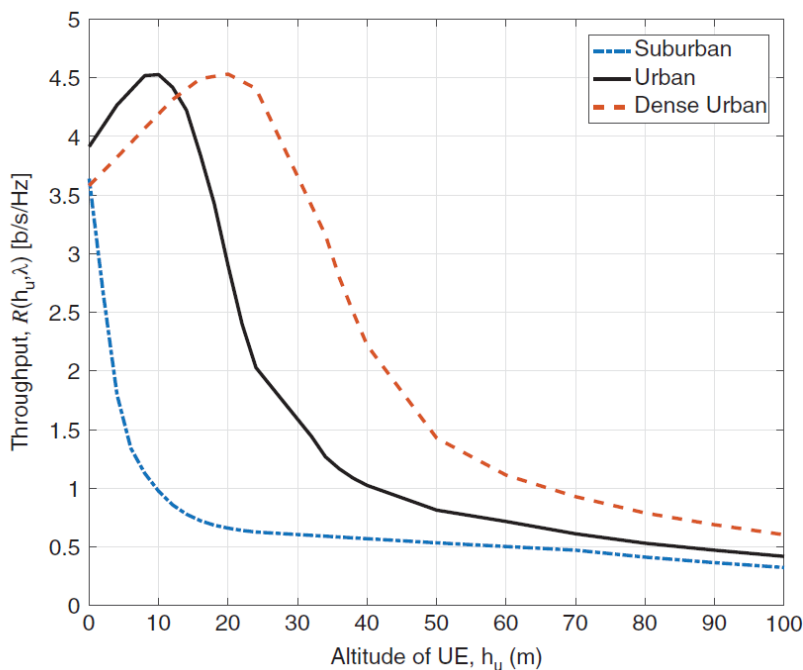
Σαφώς, η ενσωμάτωση των UAV δε θα αποτελεί μια απλή υπόθεση “plug n play” αλλά απαιτεί πολλαπλές, σημαντικές μεταρρυθμίσεις τόσο σε φυσικό επίπεδο (υφιστάμενο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο) όσο και λογισμικό. Για παράδειγμα, το σύνολο των BSs προκειμένου να εξυπηρετήσουν το σύνολο των επίγειων χρηστών έχουν στραμμένες της κεραίες τους με κλίση προς το έδαφος, με αποτέλεσμα τα UAVs να εξυπηρετούνται από πλευρικούς λοβούς (χαμηλή ποιότητα ζεύξης). Ακόμη, υπόκεινται σε αλληλο - παρεμβολές, οι οποίες προκύπτουν από την ύπαρξη πολλών LOS δικτυώσεων, στην ίδια συχνότητα, σε ένα τερματικό. Εύκολα, λοιπόν, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η ποιότητα υπηρεσιών από το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο στα UAVs είναι κατώτερου επιπέδου από εκείνη των επίγειων χρηστών, πόσο μάλλον δεν είναι ικανή να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές του TR 36.777 (3GPP).

2.3 Σχεδιαστικές παράμετροι

Στην παρούσα παράγραφο θα αναλυθεί το σύνολο των σχεδιαστικών παραμέτρων που επιδρούν στον επικοινωνιακό διάυλο UAV – BS καθώς θα διεξαχθούν συμπεράσματα και τρόποι αναβάθμισης της ζεύξης αυτής. Συγκεκριμένα, γίνεται μελέτη για την επιρροή στην επικοινωνιακή απόδοση του ύψους πτήσης του UAV, του bandwidth των κεραιών, τη γωνιακή κλίση της κεραιάς εκπομπής. Επιπλέον, παρουσιάζεται επιγραμματικώς η λύση της πύκνωσης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου για την βελτιστοποίηση της ποιότητας ζεύξης. Επιλογικά, γίνεται μελέτη για την επίδραση των γεωμορφολογικού terrain στις επικοινωνίες των UAVs.

2.3.1 Επιρροή ύψους πτήσης UAV

Γενικώς, το βέλτιστο ύψος πτήσης (για την επίτευξη του υψηλότερου throughput) είναι το εικονιζόμενο στο [Διάγραμμα 1](#).



Διάγραμμα 1 Throughput συναρτήσεως ύψους πτήσης UAV. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

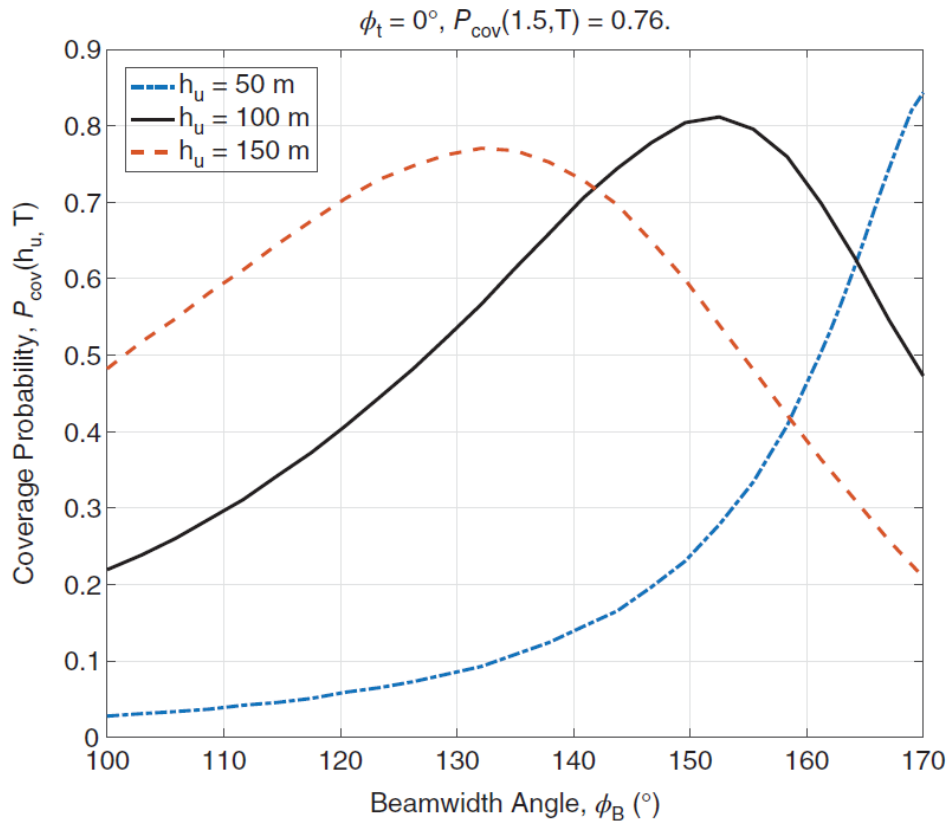
Πιο ειδικά, κατά τη διάρκεια ανόδου ενός UAV από έδαφος προς τα 100m μεταβαίνει σταδιακά από την κατάσταση NLOS σε LOS ζεύξη. Φαίνεται, λοιπόν, πως στα 10m (urban) και 20m (Dense Urban) υψομέτρου επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.

Αξίζει να σημειωθεί πως στο εν λόγω διάγραμμα, παρουσιάζεται η εκθετική πτώση της απόδοσης της ζεύξης σε Suburban περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει διότι η πυκνότητα των κεραιών, σαφώς, είναι μικρότερη. Το γεγονός αυτό σε συγκερασμό με το δεδομένο ότι, από κατασκευής, οι τηλεπικοινωνιακές κεραιές έχουν μια κλίση προς το έδαφος (προς εξυπηρέτηση των επίγειων χρηστών) δημιουργεί προβλήματα ζεύξης, εφ' όσον τα UAV εξυπηρετούνται από τους πλευρικούς λοβούς των κεραιών. Παράλληλα, λόγω της άμεσης LOS πολλαπλών BSs με τα UAVs, τα επίπεδα αλληλο-παρεμβολών αυξάνονται.

2.3.2 Επιρροή Beamwidth κεραίας του UAV

Το Beamwidth της κεραίας εκπομπής/λήψεως του UAV μπορεί να διαδραματίσει κομβικό ρόλο στις επικοινωνίες των UAV. Σε πρώτη φάση, εξετάζουμε μερικά χαρακτηριστικά της, όπως το beamwidth, του οποίου η τιμή δύναται να επαυξήσει σημαντικά τις δυνατότητες επικοινωνίας.

Πιο συγκεκριμένα, αυξάνοντας το Beamwidth, αυξάνεται ο αριθμός των διαθέσιμων BS, με αποτέλεσμα τα UAV να επιλέγουν τη βέλτιστη πηγή σήματος, βελτιώνοντας έτσι την επικοινωνιακή τους ζεύξη. Στον αντίποδα, μια αύξηση του Beamwidth, πέρα από τη μείωση του gain, θα επιτρέψει πολλά σήματα (ίδιας συχνότητας) να λαμβάνονται από την κεραία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παρεμβολής στον δέκτη που δημιουργούν τα σήματα αυτά. Επομένως, η αύξηση του Beamwidth δεν αποτελεί πανάκεια, αλλά πρέπει να εξεταστεί η «χρυσή τομή» στην οποία η το βέλτιστο σήμα σε συγκερασμό με τις παρεμβολές θα αποδώσουν τα μέγιστα στη ζεύξη.

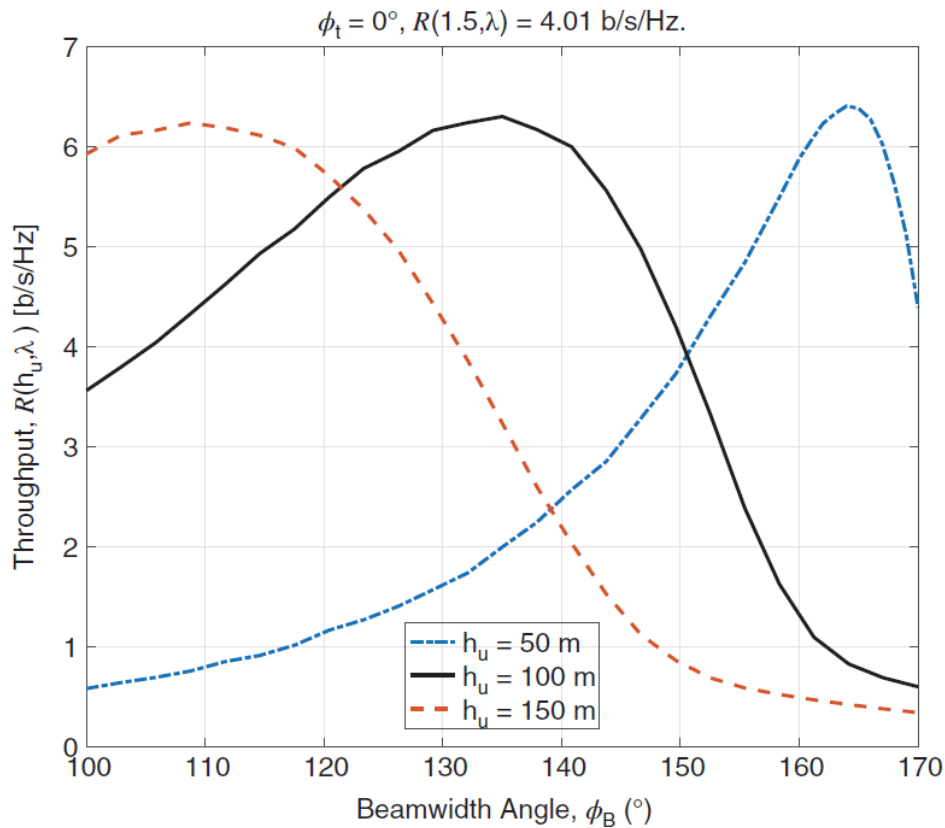


Διάγραμμα 2 Πιθανότητα επικοινωνιακής κάλυψης συναρτήσει γωνίας Beamwidth. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

Στο Διάγραμμα 2 φαίνεται ότι το Beamwidth στην τιμή $\Phi_B = 135, 152$ και 170 παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές τις πιθανότητας επικοινωνιακής κάλυψης (αναλόγως ύψους) για Dense Urban, Urban και Suburban αντίστοιχα.

Ομοίως, στο Διάγραμμα 3, οι τιμές $\Phi_B = 110, 135$ και 165 για την επίτευξη του βέλτιστου Throughput, με τις αντίστοιχες τιμές λήψεως.

Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, πως το βέλτιστο ύψος διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Ειδικότερα, αυτό συμβαίνει διότι το Throughput έχει εξαχθεί βάσει του M.O. συγκεκριμένου επιπέδου αναφοράς SINR. Απεναντίας, η πιθανότητα επικοινωνιακής κάλυψης έχει εξαχθεί βάσει μιας συγκεκριμένης (βέλτιστης) τιμής που επιτεύχθηκε, ως προς το SINR.



Διάγραμμα 3 Throughput συναρτήσει γωνίας Beamwidth. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

2.3.3 Επιρροή γωνίας κλίσης της κεραίας του UAV

Παρομοίως με το Beamwidth της κεραίας του UAV, αυξάνοντας τη γωνία κλίσης (άρα αλλάζοντας και το διάγραμμα ακτινοβολίας), δημιουργούνται ευεργετικά και αναιρετικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, αυξάνοντας την κλίση της κεραίας, αυξάνεται ο αριθμός BSs που λαμβάνονται από τον κύριο λοβό ενώ παράλληλα οι BSs περνάνε από την LoS στην NLoS συνθήκη.

Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει βελτίωση του λαμβανόμενου σήματος ενώ στη δεύτερη αυξάνονται οι BSs παρεμβολείς. Αντίστοιχα με την περίπτωση του Beamwidth, υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο στο οποίο παρουσιάζεται η καλύτερη

ποιότητα ζεύξης σε συγκεκριμένη γωνία κλίσης. Ακόμη, στην περίπτωση της μείωσης της γωνίας εκπομπής/λήψεως ενώ, μειώνονται σημαντικά οι παρεμβολές, δημιουργούνται ζητήματα εντοπισμού BS και απώλειας σήματος εν πτήση.

2.3.4 Επιρροή περιβάλλοντος πτήσης UAV

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης, καθώς και τις παραμέτρους που απαιτούνται για τη βελτίωσή της, αποτελεί το φυσικό περιβάλλον (terrain). Πράγματι, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4, η επιδόσεις ενός UE μειώνονται σε περιβάλλοντα χωρίς εμπόδια.

Ειδικότερα, σε μία προάστια περιοχή, η πιθανότητα τηλεπικοινωνιακής κάλυψης σε ύψος 150m μειώνεται από 90% σε μόλις 4% γεγονός πολύ πιο έντονο από την μείωση του 76% σε 10% σε αστικό περιβάλλον.

Ύψος πτήσης UAV h_u	Δεδομένο BW (kHz)	Επικοινωνιακή Κάλυψη (%)	
		Προάστιο	Αστικό
1.5	200	90	76
50	200	34	54
100	200	20	30
150	200	4	10
1.5	400	97	85
50	400	60	82
100	400	48	60
150	400	28	39

Πίνακας 2 Πιθανότητα επικοινωνιακής κάλυψης συναρτήσει ύψους πτήσης και terrain. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

Επιπροσθέτως, ένας επίγειος UE έχει τα βέλτιστα αποτελέσματα κάλυψης σε προάστιες περιοχές, εν αντιθέσει με ένα UAV το οποίο τα παρουσιάζει σε αστικό περιβάλλον. Είναι πασιφανές, λοιπόν, ότι η ποιότητα ζεύξης είναι άμεσα και βασικός

εξαρτώμενη από τις παρεμβολές των γειτνιαζόντων BSs, ενώ αυξάνεται γραμμικός με το διατιθέμενο BW. Αντίθετα, η ποιότητα κάλυψης δεν επηρεάζεται γραμμικός με το BW όπως άλλωστε φαίνεται στον Πίνακα 2. Η επιλογή του συγκεκριμένου BW για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε σκοπίμως, για την επίτευξη Throughput $R = 100\text{kps}$ το οποίο είναι και θεσμοθετημένο για το C&C δίκτυο των UAVs.

2.3.5 Πύκνωση δικτύου

Προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου (network capacity), ώστε να μπορεί να εξυπηρετηθεί ο αυξανόμενος αριθμός των Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων. Κατ' αυτό τον τρόπο, τα BSs θα βρίσκονται γεωγραφικώς κοντά στα οχήματα, επιτρέπονται ακόμα και τη χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων (millimeter waves) που αυξάνουν σημαντικά το παρεχόμενο Throughput. Ωστόσο, η πύκνωση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου δεν πρέπει να γίνει ανεξέλεγκτα, διότι η υπερβολική πύκνωση, θα επιφέρει και ανεπιθύμητες παρεμβολές. Επομένως, υπάρχει ένα βέλτιστο ποσοστό πύκνωσης στο οποίο η ποιότητα των ζεύξεων θα είναι η καλύτερη δυνατή. Σε κάθε περίπτωση, ένα τέτοιο εγχείρημα ενέχει σημαντικότερο κόστος το οποίο πρέπει να εξεταστεί αν, για τις παρεχόμενες υπηρεσίες, είναι επικερδές ή όχι.

2.4 Διαπιστώσεις αξιοποίησης υφιστάμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου

Μέσα από τις μελέτες και τα πειράματα που αναφέρθηκαν προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα σχετικά με την ενσωμάτωση του υφιστάμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου στις επικοινωνίες των UAV:

- Η απόδοση των UAV που χρησιμοποιούν omnidirectional κεραία είναι περιορισμένη. Αυτό συμβαίνει διότι δέχονται υψηλά επίπεδα παρεμβολών από όλες τις κατευθύνσεις των BSs (λόγω της LoS επικοινωνίας με αυτούς σε υψηλά ύψη

- Υπάρχει ένα βέλτιστο ύψος στην πτήση των UAV στο οποίο επιτυγχάνεται υψηλή τηλεπικοινωνιακή απόδοση (υψηλό throughput, μικρό latency κ.ο.κ) ακόμη και από έναν επίγειο χρήστη. Παρά ταύτα, το ύψος αυτό παραμένει αρκετά χαμηλό.
- Η κατάλληλη ρύθμιση της κεραίας Rx/Tx του UAV διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της ζεύξης. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε, η προσαρμογή του Beamwidth και τις γωνιακής κλίσης της κεραίας μπορούν να άρουν σε σημαντικά επίπεδα την επίδραση των παρεμβολών στο κανάλι επικοινωνίας. Ωστόσο, σε πυκνό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο οι εν λόγω ρυθμίσεις έχουν αμελητέα αποτελέσματα, επομένως απαιτείται η αναζήτηση έτερης λύσης.
- Η τοποθέτηση microBS (η ακόμα και femtoBSs) όπως και προβλέπεται στη δομή του 5G θα αναβαθμίσουν την ποιότητα ζεύξης εφ' όσον τα UAVs θα επιλέγουν τη βέλτιστη πηγή στην κοντινότερη απόσταση, απορρίπτοντας τις υπόλοιπες πηγές που δημιουργούν τις αμοιβαίες παρεμβολές.

Επομένως, είναι φανερό ότι η απόδοση των επικοινωνιών των UAV δια μέσου του υφιστάμενου τηλεπικοινωνιακού δικτύου περιορίζεται σημαντικά από τις παρεμβολές που δημιουργούνται από τα BSs. Μελλοντικά, ωστόσο, η τοποθέτηση περαιτέρω micro – femto BSs (η οποία θα επιτρέψει και την εκπομπή μικροκυμάτων – mmWaves) ενδέχεται να επιτρέψει τον ασφαλή χειρισμό των UAVs σε μεγαλύτερα ύψη και σε μεγαλύτερη απόσταση.

Επιλογικά, είναι αναγκαίο να εξεταστεί η χρήση πιο εξελιγμένων και περίπλοκων κεραιών (κεραίες MIMO) οι οποίες αίρουν σημαντικά φαινόμενα fading, τα οποία υποβαθμίζουν σημαντικά την ποιότητα ζεύξης με χρήση omnidirectional κεραιών.

3 Αναβάθμιση τηλεπικοινωνιακής ζεύξης δια μέσου χρήσης κεραιών Massive MIMO

Στο εν λόγω κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρήση MIMO (Massive Input Massive Output) κεραιών στα UAVs. Πιο συγκεκριμένα διερευνάται, αν η χρήση τέτοιων κεραιών δύναται να επαυξήσει την ποιότητα των επικοινωνιακών ζεύξεων σύμφωνα με τις ισχύουσες θεσμοθετημένες απαιτήσεις από την 3GPP δια μέσου της παρουσίασης της έρευνας του (Giovanni Geraci, 2021). Επίσης, απαντάται το ερώτημα αν απαιτείται περαιτέρω αναβάθμιση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου για την επαρκή υποστήριξη επίγειων και εναέριων χρηστών.

3.1 Τοπολογία δικτύου

Η εν λόγω έρευνα θεωρεί ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, το οποίο είναι αυτό κάθε αυτό σχεδιασμένο για εξυπηρέτηση επίγειων χρηστών (GUEs) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3. Τα BSs είναι τοποθετημένα σε εξαγωνικό σχήμα στο οποίο συνυπάρχουν, πάντα, 3 BSs τα οποία βρίσκονται σε γωνιακή κλίση 120° μεταξύ τους. Σε αυτό το δίκτυο, εξυπηρετούνται αφενός GUEs καθώς UAVs σε επίπεδο (UL/DL) μέσω datastreams και C&C πληροφορίες.

