

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Χρήση HAPS (High Altitude Platform Stations) σε
ενοποιημένα επίγεια και εναέρια δίκτυα 6ης γενιάς
(integrated terrestrial and aerial 6G networks).»



Της φοιτήτριας
Λασκαράκη Αικατερίνης-Κλεανθής
Αρ. Μητρώου: 516070

Επιβλέπουσα
Μεσοδιακάκη Αγάπη
Έκτακτο διδακτικό προσωπικό

4 Οκτωβρίου 2023

Τίτλος Δ.Ε.: Χρήση HAPS (High Altitude Platform Stations) σε ενοποιημένα επίγεια και εναέρια δίκτυα 6ης γενιάς.

Κωδικός Π.Ε. 22267

Ονοματεπώνυμο Φοιτήτριας Λασκαράκη Αικατερίνη Κλεανθή

Ονοματεπώνυμο εισηγητή Μεσοδιακάκη Αγάπη

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 17-10-2022

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 10-09-2023

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Λασκαράκη Αικατερίνης-Κλεανθής που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Αφιερώνω αυτήν την πτυχιακή εργασία με βαθιά ευγνωμοσύνη και αγάπη στους γονείς μου, οι οποίοι πάντα με υποστηρίζουν, με πιστεύουν, με έναυσαν να διερευνώ, να μαθαίνω και να εκτείνω τους ορίζοντές μου. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς την καθηγήτρια μου κ. Μεσοδιακάκη Αγάπη, την οποία θεωρώ όχι μόνο έναν ξεχωριστό μέντορα αλλά και έναν φάρο καθοδήγησης, που με ενέπνευσε, δίδαξε, και στάθηκε δίπλα μου, βοηθώντας με να διαμορφώσω και να υλοποιήσω αυτό το έργο με επιτυχία.

Πρόλογος

Η έρευνα σχετικά με τις επικοινωνίες έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και η χρήση υψηλών ατμοσφαιρικών πλατφορμών (High Altitude Platform Stations - HAPS) έχει εμφανιστεί ως μια ελπιδοφόρα τεχνολογία για πολλούς σκοπούς, όπως η επικοινωνία, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος και η διεξαγωγή επιστημονικών πειραμάτων.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη σύγκριση διαφόρων HAPS, όπως τα αεροσκάφη με ανθρώπινο πλήρωμα, τα αυτόνομα αεροσκάφη και τα αερόστατα. Η σύγκριση αυτή περιλαμβάνει διάφορα χαρακτηριστικά, όπως η απόδοση σε υψηλό υψόμετρο, η αυτονομία, η δυνατότητα επαναφόρτισης και το κόστος.

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε την εφαρμογή των διαφόρων ειδών HAPS, θα συνοψίσουμε τα αποτελέσματα της σύγκρισης και θα αξιολογήσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας HAPS. Επιπλέον, θα εξετάσουμε τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα HAPS, όπως η ασφάλεια, ο περιορισμένος χώρος και οι περιορισμοί στην επίτευξη σταθερότητας σε υψηλά υψόμετρα.

Συνολικά, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην αξιολόγηση των προτύπων τεχνολογιών HAPS και στην παροχή ενδεδειγμένων συστάσεων για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας για συγκεκριμένες εφαρμογές. Με αυτόν τον τρόπο, η παρούσα εργασία συνεισφέρει στη βελτίωση της κατανόησης και της χρησιμοποίησης των HAPS και στην εξέλιξη αυτής της αναπτυσσόμενης τεχνολογίας.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση και σύγκριση των διαφορετικών τύπων High Altitude Platform Stations (HAPS). Τα HAPS είναι αερόστατα ή αεροσκάφη που λειτουργούν σε υψόμετρα πάνω από 20 χιλιάδες μέτρα, προσφέροντας υπηρεσίες επικοινωνίας, παρακολούθησης και παρατήρησης. Στην εργασία παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι των HAPS, όπως αερόστατα, αερόπλοια και άλλα αεροσκάφη, και εξετάζονται οι τεχνολογικές και λειτουργικές τους ιδιαιτερότητες. Η κεντρική ενότητα της εργασίας αφιερώνεται στη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών ειδών HAPS, επικεντρώνοντας σε κριτήρια όπως η απόδοση, η διάρκεια ζωής, η ικανότητα φόρτωσης και οι ενεργειακές ανάγκες. Στο τελευταίο μέρος, η εργασία διερευνά τις λειτουργίες, τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις του κάθε τύπου πλατφόρμας, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα για την εφαρμογή των HAPS στον τομέα των τηλεπικοινωνιών.

«Use of HAPS (High Altitude Platform Stations) in integrated terrestrial and
aerial 6G networks»

« Aikaterini Kleanthi Laskaraki »

Abstract

This detailed thesis embarks on an in-depth analysis and comparison of High Altitude Platform Stations (HAPS). In the opening section, mobile communication generations are explored, with a pronounced focus on the advancements and innovations brought about by the 6th generation. The ensuing section pivots to a thorough literature review, encompassing the multifarious HAPS types, preceding projects within this domain, key advantages of the technology, the inherent technological challenges, as well as future prospects. The third section zeroes in on the intricate comparison of balloon-airship type HAPS, unveiling the adopted procedure and the power calculation model utilized. Concludingly, the fourth section meticulously portrays the simulation environment employed for the research, lays out the specific outcomes, and culminates in a detailed commentary and conclusions based on the findings.

Ευχαριστίες

Αυτή η αφιέρωση είναι για όλους όσους με στήριξαν και με εμπνέουν καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας. Είναι η έκφραση ευγνωμοσύνης μου προς εκείνους που με συνόδευσαν σε αυτό το ταξίδι της ακαδημαϊκής μου ανάπτυξης και αυτοσχεδίασης.

Καταρχάς, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, που με καθοδήγησε και με συμβούλευσε κατά τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας. Η σοφία, η γνώση και η υποστήριξή της με βοήθησαν να αναπτύξω τις ιδέες μου και να προχωρήσω στην εκτέλεση του έργου με αυτοπεποίθηση.

Επίσης, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου προς τους συμφοιτητές μου και τους φίλους μου που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της πορείας. Οι συζητήσεις, οι ιδέες και η αμοιβαία υποστήριξη μας ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και για την ανάπτυξή μου ως ακαδημαϊκού και ως άνθρωπο.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξή της και την ανελλιπή ενθάρρυνσή της. Η αγάπη και η στήριξή τους με έκαναν να πιστεύω στον εαυτό μου και να συνεχίζω να προσπαθώ για την επίτευξη των στόχων μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλες τις πηγές, τους ερευνητές και τους ακαδημαϊκούς που προέβησαν σε προηγούμενες έρευνες και εργασίες που χρησιμοποίησα κατά τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας. Οι συνεισφορές τους στον τομέα μου με βοήθησαν να εμβαθύνω στη θεωρία και να αναπτύξω την έρευνά μου σε υψηλό επίπεδο.

Αυτή η πτυχιακή εργασία είναι αποτέλεσμα πολλών ωρών σκληρής εργασίας, αμφισβήτησης και αναζήτησης γνώσης. Ελπίζω ότι η έρευνά μου θα συμβάλει στον τομέα μου και θα εμπνεύσει νέες ιδέες και μελέτες.

Τέλος, αυτή η πτυχιακή εργασία αποτελεί ένα σημαντικό κεφάλαιο στην ακαδημαϊκή μου πορεία και αντιπροσωπεύει την προσπάθεια και την αφοσίωση που έχω επενδύσει στον τομέα μου. Ελπίζω ότι η έρευνά μου θα έχει θετικό αντίκτυπο και να συμβάλει στην περαιτέρω ανάπτυξη και καινοτομία στον τομέα αυτό.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	x
Συντομογραφίες	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Γενιές κινητής τηλεφωνίας από το 0G ως το 5G	1
1.2.1 1η γενιά κινητής τηλεφωνίας	1
1.2.2 2η γενιά κινητής τηλεφωνίας	2
1.2.3 3η γενιά κινητής τηλεφωνίας	2
1.2.4 4η γενιά κινητής τηλεφωνίας	2
1.2.5 5η γενιά κινητής τηλεφωνίας	4
1.3 6η γενιά κινητής τηλεφωνίας	5
1.3.1 Κριτήρια ποιότητας	6
1.3.2 Τεχνολογίες κλειδιά και ανοικτά προβλήματα	9
1.4 Δομή πτυχιακής και μεθοδολογία	13
1.5 Επίλογος	15
2 Βιβλιογραφική έρευνα και προσεγγίσεις	17
2.1 Εισαγωγή	17
2.2 Βιβλιογραφική έρευνα	17
2.2.1 Ιστορία των High Altitude Platform Stations	18
2.2.2 Κατηγορίες των High Altitude Platform Stations	19
2.2.3 Παραδείγματα υλοποιήσεων HAPS	21
2.2.4 Πλεονεκτήματα των HAPS	33
2.2.5 Περιπτώσεις χρήσης των HAPS	35
2.2.6 Τεχνολογικές προκλήσεις	36
2.2.7 Προοπτικές για το μέλλον	39
2.3 Επίλογος	40
3 High Altitude Platform Systems (HAPS)	41
3.1 Εισαγωγή	41
3.2 Κριτήρια σύγκρισης HAPS	41
3.2.1 Σύγκριση Αεροδυναμικών Αεροπλάνων-Αεροστατικών Μπαλονιών	42
3.2.2 Σύγκριση HAPS-GEO δορυφόρων	43
3.2.3 Σύγκριση HAPS-LEO δορυφόρων	44
3.2.4 Σύγκριση HAPS-UAV	45
3.3 Μοντέλο υπολογισμού ισχύος	45
3.3.1 Κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης	46
3.3.2 Κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο backhaul	47
3.3.3 Υπολογισμός απωλειών διάδοσης	48
3.4 Επίλογος	53
4 Ανάλυση επίδοσης και αποτελέσματα	54
4.1 Εισαγωγή	54
4.2 Περιβάλλον προσομοίωσης	54
4.3 Αποτελέσματα	56
4.4 Επίλογος	65