Οι GUEs είναι τοποθετημένοι σε μικρό ύψος (1.5m) εντός και εκτός κτηριακών εγκαταστάσεων, ενώ, τα UAVs δύναται να ίπτανται από χαμηλά ύψη έως και 300m (το οποίο θεωρείται και το ανώτατο όριο τηλεπικοινωνιακής υποστήριξης). Όλα τα τηλεπικοινωνιακά χαρακτηριστικά συμμορφώνονται με τις θεσμοθετημένες διατάξεις της 3GPP (3GPP, 2017).

Διακρίνουμε λοιπόν σε αυτό το δίκτυο δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, το BS λειτουργεί ως SU (Single User mode) ενώ στη δεύτερη ως mMIMO (Massive MIMO mode). Ειδικότερα:

- **SU (Single User mode):** κάθε BS είναι εφοδιασμένος με μια συστοιχία 8×1 κεραιών $\pm 45^\circ$ cross-πολωμένων (X-POL) στοιχείων, στραμμένων

ηλεκτρονικώς κατά 12° από τον άξονα του ορίζοντα προς το έδαφος. Θεωρούμε, επίσης, πως το αναλογικό σήμα διοχετεύεται σε μια μόνο πηγή. Το BS είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να εξυπηρετεί κάθε φορά ένα PRB σε κάθε συσκευή.

- **mMIMO (Massive MIMO mode):** Όμοια, κάθε BS είναι εφοδιασμένος με μια συστοιχία 8×8 κεραιών $\pm 45^\circ$ cross-πολωμένων (X-POL) στοιχείων, στραμμένων ηλεκτρονικώς κατά 12° από τον άξονα του ορίζοντα προς το έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, το αναλογικό σήμα διοχετεύεται σε δύο διαφορετικές πηγές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν 128 διαφορετικά στοιχεία κεραίας. Σε αυτή τη βάση και δια μέσου κατάλληλης κωδικοποίησης και χωρικής πολυπλεξίας (spatial multiplexing), καθίσταται εφικτή η διαμόρφωση 3D δεσμών (3D beamforming)

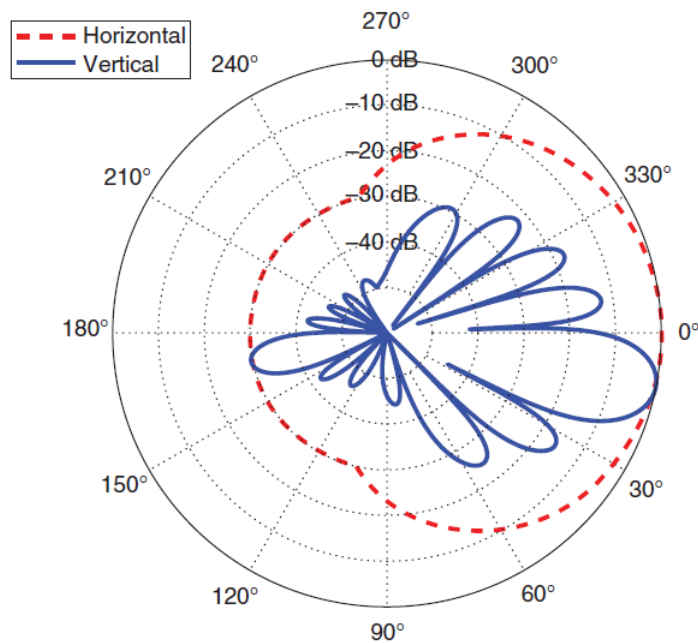
3.1 Αξιολόγηση προσομοιώσεων

Η αξιολόγηση της κάθε μιας από τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε από μια σειρά προσομοιώσεων (G. Geraci, 2018). Αμφότερες τις περιπτώσεις, για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν τα μαθηματικά μοντέλα της 3GPP (3GPP, 2017), όσον αφορά τη μοντελοποίηση καναλιών για αξιολόγηση τηλεπικοινωνιακής υποστήριξης των UAVs. Στο εν λόγω μοντέλο λαμβάνονται υπόψιν το σύνολο των παραμέτρων που επηρεάζουν μια ζεύξη (ήτοι fading, shadowing, antenna gain, coupling losses κ.ο.κ). Προσομοιάζοντας, λοιπόν, βάσει του εν λόγω μοντέλου διακρίνονται δύο περιπτώσεις επιδόσεων. Στην πρώτη περίπτωση, εξετάζεται η απόδοση στο κανάλι DL του SUE ενώ στη δεύτερη το αντίστοιχο DL Mmimo.

3.1.1 SU Downlink C2 επιδόσεις

Θεωρώντας ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, ως αναφέρθηκε ανωτέρω. Το δίκτυο αποτελείται από BSs το οποίο αποτελείται από $N_a = 16$, τοποθετημένα

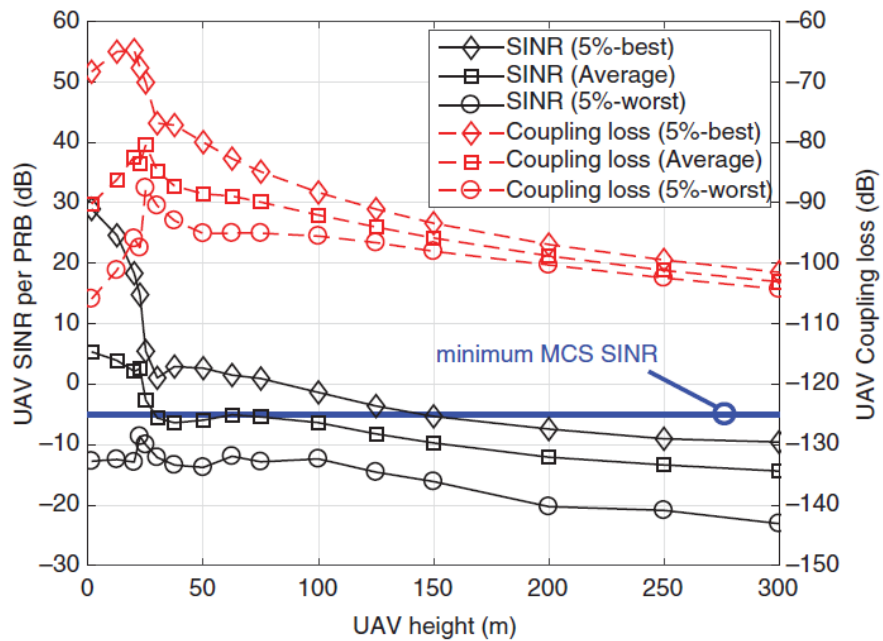
κατακόρυφος, στοιχεία κεραιών (X-POL), με ημίσεια ισχύς στις 65° και στραμμένα με κλίση 12° προς το έδαφος ως προς τον ορίζοντα ηλεκτρονικώς . Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας ενός τέτοιου BS. Θεωρούμε, επίσης, πως κάθε BS, εξυπηρετεί έναν και μόνο UE. Το εν λόγω τηλεπικοινωνιακό σχήμα προσομοιάζει την πλειοψηφία των υφιστάμενων δικτύων με υψηλή ακρίβεια (3GPP, 2006).



Εικόνα 2 Διάγραμμα ακτινοβολίας ενός BS με 16 X-POL στοιχεία, ημίσεια ισχύς στις 65° και στραμμένα στοιχεία με κλίση 12° προς το έδαφος (ηλεκτρονικώς) από τον ορίζοντα. Πηγή (A. Kammoun 2014).

Στο Διάγραμμα X παρουσιάζονται 6 καμπύλες, οι οποίες καταδεικνύουν τη σχέση SINR ανά PRB, coupling loss συναρτήσεως του ύψους πτήσης του UAV. Σε αυτό το διάγραμμα προκύπτουν οι εξής διαπιστώσεις:

- Καθώς το ύψος του UAV μεγαλώνει, σε ύψος περί των 25m, οι μέσες απώλειες coupling μειώνονται καθότι το αερόχημα, απόκτα LoS ζεύξη. Επιπλέον, όσο το UAV αυξάνει το ύψος του, αυξάνεται η απόστασή του από το BS, επομένως, το coupling loss αυξάνεται.

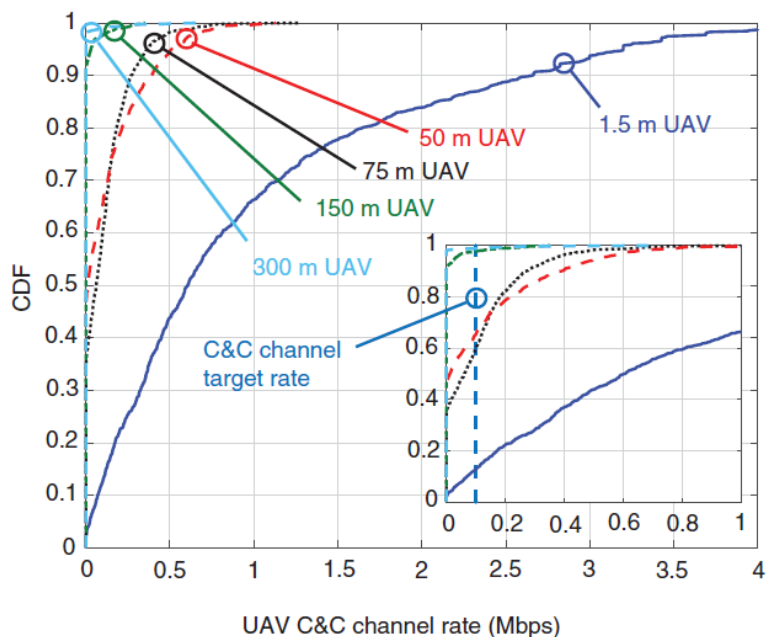


Διάγραμμα 4.6 καμπύλες προσομοίωσης, οι οποίες καταδεικνύουν τη σχέση SINR ανά PRB, coupling loss συναρτήσει του ύψους πτήσης του UAV. Οι καμπύλες χωρίζονται σε τρεις περιπτώσεις: 5% καλύτερων επιδόσεων, μέσες επιδόσεις και 5% χειρότερες επιδόσεις. Πηγή (A. Kamtoun 2014).

- Παρόμοια με την ανωτέρω περίπτωση, σε ύψος πτήσης παρατηρείται ιδιαίτερα μεγάλος λόγος SINR στο 5% των καλύτερων προσομοιώσεων. Αυτό συμβαίνει διότι το αερόχημα βρίσκεται εντός του κύριου λοβού του BS (άρα μεγάλο gain, λιγιστές και ασθενείς παρεμβολές).
- Απεναντίας, στις κατά μέσο όρο περιπτώσεις, πόσο μάλλον δε στο 5% των χειρότερων προσομοιώσεων, παρουσιάζεται αυξημένος λόγος SINR. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι αφενός το UAV (λόγω της LoS ζεύξης) γίνεται δέκτης ισχυρών παρεμβολών και αφετέρου από το γεγονός ότι δεν εξυπηρετείται από τον κύριο λοβό, αλλά οριακά από αυτό ή από τους πλευρικούς (μικρό gain, υψηλότερο coupling loss).

Όσο αυξάνεται το ύψος, ο λόγος SINR μειώνεται περαιτέρω, με χαμηλότερο δε ρυθμό απ' ότι το coupling.

Οι μετρούμενες, λοιπόν, τιμές του λόγου SINR ανα PRB δίνουν τη δυνατότητα να υπολογιστεί το data – rate του καναλιού C2 για Bandwidth της τάξεως των 10 MHz.



Διάγραμμα 5 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ενός καναλιού C2 συναρτήσει του ύψους ενός SU UAV. Την επιθυμητή τιμή αποτελούν τα 100 kbps (3GPP Standardization). Πηγή (A. Kammoun 2014).

Από το Διάγραμμα 5 προκύπτουν οι εξής διαπιστώσεις:

- Τα UAV σε ύψος 1,5 m επιτυγχάνουν τον στόχο των 100 kbps 87% του χρόνου και το 34% του χρόνου το throughput τους υπερβαίνει ακόμη και το 1 Mbps.
- Τα UAV σε ύψη 50 m και 75 m, αντίστοιχα, επιτυγχάνουν το ποσοστό-στόχο 35% και 40% του χρόνου μόνο, και τα εφικτά ποσοστά (ποσοστά στόχος) για αυτό το εύρος υψών σχεδόν ποτέ δεν φτάνουν το 1 Mbps (0,3% του χρόνου). και

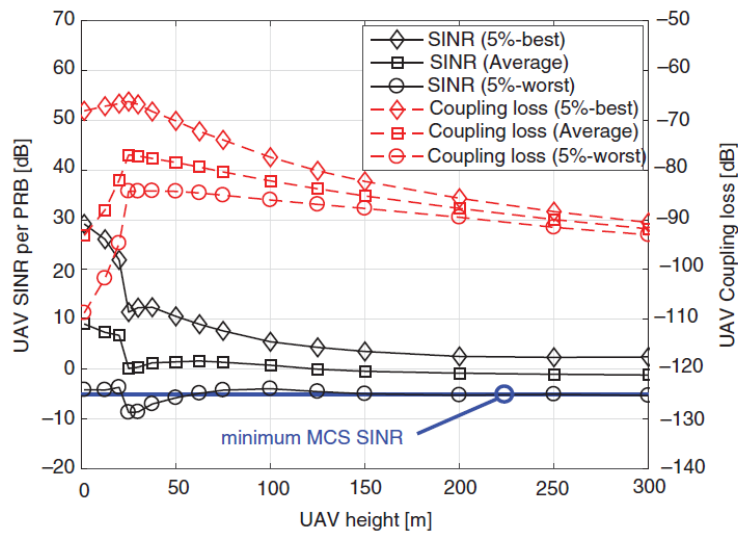
- Σε υψηλότερα ύψη, ο στόχος UAV των 100 kbps μπορεί να επιτευχθεί μόνο για μικρά κλάσματα του χρόνου, που ανέρχονται σε μόλις 2% και 1% για ύψη 150 m και 300 m, αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψιν τα ανωτέρω, συμπεραίνουμε ότι σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο με υψηλή κίνηση δεν είναι εφικτή η εξυπηρέτηση των UAVs. Αυτό συμβαίνει διότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν με βάση τις προσομοιώσεις (ακόμη και στα πιο αισιόδοξα σενάρια, θεωρώντας επίσης ότι τα UAVs ίπτανται σε λογικά για τη χρήση τους ύψη) δεν πληρούν τις προδιαγραφές που έχει θέσει η 3GPP.

3.1.2 mMIMO SU Downlink C2 επιδόσεις

Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση θεωρούμε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, αποτελούμενο από BSs που χρησιμοποιούν συστοιχίες κεραιών MIMO με δυνατότητες beamforming και χωρικής. Θεωρούμε λοιπό πως αποτελείται από 128 στοιχεία κεραιών, 8x8 επίπεδων κεραιών $\pm 45^\circ$ X-POL, τροφοδοτούμενες από 128 κυκλώματα αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, κάθε BS δύναται να εξυπηρετήσει έως και 8 χρήστες ανά PRB πολυπλεξίας (πάντα με ZF ψηφιακή κωδικοποίηση).

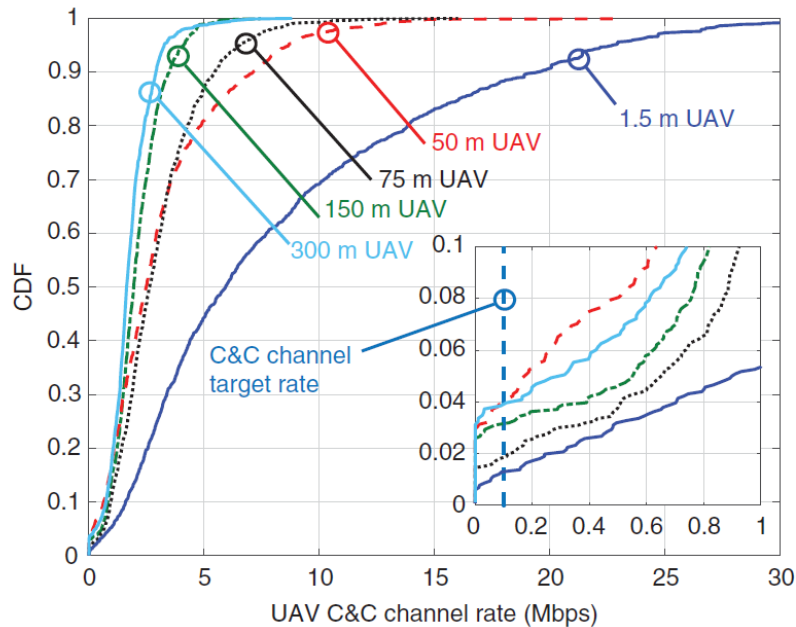
Εξετάζεται, λοιπόν, όπως και στην προγενέστερη περίπτωση η ποιότητα της C2 ζεύξης του UAV με τα BSs, αυτή τη φορά με τη χρήση MIMO κεραιών, παραθέτοντας τα αντίστοιχα Διαγράμματα 6 και 7.



Διάγραμμα 6 (6) καμπύλες προσομοίωσης BS με χρήση MIMO κεραιών, οι οποίες καταδεικνύουν τη σχέση SINR ανά PRB, coupling loss συναρτήσει του ύψους πτήσης του UAV. Οι καμπύλες χωρίζονται σε τρεις περιπτώσεις: 5% καλύτερων επιδόσεων, μέσες επιδόσεις και 5% χειρότερες επιδόσεις. Πηγή (A. Kamtoun)

Μέσα από το Διάγραμμα 6 μελετώνται το coupling loss, ο λόγος SINR ανά PRB και το data rate του καναλιού C2. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως

καθώς γίνεται η χρήση του MIMO εξοπλισμού, λαμβάνεται υπόψιν το 3GPP case 3 (3GPP, 2017), το οποίο ορίζει 1 UAV ανά 14 GUEs σε κάθε τομέα BSs. Προκύπτουν, λοιπόν, τα εξής συμπεράσματα:



Διάγραμμα 7 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής ενός καναλιού C2 συναρτήσει του ύψους ενός m MIMO UAV. Την επιθυμητή τιμή αποτελούν τα 100 kbps (3GPP Standardization). Πηγή (A. Kammoun 2014).

- Είναι εμφανές πως στα 25m ύψους ο λόγος SINR ανά PRB είναι χαμηλός, καθότι περισσότεροι BSs είναι ορατοί (δημιουργούνται παρεμβολές).
- Εγκαθιστώντας κεραιές MIMO καθίσταται εμφανέστατο ότι τα coupling losses περιορίζονται, λόγω του αυξημένου gain στον αέρα.
- Ο λόγος SINR ανά PRB αυξημένος και αυτό οφείλεται σε δύο φαινόμενα:

- Αρχικώς, οι MIMO κεραιές επιτρέπουν τη διαμόρφωση δεσμών (beamforming) αυξάνοντας σημαντικά το gain των κεραιών, άρα βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα της ζεύξης.
- Δευτερεύοντος, όπως ορίζεται και από το 3GPP case 3, τα BSs εξυπηρετούν ως επί το πλείστον, επίγειους χρήστες. Επομένως, οι πλειοψηφία των δεσμών είναι προς τα κάτω, περιορίζοντας σημαντικά τις παρεμβολές που πραγματοποιούνται σε χρήστες εδάφους και αέρα, εν αντιθέσει με τα SU BSs.
- Το Διάγραμμα 7 δείχνει πως ακόμη και στο 5% των χειρότερων περιπτώσεων, το κατώτερο όριο των 100 kbps επιτυγχάνεται.

Με βάση λοιπόν τα ανωτέρω διαπιστώνεται ότι οι mMIMO εγκαταστάσεις είναι ικανές να υποστηρίξουν επαρκώς, βάσει θεσμοθετήσεων της 3GPP, τα κανάλια C2 των UAVs παρέχοντας το 96% του χρόνου πτήσεως με ταχύτητες δεδομένων άνω των 100 kbps. Πράγματι, οι δυνατότητα beamforming, η οποία αφενός αυξάνει το gain των κεραιών και αφετέρου περιορίζει τις αμοιβαίες παρεμβολές αποτελεί σημείο κλειδί για την επαύξηση των επικοινωνιακών δυνατοτήτων των UAVs και του τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

3.4 Μελλοντικές δυνατότητες χρήσης MIMO

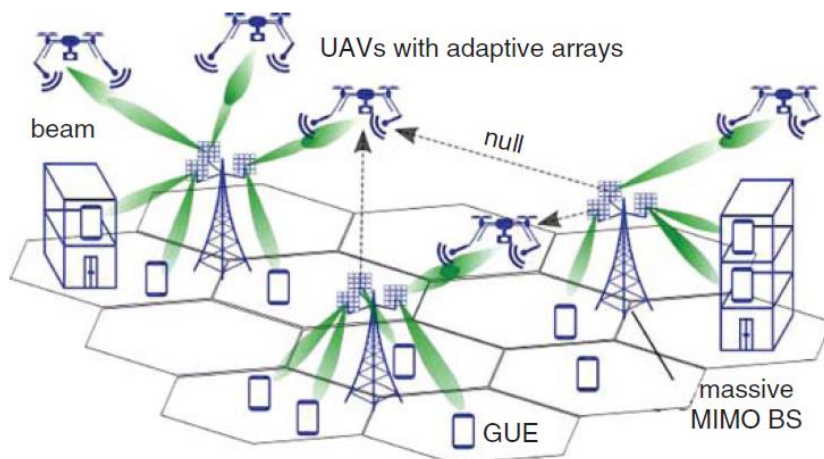
Όπως έγινε φανερό παραπάνω, η χρήση κεραιών MIMO σε επίπεδο υποδομών BSs δύναται να επαυξήσει σημαντικά τις επικοινωνιακές δυνατότητες των UAVs. Ωστόσο, μελλοντικά, ο ολοένα αυξανόμενος αριθμός UAVs σε συγκερασμό με την ανάγκη εξυπηρέτησης αυξημένου αριθμού επίγειων χρηστών (αν λάβουμε υπόψιν τις μελλοντικές smart cities με το IoT περιβάλλον) ενδέχεται να επηρεάσει τις επικοινωνίες των UAV.