5	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης	65
5.1	Εισαγωγή	65
5.2	Συμπεράσματα	65
5.3	Προτάσεις βελτίωσης για μελλοντικές επεκτάσεις	66
5.4	Επίλογος	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		68

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Κορυφαία επικοινωνιακά επιτεύγματα από την πρώτη γενιά κινητής τηλεφωνίας (1G) στην πέμπτη (5G).	3
1.2	Υποδομή δικτύου 5G με αναπαράσταση του fronthaul-midhaul-backhaul	5
1.3	Σημαντικά ορόσημα των ασύρματων δικτύων 6G όσον αφορά τις τεχνολογίες, τις τεχνολογίες κλειδιά και τις εφαρμογές	7
2.1	High Platform II Αερόπλοιο, 1970	19
2.2	Ένα μπαλόνι Loon στην εκδήλωση εκτόξευσης του Christchurch τον Ιούνιο του 2013.	20
2.3	HiSentinel80 Airship, SwRI, Aerostar	23
2.4	SPF Airship, JAXA	24
2.5	IA 200 Αερόπλοιο, KARI	25
2.6	Zephyr T and Zephyr S UAVs, Αεροσκάφος	26
2.7	HALE-D Αερόπλοιο, Lockheed Martin	27
2.8	ISIS Αερόπλοιο, Lockheed Martin,	28
2.9	Vulture Πρόγραμμα — DARPA. Προτάσεις 2η φάση: Boeing (SolarEagle), Lockheed Martin, Aurora Συστήματα Πτήσεων	29
2.10	Stratobus Αερόπλοιο, Thales Alenia Space	30
2.11	Τρία Μπαλόνια από το Έργο Loon της Google	31
2.12	Solara 50 Satellite, Aerospace Technology	32
2.13	Aquila, Atmospheric Satellite, Facebook	33
2.14	Κατασκευή πτερυγίων του Helios.	38
3.1	Απεικόνιση της απόστασης εντός βροχής που καλύπτει η ακτινοβολία σε επίγεια και HAP συστήματα	49
4.1	Γραφική απεικόνιση του SNR (Signal-to-Noise Ratio) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) για τις διάφορες κατηγορίες HAPS.	57
4.2	Γραφική απεικόνιση της μέγιστης χωρητικότητας (Maximum Capacity) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.	58
4.3	Γραφική απεικόνιση του της φασματικής αποδοτικότητας (Spectral Efficiency) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.	59
4.4	Γραφική απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.	60
4.5	Γραφική απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας στο μέγιστο φορτίο (Energy Efficiency at max load) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.	60
4.6	Γραφική απεικόνιση του SNR (Signal-to-Noise Ratio) του συστήματος σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (Bandwidth)) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.	61
4.7	Γραφική απεικόνιση της μέγιστης χωρητικότητας (Maximum Capacity) του συστήματος σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (Bandwidth)) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.	62
4.8	Γραφική απεικόνιση της φασματικής αποδοτικότητας (Spectral Efficiency) του συστήματος σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (Bandwidth)) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.	63
4.9	Γραφική απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency) του συστήματος σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (Bandwidth) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.	63

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Σύγκριση 6G με 5G.	8
2.1	Κύρια Έργα HAPS	22
4.1	Πίνακας μεταβλητών και τιμών	56
4.2	Πίνακας μεταβλητών και τιμών για διαφορετικούς τύπους HAPS	56

Συντομογραφίες

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
6G	Sixth Generation
AAS	Active Antenna System
AI	Artificial Intelligence
AMPS	Ampere
AR	Augmented Reality
BH	Backhaul
BS	Base Station
BW	Bandwidth
CRC	Communications Research Centre
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
eCRPI	Enhanced Common Public Radio Interface
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
ERAST	Environmental Research Aircraft and Sensor Technology
ESA	European Space Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FDMA	Frequency-Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
FMECA	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis
FSO	Free-Space Optical communication
GEO	Geostationary Orbit
GPRS	General Packet Radio Services
GPS	Global Positioning System
GPP	General-Purpose Processor
gNB	Next Generation NodeB
GSM	Global System
HALE-D	High-Altitude Long-Endurance Demonstrator
HAPS	High Altitude Platform Stations
HASPA	High Altitude Superpressure Powered Airship
HDTV	High-Definition Television
HSPA	High Speed Packet Access

HSDPA High Speed Downlink Packet Access
 HSUPA High Speed Uplink Packet Access
 IoE Internet of Everything
 IoT Internet of Things
 ISIS Intermediate System to Intermediate System
 ITU International Telecommunication Union
 JAXA Japan Aerospace Exploration Agency
 JTACS Japanese Total Access Communication
 KPI Key Performance Indicators
 LEO Low Earth orbit
 LoS Line-of-Sight
 LPI Low Probability Of Interception
 LTA Lighter-than-air
 LTE Long-Term Evolution
 LTEA Long Term Evolution Advanced
 MATLAB Matrix Laboratory
 MEC Multi-access Edge computing data Center
 MIMO Multiple-Input Multiple-Output
 ML Machine Learning
 MOCIE Ministry of Commerce, Industry and Energy
 NAL National Aerospace Laboratory
 NASA National Aeronautics and Space Administration
 NGC Next generation Core
 NGPON Next Generation Passive Optical Network
 NMT Nordic Mobile Telephone
 NR New Radio
 OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
 POBAL Powered Balloon
 PSK Phase-shift keying
 RAN Radio Access Network
 RFC Request for Comments
 SC Small Cell
 SINR Signal to Interference and Noise Ratio
 SM Short Message Service
 SNR Signal to Noise Ratio
 SPF Stratospheric Platform
 TACS Total Access Communication System
 UAV Unmanned Aerial Vehicle
 UDN Ultra-Dense Networks
 UE User Equipment

URLLC Ultra Reliable Low Latency Communications

USAF United States Air Force

VR Virtual Reality

WCDMA Wideband Code Division Multiple Access

ΔΙΠΑΕ Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος

Π.Ε. Πτυχιακή Εργασία

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Η επικοινωνία αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες της σύγχρονης κοινωνίας. Από τις πρώτες ασύρματες επικοινωνίες μέχρι τις σύγχρονες, η τεχνολογική εξέλιξη έχει επαναπροσδιορίσει τον τρόπο που επικοινωνούμε, εργαζόμαστε και ζούμε. Κατά μήκος αυτής της εξέλιξης, η επερχόμενη 6η γενιά κινητών επικοινωνιών αναδύεται ως μια από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στον τομέα της επικοινωνίας.

Ως εκ τούτου, το πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας αναλύει την εξέλιξη των γενιών κινητών επικοινωνιών με έμφαση στην επερχόμενη 6η γενιά. Στόχος είναι να κατανοήσουμε την πορεία από την αρχική αναλογική τηλεφωνία μέχρι την εξελιγμένη ψηφιακή εποχή. Θα διερευνήσουμε τις τεχνολογικές αλλαγές που επέφερε κάθε γενιά, καθώς και τον τρόπο που έχουν επηρεάσει την καθημερινή μας ζωή.

Με την ανάλυση αυτή, θα δημιουργήσουμε το απαραίτητο υπόβαθρο για την σύγκριση των High Altitude Platform Stations (HAPS) που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια, καθώς θα κατανοήσουμε τον σύγχρονο ρόλο των επικοινωνιών και τις ανάγκες που αναδεικνύονται στην εποχή της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών.

1.2 Γενιές κινητής τηλεφωνίας από το 0G ως το 5G

Μια από τις πιο επιτυχημένες τεχνολογικές εξελίξεις στη σύγχρονη ιστορία ήταν πάντα οι κινητές επικοινωνίες. Από το 1980, κάθε 10 χρόνια εμφανίζεται μια νέα γενιά ασύρματου δικτύου επικοινωνίας, [1], [2] και μέχρι σήμερα έχουν υιοθετηθεί συνολικά πέντε γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει τα κύρια χαρακτηριστικά των πέντε γενεών (1G έως 5G) των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και ακολουθεί μια γρήγορη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των τεχνολογιών που περιείχαν. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν εξελιχθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια, επιτρέποντας εφαρμογές που βασίζονται στα δεδομένα, όπως πολυμέσα, υπηρεσίες πολλαπλών συσκευών και μέσα ροής υψηλής ευκρίνειας [3].

1.2.1 1η γενιά κινητής τηλεφωνίας

Οι κινητές επικοινωνίες της δεκαετίας του 1970 έχουν καθιερωθεί ως 1G. Το προηγμένο σύστημα κινητής τηλεφωνίας της Βόρειας Αμερικής (North America's advanced mobile phone system-AMPS), το σκανδιναβικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας (Scandinavia's Nordic mobile telephone-NMT) της Σκανδιναβίας, το σύστημα ολικής πρόσβασης του Ηνωμένου Βασιλείου (United Kingdom's total access communications system -TACS), και το σύστημα επικοινωνιών ολικής πρόσβασης της Ιαπωνίας (Japan's total access communications system-JTACS) είναι οι κύριοι χρήστες. Η τεχνολογία 1G είναι ένα απλό αναλογικό σύστημα με ταχύτητες δεδομένων έως 2,4 kbps βελτιστοποιημένο για συνομιλίες φωνής. Έχει εύρος ζώνης 30 kHz και χρησιμοποιεί διαμόρφωση συχνότητας (FM) και διαίρεση συχνότητας πολλαπλής πρόσβασης (FDMA) τεχνολογίες επικοινωνίας (BW). Όμως η 1G έχει πολλές ελλείψεις, όπως -i) λόγω της χρήσης αναλογικής διαμόρφωσης, της μη κρυπτογράφησης, της κακής ποιότητας και ασφάλειας -ii) περιορισμένοι χρήστες λόγω της χρήσης της τεχνολογίας FDMA -iii) μη ασφαλής ακτινοβολία ισχύος σταθμού βάσης, έλλειψη διαδικασιών μεταφοράς -iv) υποστηρίζει μόνο υπηρεσίες φωνής, και -v) αποκλίνουντα συστήματα λόγω ανεπάρκειας συνεκτικών διεθνών προτύπων [4]- [5].

1.2.2 2η γενιά κινητής τηλεφωνίας

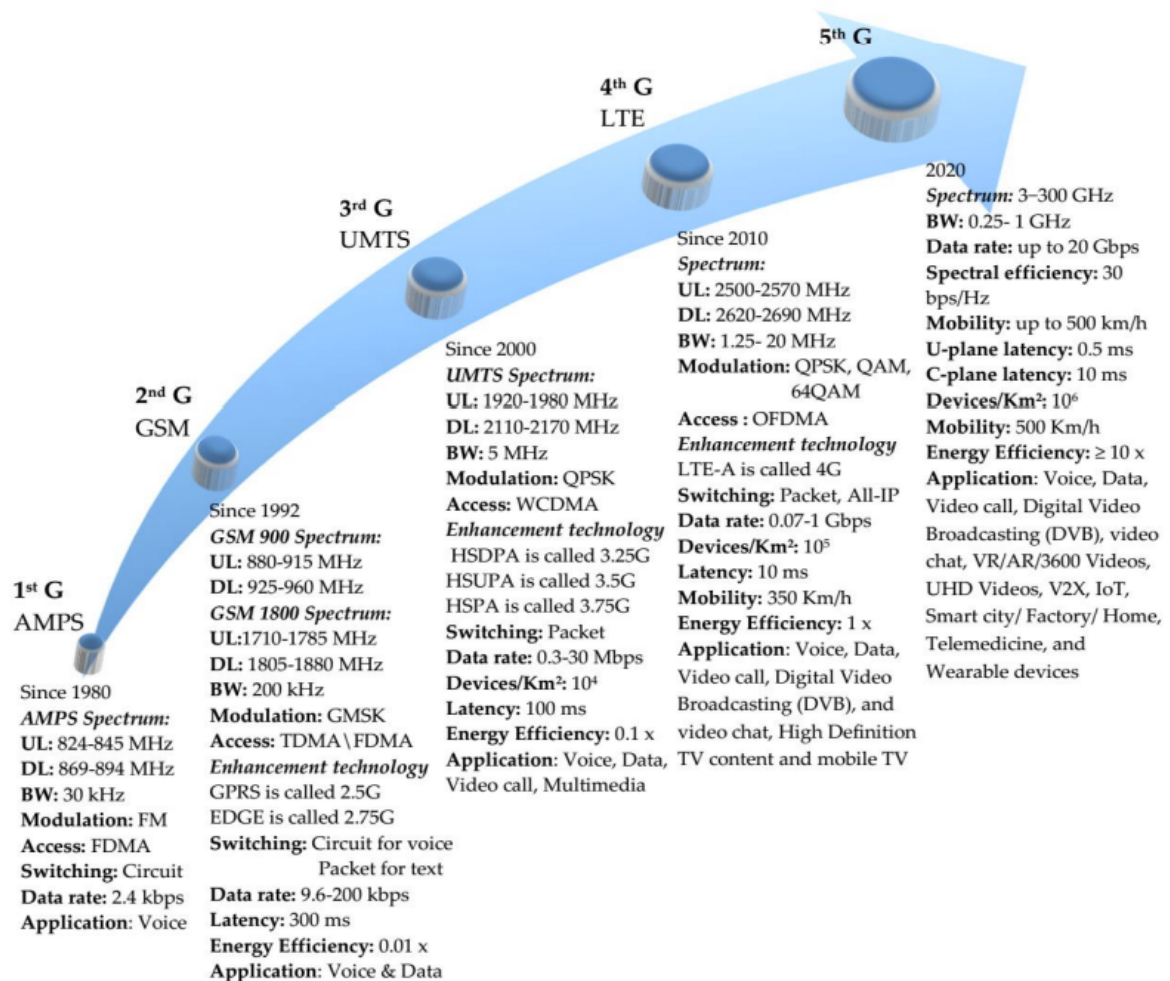
Οι παγκόσμιες κινητές επικοινωνίες (GSM), οι οποίες εισήχθησαν τη δεκαετία του 1990, ήταν το πρώτο σύστημα δεύτερης γενιάς [3]. Το GSM είναι ένα απλό ψηφιακό κυψελοειδές σύστημα που χρησιμοποιεί ελάχιστη Γκαουσιανή διαμόρφωση (GMSK), τεχνολογία μετάδοσης πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA), με εύρος ζώνης ίσο με 200 kHz για φωνητικές επικοινωνίες. Τα χαρακτηριστικά αυτής της γενιάς είναι τα εξής: i) διαμορφώνεται ένα ενιαίο διεθνές πρότυπο κινητών επικοινωνιών, προώθησε την ανάπτυξη της παγκόσμιας κινητής επικοινωνίας ii) βελτιωμένες υπηρεσίες, iii) βελτιωμένη ασφάλεια δικτύου μέσω κρυπτογραφημένων αριθμών και iv) βελτίωση της χωρητικότητας του συστήματος και v) η διάρκεια ζωής της μπαταρίας του κινητού τηλεφώνου είναι μεγαλύτερη, επειδή το ραδιοσήμα χρησιμοποιεί λιγότερη ενέργεια. Ωστόσο, ο χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του GSM προκάλεσε βελτιώσεις στα κυψελωτά συστήματα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία γενικής ραδιοφωνικής υπηρεσίας πακέτων (GPRS) [4]- [5]. Το GPRS ταξινομείται ως 2.5G. Χρησιμοποιεί τις τεχνολογίες μεταγωγής πακέτων και μεταγωγής κυκλώματος του GSM. Ο ρυθμός δεδομένων του μπορεί να αυξηθεί έως και 50 kbps και χρησιμοποιεί μετάδοση και διαμόρφωση που είναι παρόμοια με το GSM. Βασικά, το GPRS είναι η πρώτη φάση στην πορεία προς το περιβάλλον GSM που υποστηρίζει βελτιωμένα δεδομένα (EDGE). Το EDGE είναι μια ραδιοτεχνολογία που προϋπήρχε του 3G. Οι χρήστες μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα με ρυθμό έως και 200 kbps. Η τεχνολογία EDGE βασίζεται στο προηγούμενο πρότυπο GSM και χρησιμοποιεί ένα πανομοιότυπο μηχανισμό μετάδοσης και BW με το GSM, αλλά χρησιμοποιεί οκτώ κλειδιά μετατόπισης φάσης (8PSK) και GMSK διαμόρφωση αντί του GSM. Το 8PSK έχει υψηλότερο ρυθμό δεδομένων αλλά στενότερη περιοχή κάλυψης, ενώ το GMSK είναι ένα αξιόπιστο μοντέλο για ευρεία κάλυψη. Αναπτύχθηκε για να βελτιώσει τις υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων και να επιτρέψει τις μελλοντικές εφαρμογές για δεδομένα υψηλής ταχύτητας, όπως τα πολυμέσα [5]- [6].