Γι' αυτό το λόγο, είναι αναγκαίο να εξεταστεί και μελετηθεί η χρήση ορισμένων βελτιώσεων της MIMO τεχνολογία (A. Garcia-Rodriguez, 2019). Πιο συγκεκριμένα γίνεται λόγος για:

1) Προσαρμοζόμενες συστοιχίες κεραιών UAV (aaUAV³): Τα UAVs χρησιμοποιούν 2x2 προσαρμοζόμενες κεραιές αποτελούμενες από omnidirectional στοιχεία κεραιών μαζί με μια RF chain. Γενικότερα, τα UAVs επειδή έχουν άμεση LoS με τα BSs, δε χρησιμοποιούν χωρική πολυπλεξία, γεγονός το οποίο κάνει την επεξεργασία ψηφιακών και αναλογικών σημάτων συγκρίσιμη.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3 αυτή η αναβάθμιση θα επιτρέψει στα UAVs, με γνώση της διόπτρευσης και του ύψους τους σε σχέση με τον εξυπηρετούμενο BS, θα είναι ικανά να διαμορφώνουν κατάλληλα της κεραιές τους ώστε να επιτυγχάνουν το beamforming, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του καναλιού επικοινωνίας.

³ aaUAV: adaptive array UAV.



Εικόνα 3 UAVs - BSs με εφαρμογή τεχνολογιών aaUAV και mMIMOnulls. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

1) Massive MIMO BSs με null steering (mMIMOnulls): Τα BSs δια μέσου αυτή της τεχνολογίας αποκτούν διττό ρόλο κατά την λειτουργία τους. Αρχικώς, επιτρέπεται η περαιτέρω επεξεργασία εισερχόμενων και εξερχόμενων σημάτων. Πιο επεξηγηματικά, επιτυγχάνεται η αξιοποίηση της κατευθυντικότητας που επιτυγχάνουν οι κεραιές, απορρίπτοντας έτερα εισερχόμενα σήματα από γειτνιάζοντα UAVs, περιορίζοντας, σημαντικά, τις αμοιβαίες παρεμβολές. Επιπροσθέτως, εφαρμόζοντας χωρική ακτινοβολία, κατά τη διάρκεια ύπαρξης πολλαπλών τερματικών UAVs, επιλέγεται εκείνο το οποίο βρίσκεται κοντύτερα του BS (εφ' όσον επιτυγχάνεται LoS ζεύξης, αναβαθμίζεται η ποιότητα της ζεύξης).

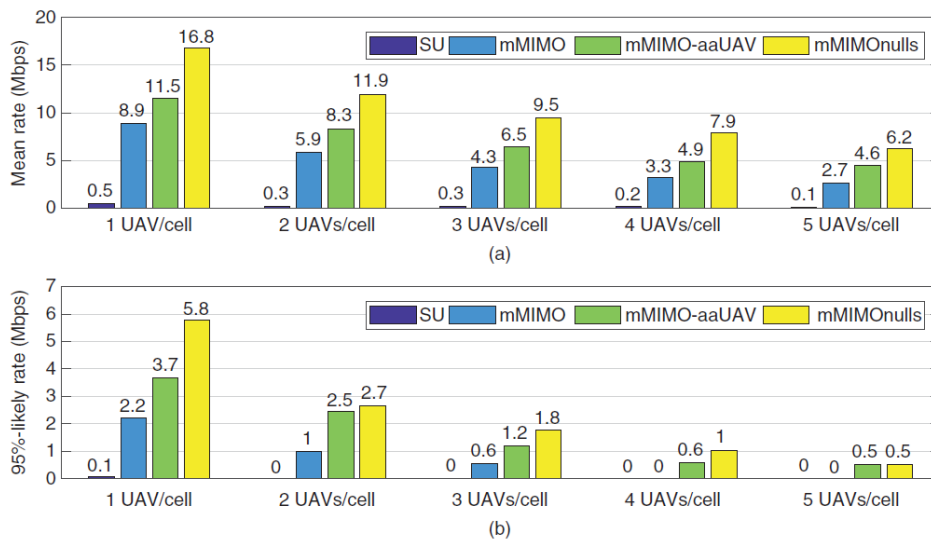
3.5 Επιδόσεις UL καναλιού

Εφ' όσον μελετήθηκε, θεωρητικώς, η απόδοση του καναλιού DL σε επίπεδο SU και mMIMO είναι αναγκαία η αναφορά στις UL (UAV σε BS) καναλιού, προς αξιολόγηση της ποιότητας των υπηρεσιών σε επίπεδο Payload.

Η εν λόγω αναφορά πραγματοποιείται δια μέσου της Εικόνας 4. Συγκεκριμένα απεικονίζει τις δύο περιπτώσεις στις οποίες (a) κατά μέσο όρο (b) το 95% των περιπτώσεων δικτύωσης UAVs (data rates) με cell σε διαφορετικά σενάρια. Τα

σενάρια αυτά, τα ύψη πτήσεως των UAVs έχουν φάσμα από 1.5m (ύψος απογείωσης) έως και 300m (φυσικό τηλεπικοινωνιακό όριο εμβέλειας). Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι τα σενάρια ακολουθούν τις προβλέψεις των διατάξεων της 3GPP όσον αφορά το αριθμό συνύπαρξης GUEs και UAVs (σταθερώς εξυπηρετούμενες 15 συσκευές ανά cell). Επομένως, καθώς αυξάνεται ο αριθμός εξυπηρέτησης των UAVs μειώνεται εκείνος των επίγειων χρηστών.

Αναλύοντας την Εικόνα 4, παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των εξυπηρετούμενων UAVs, μειώνεται (όχι αναλογικώς) η απόδοση του δικτύου. Αυτό οφείλεται δε στην περεταίρω επιφόρτιση των cell με παρεμβολές από τις UL – DL ζεύξεις των UAVs προς τα BSs. Γίνεται φανερό δε, επίσης, πως ακόμη η χρήση SU UAVs δεν μπορεί να επιτύχει τα οριζόμενα από την 3GPP, καθιστώντας το κανάλι επικοινωνίας αναξιόπιστο. Άρα, προκειμένου να διασφαλιστεί η αδιάλειπτη συνδεσιμότητα (seamless connectivity) στα οριζόμενα πρότυπα, είναι αναγκαία η χρήση MIMO τεχνολογίας, τόσο σε επίπεδο UAVs όσο και BSs.



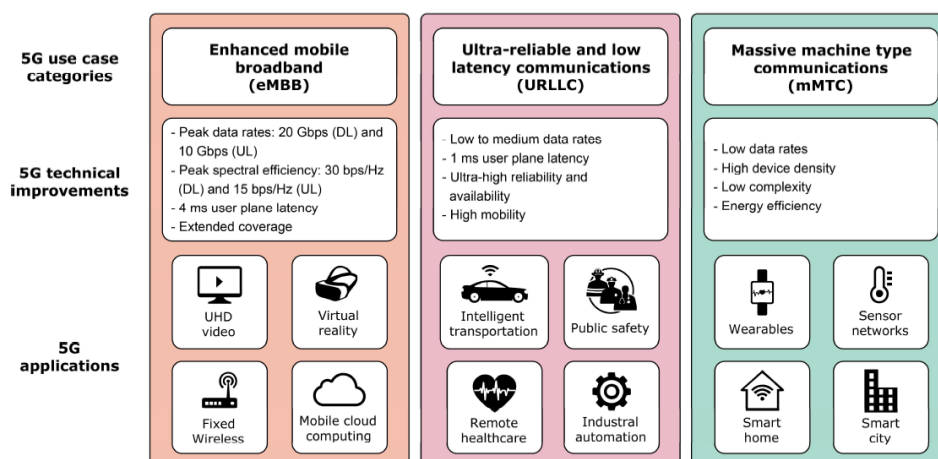
Εικόνα 4 (a) Μέσος όρος περιπτώσεων, (b) 95% των περιπτώσεων τις UL ζεύξης με ένα, δύο, τρία, τέσσερα και πέντε UAVs εν πτήση αντίστοιχα. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

Ωστόσο, η χρήση MIMO BSs παρά το γεγονός ότι επαυξάνει σημαντικά τις δυνατότητες επικοινωνιών έναντι των SU, δεν είναι ικανή να διατηρήσει υψηλή ποιότητα ζεύξης με μεγάλο αριθμό UAVs. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 4, φαίνεται πως αυξάνοντας τον αριθμό των UAVs από 1 σε 5, το data rate μειώνεται από 8.9 Mbps σε 2.7 Mbps. Αυτό, ως αναλύθηκε, οφείλεται στην αδυναμία των BSs να μειώσουν περαιτέρω τις παρεμβολές που δημιουργούνται από τον ολοένα αυξανόμενο αριθμό UAV.

Εύλογα, λοιπόν, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ένα τέτοιο δίκτυο δε θα είναι ικανό να εξυπηρετήσει έναν μεγάλο αριθμό εναέριων χρηστών. Σε επιφορτισμένα δίκτυα, ενδέχεται τα mMIMO – aaUAVs να μπορούν να φέρουν εις πέρας τις απαιτήσεις ενός τέτοιου δικτύου διατηρώντας C2 – Payload δίκτυο σε ικανοποιητικά επίπεδα (Εικόνα 5)

4. Μικροκυματικές επικοινωνίες (mmWave) UAV

Το υψηλό data – rate είναι εκείνο που επιτρέπει την ανάπτυξη και αξιοποίηση πληθώρας εφαρμογών από μη επανδρωμένα οχήματα. Αποτελεί ένα από τρία χαρακτηριστικά του δικτύου 5^{ης} γενιάς, εφ’ όσον παρέχει σημαντικά μεγάλο και αξιοποιήσιμο Bandwidth. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλυθεί η σημασία ενσωμάτωσης του 5G δικτύου (της χρήσης δηλαδή των μικροκυμάτων) στις επικοινωνίες των UAVs. Θα αναλυθεί, δηλαδή, τις εφαρμογές στις οποίες θα μπορούσε να γίνει η χρήση των μικροκυμάτων στα μη επανδρωμένα αεροχήματα, καθώς επίσης και θεμελιώδεις αρχές στη διάδοση των μικροκυμάτων σε Air 2 Ground και Air 2 Air κανάλια.



Εικόνα 5 Οι 3 use - cases του 5G μετά τεχνικών βελτιώσεων. Πηγή ITU-R Recommendation M.2083-0. September 2015.

Τα μικροκύματα αποτελούν τα φάσμα συχνοτήτων το οποίο αξιοποιεί το νέο δίκτυο 5^{ης} γενιάς και ειδικότερα τα 5G NR⁴. Μια θεμέλια διαφορά του από τα προηγούμενα αποτελεί το διευρυμένο Bandwidth (400 MHz) για το φάσμα συχνοτήτων από 28 GHz έως 40 GHz όπως ορίζει και το 3GPP Release 15 (J. Skold, 2018), συγκρινόμενο με το 20 MHz για συχνότητες κάτω των 2 GHz.

Όπως είναι γνωστό, εκ θεωρίας από το θεώρημα του Shannon και το Gaussian noise channel για ένα δεδομένο SINR και ένα σύστημα θα έχει $\text{Blog}(1+\text{SINR})$ χωρητικότητα δικτύου, επομένως είναι ανάλογο του Bandwidth. Αναλογιζόμεστε, λοιπόν, ότι η αύξηση του Bandwidth σε μεγάλα ποσοστά θα επιφέρει και πολύ υψηλές ταχύτητες. Βέβαια, στην πραγματικότητα είναι πολύ πιο περίπλοκο από μια απλή αναλογία.

Υπάρχουν πολλές προκλήσεις για την αξιοποίηση των μικροκυμάτων από τα UAV συγκριτικά με τους επίγειους χρήστες και τις υπάρχουσες υποδομές. Πιο ειδικά, η μεγάλη κινητικότητα των UAVs αποτελεί την κύρια πρόκληση, καθότι ένα 5G NR

⁴ NR: New Radios

(BS) πρέπει να διατηρεί συνεχώς LoS seamless ζεύξη προκειμένου να διατηρηθεί υψηλή η ποιότητα της σύνδεσης. Αυτό καθίσταται εφικτό με τη χρησιμοποίηση MIMO κεραιών η οποίες μέσω της χωρικής πολυπλεξίας σήματος, διαμορφώνουν δέσμες για την επίτευξη της δικτύωσης. Κατά αυτό τον τρόπο, θα μειωθούν οι αμοιβαίες παρεμβολές από γειτνιάζοντα UAV και BSs.

Ακόμα μια πρόκληση που επιφέρει η εισαγωγή των μικροκυμάτων και του 5G γενικότερα αποτελεί η επεξεργασία των σημάτων από τις MIMO κεραιές. Πιο συγκεκριμένα, αυτό που χαρακτηρίζει τα UAVs, αποτελώντας δε την ειδοποιό διαφορά τους από τους επίγειους χρήστες, είναι η υψηλή κινητικότητά τους και στις 3 χωρικές διαστάσεις. Αυτό σημαίνει, ότι οι δέσμες (MIMO signal beams) αφενός θα πρέπει να δημιουργούνται γρήγορα και αφετέρου να διατηρούνται στο δέκτη των οχημάτων, ανάλογα πάντα την κάθε περίπτωση. Επί παραδείγματι, για ένα UAV με την εφαρμογή του relay station (αναμεταδότης), διατηρείται σταθερό (fixed) σε ένα γεωγραφικό σημείο (σταθερές συντεταγμένες).

Αρα τα φαινόμενα multipath και fading δεν περιορίζουν, σημαντικά, την επικοινωνία μεταξύ UAV – BS, η οποία είναι LoS. Απεναντίας, ένα UAV – διανομέας, το οποίο εκτελεί παράδοση αγαθών/προϊόντων σε μια καθορισμένη τοποθεσία, δε διατηρεί μόνιμη, LoS ζεύξη με ένα BS, αλλά δημιουργούνται πολλά handovers ανάμεσα σε BSs (εντός της πορείας του UAV) ενώ η ανάγκη δημιουργίας και διατήρησης ζεύξης μέσω των MIMO beams είναι πολύ σημαντική για τη διεκπεραίωση της αποστολής.

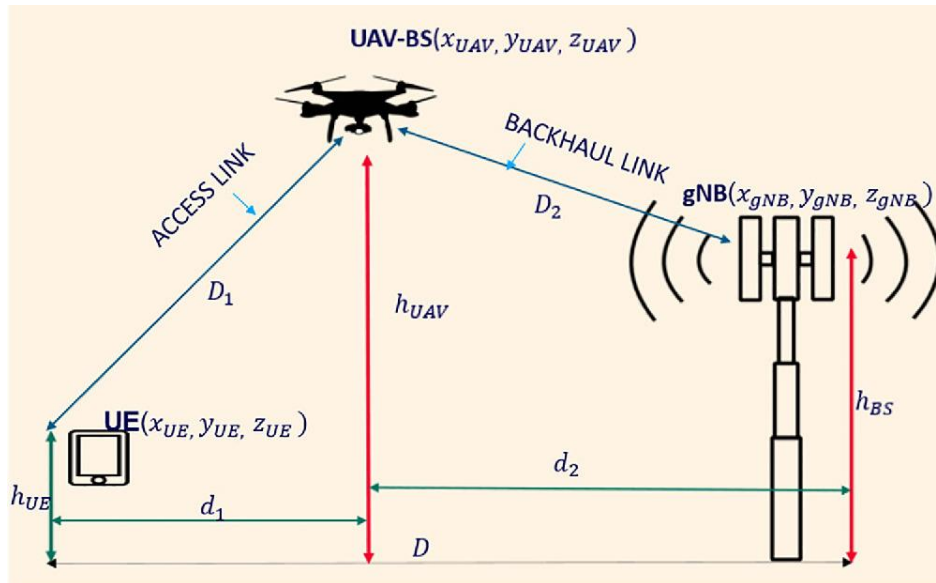
Τα παραπάνω παραδείγματα, λοιπόν, καταδεικνύουν, πως η χρήση μικροκυματικών κεραιών MIMO, δεν αποτελεί plug ‘n’ play λύση και πανάκεια στα τηλεπικοινωνιακά προβλήματα, αλλά απαιτεί μελέτη των αδύναμων σημείων για τη βέλτιστη αξιοποίησή τους στα μη επανδρωμένα αεροχήματα.

4.1 Εφαρμογές χρήσης μικροκυμάτων στις επικοινωνίες των UAVs

Δε αποτελεί, πλέον, γεγονός πως κύριο “selling point” του 5G δικτύου αποτελεί η υψηλή ταχύτητα δεδομένων που προσφέρει, σε συγκερασμό με το low latency και της αξιοπιστίας του. Τα συστατικά αυτά είναι εξαιρετικής σημασίας, επίσης, για τα UAVs και δεν μπορούν να προσφερθούν από το υπάρχον 4G τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, το WiFi ή έτερες μη – μικροκυματικές τεχνολογίες. Σε αυτή την παράγραφο, θα παρουσιαστούν οι τρόποι, με τους οποίους ένα UAV θα μπορέσει να έχει πρόσβαση στις μικροκυματικές επικοινωνίες (δηλαδή πρόσβαση στο δίκτυο 5^{ης} γενιάς) καθώς επίσης εφαρμογές που γίνονται εφικτές με την αξιοποίηση του δικτύου αυτού.

4.1.1 Τα UAVs στο υπάρχον τηλεπικοινωνιακό δίκτυο

Τα μη επανδωμένα αεροχήματα, μπορούν να είναι είτε ένα μέρος του τηλεπικοινωνιακού δικτύου (ως aerial BS) είτε ως εναέριος χρήστης (UE). Στην πρώτη περίπτωση, τα UAVs αξιοποιώντας το προνόμιο του ύψους πτήσης, διατηρεί LoS επαφή με πληθώρα από επίγειους χρήστες, όπως ακριβώς και ένα BS. Διατηρεί ζεύξη έχοντας backhaul δίκτυο (δίκτυο κορμού) το υπάρχον τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, είτε απευθείας με αυτό (σύνδεση με BS), είτε μέσω δορυφορικής ζεύξης (για απομακρυσμένες περιοχές. Κατά αυτό τον τρόπο, μια από τις εφαρμογές της εν λόγω τεχνολογίας μπορεί να αποτελεί η παροχή τηλεπικοινωνιακής κάλυψης σε περιοχές που έχουν πληχθεί από θεομηνίες, παρέχοντας αξιόπιστη επικοινωνία με το δίκτυο κορμού σε υψηλές ταχύτητες.

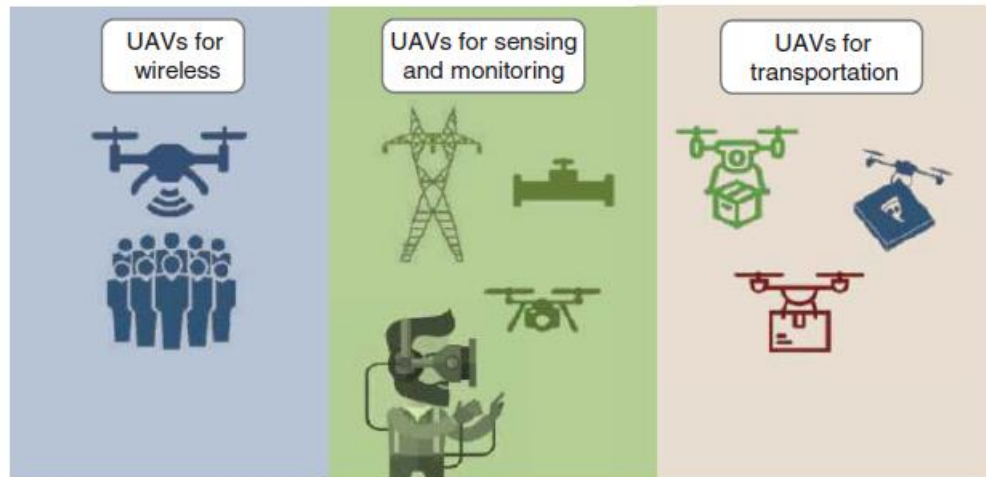


Εικόνα 6 Χρήση UAV ως relay station του 5G δικτύου. Πηγή: Shah Khalid Khan (2020), *Mathematical framework for 5G-UAV relay* <https://doi.org/10.1002/ett.4194>.

Από την άλλη μεριά, η χρήση των UAVs ως UE μέσω μικροκυμάτων έχει σημαντικές προοπτικές σε μια πληθώρα βιομηχανικών και μη εφαρμογών. Μια από τις πιο υποσχόμενες εφαρμογές αυτές αποτελεί η χρήση των UAV στη μεταφορά φορτίων, ακόμα και δια μέσου αστικών περιοχών, κάτι το οποίο δεν ήταν μέχρι τώρα εφικτό λόγω των περιορισμών του 4G δικτύου σε επίπεδο data – rate και latency. Αν αναλογιστεί κανείς πως το 5G (σε κάποιες από τις URLLC εφαρμογές) θα παρέχει latency τις τάξεως του 1ms, data – rate δε τάξεως Gbps, μπορεί να συμπεράνει πως η χρήση των μικροκυμάτων στα UAVs θα αναβαθμίσει σημαντικά τον εμπορικό τους χαρακτήρα.

4.1.2 Εφαρμογές των UAVs στο μικροκυματικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο

Αφού παρουσιάστηκαν οι κύριες χρήσης του υπάρχοντος τηλεπικοινωνιακού δικτύου από τα UAVs κρίνεται σκόπιμο η παρουσίαση της μελλοντικής αξιοποίησης του μικροκυματικού 5G δικτύου από τα μη επανδρωμένα αεροχήματα. Πιο συγκεκριμένα, πλέον, θα επιτρέπεται η αξιοποίηση μιας πληθώρας εφαρμογών, σε πολλαπλούς τομείς τη βιομηχανίας, όπως αυτός της κινηματογραφίας των μεταφορών, τις πολιτικής προστασίας και της ψυχαγωγίας.



Εικόνα 7 Εφαρμογές μικροκυμάτων στα UAVs. Πηγή: ITU-R Recommendation M.2083-0. September 2015.

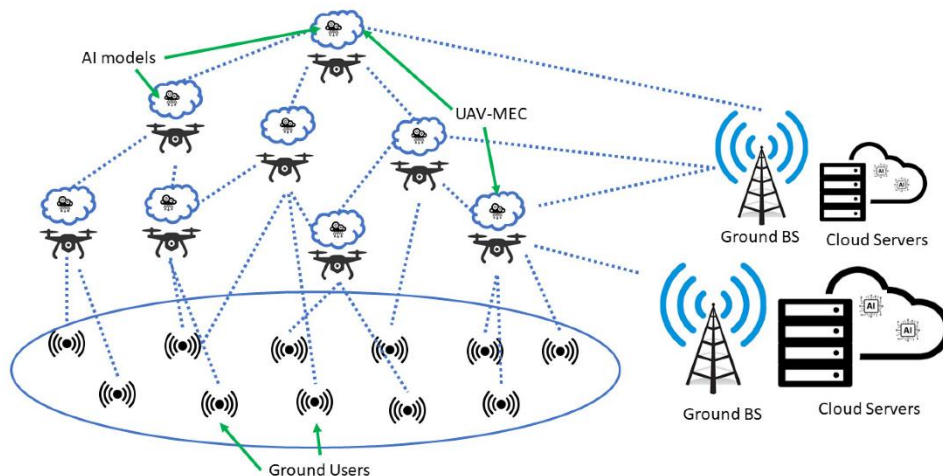
Ειδικότερα, το υψηλό throughput σε σύγκραση με την εφαρμογή της URLLC λειτουργείας του δικτύου, θα καθίσταται εφικτή η αναμετάδοση 4K video, δεδομένων από υπέρυθρες και πολυφασματικές κάμερες (IR - multispectral) σε σταθμούς εδάφους καθώς και πολλών άλλων αισθητήρων.

Ακόμα, θα γίνεται εφικτή η χρήση VR (Virtual Reality) τεχνολογιών, με χρήση VR goggles για αξιοποίησή τους σε FPV (First Person View) drones που ήδη έχουν κάνει την εμφάνισή τους στον τομέα της ψυχαγωγίας και της κινηματογραφίας. Ένα

άλλο παράδειγμα, αποτελεί επίσης, η χρήση των UAVs στη διανομή αγαθών, φαγητών και φαρμάκων με μηδαμινό κόστος.

Επιπροσθέτως μια ακόμη πολλά υποσχόμενη εφαρμογή των μικροκυμάτων στα UAVs αποτελεί το MEC (Machine end Computing) (Εικόνα 7). Πρόκειται, δηλαδή, για την αξιοποίηση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου από το UAV για τη μεταφορά συγκεκριμένων δεδομένων προς επεξεργασία τους από έτερο υπολογιστικό σύστημα στην άλλη πλευρά του δικτύου.

Κατ' αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται, η σημαντική, εξοικονόμηση ισχύος, χρόνου επεξεργασίας και χώρου από τα UAVs για την εξαγωγή των προϊόντων επεξεργασίας. Με άλλα λόγια, αντί να τοποθετήσουμε ένα επιπλέον ισχυρό υπολογιστικό σύστημα πάνω στο UAV (ως payload), το τοποθετούμε εντός δικτύου, στο οποίο μεταφέρονται τα απαραίτητα δεδομένα από το UAV και εκτελεί την υπολογιστική διαδικασία από ξεχωριστή ενεργειακή πηγή. Κάτι τέτοιο, ωστόσο, προαπαιτεί γρήγορη, αδιάλειπτη μεταφορά δεδομένων με υψηλή χωρητικότητα, χαρακτηριστικά τα οποία σκιαγραφούν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς.



Εικόνα 8 Δομή MEC δια μέσω UAVs δικτυωμένων με 5G δίκτυο. Πηγή: Y. Yazid, Imad Ez – Zazi, Antonio – Guerro Gonzalez (2021), *UAV-Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on AI: A Comprehensive Review* <https://doi.org/10.3390/drones5040148>

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, πειραματικά (H. Koumaras, 2021), αποδείχθηκε πως μέσα από ένα POC (Proof of Concept) MEC εφαρμογής με χρήση ως C&C δίκτυο το 5G αποδείχθηκε πως είναι εφικτή η χρήση των drones στις εν λόγω εφαρμογές. Ειδικότερα, σε αυτό το POC έγινε η μεταφορά του FCS (Flight Control System) σε εξωτερικό υπολογιστικό σύστημα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν αφενός η εξοικονόμηση χώρου και ενέργειας από το αερόχημα και αφετέρου η επιβεβαίωση του low – latency (50ms round trip time) και αξιοπιστίας (6% error loss) στα 3.5 GHz λειτουργίας του δικτύου⁵.

Είναι φανερό, λοιπόν, πως τα μικροκυματικά δίκτυα 5^{ης} γενιάς προσδίδουν σημαντικές δυνατότητες στα μη επανδρωμένα αεροχήματα, εφ' όσον επιτρέπεται, πλέον, η αξιοποίησή τους για μια πληθώρα εφαρμογών. Είναι ωστόσο αναγκαίο γίνουν κατανοητά τα χαρακτηριστικά των μικροκυμάτων και συγκεκριμένα το μοντέλο διάδοσής τους προς τη βέλτιστη αξιοποίησή τους.

4.2 Μοντέλα καναλιών μικροκυματικών δικτύων

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της μικροκυματικής διάδοσης. Αρχικά, μελετάται η επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών σε αναλογία με τη συχνότητα της ζεύξης καθώς και τα εμπόδια που επηρεάζουν. Εν συνεχεία, αναλύεται έκαστο μοντέλο διάδοσης A – A και A – G.

4.2.1 Επίδραση ατμοσφαιρικών συνθηκών

Δεν αποτελεί γεγονός ότι τα μικροκύματα, εκτός από τις απώλειες που υφίστανται λόγω διάδοσης (free space losses) υφίστανται, περαιτέρω, απώλειες λόγω των ατμοσφαιρικών συνθηκών στη διάδοσή τους. Επομένως, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι οι επικοινωνίες των εναέριων οχημάτων καθώς και η επίτευξη της αποστολής τους εξαρτάται σημαντικά από τις καιρικές συνθήκες σε αντίθεση με τους επίγειους χρήστες.

⁵ Δια μέσου χρήσης mMIMO κεραίας BS.

Θα μπορούσαμε να κατατάξουμε την ατμοσφαιρική απορρόφηση σε 3 κύριες κατηγορίες (Yong Zeng, 2020). Οι κατηγορίες έχουν ως εξής:

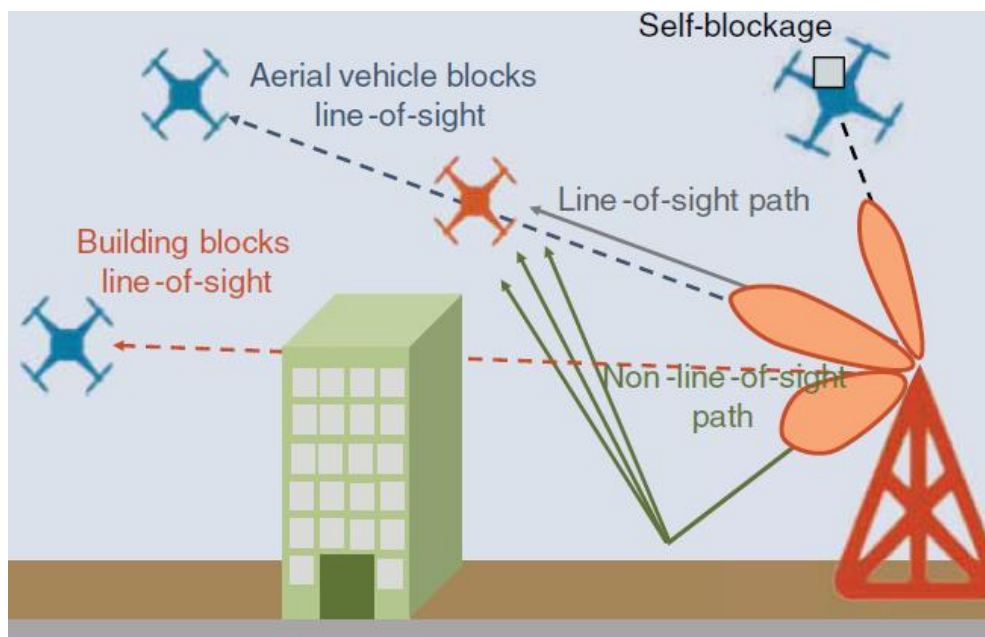
1. Μοριακή απορρόφηση (αερίων): Τα μικροκύματα κατά τη διάδοσή τους προσπίπτουν στα αέρια μόρια της ατμόσφαιρας.
2. Αέριες υγρές μάζες: Πρόκειται για τα σύννεφα, την ομίχλη και γενικότερα τον υετό που συναντούν τα μικροκύματα κατά τη διάδοσή τους.
3. Εξασθένηση λόγω βροχόπτωσης: Ειδικότερα όσον αφορά τον υετό, η βροχόπτωση επηρεάζει σημαντικά τα μικροκύματα μεταξύ 1mm έως 10mm μήκους κύματος. Επί παραδείγματι, η ελαφριά βροχή (2mm/hr) επιφέρει απώλειες περίπου στα 2.55 dB/km ενώ η βαριά στα (50mm/hr) 20dB/km. Ωστόσο, μιλώντας για κοντινές αποστάσεις (τάξεως μερικών εκατοντάδων μέτρων) τα μικροκύματα δεν υφίστανται σημαντικά υψηλές απώλειες, επομένως μπορεί και να γίνει η αξιοποίησή τους.

Γενικώς, στις συχνότητες των μικροκυμάτων, οι ατμοσφαιρικές απώλειες είναι κυρίως λόγω των μορίων νερού και οξυγόνου που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Άρα για την λειτουργία ορισμένων συστημάτων σε αυτές τις συχνότητες είναι αναγκαία η εγκατάσταση πυκνού δικτύου BS.

4.2.2 Παρεμποδίσεις κατά τη διάδοση

Η πιθανότητα ύπαρξης ζεύξης μεταξύ οχημάτων και σταθμών εδάφους έγκειται σε πολλαπλούς παράγοντες (R. W. Heath Jr, 2016). Έναν από αυτούς αποτελούν οι παρεμποδίσεις αυτών των κυμάτων από φυσικά εμπόδια όπως για παράδειγμα η βλάστηση της εγγύς περιοχής θέσεως του πομπού/δέκτη ή τα ανθρώπινα κτίσματα αν γίνεται λόγος για αστικές περιοχές κ.ο.κ.

Πιο συγκεκριμένα για τα μικροκύματα, τα εμπόδια αυτά είναι υψίστης σημασίας καθ' ότι επιδρούν άμεσα εξασθενώντας την ισχύ τους, παραμορφώνοντας τα σήματα εκπομπής. Άρα, τόσο η πιθανότητα ζεύξης όσο και η ποιότητα αυτής εξαρτώντας από τη σχετική θέση Tx/Rx ως προς το περιβάλλον (μετ' εμποδίων που τα περιβάλλουν). Επιπλέον, το φαινόμενο shadowing, δηλαδή η επικάλυψη της LoS ζεύξης κατά τους χειρισμούς (μανούβρες) των αεροσκαφών αποτελούν, επίσης, ένα παράγοντα παρεμπόδισης της διάδοσης των μικροκυμάτων.



Εικόνα 9 Διαφορετικά σενάρια παρεμπόδισης σήματος. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

Αναλυτικότερα:

1. Εξασθένηση λόγω βλάστησης: Η παρουσία βλάστησης μπορεί να προξενήσει περεταίρω εξασθένηση στις μικροκυματικές μπάντες συχνοτήτων. Το κατά πόσο αυξημένη θα είναι αυτή η καταπόνηση εξαρτάται από τη συχνότητα τις εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και το βάθος της βλάστησης. Επί παραδείγματι, εξασθένηση λόγω βλάστησης τάξεως 17 dB 22 dB και 25 dB παρατηρείται σε συχνότητες 28 GHz 60 GHz 90 GHz αντίστοιχα [20].
2. Απώλειες διεισδύσεως υλικών: Τα μικροκύματα υψηλών συχνοτήτων δε δύναται να διαπεράσουν (δίχως να παραμορφωθούν ή να χάσουν σημαντικό μέρος της ισχύος τους) από εμπόδια όπως έπιπλα και τοίχοι. Επί παραδείγματι, οι απώλειες που υφίστανται είναι της τάξεως των 24.4 dB και 45.1 dB σε συχνότητα των 28 GHz σε περίπτωση διαπέρασης 2 τοίχων και 4^{ov} πορτών αντίστοιχα [20]. Όσο υψηλότερες είναι οι απώλειες λόγω διαπέρασης, τόσο περιορίζεται η περιοχή κάλυψης του πομπού μικροκυμάτων σε σενάρια εσωτερικών – εξωτερικών και αμιγώς εξωτερικών χώρων.

Σε κάθε περίπτωση είναι εφικτή η μοντελοποίηση και προσδιορισμός ενός μοντέλου υπολογισμού της πιθανότητας LoS ζεύξης προκειμένου να ληφθεί υπόψιν ποσοτικά η επιρροή των εμποδίων στην ποιότητα ζεύξης. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το μοντέλο θεωρεί μια απόσταση ζεύξης d θα έχει την πιθανότητα LoS ζεύξης $p_L(d)$. Οι εκφράσεις της $p_L(d)$ λαμβάνονται, συνήθως, εμπειρικά από διάφορα δεδομένα. Για παράδειγμα σε ένα (UMa) σενάριο [21] έχουμε:

$$p_L(d) = \min\left(\frac{d_1}{d_2}, 1\right) \left(1 - e^{-\frac{d_1}{d_2}}\right) + e^{-\frac{d_1}{d_2}}$$

Όπου d είναι η 2D απόσταση σε μέτρα όπου d_1 και d_2 είναι 18m και 63m αντίστοιχα. Το ίδιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επίσης, για UMi σενάρια με

$d_2 = 36\text{m}$. Σαφώς, οι μεταβλητές για τον υπολογισμό της πιθανότητας LoS ποικίλουν ανάλογα τις μεταβλητές.

Αυτά τα εμπειρικά μοντέλα μπορούν να διατυπωθούν και θεωρητικός. Σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, με τυχαίες ορθογώνιες παρεμποδίσεις, θεωρήθηκε πως τα εμπόδια μπορούσαν να υπολογιστούν με χρήση μέθοδο Bool (Boolean process), όπου και διαπιστώθηκε ότι η LoS πιθανότητα ζεύξης δίδεται από (T. Bai, R. Vaze, 2014):

$$pL(d) = e^{-\beta d}$$

$$\text{Όπου } \beta = \frac{2\mu(E[W]+E[L])}{\pi}$$

Με τα W και L να είναι το πλάτος και το ύψος αντίστοιχα ενώ το μ είναι η πυκνότητα των εμποδίων. Σε διαφορετικό σενάριο, γνωστό και ως *Ball model* θεωρείται πως όλες οι ζεύξεις διαμορφώνονται και διατηρούνται εντός μιας σφαίρας διαμέτρου R_B . Συγκεκριμένα, είναι (T. Bai, R. Vaze, 2014):

$$pL(d) = I(d < R_B), \quad \text{όπου } R_B = \frac{\sqrt{2}\mu E[L]}{\pi}$$

Τα οποία σαφώς αξιοποιούνται στην ανάλυση των μικροκυμάτων.

Επιπλέον των ανωτέρω, τα μικροκύματα υπόκεινται σε επιπλέον απώλειες που προκύπτουν κατά τη διάδοσή τους στο φυσικό περιβάλλον. Επιγραμματικά, αναφέρονται ως τα κάτωθι:

1. Αντανάκλασεις και Σκεδάσεις
2. Διαθλάσεις
3. Doppler Spread
4. Απορρόφηση θορύβου
5. Φαινόμενα σπινθήρωσης (Scintillation effects)
6. Μικροεμπόδια και άνθρωποι

4.3 Βασικό μοντέλο διάδοσης μικροκυμάτων

Θεωρούμε μια ζεύξη μεταξύ πομπού Tx και δέκτη Rx σε απόσταση r μεταξύ τους λαμβάνοντας υπόψιν τον παράγοντα s, $s \in \{L, N\}$, δηλαδή αν η ζεύξη είναι LoS ή NLoS. Για χάριν ευκολίας, θεωρούμε τη ζεύξη narrow-band (στενοζωνική) και αναλογική διαμόρφωση σήματος. Το λαμβανόμενο από το δέκτη σήμα δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Pr = P_t l_s(r) g_R(\theta_R) g_t(\theta_t) H$$

Όπου:

$l_s(r)$: Υποδεικνύει της απώλειες κατά τη διάδοση των κυμάτων από μια απόσταση r η οποία οφείλεται σε spreading losses. Δύναται να υπολογιστεί από χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο εύρεσης απωλειών ως ακολούθως:

$$l_s(r) = c_s^{-a_s}$$

Όπου c_s το gain και a_s σταθερά απωλειών.

P_t : Η ισχύς εκπομπής.

g_t και g_r είναι τα pattern του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα ενώ θ_t και θ_R οι γωνίες που δείχνουν την κατεύθυνση των ακτινών ομοίως. Επομένως, $g_t(\theta_t)$ και $g_r(\theta_R)$ τα Gain των αντίστοιχων κεραιών.

H : Αποτελεί μια σταθερά απωλειών small fading. Θεωρείτο, επίσης, και η Nakagami fading με διαφορετικές παραμέτρους όπως m_L και m_N όσον αφορά LoS και NLoS ζεύξεις. Επομένως, H είναι μια σταθερά Γ , τυχαία μεταβλητή εξαρτώμενη από τον παράγοντα m_L (J.G. Andrews, 2016).

Το προαναφερθέν μοντέλο δύναται να χρησιμοποιηθεί και σε διαφορετικά terrain και σενάρια διάδοσης, όπως παράδειγμα περιλαμβάνοντας πολλαπλά

μονοπάτια, multi – link channels, υβριδικό beam – forming (M.N. Kulkarni) και επιλογικά MIMO (R.W. Heath, 2016).

4.4 Μοντέλο διάδοσης μικροκυμάτων A-A

Τα μοντέλα διάδοσης ελεύθερου χώρου (free space) των μικροκυμάτων στα A – A (Air 2 Air) δίκτυα περιγράφονται με πολύ καλή προσέγγιση από τα υφιστάμενα LoS. Πράγματι, όταν η LoS επικοινωνία είναι εφικτή, τα A2A MIMO δίκτυα, τα οποία παραμετροποιούνται με μεταβλητές τη δίοπτρευση (αζιμούθιο) ως προς τον αληθή βορρά καθώς και τη γωνία μεταξύ πομπού και δέκτη. Έτσι, σε αυτά επιδρούν οι ατμοσφαιρικές απώλειες, η γεωμετρία της κεραίας και τα λοιπά φαινόμενα εξασθένησης σήματος. Έτσι, η εν λόγω ζεύξη θεωρείτο ότι έχει μια και μοναδική διαδρομή μεταξύ Tx/Rx.

Προσομοιάζοντας το LoS κανάλι επικοινωνίας, απαιτείται ο προσδιορισμός όλων των παραγόντων, μικρής και μεγάλης κλίμακας εξασθενήσεις. Αυτές περιλαμβάνουν τις ατμοσφαιρικές απώλειες, τις διαφορές φάσεις μεταξύ των κεραίων πομπών και δεκτών, τη σχετική γεωμετρία αυτών καθώς και τη γνώση αζιμούθιων και των γωνιών AoD & AoA.