1.2.3 3η γενιά κινητής τηλεφωνίας

Το σύστημα 3G χρησιμοποιεί ευρυζωνική πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (WCDMA) και πακέτα υψηλής ταχύτητας (HSPA) για την παροχή γρήγορης πρόσβασης στο Διαδίκτυο, καθώς και σημαντικά βελτιωμένο βίντεο και δυνατότητες μετάδοσης ήχου. [3]. Το HSPA συνδυάζει δύο πρωτόκολλα κινητής τηλεφωνίας, πρόσβαση σε πακέτα downlink υψηλής ταχύτητας (HSDPA) και πρόσβαση πακέτων uplink υψηλής ταχύτητας (HSUPA), για τη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας 3G χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο WCDMA. Το αναπτυγμένο HSPA (κοινώς γνωστό ως HSPA+) είναι ένα αναβαθμισμένο πρότυπο του έργου σύμπραξης 3ης γενιάς (3GPP) που ξεκίνησε στα τέλη του 2008 και ήταν χρησιμοποιήθηκε διεθνώς το 2010 [3]. Από την άλλη πλευρά, το 3.9G long term evolution (LTE) περιέχει χαρακτηριστικά που υπερβαίνουν αυτά που συναντώνται στις συνήθεις κινητές επικοινωνίες 3G. [6]- [5] Ωστόσο, η ITU και η 3GPP κατέληξαν τελικά στο συμπέρασμα ότι η LTE μπορεί να ονομαστεί τεχνολογία 4G. [7]

1.2.4 4η γενιά κινητής τηλεφωνίας

Το LTE είναι μια τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης που βασίζεται στην ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM), η οποία επιτρέπει εξελιγμένη μετάδοση πολλαπλών κεραιών καθώς και επεκτάσιμο εύρος ζώνης μετάδοσης έως και 20 MHz. [3] Η MIMO είναι μια κρίσιμη τεχνολογία συστήματος που επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και πολλαπλές ροές μετάδοσης για την επίτευξη μεγάλης φασματικής απόδοσης, τη βελτίωση της ποιότητας της σύνδεσης και την αλλαγή των διαγραμμάτων ακτινοβολίας για ενίσχυση και μετριασμό του σήματος. Η προσαρμοστική διαμόρφωση δέσμης της κεραίας χρησιμοποιείται για τη δημιουργία

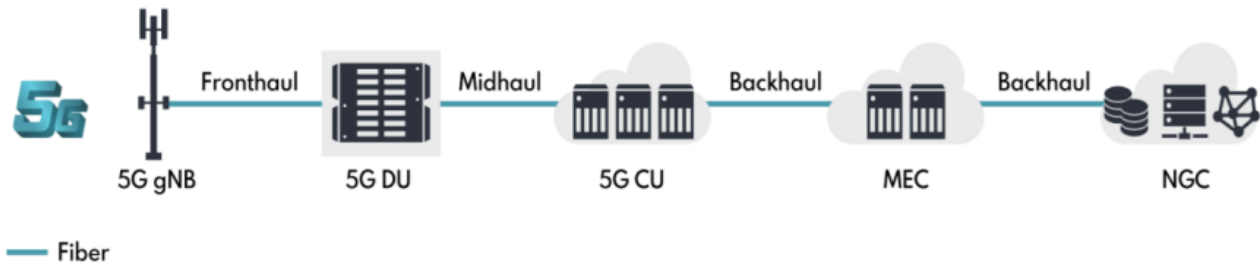


Σχήμα 1.1: Κορυφαία επικοινωνιακά επιτεύγματα από την πρώτη γενιά κινητής τηλεφωνίας (1G) στην πέμπτη (5G) [3]

της συστοιχίας παρεμβολής. Η τεχνολογία LTE αυξάνει τις ταχύτητες δεδομένων μέσω κινητής τηλεφωνίας στα 100 megabits ανά δευτερόλεπτο (Mbps). Ο ασύρματος οδικός χάρτης της τεχνολογίας έχει επεκταθεί στο LTE advanced (LTEA) [7], το οποίο θεωρητικά μπορεί να φτάσει σε μέγιστο ρυθμό μετάδοσης άνω του 1 gigabit ανά δευτερόλεπτο, ως απάντηση στην τεράστια αύξηση της ζήτησης για χωρητικότητας κινητών ευρυζωνικών επικοινωνιών χρόνο με το χρόνο (Gbps). Παρέχοντας μια ολοκληρωμένη λύση βασισμένη στο πρωτόκολλο IP του Διαδικτύου, το 4G σύστημα βελτιώνει το σημερινό δίκτυο επικοινωνίας. Η ασύρματη κοινότητα έχει διερευνήσει τρία κύρια ερευνητικά θέματα σε βάθος για την ικανοποίηση των δυνατοτήτων του κινητού δικτύου 4G: - Πυκνότητα του δικτύου: Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλοί άνθρωποι, όπως στάδια, συναυλίες, δημόσιοι χώροι και εμπορικά κέντρα. Με την ανάπτυξη συμπαγών, χαμηλής ισχύος και χαμηλού κόστους κυψελών, αυτή η τεχνική αποσκοπεί στη μείωση της απόστασης μεταξύ των κινητών τερματικών και των σταθμών βάσης (BS), επομένως αυξάνοντας την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος και ενισχύοντας την κάλυψη του δικτύου. Λόγω της χρήσης δρομολόγησης χαμηλών απωλειών, ο μικρός σταθμός βάσης έχει ακτίνα κάλυψης 50-150 m και εκπέμπει σε χαμηλή ισχύ (0,110 W), γεγονός που βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση και το λόγο παρεμβολής σήματος συν θορύβου (SINR). Επιπλέον, οι φορείς εκμετάλλευσης εργάζονται για να κάνουν τους μικρούς σταθμούς βάσης plug-and-play, που σημαίνει ότι μπορούν να διαμορφώσουν όλες τις βασικές παραμέτρους και δεν χρειάζεται να συντηρούνται τακτικά. [3] - Βελτιωμένη φασματική απόδοση: Συντονισμένες μέθοδοι εκπομπής/λήψης και λύσεις για τη μείωση των ενδοκυψελικών παρεμβολών χρησιμοποιούν σύγχρονη επεξεργασία σήματος και χωρική ποικιλομορφία για τη μείωση της παρεμβολής σε συνδιαύλους και βελτίωση της αποδοτικότητας του φάσματος. [3] - Η συνάθροιση φέροντος χρησιμοποιείται στο LTE(A=Advanced) για τη συνένωση ξεχωριστών συνιστωσών φέροντος, οι οποίες μπορεί να είναι διαφορετικών μεγέθη και βρίσκονται σε μη συνεχόμενο φάσμα, για να διευκολυνθεί η αύξηση του εύρους ζώνης (έως και 100 MHz). Παρόλο που η συνδυασμένη εκτέλεση αυτών των τεχνολογιών μπορεί θεωρητικά να παρέχει σε σταθερούς πελάτες ρυθμούς δεδομένων που υπερβαίνουν το 1 Gbps, η περαιτέρω επέκταση περιορίζεται λόγω του περιορισμένου αριθμού των προσβάσιμων συχνοτήτων. [3]

1.2.5 5η γενιά κινητής τηλεφωνίας

Η διαδικασία τυποποίησης της επικοινωνίας 5G έχει πλέον ολοκληρωθεί και εφαρμόζεται σε παγκόσμια βάση [8]. Η ITU ορίζει το όραμα και τις προδιαγραφές. Το 5G θα πρέπει να πληροί οκτώ KPI και τρία κοινά σενάρια. Εκατομμύρια συνδέσεις/τετραγωνικό χιλιόμετρο (1 M/km²) πρόκληση μαζικής μηχανικής τεχνολογίας σε τρία σενάρια eMBB ρυθμός δεδομένων Gb/s, καθυστέρηση διεπαφής αέρα URLLC χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms) και τεχνολογία πρόκλησης μαζικών μηχανών σε τρία σενάρια επικοινωνία τύπου δείκτη (mMTC). Πολλές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί, εξεταστεί στην τυποποίηση και υλοποιηθεί σε τεχνικές δοκιμές προκειμένου να επιτευχθούν τα KPIs. [9] Αρχιτεκτονική διπλής συνδεσιμότητας, μαζική MIMO, UDN, εξελιγμένη κωδικοποίηση και διαμόρφωση, επικοινωνίες χιλιοστομετρικών κυμάτων, ευέλικτη δομή πλαισίου, μη ορθογώνια πολλαπλάσια πρόσβαση και άλλες ασύρματες τεχνολογίες είναι μερικά μόνο παραδείγματα [9]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2, η κύρια ραχοκοκαλιά στο δίκτυο 5G περιλαμβάνει διάφορα στοιχεία που είναι ευρέως τοποθετημένα σε όλο το δίκτυο, όπως πολλαπλής πρόσβασης κέντρο δεδομένων ακραίας υπολογιστικής (MEC), πυρήνας επόμενης γενιάς (NGC) και ενεργό σύστημα κεραιών (AAS) (με 5G NR υποστήριξη) Source antenna system). Η οργάνωση που χρησιμοποιείται για το 5G AAS, δηλαδή το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN) Fronthaul δίκτυο των κινητών δικτύων, απαιτεί την κοινή χρήση πολλαπλών τεχνολογιών, όπως η επόμενη γενιά παθητικό οπτικό δίκτυο (NGPON), η επιμήκης διαίρεση πολυπλεξίας παχίων κυμάτων (CWDM), η πυκνή διαίρεση μήκους κύματος (DWDM), και ενισχυμένη κοινή δημόσια ραδιοδιεπαφή (eCPRI). [3] Όλες αυτές οι



Σχήμα 1.2: Υποδομή δικτύου 5G με αναπαράσταση του fronthaul-midhaul-backhaul [3]

τεχνικές απαιτούν συμβατή υποδομή οπτικών ινών. Επειδή τα κινητά δίκτυα 5G απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης και ταχύτητα, η υποδομή χρειάζεται καλώδιο οπτικών ινών για να εγκατασταθεί στην κεραία. Ως αποτέλεσμα, εκτός από την ενίσχυση της χωρητικότητας των οπτικών ινών κορμού, απαιτείται επίσης η ανάπτυξη του 5G κινητού δικτύου όσο το δυνατόν πιο κοντά στις κεραίες της υποδομής οπτικών ινών, καθώς και να εγκατασταθούν νέες οπτικές ίνες υποδομή καλωδίων οπτικών ινών για επιπλέον κεραίες όταν η χωρητικότητα δεν επαρκεί. [3] Ωστόσο, λόγω της σημαντικής αύξησης του αριθμού των συνδεδεμένων πραγμάτων, η κυκλοφορία δεδομένων έχει αυξηθεί εκθετικά, η οποία μπορεί να αυξηθεί σε εκατοντάδες (s) συσκευές ανά m³, εκτός από τη ραγδαία αύξηση των νέων εφαρμογών, όπως η εικονική πραγματικότητα/επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR), τα αυτοκινούμενα αυτοκίνητα, οι ολογραμμaticές τρισδιάστατες επικοινωνίες, και νέες εφαρμογές που δεν έχουν ακόμη φανταστεί [10], θα εξακολουθούν να χρειάζονται ρυθμοί δεδομένων. Θα παρέχουν υψηλότερη και χαμηλότερη καθυστέρηση από τα δίκτυα 5G. Αυτές οι προκλήσεις πιστεύεται ότι θα αποτελέσουν τους βασικούς κινητήριους παράγοντες για την υλοποίηση των επικοινωνιακών συστημάτων 6G [3]. Δεδομένου του τεράστιου δυναμικού των δικτύων 5G και την προβλέψιμη εξέλιξή τους, ποια χαρακτηριστικά του 6G θα πρέπει να συμπεριληφθούν που δεν υπάρχουν στο 5G, Έρευνα ακαδημαϊκή κοινότητα και η βιομηχανία έχουν εργαστεί για την περιγραφή και τον προσδιορισμό των κύριων χαρακτηριστικών τεχνολογιών που μπορούν να ορίσουν το 6G- αναμένεται να αναπτυχθεί έως το 2030 [11].

1.3 6η γενιά κινητής τηλεφωνίας

Το 6G θα επικαιροποιηθεί και θα διευρυνθεί με βάση την οπτικοποίηση και την επέκταση του 5G, ώστε να φτάσει μέχρι και 100 φορές την απόδοση δεδομένων του 5G, υψηλότερη χωρητικότητα συστήματος, μειωμένη καθυστέρηση, υψηλότερη αποδοτικότητα φάσματος και ευρύτερη και βαθύτερη κάλυψη. Για να καταστεί δυνατή η ταχύτερη μετακίνηση, η εξυπηρέτηση του διαδικτύου των πάντων (IoE) και να προωθήσει πλήρως την εξέλιξη της ευφυούς ζωής και της βιομηχανικής πανταχού παρούσας ευφυούς κινητής κοινωνίας. Το Σχήμα 2.14 συνοψίζει τα κορυφαία ορόσημα του ασύρματου δικτύου 6G όσον αφορά την τεχνολογία, τις εφαρμογές και τους βασικούς δείκτες απόδοσης. Στις ακόλουθες παραγράφους περιγράφονται λεπτομερώς οι προβλέψιμες απαιτήσεις που σχετίζονται με το όραμα: [3] - Το 6G θα πρέπει να είναι ένα ολοκληρωμένο δίκτυο με ευρύτερη και ευρύτερη κάλυψη, συμπεριλαμβανομένων των επίγειων, δορυφορικών και επικοινωνία συσκευής προς συσκευή σε μικρές αποστάσεις. Χάρη στην εξελιγμένη διαχείριση των κινητών τεχνολογιών, το 6G μπορεί να εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων, συμπεριλαμβανομένου του εναέριου χώρου, της ξηράς και της θάλασσας, με αποτέλεσμα την πρώτη πανταχού παρούσα κινητή ευρυζωνική επικοινωνία στον κόσμο [12]. - Προκειμένου να επιτευχθεί ένα ευρύτερο εύρος ζώνης, το 6G σχεδιάζεται να λειτουργεί σε υψηλότερες συχνότητες, όπως χιλιοστά κυμάτων, terahertz [13] και ορατό φως. Σε σύγκριση με το 5G, οι ρυθμοί δεδομένων μπορούν

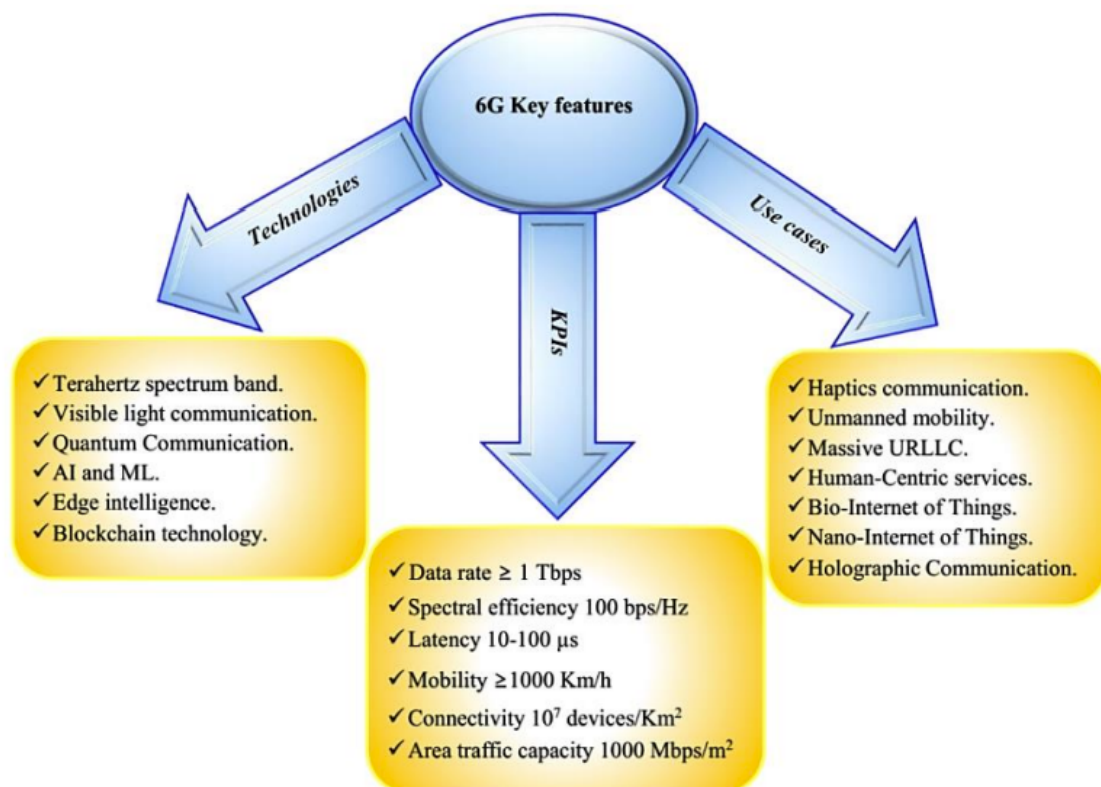
να βελτιωθούν σε 6G έως και εκατό φορές, επιτρέποντας τη μέγιστη ταχύτητα δεδομένων Tb/s και ρυθμό δεδομένων εμπειρίας χρήστη 10 Gb/s. Επιπλέον, το 6G μπορεί να επωφεληθεί από τις ευέλικτες τεχνολογίες κοινής χρήσης συχνοτήτων για να ενισχύσει ακόμη περισσότερο την αποδοτικότητα της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας [14]. - Το 6G είναι ένα έξυπνο δίκτυο που μπορεί να προσαρμοστεί. Όταν συνδυάζεται με την τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης, το 6G θα επιτρέψει την εικονικοποίηση της κινητής επικοινωνίας [15], το δίκτυο θα μεταφερθεί από έναν κλασικό τύπο κεντρικού δικτύου σε ένα νέο κεντρικό δίκτυο τύπου 3, το οποίο είναι με επίκεντρο τον χρήστη, με επίκεντρο τα δεδομένα και εξ ολοκλήρου συγκεντρωμένο περιεχόμενο. – Μια ενδογενής λύση ασφαλείας ή μια ολοκληρωμένη λειτουργική σχεδίαση ασφάλειας θα χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο 6G. Το 6G έχει δυνατότητες αυτοαντίληψης, δυνατότητες δυναμικής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, προσαρμογής κινδύνου ικανότητες και δυνατότητες αξιολόγησης εμπιστοσύνης. Θα βοηθήσει στην επίτευξη της ασφάλειας του κυβερνοχώρου με την εισαγωγή μηχανισμών εμπιστοσύνης και ασφάλειας. [3] -Υπολογισμός, πλοήγηση και ανίχνευση συνδυάζονται όλα στο 6G. Το 6G θα περιλαμβάνει, για παράδειγμα, συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών καθώς και συστήματα εντοπισμού θέσης και δορυφορικής πλοήγησης, καθώς και συστήματα ανίχνευσης ραντάρ. Θα χρησιμοποιηθεί πιο ανοιχτή αρχιτεκτονική στο 6G, με ένα κεντρικό δίκτυο που χρησιμοποιεί αλγόριθμους που καθορίζονται από λογισμικό και ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Θα είναι σε θέση να επιτύχει ταχεία αυτόνομη ευφυή ανάπτυξη καθώς και ταχεία και δυναμική ανάπτυξη των δυνατοτήτων του δικτύου. [3] – Το Διαδίκτυο των πραγμάτων μπορεί να δημιουργήσει τεράστιους όγκους δεδομένων και το 6G μπορεί να ενσωματωθεί με νέες τεχνολογίες όπως ο υπολογισμός αιχμής, το cloud computing, η τεχνητή νοημοσύνη και το blockchain [16]. Το 6G έχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης πολλαπλών νοημοσύνης καθώς και ομαδικής νοημοσύνης. Το 6G μπορεί τελικά να υποστηρίξει την πανταχού παρούσα κοινωνία των έξυπνων κινητών.