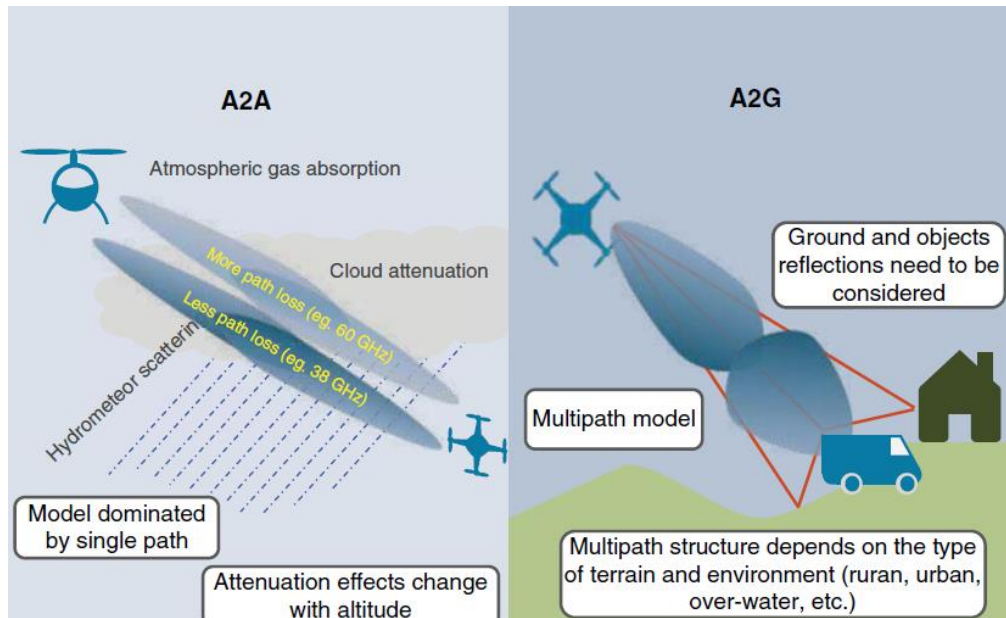
Καθορίζοντας, λοιπόν, τον αριθμό των κεραίων εκπομπής N_t , τον αριθμό κεραίων λήψης N_r , τη συνδυασμένη επιρροή των ατμοσφαιρικών συνθηκών και της διαφοράς φάσης σε μια σταθερά, έστω a_1 , τα διανύσματα εκπομπής των κεραίων εκπομπής και λήψης (α_t & α_r), τα αζιμούθια AoA και AoD ως θ_{AoA} , θ_{AoD} , όμοια το ύψος αυτών Φ_{AoA} , Φ_{AoD} , την καθυστέρηση διάδοσης ως $t_{1,1}$, την αναλογική διαμόρφωση με σταθερά t την $p(t)$ και χρόνο δειγματοληψίας T_s , διαμορφώνεται ο αντίστοιχος πίνακας MIMO LoS καναλιού γεωμετρικός μοντελοποιούμενος ως ακολούθως:

$$H = \sqrt{N_t N_r} a_1 p(dT_s - t_{1,1}) a_R(\theta_{AoA}, \Phi_{AoA}) a_T(\theta_{AoD}, \Phi_{AoD})$$

Εκτός της μοντελοποίησης του ανωτέρω καναλιού μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης θεωρείται εξίσου σημαντική η διαφορά φάσης λόγω της Μη – ιδανικής παραγόμενης συχνότητας από τους τοπικούς ταλαντωτές του εκάστοτε συστήματος (RF oscillators).

4.5 Μοντέλο διάδοσης μικροκυμάτων A-G

Γενικώς, οι NLoS Air – Ground ζεύξεις υπόκεινται σε διαθλάσεις και ανακλάσεις, οι οποίες περιορίζουν σημαντικά την ποιότητα της ζεύξης τους. Επομένως, ένας εκ των παραγόντων τις επιρροής των ζεύξεων αυτών είναι το ύψος πτήσης των UAVs. Επιπροσθέτως, εμπόδια όπως η χλωρίδα και η πανίδα μιας περιοχής, η παρουσία βουνοκορφών και ιδιόμορφου γεωγραφικού περιβάλλοντος καθώς η ύπαρξη κτηριακών εγκαταστάσεων αποτελούν ενδεικτικά παραδείγματα των παραγόντων που εντείνουν την υποβάθμιση των δικτύων. Άρα, θεωρείται σημαντικό, να μοντελοποιηθεί η διάδοση των κυμάτων ώστε να υπάρχει ενδεικτική εικόνα της αναμενόμενης ποιότητας ζεύξης στην εκάστοτε περιοχή. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η διαφοράς μεταξύ A – G & A – A διάδοσης.



Εικόνα 10 Κανάλι διάδοσης A – A vs A -G. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

Ορίζοντας, λοιπόν, το μοντέλο διάδοσης, A-G βάσει του (R. W. Heath Jr., 2016) προκύπτει το εξής μιγαδικό μοντέλο βασικής ζώνης (χρόνο – εξαρτημένο)

$$H_d = \sqrt{\frac{NtNr}{\sum_{c=1}^C Rc}} \sum_{c=1}^C \sum_{r=1}^{Rc} A_{c,r} * Pr,c(dTs - \tau_{c,r}) \times Ar(\theta_{AoA,c,r} \Phi_{AoA,c,r}) \\ * (\theta_{AoD,c,r} \Phi_{AoD,c,r})$$

Όπου:

C: Ο αριθμός των συνολικών multipath διαδόσεων.

R_C: Ο αριθμός των δεσμών της cth δέσμης.

A_{c,r}: Ο συνολικός αριθμός της ατμοσφαιρικής επίδρασης μετά διαφοράς φάσεως πομπού και δέκτη για την rth ακτίνα εντός του συνόλου c και

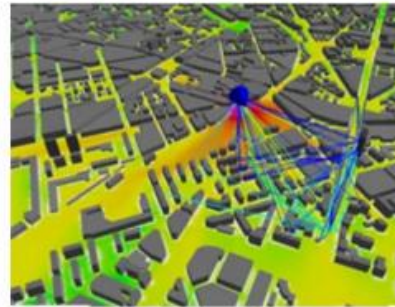
τ_{c,r}: Η χρονική στιγμή άφιξης της τελευταίας rth ακτίνας του συνόλου c.

d: d = 1, ..., D το σύνολο των channel taps κατά τη διάρκεια του χρόνου εκπομπής – λήψης. Επίσης, εξίσου σημαντικό θεωρείται και το φαινόμενο παραμόρφωσης του παλμού κατά τη διάδοσή του.

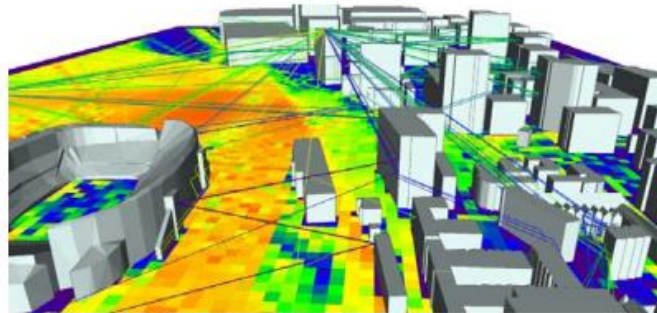
Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψιν τις δυσκολίες που προκύπτουν από από τα ιπτάμενα αεροχήματα, οι προσομοιώσεις Ray – tracing έχουν γίνει ένα πολύτιμο και αξιόπιστο εργαλείο στις διάφορες μετρήσεις καναλιών. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποίησαν η ομάδα του (I. Guvens, 2017) με την Remcom's Wireless InSite. Εξετάστηκαν 4 διαφορετικά σενάρια προσεγγίζοντας περιβάλλοντα όπως το αστικό, προάστιο και υπαίθριο. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με μπάντες συχνοτήτων 23 GHz και 60 GHz (συχνότητες φερόντων κυμάτων). Μελετήθηκαν μεταξύ άλλων στοιχεία όπως η ισχύς του σήματος λήψεως, το delay spread⁶ για διάφορα ύψη από εκείνο της απογειώσεως έως και τα 150m.

⁶ Delay spread: Η χρονική διαφορά μεταξύ πρώτου και τελευταίου component με το πρώτο κατά το προφίλ multipath.

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το delay spread είναι συνάρτηση του ύψους πτήσεως και του περιβάλλοντος επιχείρησης του UAV. Δηλαδή, για το ίδιο ύψος πτήσης σε μια αστική περιοχή προκύπτουν διαφορετικά δεδομένα απ' ότι στην ύπαιθρο. Ειδικότερα, όσο αυξάνεται το ύψος στην πρώτη περίπτωση αυξάνεται το delay spread, ενώ στη δεύτερη μειώνεται.



(a) Altair Winprop



(b) Remcom Wireless Insite

Εικόνα 11 Ray tracing σε δύο διαφορετικά λογισμικά, (a) Altair Windrop και (b) Remcom Wireless Insite. Πηγή: David Matolak , , Hani Mehrpouyan, 2019, Detection, Localization, and Tracking of Unauthorized UAS and Jammers

Ακόμα μια τεχνική υπολογισμού των απωλειών διάδοσης και του delay spread στα κανάλια A – G (mmWave) παρουσίασαν οι (Y. Zhang, Z. He, 2019) είναι εκείνη της μηχανικής μάθησης. Πρόκειται για μοντέλα τα οποία χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους γειτονικούς κόμβους (έστω K (KNN)) και τυχαία δάση σαν αλγόριθμους μάθησης για τη συλλογή στοιχείων. Τα μοντέλα αυτά κάνουν χρήση μίας συγκεκριμένης δεξαμενής χαρακτηριστικών (όπως η 2D απόσταση μεταξύ Tx/Rx, η ύπαρξη κτηρίων στην πέριξ περιοχή ή όχι κ.α) για την εύρεση των απωλειών διάδοσης.

Τα στοιχεία που εξάγονται από ένα μοντέλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση του επόμενου κ.ο.κ. Προσομοιώσεις Ray tracing με το λογισμικό Remcom's Wireless InSite (σε περιοχές Οτάβα και Ελσίνκι μεταξύ διάφορων συχνοτήτων (από 2.4 GHz έως και 37 GHz). Τα εξαχθέντα δεδομένα επέτρεψαν τη σύγκριση και ανάλυση δύο διαφορετικών προσεγγίσεων της προσομοίωσης: (α) με χρήση μοντέλων με βάση τη συχνότητα εκπομπής (β) με βάση το terrain. Αμφότερες τι περιπτώσεις, τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια των μετρήσεων βασίζεται στην ακρίβεια της γνώσης του τρισδιάστατου περιβάλλοντος της περιοχής προσομοίωσης .

4.6 System Design Implications

Σε αυτή την παράγραφο θα αναλυθούν οι απαιτήσεις συστημάτων για την ενσωμάτωση του 5G δικτύου στις υπάρχουσες υποδομές.

4.6.1 Συνύπαρξη με το υπάρχον τηλεπικοινωνιακό δίκτυο

Ακριβώς εξαιτίας της εμβέλειας εκπομπής αυτών των συστημάτων, τα μικροκύματα δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά ως stand alone, επομένως απαιτείται η αξιοποίηση της υπάρχουσας τηλεπικοινωνιακής δομής (M. Giordani, 2019). Συγκεκριμένα, πρέπει να συνεργάζονται με δίκτυο το οποίο λειτουργεί σε συχνότητες sub – 6 GHz, το οποίο θα αναλαμβάνει και το κύριο έργο του control management, περιλαμβάνοντας κατανομή φορτίου, handovers, ενώ κύριος ρόλος των μικροκυμάτων θα είναι η μεταφορά data αξιοποιώντας της υψηλές δυνατότητες capacity που διαθέτουν.

Τέτοιου τύπου δίκτυα είναι ικανά να παρέχουν υψηλό throughput και καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών, με γνώμονα πάντα την αξιοπιστία των επικοινωνιών εν συγκρίσει με το υπάρχον δίκτυο (Y. Niu, 2015). Επιπλέον micro – diversity καθίσταται εφικτή με την εγκατάσταση πολλαπλώς BSs (με υβριδικό τρόπο, sub – 6 GHz και μικροκυμάτων) ώστε ο εκάστοτε χρήστης να μπορεί να έχει απομακρυσμένη κάλυψη, seamless connectivity και υψηλό capacity.

4.6.2 Διαμοιρασμός διατιθέμενου φάσματος

Στις χαμηλές συχνότητες, υπάρχει μια κατάλληλη ταξινόμηση των συχνοτήτων, μετά απαραίτητων αδειών αξιοποίησής των, ώστε να εξασφαλιστεί το αξιόπιστο της λειτουργίας των συστημάτων σε time - critical εφαρμογές. Ωστόσο, τα μικροκυματικά συστήματα μπορούν να επιχειρήσουν σε ένα περιορισμένο περιβάλλον θορύβου διότι εξειδικευμένη αδειοδότηση σε αυτές τις μπάντες συχνοτήτων μπορεί να οδηγήσει σε υπό – εκμετάλλευση του διαθέσιμου φάσματος (A.K. Gupta, 2020). Έχει αποδειχθεί ότι κατά τον διαμοιρασμό του φάσματος στα μικροκύματα δεν απαιτεί πολύπλοκες εμπλοκές της τηλεπικοινωνιακής υποδομής, ακόμα και μη συντονισμένος διαμοιρασμός μεταξύ δύο και περισσότερων χρηστών είναι δυνατός.

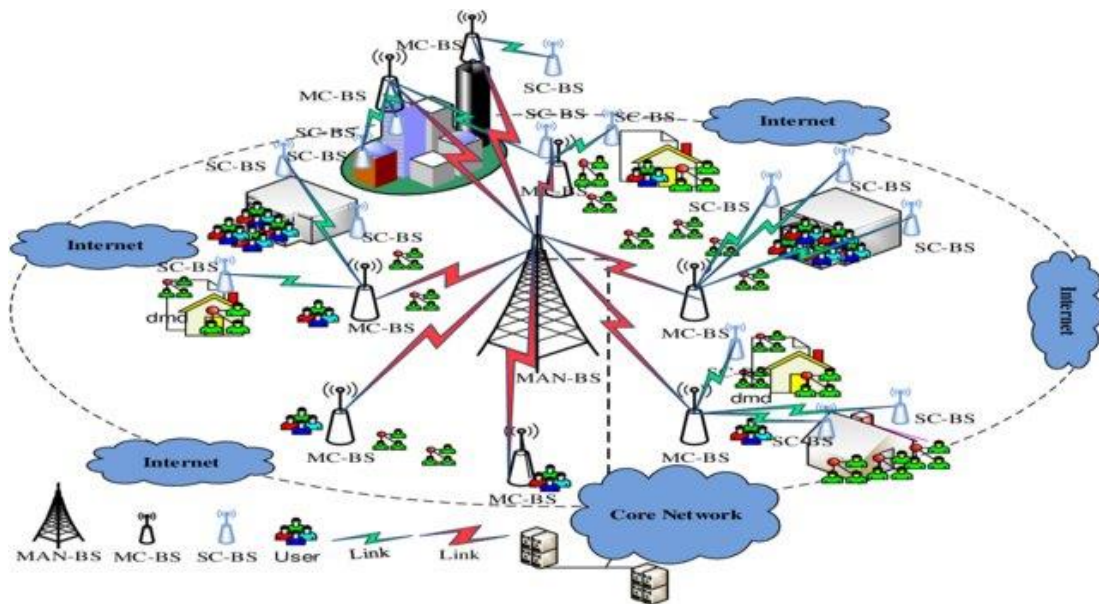
Αυτή, είναι μια πολύ δελεαστική επιλογή για το μη αδειοδοτημένο φάσμα που περιβάλλει τις συχνότητες 59 – 64 GHz και 64 – 71 GHz το οποίο επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να αξιοποιήσουν το εν λόγω φάσμα χωρίς συγκεκριμένο συντονισμό. Τέτοια χρήση μη αδειοδοτημένου φάσματος αυξάνει τη χρήση του και βοηθά την εξάλειψη οποιονδήποτε εμποδίων για την χρησιμοποίησή του από μικρή κλίμακος χρήστες.

Ακόμα και στις αδειοδοτημένες μπάντες, ο διαμοιρασμός του φάσματος μπορεί να βοηθήσει στην αξιοποίησή του μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος αδειοδότησης του. Έχει διαπιστωθεί, επίσης, πώς βελτιώσεις στον τρόπο λειτουργίας των κελιών του τηλεπικοινωνιακού δικτύου μπορούν να επαυξήσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα του φάσματος (I.A. Hemadeh, 2017). Επιπροσθέτως, οι μπάντες όπου τα μικροκύματα συνυπάρχουν με άλλες υπηρεσίες (συμπεριλαμβάνοντας επικείμενες και νέες εφαρμογές) ίσως να απαιτείται να προστατεύουν η μια την άλλη σε περιπτώσεις πυκνών εγκαταστάσεων. Για αυτό το λόγο, μηχανισμοί αδειοδότησης φάσματος, όπως η μη αδειοδότηση, στατική ή δυναμική είναι διάφορες επιλογές για αυτές τις μπάντες συχνοτήτων (S. Rangan, 2014).

Ο διαμοιρασμός του εύρους ζώνης με τις ευκαιρίες τις οποίες παρέχει στις μπάντες των μικροκυμάτων, επιβάλλει την ανάγκη ανάπτυξης νέων μεθόδων αδειοδότησης οι οποίες θα είναι πιο ευκαιριακές, εύκαμπτες, δυναμικές και συγκεκριμένων περιοχών.

4.6.3 Υπέρ – Πυκνά Δίκτυα

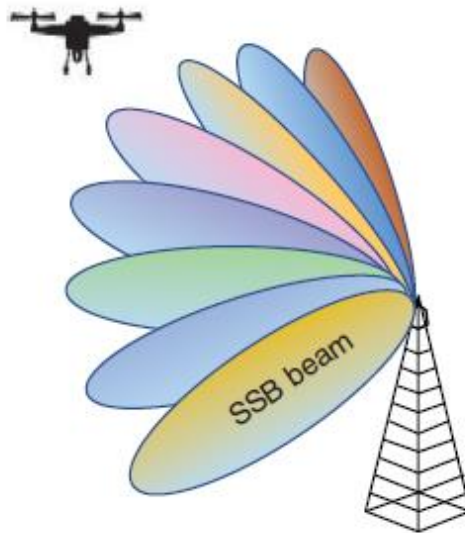
Τα υπέρ πυκνά δίκτυα (Ultra Dense Networks – UDN) χαρακτηρίζονται από πολύ μικρές ενδό – κυψελωτές αποστάσεις. Γενικώς, είναι σχεδιασμένες για την εξυπηρέτηση τοπικών περιοχών μεγάλου πληθυσμιακού αριθμού, κτηριακές εγκαταστάσεις, campus πανεπιστημίων και κέντρα πόλεων. Οι μικροκυματικές συχνότητες, αποτελούν φυσικό υποψήφιο για UDNs εξαιτίας των κατευθυντικών εκπομπών και της ευαισθησίας σε εμπόδια, κάτι το οποίο περιορίζει τις παρεμβολές σε πολύ πυκνά περιβάλλοντα. Επιπρόσθετα, το self backhauling παρέχει έναν κοστοβόρο τρόπο για να συνδέσει πυκνώς κατανομημένα APs/BSs σε backhaul δίκτυο.



Εικόνα 12 Γενικό περίγραμμα Ultra Dense Network. Πηγή: International Journal of Advanced Computer Science and Applications 9(11) DOI: 10.14569/IJACSA.2018.091123

4.6.4 Beamforming μέσω μηχανικής μάθησης

Η απόδοση των συστημάτων mmWave σε ένα σενάριο υψηλής κινητικότητας επηρεάζεται σοβαρά από τα μεγάλα γενικά έξοδα εκπαίδευσης, τα οποία συμβαίνουν λόγω της συχνής ενημέρωσης των διανυσμάτων διαμόρφωσης δέσμης μεγάλης συστοιχίας. Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης που βασίζονται στη βαθιά μάθηση έχουν προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον λόγω της ικανότητάς τους να μειώσουν αυτά τα γενικά έξοδα εκπαίδευσης. Στον πομπό, τα πιλοτικά σήματα από το UE μεταδίδονται πρώτα για να μάθουν την υπογραφή RF του γειτονικού περιβάλλοντος και στη συνέχεια αυτή η γνώση χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των καλύτερων φορέων διαμόρφωσης δέσμης για την υπογραφή RF μεταδιδόμενων δεδομένων. Έτσι, μετά την επιτυχή φάση μάθησης, τα μοντέλα βαθιάς μάθησης απαιτούν αμελητέα γενικά έξοδα εκπαίδευσης που εξασφαλίζουν αξιόπιστη κάλυψη και χαμηλό λανθάνοντα χρόνο για τις εφαρμογές mmWave (A. Alkhateeb, 2018).



Εικόνα 13 MIMO eNB beamforming. Πηγή UAV Communications for 5G and Beyond. (2020).

4.7 5G ως μέσω Ηλεκτρονικού πολέμου

Επιπλέον, τα νέα χαρακτηριστικά 5G, όπως η δυναμική διεπαφή αέρα (dynamic air interface, η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (network function virtualization) και ο τεμαχισμός δικτύου (network slicing), εισάγουν πρόσθετη πολυπλοκότητα σχεδιασμού συστήματος και απαιτήσεις βελτιστοποίησης για την αντιμετώπιση προκλήσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη συντήρηση του δικτύου. Κατά συνέπεια, το ML επανήλθε πρόσφατα στο επίκεντρο στον τομέα των επικοινωνιών για τις δυνατότητές της να αντιμετωπίσει αυτές τις προκλήσεις που δεν μπορούν να επιλυθούν με παραδοσιακές μεθοδολογίες. Για παράδειγμα, το 3GPP και η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) έχουν προτείνει και τα δύο ερευνητικά έργα 5G που περιλαμβάνουν διάφορες τεχνικές AI/ ML. Επί παραδείγματι, (You X., 2015) συζητάτε τέσσερα προβλήματα στο 5G των οποίων οι λύσεις έχουν άμεση εφαρμογή στο EW.