1.3.1 Κριτήρια ποιότητας

Από την παραπάνω ανάλυση των εξελίξεων του 5G, μπορεί να προβλεφθεί ότι, αφενός, το 6G θα πρέπει να επιλύσει τους περιορισμούς του 5G, συμπεριλαμβανομένων τουλάχιστον της κάλυψης του συστήματος και του ΙοΕ. Σύμφωνα με το [17], από την άλλη πλευρά, να καλύψει τις απαιτήσεις κινητής επικοινωνίας του έτους 2030 και μετά, το 6G θα πρέπει να κάνει την ανθρώπινη κοινωνία ως μια πανταχού παρούσα ευφυή κινητή κοινωνία. Αυτό είναι το όραμα του 6G. Με βάση το όραμα και την ανάπτυξη του 5G, το 6G θα αναβαθμιστεί περαιτέρω και θα επεκταθεί για να επιτύχει 10 έως 100 φορές υψηλότερο ρυθμό δεδομένων, υψηλότερο σύστημα χωρητικότητας, υψηλότερη αποδοτικότητα φάσματος, χαμηλότερη καθυστέρηση, καθώς και ευρύτερη και βαθύτερη κάλυψη, για την υποστήριξη υψηλότερης ταχύτητας κίνησης, για την εξυπηρέτηση της διασύνδεσης των πάντων, και να υποστηρίξει πλήρως την ανάπτυξη μιας πανταχού παρούσας ευφυούς κινητής κοινωνίας για ευφυή ζωή και βιομηχανίες. Στις επόμενες παραγράφους σύμφωνα με το [17] θα δοθούν λεπτομερείς περιγραφές των προβλεπόμενων απαιτήσεων που σχετίζονται με το όραμα.

Όπως βλέπουμε στον Πίνακα 1.1:

- Το 6G θα πρέπει να είναι ένα πανταχού παρόν και ολοκληρωμένο δίκτυο με ευρύτερη και βαθύτερη κάλυψη, συμπεριλαμβανομένης της επίγειας επικοινωνίας, της δορυφορικής επικοινωνίας, της επικοινωνίας από συσκευή σε συσκευή σε μικρής εμβέλειας, κ.ο.κ. Με ευφυή κινητικότητα τεχνολογία διαχείρισης, το 6G μπορεί να εξυπηρετήσει σε διάφορα περιβάλλοντα, όπως ο εναέριος χώρος, η ξηρά και η θάλασσα, υλοποιώντας ένα παγκόσμιο πανταχού παρόν σύστημα κινητών ευρυζωνικών επικοινωνιών.



Σχήμα 1.3: Σημαντικά ορόσημα των ασύρματων δικτύων 6G όσον αφορά τις τεχνολογίες, τις τεχνολογίες κλειδιά και τις εφαρμογές. [3]

Κριτήρια	5G	6G
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	10 Gbps	1 Tbps
Καθυστέρηση (από άκρο σε άκρο)	10 ms	1 ms
Μέγιστη Φασματική Αποδοτικότητα	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Κάλυψη δικτύου (%)	99.999	99.99999
Μέγιστη συχνότητα	90 GHz	10 THz
Δορυφορική ενοποίηση	Όχι	Πλήρως
Τεχνητή Νοημοσύνη	Μερικώς	Πλήρως
Αυτόνομα οχήματα	Μερικώς	Πλήρως
Εκτεταμένη Πραγματικότητα	Μερικώς	Πλήρως
Απτική Επικοινωνία	Μερικώς	Πλήρως
THz	Πολύ περιορισμένα	Πλήρως
Επίπεδο Εξυπηρέτησης	Εικονική/Επαυξημένη Πραγματικότητα	Απτή
Αρχιτεκτονική	Μαζική MIMO	Μαζική MIMO και Επαναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες

Πίνακας 1.1: Σύγκριση 6G με 5G.

- Το 6G αναμένεται να λειτουργήσει σε υψηλότερη συχνότητα για την επίτευξη μεγαλύτερου εύρους ζώνης, όπως mmWave, Terahertz, ορατό φως κ.ο.κ. Σε σύγκριση με το 5G, το 6G μπορεί να προωθήσει ρυθμό δεδομένων έως και 10 έως 100 φορές, υποστηρίζοντας μέγιστο ρυθμό δεδομένων Tb/s και ρυθμό δεδομένων 10Gb/s για την εμπειρία του χρήστη. Επιπλέον, Το 6G μπορεί να χρησιμοποιήσει ευέλικτη τεχνολογία διαμοιρασμού συχνοτήτων για την περαιτέρω ενίσχυση της αποδοτικότητας της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας.
- Το 6G είναι ένα εξατομικευμένο ευφυές δίκτυο. Σε συνδυασμό με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης, το 6G θα πραγματοποιήσει την εικονικοποιημένη προσωπική κινητή επικοινωνία, με το δίκτυο να αλλάζει από ένα παραδοσιακό τύπο κεντρικής λειτουργίας σε ένα νέο 3-κεντρικό τύπο, δηλαδή, κεντρικό χρήστη, δεδομένα και πλήρως συγκεντρωμένο περιεχόμενο.
- Το δίκτυο 6G θα έχει ένα ενδογενές σχήμα ασφάλειας ή ολοκληρωμένο σχεδιασμό ασφάλειας λειτουργιών. Με την εισαγωγή εμπιστοσύνης και ασφάλειας μηχανισμούς, το 6G έχει τη δυνατότητα αυτογνωσίας, δυναμικής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο και προσαρμοστικού κινδύνου και την αξιολόγηση εμπιστοσύνης, τα οποία θα βοηθήσουν να υλοποιήσουν την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο.
- Το 6G θα συγχωνεύσει τους υπολογισμούς, την πλοήγηση και την ανίχνευση με τις επικοινωνίες. Για παράδειγμα, 6G θα περιλαμβάνει όχι μόνο δορυφορικές επικοινωνίες αλλά και συστήματα δορυφορικής πλοήγησης και εντοπισμού θέσης, ακόμη και συστήματα ανίχνευσης ραντάρ. Το 6G θα υιοθετήσει μια πιο ανοικτή αρχιτεκτονική, με λογισμικό καθορισμένο από το λογισμικό, δίκτυο πυρήνα και δίκτυα ραδιοπρόσβασης. Το 6G μπορεί να πραγματοποιήσει γρήγορη και αυτο-ευφυή ανάπτυξη και ταχεία δυναμική

ανάπτυξη των λειτουργιών δικτύου.

- Το 6G μπορεί να δημιουργήσει μαζικές δεδομένα μέσω του Διαδικτύου των πάντων- επίσης, το 6G μπορεί να συνδυαστεί με νέες τεχνολογίες, όπως υπολογιστικό νέφος, άκρη computing, τεχνητή νοημοσύνη, blockchain, κλπ,

Το 6G μπορεί να πραγματοποιήσει την ευφυΐα και την ομάδα των πάντων. Η συλλογική νοημοσύνη και το 6G μπορεί τελικά να υποστηρίξει μία πανταχού παρούσα ευφυή κινητή επικοινωνία.