Network resource allocation: Η κατανομή μπλοκ πόρων (RB) ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (OFDM) 5G NR είναι πολύ πιο περίπλοκη από αυτή της μακροπρόθεσμης εξέλιξης 4G (LTE) λόγω της απαιτούμενης υποστήριξης για τις τρεις προαναφερθείσες περιπτώσεις χρήσης. Η RL εκτελεί κατανομή RB (You X., 2015) και τεμαχισμό δικτύου 5G (Li R, 2018). Ο (You X., 2015) συζητάά πώς να επιτύχει ενεργειακά αποδοτική διαμόρφωση δέσμης σε ένα τεράστιο σύστημα MIMO βρίσκοντας τη μήτρα διαμόρφωσης δέσμης, η οποία εισάγει ελάχιστες μη γραμμικότητες ενισχυτή ισχύος σε ένα μεγάλο χώρο λύσης. Το RNN μαθαίνει αναδρομικά για τις μη γραμμικότητες των PAs και βρίσκει κατάλληλα βάρη νευρώνων που ικανοποιούν δύο απαιτήσεις:

- (1) Μηδενική διαμόρφωση δέσμης εξαναγκασμού, που σημαίνει ελάχιστη παρεμβολή πολλαπλών χρηστών και
- (2) Ελάχιστη συνολική μη γραμμική παραμόρφωση.

Το RNN μοντελοποιεί τη μη γραμμικότητα της συστοιχίας ενισχυτών ισχύος, η οποία στη συνέχεια βελτιστοποιείται σε ελάχιστη μεταδιδόμενη ισχύ παρέχοντας παράλληλα μια λύση μηδενικής πίεσης. Στη συνέχεια, το RNN ειδοποιεί το σύστημα 5G σχετικά με τον τρόπο ρύθμισης των βαρών διαμόρφωσης δέσμης μηδενικού εξαναγκασμού. Άλλες τεχνικές ML περιλαμβάνουν επίγνωση περιβάλλοντος για την κατανομή πόρων, θεωρία παιγνίων για τη βελτιστοποίηση του ελέγχου ισχύος για χρήστες από πολλαπλά κύτταρα στα οποία έχει εκχωρηθεί το ίδιο RB και διαχείριση και ενορχήστρωση πόρων κυψελοειδούς δικτύου.

Self-organizing networks (SONs): Το SON είναι ένας νέος τρόπος διαχείρισης δικτύου που παρέχει πληροφορίες στη λειτουργία και συντήρηση του δικτύου. Η 3GPP εισήγαγε το SON ως βασικό συστατικό των δικτύων 4G LTE. Εν παραλλήλω, η 3GPP χωρίζει τις λύσεις SON σε τρεις κατηγορίες: αυτοδιαμόρφωση, αυτοβελτιστοποίηση και αυτοίαση. Με το 5G, οι λειτουργίες SON θα πρέπει να βελτιωθούν λόγω της υπερ-πύκνωσης (UDNs) του δικτύου και της δυναμικής κατανομής πόρων, καθώς και της συνολικής αυξημένης πολυπλοκότητας του δικτύου. Τεχνικές ML όπως το RNN και γενετικοί αλγόριθμοι επιλύουν διάφορες λειτουργίες SON, όπως ανάπτυξη νέων κυττάρων και φάσματος, αυτόματη διαμόρφωση σταθμού βάσης, βελτιστοποίηση κάλυψης και χωρητικότητας και ανίχνευση και αντιστάθμιση διακοπής λειτουργίας κυττάρων. Ο B. Erançi (B. Erançi, 2012) ανέπτυξε ένα σύστημα ανάλυσης γενεσιουργών αιτιών που συνδυάζει τεχνικές εποπτευόμενης και μη εποπτευόμενης μάθησης σε τρία βήματα:

- (1) Μη εποπτευόμενη εκπαίδευση SON,
- (2) Μη εποπτευόμενη ομαδοποίηση, και
- (3) επισήμανση από εμπειρογνώμονες.

Ομοιόμορφη επιτάχυνση βασικής ζώνης 5G (Uniform 5G baseband acceleration): Η επεξεργασία σήματος βασικής ζώνης 5G περιλαμβάνει μια σειρά μπλοκ επεξεργασίας σήματος, συμπεριλαμβανομένης της μαζικής ανίχνευσης MIMO

και των πολικών κωδικών για την αποκωδικοποίηση καναλιών. Ο αυξημένος αριθμός μπλοκ βασικής ζώνης έχει ως αποτέλεσμα πολύ πιο περίπλοκα σχέδια και υλοποιήσεις υλικού.

Βελτιστοποίηση της επικοινωνίας φυσικού επιπέδου από άκρο σε άκρο
Optimization of end-to-end physical layer communication: Οι O'Shea και Hoydis (O'Shea, T., and J. Hoydis, 2017). προτείνουν μια μέθοδο βελτιστοποίησης PHY που βασίζεται σε αυτόματο κωδικοποιητή από άκρο σε άκρο. Ερμηνεύοντας ένα σύστημα επικοινωνιών ως αυτόματο κωδικοποιητή, οι συγγραφείς προτείνουν μια νέα προσέγγιση σκέψης για το σχεδιασμό συστημάτων επικοινωνιών ως μια εργασία ανακατασκευής από άκρο σε άκρο που επιδιώκει να βελτιστοποιήσει από κοινού τα στοιχεία του πομπού και του δέκτη σε μία μόνο διαδικασία.

Οι αποδεδειγμένες λύσεις στις περιπτώσεις χρήσης 5G αντιστοιχούν σε προβλήματα στις ηλεκτρονικές επικοινωνίες, τα ραντάρ και τα γνωστικά συστήματα EW σε πολλούς λειτουργικούς τομείς.

5 Ενσωμάτωση 4G LTE/5G δικτύου σε UAV

Μέσα από την ανωτέρω ανάλυση καθίσταται, πλέον, πασιφανές το γεγονός ότι τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς παρέχουν πολλή υψηλές δυνατότητες σε όλο το φάσμα των smart cities και ιδιαίτερα στα Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα. Επομένως, είναι επιβεβλημένη η μελέτη μέσω proof of concept της απόδοσης αυτών των δικτύων τόσο στα δίκτυα C2 όσο και στα Payload ώστε να εξεταστεί/επαληθευτεί η θεωρία, καθώς και η επίτευξη των απαιτήσεων που έχει θέσει η 3GPP. Στο παρόν κεφάλαιο, επομένως, παρουσιάζεται η ενσωμάτωση του υπάρχοντος τηλεπικοινωνιακού δικτύου ως κύριο δίκτυο ανταλλαγής mission critical πληροφοριών σε αυτοσχέδιο UAV. Συγκεκριμένα, μετά την ανάλυση της επιμέρους διάταξης των επικοινωνιακών συστημάτων (Block επικοινωνιών) θα αναλυθούν τα συλλεχθέντα στοιχεία καθώς θα εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα.

5.1 Ομάδα Εργασίας

Τη διαδικασία ενσωμάτωσης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου υποβοήθησε το προσωπικό της ομάδας UAS του Εργαστηρίου Συστημάτων Μάχης και Ναυτικής Τακτικής της ΣΝΔ (Σχολή Ναυτικών Δοκίμων) παρέχοντας σημαντικότερη υλικοτεχνική υποδομή. Συγκεκριμένα, για τη διεκπεραίωση του έργου διατέθηκαν τα ακόλουθα:



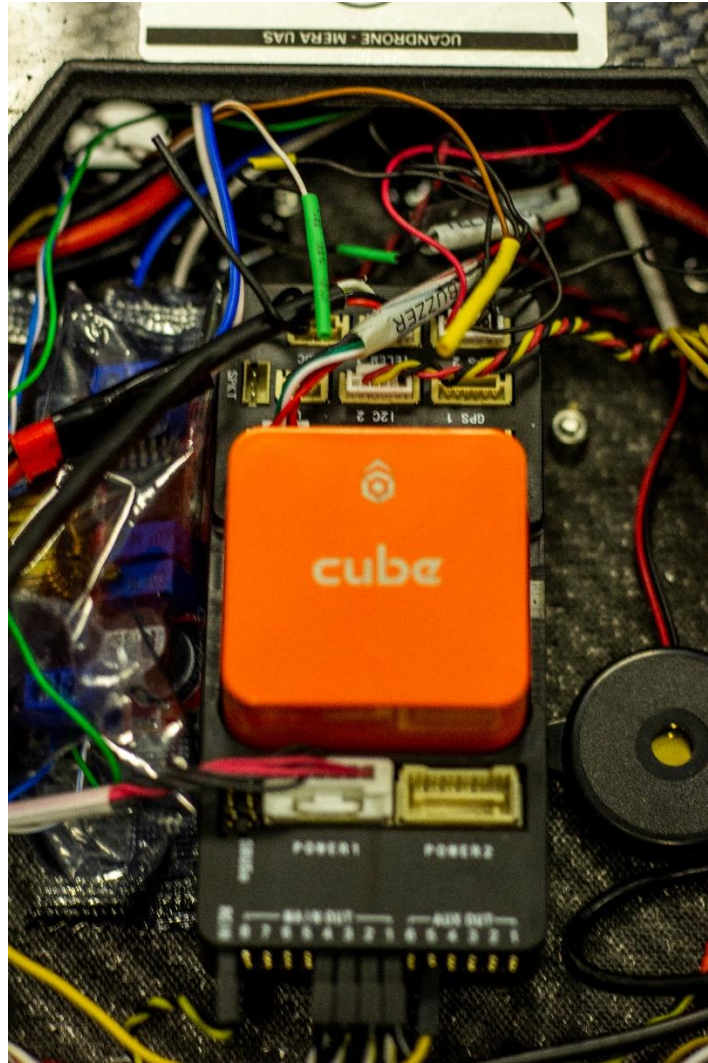
- UAS MERA
- DC - DC stepdown converter XL4015 για την τροφοδοσία του raspberry
- Καλώδια σύνδεσης
- Προσαρμογείς (adaptors)
- Λοιπά μικροϋλικά και εργαλεία

Καίριος επίσης ήταν και ο υποστηρικτικός ρόλος της ομάδας στις απομακρυσμένες δοκιμές δικτύωσης και πτήσης του εν λόγω UAV μέσω 4G LTE/5G δικτύου

5.1 Διασυνδέσεις Hardware

Η ενσωμάτωση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου έγινε στο ένα αυτοσχέδιο UAS MERA. Πιο συγκεκριμένα το εν λόγω UAV αποτελείται ένα σύνολο κινητήρων (4x motors με ενσωματωμένα ESC), IMU (autopilot) τον Cubepilot (Pixhawk), BEC, δέκτη GPS, μπαταρία 16.000 mAmp, κεραία 2.4 GHz καθώς και δέκτη ασυρμάτου.

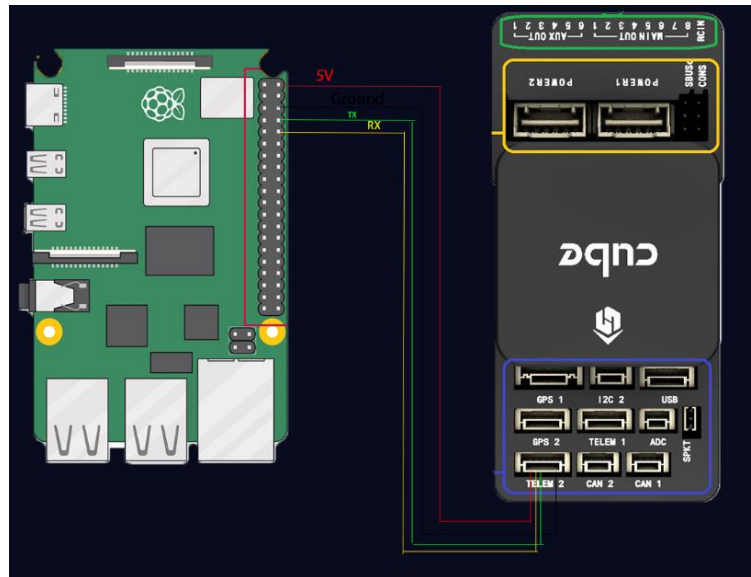
Στο ανωτέρω σύνολο προστίθεται ένας H/Y raspberry Pi 4 (4 Gb), ο οποίος θα αναλαμβάνει τα εξής έργα:



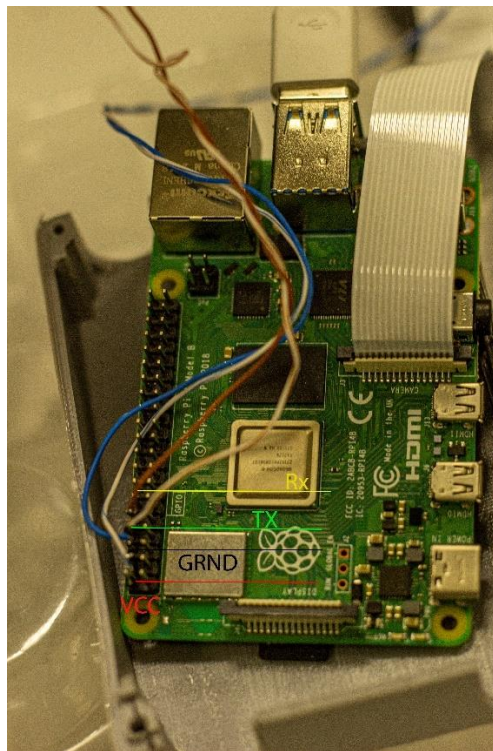
Εικόνα 14 Διασύνδεση όλων των επί μέρους υπόσυστημάτων στην IMU, CubePilot.

1. Απευθείας διασύνδεση με την IMU (Autopilot) στην αντίστοιχη θύρα τηλεμετρίας (εν προκειμένω, στην θύρα Telemetry 2⁷ - Εικόνα 14, 15 και 16).

⁷ Διατηρείται πάντα ο ασύρματος στην Telemetry 1 προκειμένου να διασφαλιστεί η αδιάκοπη συνδεσιμότητα (seamless connectivity – redundancy) για ασφαλές της πτήσεως.

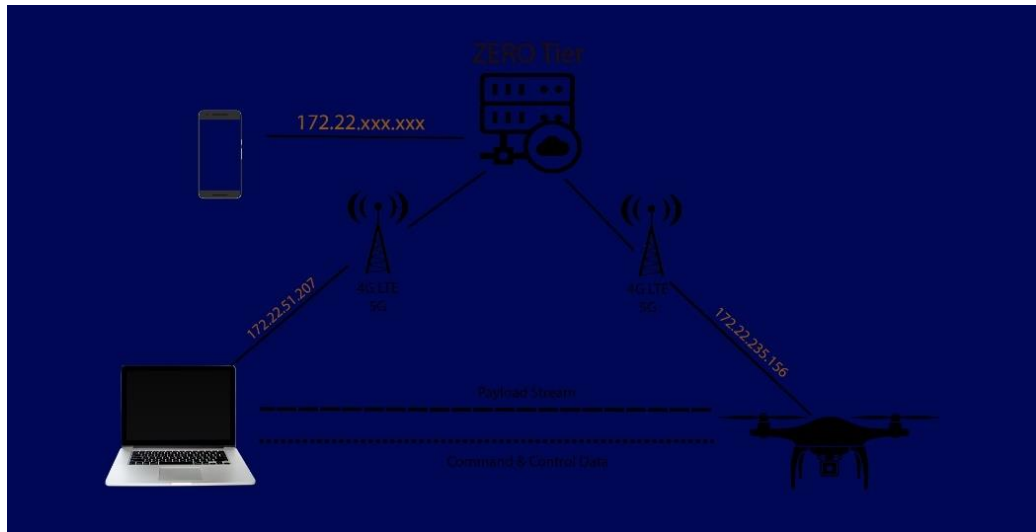


Εικόνα 15 Διασύνδεση RPi Model 4 - CubePilot (Pixhawk).



Εικόνα 16 Συνδεσμολογία RPi με CubePilot στο UAS MERA.

2. Παροχή διεύθυνσης IP ώστε τα δεδομένα τηλεμετρίας μέσω πρωτοκόλλου MAVLINK και δικτύου VPN να μεταφερθούν σε έτερους τερματικούς σταθμούς.



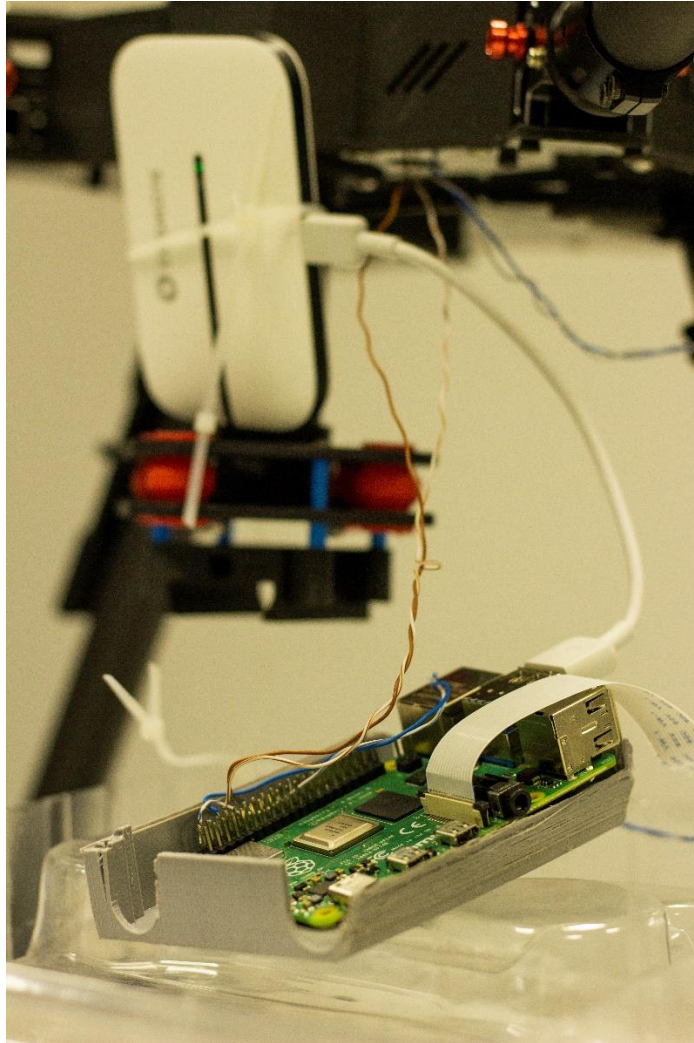
Εικόνα 17 Τοπολογία δικτύου.

3. Διασύνδεση κάμερας (Pi Camera 1v3) ανάλυσης 1080p, 30fps. Εφόσον κατέχεται ποιοτικότερη κάμερα δύναται να διασυνδεθεί με το RPi, λαμβάνοντας σαφώς υπόψιν την οροφή της επεξεργαστικής ισχύος του τελευταίου.



Εικόνα 18 Rpi camera v2 (8MP, 1080p). Πηγή <https://grobotronics.com/raspberry-pi-camera-module-v2-8mp-1080p.html>.

4. Σύνδεση με την κεραία 4G LTE/5G δια μέσου είτε κινητού τηλεφώνου που έχει δυνατότητα 5G δικτύωσης είτε δια μέσου 4G LTE USB Stick, 5G router κ.ο.κ μέσω μίας εκ των θυρών USB 3.0 που διατίθενται.



Εικόνα 19 Διασύνδεση 4G LTE/5G Router με το RPi.

5. Ενσωμάτωση κατά το δοκούν και του CONOPS του εκάστοτε αεροχήματος το σύνολο των αισθητήρων που απαιτούνται για τη διεκπεραίωση της αποστολής τους (π.χ. κάμερες IR, Lidar, radar, κ.ο.κ)

Επιπλέον των ανωτέρω είναι απαραίτητη η χρήση ενός τερματικού GCS ως network administrator ο οποίος αφενός θα εποπτεύει/διαχειρίζεται τη ροή των πληροφοριών από το UAV στους τερματικούς σταθμούς και αφετέρου θα συνδέεται μέσω MAVLINK στην IMU (μέσω RPi).

5.2 Απαιτήσεις Software

Η μεταφορά των δεδομένων C2 & Payload (εν προκειμένω βίντεο) πραγματοποιείται δια μέσου VPN. Πιο συγκεκριμένα, είναι γνωστό ότι τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα δύναται να παρεμβληθούν και να υποκλαπούν σχετικά εύκολα εάν κατέχεται το κατάλληλο hardware (SDRs) και τεχνογνωσία. Με αυτό τον τρόπο τα τηλεπικοινωνιακά σήματα όχι μόνο μπορούν να παρεμβληθούν αλλά και να υποκλαπούν, εφόσον ένας κακόβουλος χρήστης έχει εισέλθει στο δίκτυο επικοινωνίας δύο κόμβων/τερματικών (eavesdropping), παρά το γεγονός ότι παρέχεται κρυπτοκάλυψη. Μάλιστα αυτά τα δίκτυα, σε συνεργασμό με τα υπόλοιπα δίκτυα που αξιοποιούνται από τα UAVs (π.χ. οικογένεια των 802.11) είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε κυβερνοεπιθέσεις.