1.3.2 Τεχνολογίες κλειδιά και ανοικτά προβλήματα

Η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών (6G) αναμένεται να είναι η επόμενη εξέλιξη στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών, προσφέροντας πολλαπλές τεχνολογικές και λειτουργικές καινοτομίες. Αυτό το κεφάλαιο ασχολείται με τις τεχνολογίες κλειδιά που αναμένεται να αποτελέσουν το θεμέλιο της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών καθώς και με τα ανοικτά προβλήματα που προκύπτουν κατά την ανάπτυξή της. Δεν λείπει η πεποίθηση ότι το 6G θα φαίνεται πολύ καλύτερο από το 5G, αλλά για να επιτευχθούν οι στόχοι για το 6G απαιτούνται ορισμένα σημαντικά άλματα προς τα εμπρός. Υπάρχουν διάφορες βασικές τεχνολογίες του 6G που αναμένουμε ότι μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για τη βελτίωση του συστήματος. Αυτές οι βασικές τεχνολογίες για την 6η γενιά κινητών επικοινωνιών περιλαμβάνουν σύμφωνα με το [18]:

- **Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence)** Με την τεχνολογία 6G σύμφωνα με το [19], η τεχνητή νοημοσύνη θα διαδραματίσει βασικό ρόλο στην αναμόρφωση των υπηρεσιών που βασίζονται στην επικοινωνία. Για παράδειγμα, τα αυτοοδηγούμενα αυτοκίνητα στην αυτοκινητοβιομηχανία πρέπει να γνωρίζουν για το συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, την τοποθεσία, τους πεζούς, τους ποδηλάτες και άλλα αυτοκίνητά τους προκειμένου να βρουν την καλύτερη διαδρομή και να περάσουν από διασταυρώσεις. Ο χειρισμός, η παραγωγή και η επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων ταυτόχρονα σε συνεργασία είναι μια άλλη εργασία που χρειάζεται ΑΙ για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων σε πραγματικό χρόνο σε μεγαλύτερη κλίμακα. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις αναδυόμενες βιομηχανίες, όχι μόνο στην αυτοκινητοβιομηχανία. Στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης, οι πιθανές μελλοντικές εφαρμογές της τεχνολογίας 6G περιλαμβάνουν τις πιο παραδοσιακές χρήσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν διαγνωστικές, συνταγογραφικές και περιγραφικές αναλύσεις. Τα προκαθορισμένα αναλυτικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κρίσεις ή προβλέψεις σχετικά με την αποκεντρωμένη επεξεργασία δεδομένων στα όρια του δικτύου (edge computing), την τοποθέτηση της κρυφής μνήμης, την ψηφιοποίηση δικτύου, την κατανομή πόρων και άλλα σχετικά θέματα. Με τη χρήση προγνωστικών αναλυτικών στοιχείων, μπορεί κανείς να κάνει μορφωμένες εικασίες για το μέλλον με βάση τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί σε πραγματικό χρόνο και έχουν εφαρμοστεί σε παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα πόρων, οι προτιμήσεις, η συμπεριφορά των χρηστών, οι τοποθεσίες των χρηστών και τα μοτίβα επισκεψιμότητας. Ο σκοπός των διαγνωστικών αναλυτικών στοιχείων είναι ο εντοπισμός προβλημάτων μέσα σε ένα δίκτυο, που περιλαμβάνει τον εντοπισμό ανωμαλιών δικτύου, βλάβες υπηρεσιών, αστοχίες δικτύου και τις υποκείμενες αιτίες τους. Αυτό, με τη σειρά του, συμβάλλει στη βελτίωση του επιπέδου αξιοπιστίας και ασφάλειας του δικτύου. Προκειμένου να βελτιωθεί η επίγνωση της κατάστασης του παρόχου υπηρεσιών και του διαχειριστή δικτύου, η περιγραφική ανάλυση βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε προηγούμενα δεδομένα. Οι εφαρμογές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα θεμάτων, όπως προβολές χρηστών, συνθήκες καναλιού, προφίλ κίνησης και απόδοση δικτύου, μεταξύ άλλων.

- Επικοινωνία Terahertz (THz)** Το Terahertz είναι μια μονάδα συχνότητας που ορίζεται ως ένα τρισεκατομμύριο (10¹²) κύκλοι ανά δευτερόλεπτο ή 10¹² hertz. Η ζώνη συχνοτήτων Terahertz θεωρείται τεχνολογία κλειδί για τα μελλοντικά ασύρματα συστήματα μικρής εμβέλειας. Η επικοινωνία Terahertz δίνει τη δυνατότητα για χωρητικότητα σύνδεσης της τάξης των Terabit ανά δευτερόλεπτο (Tbps) με διάφορα χαρακτηριστικά στο επίκεντρο, όπως η υψηλή απόδοση και η ελάχιστη καθυστέρηση. Οι φωτονικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία κυμάτων terahertz. Τα κύματα Terahertz βρίσκονται μεταξύ της ζώνης μικροκυμάτων και της υπέρυθρης ζώνης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το εύρος συχνοτήτων Terahertz (THz) (0,1 THz – 3THz) είναι το τελευταίο διάστημα σε ολόκληρο το φάσμα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και περιγράφεται ως κενό THz στον κόσμο της επιστήμης. Πολλά ζητήματα περιορίζουν την πρακτικότητα των δικτύων που χρησιμοποιούν ζώνες χαμηλότερης συχνότητας. Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, η τεχνολογία επικοινωνίας terahertz μπορεί να παρέχει έως και Tbps συνδέσεις για να ικανοποιήσει τη ζήτηση επικοινωνίας επιτυγχάνοντας παράλληλα χαμηλή καθυστέρηση. Η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας Terahertz είναι ευνοϊκή για τη μετάδοση πληροφοριών υψηλής ταχύτητας μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών, δημιουργία ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN) και ασύρματων προσωπικών δικτύων (WPAN). Λόγω του περιορισμού της απόστασης μετάδοσης, οι ασύρματες επικοινωνίες THz μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως για σενάρια εφαρμογών εσωτερικού χώρου. Η ανάπτυξη συστημάτων terahertz απαιτεί ισχυρή κατανόηση και ακριβή μοντελοποίηση των συνθηκών καναλιού μεταξύ του δέκτη (RX) και του πομπού (TX). Καθώς εξερευνούμε περισσότερα για τις επικοινωνίες Terahertz (THz), βρίσκουμε περισσότερες τεχνικές προκλήσεις στην εφαρμογή αυτού του συστήματος επικοινωνίας. Αν και το THz παρέχει τεράστιο εύρος ζώνης, η ζώνη υποβαθμίζεται από υψηλές ατμοσφαιρικές απώλειες. Στη ζώνη THz, οι κεραίες γίνονται μικρότερες, ευνοώντας τη χρήση κατευθυντικών κεραιών υψηλού κέρδους σε αποστάσεις που ξεπερνούν τα λίγα μέτρα. Η ιδέα του Ultra-Massive MIMO έχει διαμορφωθεί, η οποία εξαρτάται από την υιοθέτηση συστοιχιών πλασμονικών νανο-κεριών με δυνατότητα συντονισμού με εξαιρετικά υψηλή συχνότητα, γεγονός που αυξάνει την απόσταση και επίσης επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε συχνότητες THz.
- Επικοινωνία ορατού φωτός (Visible light communication)** Η επικοινωνία ορατού φωτός (VLC) μπορεί να γίνει μια σημαντική τεχνολογία για συστήματα ασύρματης επικοινωνίας 6ης γενιάς. Το VLC έχει μεγάλες δυνατότητες προόδου την επόμενη δεκαετία, γεφυρώνοντας το υπάρχον χάσμα απόδοσης μεταξύ της τεχνολογίας VLC και 5G που έχει ήδη αποδείξει την εμπειρία των Gbps και θα φτάσει τα Tbps με την τεχνολογία 6G. Μια πιθανή εναλλακτική στρατηγική για τα μελλοντικά δίκτυα 6G είναι η χρήση του ορατού φάσματος για επικοινωνία ορατού φωτός ώστε να υπάρχει έξοδος που μοιάζει με οπτική ίνα. Το VLC είναι ο τύπος επικοινωνίας στον οποίο τα δεδομένα αποστέλλονται ασύρματα μέσω του αέρα με διαμόρφωση κυμάτων φωτός από το ορατό φάσμα με εύρος μήκους κύματος από 380nm έως 750nm. Αυτή η τεχνολογία περιστρέφεται γύρω από την αρχή της διαμόρφωσης έντασης της υποδομής στερεάς κατάστασης που παρέχεται από διόδους εκπομπής φωτός (LED). Ένα βασικό πλεονέκτημα του VLC είναι η παροχή ενός επιπλέον φάσματος εύρους ζώνης περίπου 300 THz, το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από τα παραδοσιακά δίκτυα πρόσβασης που βασίζονται σε ραδιοσυχνότητες. Το VLC είναι μια από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες λόγω των χαρακτηριστικών της για μη αδειοδοτημένα κανάλια, το υψηλό εύρος ζώνης και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Κατά την εφαρμογή της τεχνολογίας VLC, τα πανκατευθυντικά χαρακτηριστικά μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση πολλών στοιχείων μετάδοσης.
- Επικοινωνία Κβαντικών Δικτύων (Quantum Networks Communication)** Όταν τα Κβαντικά δίκτυα και το κβαντικό Διαδίκτυο θα εφαρμοστούν πλήρως σε ευρεία κλίμακα, η επικοινωνία θα φέρει επανάστα-

ση, οι άνθρωποι δεν θα αντιμετωπίσουν μόνο τη μεγαλύτερη ταχύτητα αλλά και την ασφαλή επικοινωνία σε σύγκριση με το τρέχον σύστημα. Ο υψηλός ρυθμός δεδομένων και η ασφάλεια είναι τα χαρακτηριστικά που θα παίξουν σημαντικό ρόλο στη χρήση της κβαντικής επικοινωνίας στην τεχνολογία 6G. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν την αρχή της εμπλοκής, η οποία μπλέκει τα φωτόνια για να μεταφέρει πληροφορίες μεταξύ δύο κόμβων, όπου τα μισά φωτόνια ανήκουν στον αποστολέα, ενώ ο δέκτης τα άλλα μισά. Η διαπλοκή, ωστόσο, είναι το αντικείμενο της αποσύνδεσης και το θεώρημα της μη κλωνοποίησης. Τα μπλεγμένα σωματίδια ξεμπλέκονται λόγω της ισχυρής αλληλεπίδρασής τους με το περιβάλλον. Κανένα θεώρημα κλωνοποίησης δεν αναφέρει ότι άγνωστες κβαντικές καταστάσεις δεν μπορούν να αντιγραφούν.