5.2.1 Zero Tier VPN

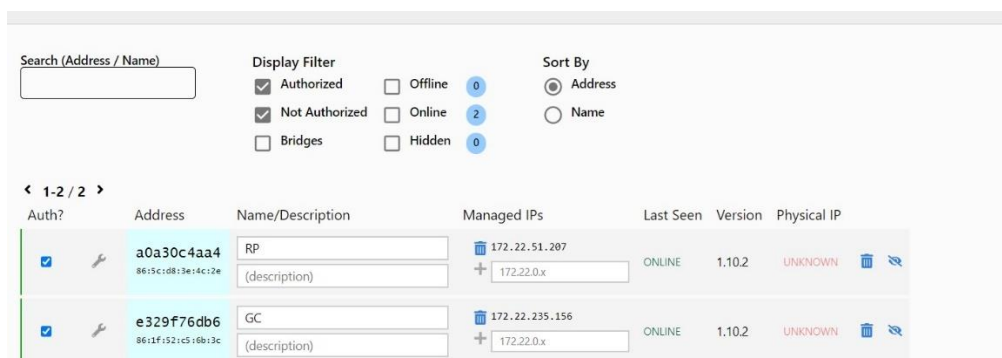
Με βάση τα παραπάνω, εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προστασία (cybersecurity) των εν λόγω δεδομένων που διακινούνται μέσω τηλεπικοινωνιών είναι κομβικής σημασίας, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς τη σημασία των δεδομένων αυτών σε συγκεκριμένες εφαρμογές των UAVs (security patrolling, goods delivery κ.λπ.). Με βάση λοιπόν αυτό, η διακίνηση των δεδομένων στο εν λόγω σενάριο πραγματοποιείται μέσω VPN (Zero Tier) ώστε να υπάρχει ένα αξιόπιστο (trustworthy network) του οποίου οι κόμβοι θα μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα κρυπτοκαλυμένα μεταξύ τους.

ZEROTIER

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται σύγχρονη κρυπτογράφηση των 256-bit με τρόπους που συνιστώνται από επαγγελματίες κρυπτογράφους που το δημιούργησαν. Η ασύμμετρη κρυπτογράφηση του δημόσιου κλειδιού είναι Curve25519/Ed25519, μια παραλλαγή ελλειπτικής καμπύλης 256-bit.

Κάθε πακέτο VL1 κρυπτογραφείται από άκρο σε άκρο χρησιμοποιώντας (από την τρέχουσα έκδοση) 256-bit Salsa20 και ελέγχεται η ταυτότητά του χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ελέγχου ταυτότητας μηνυμάτων Poly1305 (MAC). Το MAC υπολογίζεται μετά την κρυπτογράφηση και η σύνθεση κρυπτογράφησης/MAC που χρησιμοποιείται είναι ίδια με την υλοποίηση αναφοράς NaCl.

Η χρήση του Zero Tier πραγματοποιείται δωρεάν (υφίσταται χρήση επί πληρωμή με αυξημένες ως προς τη δικτυακή διαχείριση δυνατότητα) μέσα από τη δημιουργία λογαριασμού στην αντίστοιχη σελίδα.



Auth?	Address	Name/Description	Managed IPs	Last Seen	Version	Physical IP
<input checked="" type="checkbox"/>	a0a30c4aa4 <small>86:5c:d8:3e:4c:2e</small>	RP <small>(description)</small>	172.22.51.207 + 172.22.0.x	ONLINE	1.10.2	UNKNOWN
<input checked="" type="checkbox"/>	e329f76db6 <small>86:1f:52:c5:6b:3c</small>	GC <small>(description)</small>	172.22.235.156 + 172.22.0.x	ONLINE	1.10.2	UNKNOWN

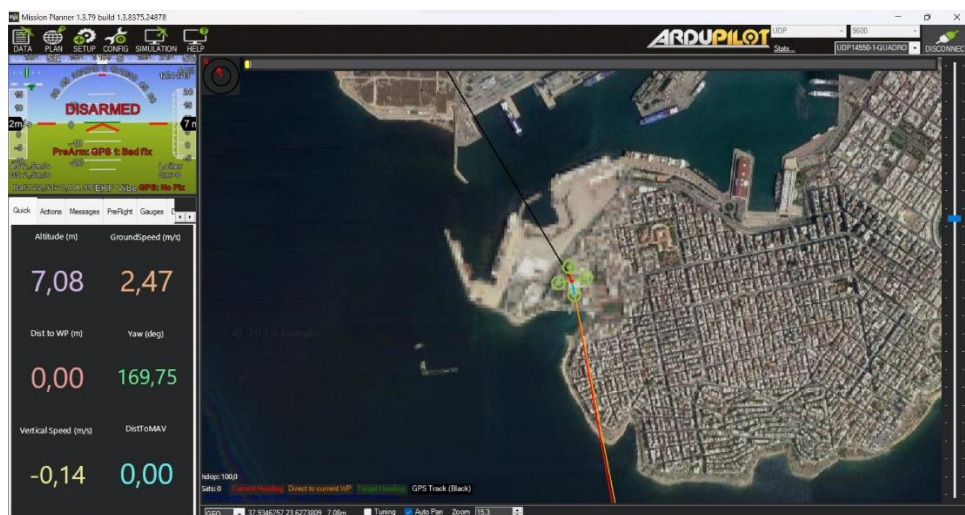
Εικόνα 20 Δημιουργία VPN με δύο κόμβους (α) UAV και (β) GCS.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 20 έχει δημιουργηθεί ένα VPN με δύο κόμβους. Τον πρώτο αποτελεί το UAV (με ονομασία RPi) ενώ τον δεύτερο τον σταθμό εδάφους GCS με τις αντίστοιχες εκχωρημένες IPs. Η δημιουργία του VPN προαπαιτεί την

εγκατάσταση/παραμετροποίηση του Zero Tier τόσο στο GCS όσο και στο RPi σε περιβάλλον Linux (ή έτερο εξαρτώμενο από τον χρήστη)

5.2.2 Mission Planner

Το Mission Planner είναι ένα λογισμικό σταθμού ελέγχου εδάφους για αεροπλάνα, drones και rover. Δύναται να χρησιμοποιηθεί ως βοηθητικό πρόγραμμα διαμόρφωσης ή ως δυναμικό συμπλήρωμα ελέγχου για το UAV. Μέσα από το εν λόγω λογισμικό πραγματοποιείται η διαμόρφωση των δεδομένων τηλεμετρίας στο πρωτόκολλο MAVLINK ώστε στη συνέχεια μέσω VPN Zero Tier, του τηλεπικοινωνιακού δικτύου να φτάσουν στο RPi και εν συνεχεία στον πιλότο (IMU) του σκάφους και το αντίστροφο.

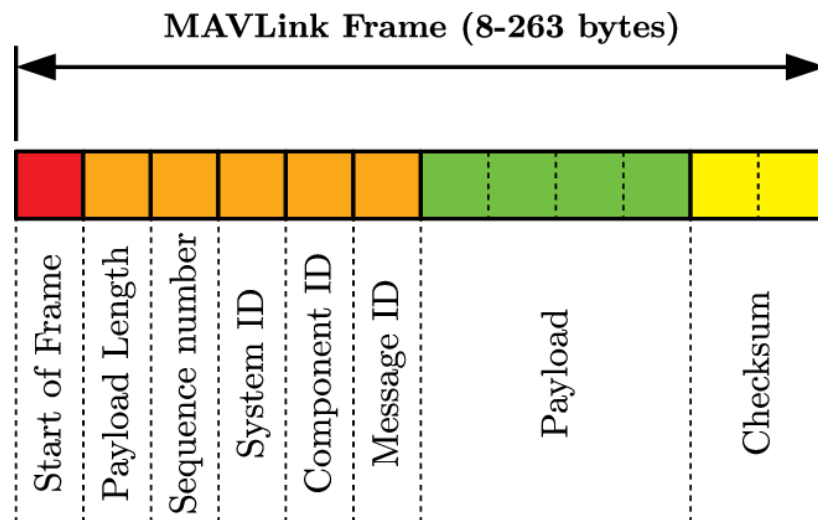


Εικόνα 21 Το Mission Planner ως λογισμικό διακίνησης και έλεγχου C2 δεδομένων.

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται τα C2 δεδομένα (ύψος πτήσης, pitch, yaw, v speed, g speed κ.λπ.) κατά τη διάρκεια ζεύξης του οχήματος μέσω MAVLINK & 4G LTE/5G δικτύου.

5.2.3 MAVlink

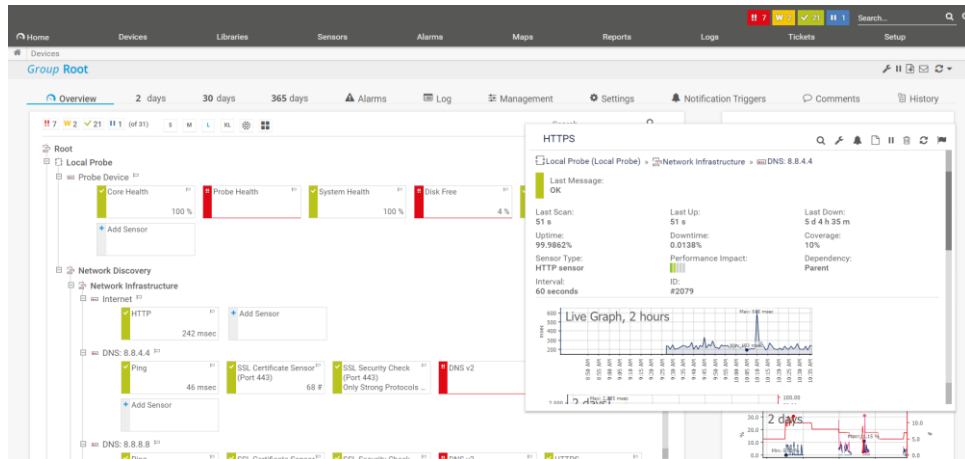
Το MAVLink είναι ένα δυαδικό πρωτόκολλο τηλεμετρίας σχεδιασμένο για συστήματα περιορισμένων πόρων και συνδέσεις περιορισμένου εύρους ζώνης. Οι ροές δεδομένων τηλεμετρίας αποστέλλονται σε σχεδιασμό πολλαπλής διανομής, ενώ οι πτυχές πρωτοκόλλου που αλλάζουν τη διαμόρφωση του συστήματος και απαιτούν εγγυημένη παράδοση, όπως το πρωτόκολλο αποστολής ή το πρωτόκολλο παραμέτρων, είναι από σημείο σε σημείο με αναμετάδοση.



Εικόνα 22 Δομή ενός MAVLINK frame.

5.2.4 PRTG Network Monitor

Το PRTG Network Monitor αποτελεί free λογισμικό για την παρακολούθηση μιας πληθώρας χαρακτηριστικών δικτύων στα οποία είναι συνδεδεμένη οποιαδήποτε συσκευή που κατέχει IP. Το εν λόγω λογισμικό είναι αναγκαίο για τη μελέτη της δικτυακής απόδοσης και του QoS του τηλεπικοινωνιακού δικτύου κατά τη διάρκεια της πτήσης του UAV σε διάφορα ύψη.



Εικόνα 23 PRTG Network monitoring. Λογισμικό επιτήρησης και ανάλυσης QoS του τηλεπικοινωνιακού δικτύου που δημιουργήθηκε κατά τις δοκιμές.

5.3 UAS MERA Trials

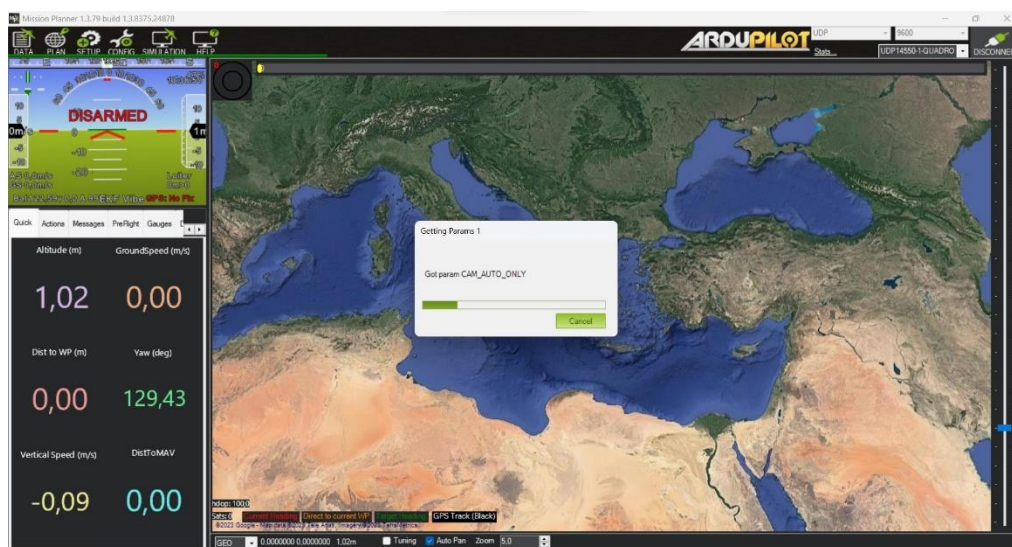
Εφ' όσον, λοιπόν, πραγματοποιήθηκε η διασύνδεση των κυρίων συστημάτων δικτύωσης διεκπεραιώθηκε ένα σύνολο δοκιμών για να εξασφαλιστεί η αξιόπιστη διασυνδεσιμότητα και μεταφοράς τηλεμετρίας από το CubePilot στον GCs δια μέσου MAVlink και VPN.

Η διαδικασία της άρμωσης και διεκπεραίωσης των δοκιμών έλαβε χώρα στη Σχολή Ναυτικών δοκιμών στο Εργαστήριο Συστημάτων Μάχης και Ναυτικής Τακτικής με τη συμβολή της UAS Team.

Παρακάτω, επομένως, θα παρουσιαστεί το σύνολο των δοκιμών μετά συμπερασμάτων τους και περεταίρω ανάλυση.

5.3.1 1st Trial

Σε πρώτη φάση δοκιμάστηκε και επιτεύχθηκε το connectivity test στο περιβάλλον του Mission Planner δια μέσω του MAVlink και του 4G LTE/5G δικτύου. Πιο συγκεκριμένα δια μέσω απομακρυσμένης σύνδεσης (SSH) του GCS με το RPi κατά την ενεργοποίηση του UAS MERA. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η σύνδεση μέσω UDP σε Port 14450, baud rate 9.600 και IP 172.22.51.207 (GCS). Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24 Πρώτη σύνδεση στο περιβάλλον του Mission Planner.

Αφού πραγματοποιήθηκε η σύνδεση, αυτόματα, ο πιλότος (CubePilot) μεταβιβάζει της απαραίτητες πληροφορίες συστήματος μέσω MAVlink, VPN και τηλεπικοινωνιακού δικτύου στον σταθμό εδάφους ώστε να παραμετροποιηθεί ορθά. Σημειωτέο δε, η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στον ίδιο φυσικό χώρο (εντός του εργαστηρίου) αφενός για το UAS και αφετέρου για το GCS.

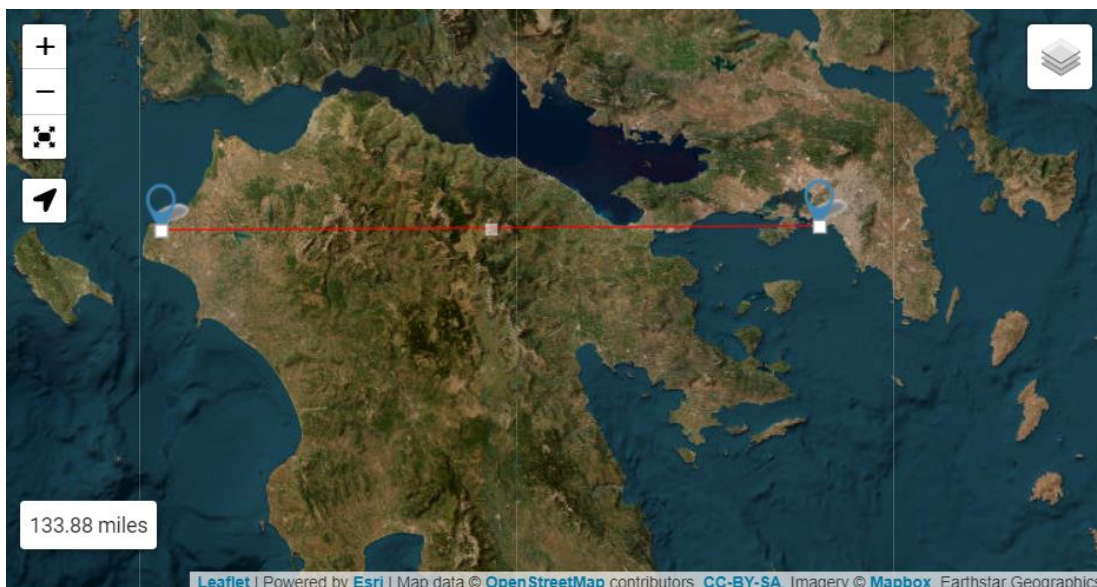
Προκειμένου να εξασφαλιστεί, λοιπόν, η αξιόπιστη λειτουργία της απομακρυσμένης σύνδεσης, πραγματοποιήθηκε Motor test έκαστου κινητήρα του UAS MERA καθώς και έτερων Pre flight tests. Έτσι, διαπιστώθηκε το γεγονός ότι το UAS MERA δύναται να επιχειρήσει δια μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

5.3.2 2nd Trial

Με δεδομένο ότι έχει εξασφαλιστεί η μετάδοση της τηλεμετρίας (C2), επόμενο βήμα απαιτεί η μεταφορά φορτίου Payload, εν προκειμένω μετάδοση βίντεο σε ένα τερματικό (το τερματικό ελέγχου του οχήματος GCS) ώστε να διαπιστωθεί το QoS.

Με βάση τα ανωτέρω, ενσωματώθηκε στο RPi μια κάμερα (RPi camera v.3) η οποία δύναται να μεταδίδει βίντεο σε ανάλυση 1080p ενώ αποτελείται από αισθητήρα των 8 MP. Παράλληλα, με κατάλληλη παραμετροποίηση του RPi καθίσταται δυνατή η μετάδοση βίντεο σε απομακρυσμένους χρήστες.

Σε αυτή τη δοκιμή εξετάστηκε η σύνδεση μέσω SSH στο UAS MERA και η αποστολή, πλέον, C&C και Payload data. Αναλυτικότερα, ο σταθμός εδάφους τοποθετήθηκε στη διασπορά της 117 ΠΜ (Πτέρυγας Μάχης) στην περιοχή Ίκαρος, εγγύς στην Ανδραβίδα. Το UAS MERA δε, βρισκόταν πάλι, στην περιοχή της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων (μεταξύ τους -ευθεία- απόσταση 134 μίλια), σε ύψος 37 μέτρων (MSL).

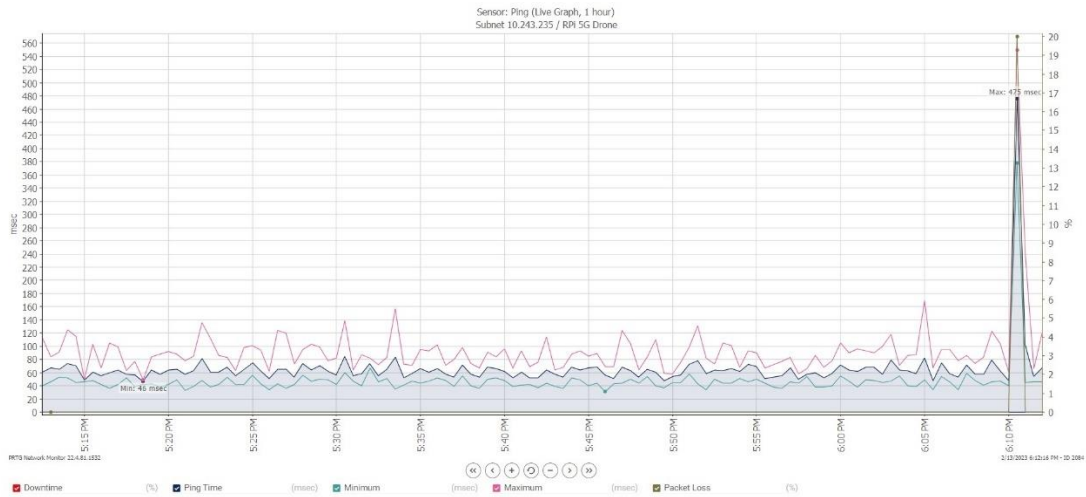


Εικόνα 25 Απόσταση UAS MERA με GCS.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών εξάχθηκαν (δια μέσου του PRTG Network Monitor) σημαντικά συμπεράσματα για την απόδοση του δικτύου. Ειδικότερα, κατά τη διάρκεια της ζεύξης (60') τα εξαγόμενα στοιχεία είναι τα εξής:

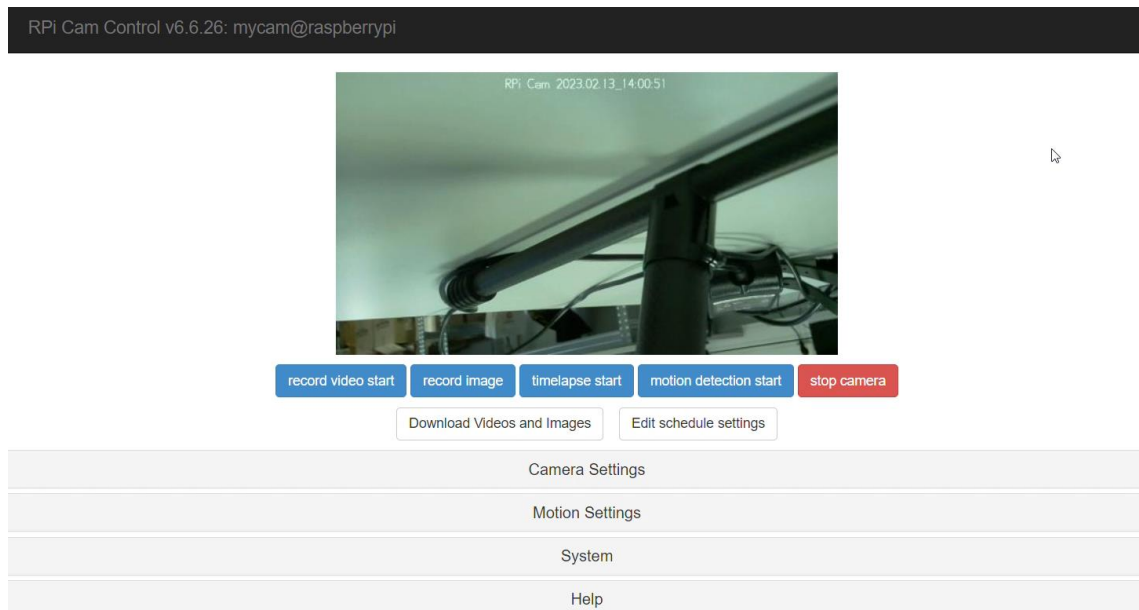
	Minimum	Maximum	Mean
Ping Time (ms) (Latency)	75	107	51
Packet Loss (%)	1<		
Throughput (Mbps)			50 (UL/DL)

Πίνακας 3 Πίνακας συλλεχθέντων στοιχείων από το trial #2.



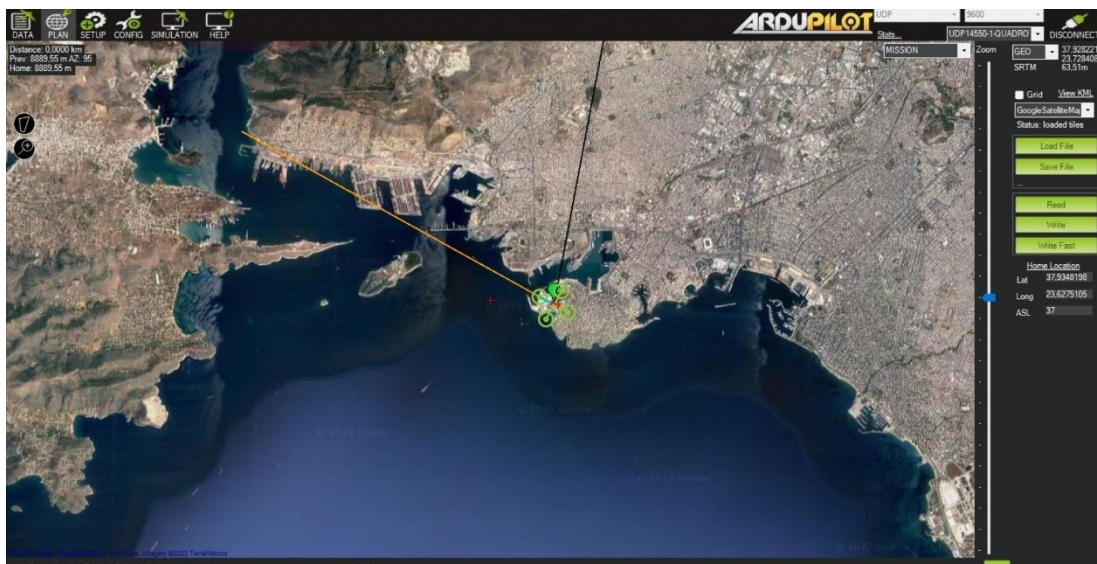
Διάγραμμα 8 Διάγραμμα συλλεχθέντων στοιχείων από το trial #2

Από τα παραπάνω απορρέει το συμπέρασμα ότι για ύψος πτήσης 37m MSL σε προφίλ Hover (αώρηση) ένα UAV μπορεί να διατηρήσει υψηλής ποιότητας ζεύξη, χαμηλού latency, επιτρέποντας έτσι την αξιόπιστη, σε πρώτη φάση μεταφορά δεδομένων C2 (error rate <1%) και Payload σε δεύτερη (αδιάλειπτη παροχή βίντεο 1080p 30fps) (Πίνακας 3, Διάγραμμα 8).



Εικόνα 26 Περιβάλλον προβολής Video κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Αρα μπορούμε να υποθέσουμε με ασφάλεια ότι σε αυτό το ύψος ένα UAV μπορεί να επιχειρήσει ασφαλώς, εφ' όσον πληροί τις προδιαγραφές τις 3GPP σχετικά με τις απαιτούμενες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων στο εκάστοτε δίκτυο.



Εικόνα 27 Υποτύπωση θέσης UAS MERA κατά τη διάρκεια του trial #2.

6. Συμπεράσματα

Είναι πασιφανές λοιπόν, ότι τα Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα Εναέρια οχήματα μπορούν να επωφεληθούν πολλαπλά από τις νέες τεχνολογίες επικοινωνιών. Οι σημαντικότερες εξ αυτών αποτελούν τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G) και τα ευρυζωνικά δίκτυα. Αναλυτικότερα, η αξιόπιστη ασύρματη επικοινωνία αποτελεί σημείο κλειδί για την αξιοποίηση των UAV στο σύνολο των εφαρμογών που δύναται να εξυπηρετήσουν, με ασφάλεια, εφ' όσον εξασφαλίζεται ο έλεγχος της αποστολής, η συνεχής (seamless) και αμφίδρομη επικοινωνία με το όχημα.

Μέσα λοιπό από αυτή την εργασία καταδεικνύεται το πώς αυτά τα δίκτυα είναι υψίστης σημασίας για τις μελλοντικές smart cities και το σύνολο του Industry 4.0. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε το βασικό θεωρητικό πλαίσιο των επικοινωνιακών τεχνικών απαιτήσεων των επικοινωνιών των UAVs παραθέτοντας, επίσης, τις γενικές κατευθυντήριες γραμμές και τον προσανατολισμό της 3GPP. Αυτή είναι μάλιστα η οποία, όπως παρουσιάστηκε, η οποία καθορίζει τις τεχνικές προδιαγραφές προκειμένου τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς να εισαχθούν και να πρωταγωνιστήσουν στο επικοινωνιακό σχήμα των UAVs (TR 36.777 3GPP).

Επιπροσθέτως, παρουσιάστηκαν βασικές θεωρητικές αρχές διάδοσης των μικροκυμάτων σε προφίλ A-A και A-G εφ' όσον αυτές είναι οι συχνότητες που λειτουργούν τα δίκτυα νέας γενιάς. Ακόμη, αναλύθηκαν οι απαιτήσεις των συστημάτων και του τηλεπικοινωνιακού δικτύου για την ένταξη και υποστήριξη του συνόλου των κόμβων, ειδικότερα δε των UAVs, προς επίτευξη της βέλτιστης αξιοποίησης του δικτύου. Παράλληλα, δεδομένου των κινδύνων που ελλοχεύουν στο οικοσύστημα των επικοινωνιών έγινε αναφορά σε ζητήματα κυβερνοασφάλειας και ηλεκτρονικού πολέμου που δύναται να επηρεάσουν τη λειτουργία των Μη Επανδρωμένων Συστημάτων.

Με βάση λοιπόν τα ανωτέρω, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση των θεωρητικών και πειραματικών επιδόσεων των 4G LTE/5G δικτυωμένων UAVs. Σε αυτή την ανάλυση παρουσιάζονται οι μελέτες

μετά συμπερασμάτων τους οι οποίες μέσα από τη χρήση συγκεκριμένων λογισμικών προσομοίωσης εξήγαγαν αυτά τα συμπεράσματα. Τα τελευταία είναι εκείνα που λήφθηκαν υπόψιν προκειμένου να σχεδιαστεί ένα case study, εκείνο που εκπονήθηκε από το Εργαστήριο Συστημάτων Μάχης και Ναυτικής Τακτικής της ΣΝΔ (Σχολή Ναυτικών Δοκίμων) με την UAS team.

Σε αυτό το case study αξιοποιήθηκε το UAS MERA. Πιο αναλυτικά, προστέθηκε σε αυτό το απαραίτητο Hardware και Software προκειμένου το τελευταίο να δικτυωθεί στο 4G LTE/5G δίκτυο. Μέσα λοιπόν από μια σειρά δοκιμών επιτεύχθηκε η δικτύωση, ανταλλαγή δεδομένων on site και απομακρυσμένα μέσω σταθμού εδάφους. Το σύνολο της διαδικασίας πραγματοποιήθηκε με τη συνδρομή του UAS TEAM το οποίο παρείχε τα απαραίτητα υλικά, εργαλεία αλλά και τεχνογνωσία στα σημεία τα οποία απαιτήθηκε.

Μετά λοιπόν από το σύνολο των δοκιμών προέκυψαν σημαντικότερα συμπεράσματα. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι στις αστικές περιοχές το υφιστάμενο 4G LTE/5G δίκτυο είναι ικανό να υποστηρίξει τις εφαρμογές των UAVs παρέχοντας αδιάλειπτη και αξιόπιστη συνδεσιμότητα σε υψηλές ταχύτητες. Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι ο μέσω του τηλεπικοινωνιακού δικτύου καθίσταται εφικτός ο έλεγχος (C&C) με πολύ μικρό Latency του UAV σε οποιοδήποτε μέρος υφίσταται τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Δηλαδή, οι περιορισμοί αποστάσεως που απορρέουν από τη χρήση των παραδοσιακών πλέον εμπορικών πρωτοκόλλων και μέσων επικοινωνίας (Wi-fi) καταργούνται, επιτρέποντας την πτήση των UAVs όπου υπάρχει τηλεπικοινωνιακή κάλυψη. Επιπλέον των ανωτέρω, η ολοκλήρωση του έργου των δικτύων 5^{ης} γενιάς και η ενσωμάτωση έτερων τηλεπικοινωνιακών μέσων (κεραίες MIMO, femtocells κ.ο.κ.) θα προσδώσουν ακόμη περισσότερες δυνατότητες στα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη εκπληρώνοντας τις δυνατότητες των δικτύων αυτών, όπου αυτό δύναται (eMBB, URLLC, mMTC). Επιλογικά, αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος εγκατάστασης του εν λόγω συστήματος είναι μικρό, επιτρέποντας έτσι την μελλοντική εμπορική αξιοποίησή του.

Συμπερασματικά, λοιπόν, η ανάπτυξη 4G LTE/5G UAS αποσκοπεί στην ενσωμάτωση των υφιστάμενων τηλεπικοινωνιακών υποδομών στις επικοινωνίες των UAV, αποτελώντας το δίκτυο κορμού τους, αυξάνοντας σημαντικά τις επιχειρησιακές τους δυνατότητες. Ένα τέτοιο εγχείρημα πρόκειται να εξοικονομήσει σημαντικό κεφάλαιο από την παγκόσμια αγορά ενώ επιτρέπει τις ασφαλείς και πιστοποιημένες BVLOS πτήσεις των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών, γεγονός το οποίο θα δημιουργήσει πρόσφορο έδαφος στην παγκόσμια αγορά, όπως άλλωστε αναμένεται.

7. Future Work

Στο πλαίσιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε ένα UAV το οποίο χρησιμοποιεί ως βασικό δίκτυο ανταλλαγής δεδομένων τηλεμετρίας και φορτίου το υφιστάμενο τηλεπικοινωνιακό. Τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν είναι πολλαπλά και ιδιαίτερα υψηλής σημασίας, αν αναλογιστεί κανείς το εύρος των εφαρμογών τις οποίες επιτρέπουν να αναπτυχθούν.

Ωστόσο, για την εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν δοκιμές και σε έτερα γεωγραφικά περιβάλλοντα όπως προάστιες περιοχές, περιοχές λιμένων, δασών και ορεινών περιοχών ώστε να αναλυθούν τα δεδομένα που θα εξαχθούν από κάθε ιδιαίτερο περιβάλλον. Κατ' αυτό το τρόπο θα αναλυθούν οι περιορισμοί οι οποίοι προκύπτουν από κάθε περιβάλλον καθώς και οι διάφορες προκλήσεις για την αντιμετώπισή τους.

Επιπλέον, υπάρχουν ακόμη περισσότερα περιθώρια βελτίωσης του εν λόγω συστήματος (και του συνόλου των συστημάτων εν γένει) μέσω της αξιοποίησης των state of the art τεχνολογιών των τηλεπικοινωνιών. Συγκεκριμένα, προκειμένου να μειωθεί ακόμη περισσότερο ο λόγος SINR αυξάνοντας το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την αξιοπιστία της επικοινωνίας και την εμβέλεια αυτής είναι υψίστης σημασίας η μελέτη ενσωμάτωσης διάφορων ειδών MIMO κεραιών (mMIMO κ.α.). Παράλληλα, δυνατότητες όπως διαχείριση ισχύος δια μέσου μηχανικής μάθησης από

τα BSs, flight path signaling, αναγνώριση και άρση αμοιβαίων παρεμβολών, ταυτοποίηση και αναγνώριση των εν πτήση drones πρέπει να εξεταστούν ως προς τη συμβατότητα και αξιοποίησή τους για τη βελτίωση του QoS των δικτύων. Κατ' αυτό τον θα καθίσταται εφικτή η αύξηση του ρυθμού δεδομένων άνω των 50 Mbps γεγονός που θα υπερκάλυπτε τις απαιτήσεις της 3 GPP.

Επιπροσθέτως, ανερχόμενες εφαρμογές όπως εκείνη του Machine Edge Computing (MEC) είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μελετηθούν. Αυτό διότι οι δυνατότητες τις οποίες προσδίδει όσον αφορά την ταχύτητα επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων και την εξοικονόμηση ενέργειας μπορούν να αναβαθμίσουν τις δυνατότητες των UAV αυξάνοντας παράλληλα την αυτονομία τους. Παράλληλα, στο κομμάτι ανάλυσης της ενεργειακής δαπάνης η σύγκριση κατανάλωσης ενέργειας από διάφορα επικοινωνιακά συστήματα όπως Wifi, C – Band radios, τηλεπικοινωνίες κ.ο.κ. είναι μεγάλης σημασίας ώστε να επιλέγεται κάθε φορά το προσφορότερο για την αποστολή μέσο.

Τέλος, είναι υψίστης σημασία η μελέτη συνύπαρξης μεγάλου αριθμού χρηστών GUEs και UAVs (ως ορίζει σε αριθμούς η 3 GPP) ώστε να διαπιστωθεί αν το QoS των ζεύξεων είναι ικανό για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Αυτό διότι, όπως αναλύθηκε δημιουργούνται ιδιαίτερα υψηλής εντάσεως αμοιβαίες παρεμβολές, γεγονός το οποίο θέτει υπό αμφισβήτηση τη συνύπαρξή των χρηστών αυτών με το υφιστάμενο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο.

Βιβλιογραφία

1. Kammoun, H. Khanfir, Z. Altman et al. (2014). Preliminary results on 3D channel modeling: from theory to standardization. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 32 (6): 1219–1229.
2. UAV Communications for 5G and Beyond. (2020). In *UAV Communications for 5G and Beyond*. <https://doi.org/10.1002/9781119575795>.
3. G. Geraci, A. Garcia-Rodriguez, L. G. Giordano et al. (2018). Understanding UAV cellular communications: from existing networks to massive MIMO. *IEEE Access* 6, 67853–67 865.
4. Qualcomm Technologies, Inc. (2017). LTE unmanned aircraft systems. Tech. Rep., May.
5. M. M. Azari, F. Rosas, and S. Pollin, (2019). Cellular connectivity for UAVs: network modeling, performance analysis and design guidelines. *IEEE Trans. Wireless Commun.*
6. M. M. Azari, F. Rosas, A. Chiumento, and S. Pollin, Dec. (2017). Coexistence of terrestrial and aerial users in cellular networks. *Proceedings of the IEEE Global Communications (GLOBECOM) Workshops*.
7. M. M. Azari, F. Rosas, and S. Pollin, (2018), Reshaping cellular networks for the sky: major factors and feasibility. *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, pp. 1–7.
8. Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang (2019). Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond. *Proc. IEEE*, submitted, arXiv/1903.05289. (Εικόνα 1).

9. D. Joshi (2017). Commercial unmanned aerial vehicle (UAV) market analysis industry trends, companies and what you should know. Business Insider.
10. 3GPP (2017). 3GPP Technical Report 36.777. Technical Specification Group Radio Access Network; study on enhanced LTE support for aerial vehicles (Release 15), December.
11. 3GPP (2006). 3GPP Technical Report 25.814. Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (Release 7), September.
12. G. Geraci, A. Garcia Rodriguez, L. Galati Giordano et al. (2018). Supporting UAV cellular communications through massive MIMO. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC) Workshops, May, pages 1–6.
13. Garcia-Rodriguez, G. Geraci, D. Lopez-Perez, L. Galati Giordano, M. Ding, and E. Björnson (2019). The essential guide to realizing 5G-connected UAVs with massive MIMO. *IEEE Commun. Mag.* 57 (12): 84–90.
14. IMT Vision—Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. ITU-R Recommendation M.2083-0. September (2015). Available online: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E
15. E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold (2018). *5G NR The Next Generation Wireless Access Technology*. Academic Press.
16. Y. Yazid, Imad Ez – Zazi, Antonio – Guerro Gonzalez (2021), UAV-Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on AI: A Comprehensive Review <https://doi.org/10.3390/drones5040148>.
17. Shah Khalid Khan (2020), Mathematical framework for 5G-UAV relay <https://doi.org/10.1002/ett.4194>.

18. Harilaos Koumaras, George Makropoulos, Michael Batistatos, Stavros Kolometsos, Anastasios Gogos, George Xilouris, Athanasios Sarlas and Michail-Alexandros Kourtis (2021), 5G-Enabled UAVs with Command and Control Software Component at the Edge for Supporting Energy Efficient Opportunistic Networks, <https://doi.org/10.3390/en14051480>.
19. R. W. Heath Jr., N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan et al. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, 10(3):436–453, 2016.
20. I.A. Hemadeh, K. Satyanarayana, M. El-Hajjar, L. Hanzo, (2017). Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 20(2), 870–913.
21. K. Haneda, J. Zhang, L. Tan, G. Liu, Y. Zheng, H. Asplund, J. Li, Y. Wang, D. Steer, C. Li, et al., (2016), 5G 3GPP-like channel models for outdoor urban microcellular and microcellular environments, in 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring) (IEEE,2016), pp. 1–7.
22. T. Bai, R. Vaze, R.W. Heath, (2014)., Analysis of blockage effects on urban cellular networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.* **13**(9), 5070–5083.
23. T. Bai, R.W. Heath, (2014). Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 14(2), 1100–1114.
24. W. Khawaja, O. Ozdemir, and I. Guvenc (2017). UAV air-to-ground channel characterization for mmWave systems. *Proceedings of the IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC), Fall*, pp. 1–5.
25. David Matolak, Hani Mehrpouyan, (2019), Detection, Localization, and Tracking of Unauthorized UAS and Jammers.

26. G. Yang, Y. Zhang, Z. He et al. (2019). Machine-learning-based prediction methods for path loss and delay spread in air-to-ground millimetre-wave channels. *IET Microw. Antennas Propag.* 13 (8): 1113–1121.
27. J.G. Andrews, T. Bai, M.N. Kulkarni, A. Alkhateeb, A.K. Gupta, R.W. Heath, (2016). Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems. *IEEE Trans. Commun.* **65**(1), 403–430.
28. R.W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, A.M, (2016). Sayeed, An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems. *IEEE J. Sel. Top. Sig. Process.* **10**(3), 436–453.
29. M.N. Kulkarni, A. Ghosh, J.G. Andrews, (2016). A comparison of MIMO techniques in downlink millimeter wave cellular networks with hybrid beamforming. *IEEE Trans. Commun.* 64(5), 1952–1967.
30. M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor, M. Zorzi, (2019). Standalone and non-standalone beam management for 3GPP NR at mmWaves. *IEEE Commun. Mag.* 57(4), 123–129.
31. Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, A.V. Vasilakos, (2015). A survey of millimeter wave (mmWave) communications for 5G: Opportunities and challenges. *J. Wireless Netw.* 21(8), 2657–2676.
32. A.K. Gupta, J.G. Andrews, R.W. Heath, (2017). Macrodiversity in cellular networks with random blockages. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 17(2), 996–1010.
33. A.K. Gupta, A. Banerjee, (2020). Spectrum above radio bands, *Spectrum Sharing: The Next Frontier in Wireless Networks*, pp. 75–96.

34. I.A. Hemadeh, K. Satyanarayana, M. El-Hajjar, L. Hanzo, (2017). Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 20(2), 870–913.
35. S. Rangan, T.S. Rappaport, E. Erkip, (2014). Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges. *Proc. IEEE* 102(3), 366–385.
36. A.K. Gupta, A. Alkhateeb, J.G. Andrews, R.W. Heath, (2016). Gains of restricted secondary licensing in millimeter wave cellular systems. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 34(11), 2935–2950.
37. A. Alkhateeb, S. Alex, P. Varkey, Y. Li, Q. Qu, D. Tujkovic, (2018), Deep learning coordinated beamforming for highly-mobile millimeter wave systems. *IEEE Access* 6, 37,328–37,348.
38. You, X., et al., (2019). “AI for 5G: Research Directions and Paradigms,” *Science China Information Sciences*, Vol. 62, No. 2.
39. Li, R., et al., (2018). “Deep Reinforcement Learning for Resource Management in Network Slicing,” *IEEE Access*, Vol. 6.
40. Barshan, B., and B. Eravci, (2012) “Automatic Radar Antenna Scan Type Recognition in Electronic Warfare,” *Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 48, No. 4.
41. O’Shea, T., and J. Hoydis, (2017). “An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer,” *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, Vol. 3, No. 4.
42. Sabeen Tahir, (2018): *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 9(11) DOI: 10.14569/IJACSA.2018.091123.