Επιπλέον, κάθε κόμβος ενός κβαντικού δικτύου αποτελείται από Κβαντικούς επεξεργαστές που βασίζονται σε qubits ως αντικατάσταση συμβατικών bit. Τα Qubits μπορούν επίσης να οριστούν ως υπέρθεση και μπορεί να εμφανίζονται σε πολλαπλές καταστάσεις, γεγονός που τους επιτρέπει να πραγματοποιούν πολλούς υπολογισμούς ταυτόχρονα, ενώ τα συμβατικά bit περιορίζονται μόνο στο 0 και στο 1 περιορίζοντας τα σε έναν υπολογισμό τη φορά. Ενώ ένας κβαντικός επεξεργαστής αλλάζει την κατάσταση των φωτονίων του, τα μπερδεμένα φωτόνια στον ισοδύναμο κβαντικό επεξεργαστή αλλάζουν επίσης, επιτρέποντάς τους να μεταφέρουν βασικά qubits. Ένα από τα πλεονεκτήματα είναι ότι αυτό είναι ένα σύστημα επικοινωνίας που δεν μπορεί να παραβιαστεί, οποιαδήποτε προσπάθεια κατασκοπείας ή - οι πληροφορίες θα αποδεδειχθούν το σύστημα. Οι πληροφορίες θα τροποποιηθούν και θα ειδοποιηθούν ότι συνέβη η επίθεση πειρατείας. Αν και οι υπάρχουσες εφαρμογές είναι ανεπαρκείς, αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί θαυμάσια στη διανομή κβαντικών κλειδιών. Επειδή τα μπερδεμένα φωτόνια μεταδίδουν αμέσως πληροφορίες, αυτό το καθιστά ταχύτερο από το συμβατικό σύστημα. Για να ξεπεράσει τη δυσκολία της επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων, η ακαδημαϊκή κοινότητα έχει χρησιμοποιήσει κβαντικούς επαναλήπτες. Αυτοί οι επαναλήπτες τοποθετούνται μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη. Το κίνητρο αυτών των επαναληπτών είναι να αποθηκεύουν τα μπερδεμένα φωτόνια από τον αποστολέα και τον δέκτη. Εάν επιτευχθεί εναλλαγή εμπλοκής με μετρήσεις κατάστασης Bell, τα φωτόνια τόσο του δέκτη όσο και του αποστολέα μπορούν να μπερδευτούν σε μεγάλη απόσταση. Παρόλο που οι ερευνητές έχουν αναπτύξει ευρηματικές μεθόδους για την καταστολή των προβλημάτων, ακόμη και σε πρωτεύοντα κβαντικά δίκτυα απαιτούνται μια χούφτα κβαντικών επαναληπτών.

- **Μεγάλη Έξυπνη Επιφάνεια (Large Intelligent Surface)** Το Large Intelligent Surface (LIS), γνωστό και ως Intelligent Reflecting Surface (IRS) θεωρείται ως μια εξέχουσα ενεργειακά αποδοτική τεχνολογία για το σύστημα επικοινωνίας 6G που μπορεί να επιτύχει άνευ προηγουμένου τεράστια κέρδη εξόδου MIMO. Τα δίκτυα 5G χρησιμοποίησαν το σύστημα Massive MIMO για το σύστημα επικοινωνίας για να λάβουν βελτιωμένη φασματική και ενεργειακή απόδοση όπου οι σταθμοί βάσης είναι εξοπλισμένοι με πολύ μεγάλο αριθμό συστοιχιών κεραιών, κλιμακώνοντας έτσι τα συμβατικά συστήματα MIMO κατά πολλές τάξεις μεγέθους. Η διαφορά που κάνει το IRS είναι ότι το IRS περιέχει χαμηλού κόστους παθητικά ανακλαστικά στοιχεία, τα οποία είναι χαμηλού κόστους και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια που μπορούν να διαμορφώσουν εκ νέου το περιβάλλον ελεγχόμενης διάδοσης. Το IRS που προκύπτει μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε τοίχους, οροφές και προσόψεις κτιρίων. Έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Κάθε ανακλαστικό στοιχείο προκαλεί μια ορισμένη μετατόπιση φάσης στο προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα που θα κάνει το κανάλι διάδοσης πιο ευνοϊκό για τους χρήστες. Στα δίκτυα 6G, η IRS θα διαδραματίσει θεμελιώδη ρόλο και θα ικανοποιήσει τη διαφορετική ποιότητα των υπηρεσιών (QoS).

Η έλευση της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών, γνωστής και ως 6G, συνεπάγεται την αντιμετώπιση ορισμένων προβλημάτων και προκλήσεων. Ανάμεσα σε αυτά τα προβλήματα συμπεριλαμβάνονται:

- **Απαιτητική υποδομή:** Η επίτευξη των δυνατοτήτων της 6ης γενιάς θα απαιτήσει την αναβάθμιση και την επέκταση της υποδομής των τηλεπικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένων των κεραιών, των βάσεων και των δικτύων. Αυτό απαιτεί σημαντικές επενδύσεις και προγραμματισμό για την αναβάθμιση της υπάρχουσας υποδομής και την κατασκευή νέων δικτύων.
- **Ασφάλεια και Προστασία Δεδομένων:** Με την αυξημένη συνδεσιμότητα και την υπεрсύνδεση που προσφέρει η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών, η ασφάλεια και η προστασία των δεδομένων αποτελούν σημαντικά ανοικτά προβλήματα. Η αυξημένη ποσότητα προσωπικών δεδομένων που θα ανταλλάσσονται μεταξύ συσκευών και δικτύων απαιτεί την ανάπτυξη προηγμένων μηχανισμών ασφαλείας για την προστασία από κακόβουλες επιθέσεις, την παρεμπόδιση της παρακολούθησης και τη διασφάλιση της ιδιωτικότητας των χρηστών. Προκλήσεις όπως η ανάγκη για ασφάλεια στην επικοινωνία, η προστασία των προσωπικών δεδομένων και η αντιμετώπιση των κυβερνοαπειλών απαιτούν περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.
- **Αρχιτεκτονική δικτύου:** Η ανάπτυξη μιας κατάλληλης αρχιτεκτονικής δικτύου για την υποστήριξη των υψηλών ταχυτήτων και των μεγάλων όγκων δεδομένων της 6G αποτελεί πρόκληση. Αυτή περιλαμβάνει την ανάπτυξη ευέλικτων δικτύων με μεγάλη χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση.
- **Ενεργειακή Απόδοση:** Η αυξημένη χρήση της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών θα έχει αντίκτυπο στην ενεργειακή κατανάλωση. Η ανάπτυξη βιώσιμων και ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών, όπως η βελτιστοποίηση των δικτύων, οι ευφυείς αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για την επίτευξη ενεργειακής απόδοσης στην 6η γενιά κινητών επικοινωνιών.
- **Αποδοτική χρήση του φάσματος:** Ο περιορισμένος διαθέσιμος φάσμα χρήσης απαιτεί την ανάπτυξη τεχνικών για την αποδοτική και αποτελεσματική χρήση των συχνοτήτων, με στόχο την αποφυγή περιορισμών και συγκρούσεων.
- **Ανεπαρκής υποδομή σε αγροτικές περιοχές:** Η επέκταση της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές αντιμετωπίζει προκλήσεις λόγω της έλλειψης υποδομής και της ανεπάρκειας κεραιών και δικτύων. Η επίλυση αυτού του προβλήματος απαιτεί σημαντικές επενδύσεις για την επέκταση της υποδομής και την παροχή σταθερής και αξιόπιστης σύνδεσης σε αυτές τις περιοχές.
- **Προκλήσεις πολιτικής και κανονιστικού πλαισίου:** Η εισαγωγή της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών θα αντιμετωπίσει προκλήσεις σε πολιτικό και κανονιστικό επίπεδο. Οι ρυθμίσεις περί συχνοτήτων, οι πολιτικές ασφάλειας και ιδιωτικότητας, καθώς και οι συμφωνίες διασυννοριακής συνεργασίας απαιτούν συντονισμό και συνεργασία μεταξύ των διαφόρων ενδιαφερόμενων φορέων και χωρών. Η αποτελεσματική διαχείριση αυτών των πολιτικών και κανονιστικών πτυχών είναι κρίσιμη για την ομαλή υλοποίηση της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών.
- **Κοινωνικές επιπτώσεις:** Η εισαγωγή της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών θα έχει επίσης σημαντικές κοινωνικές επιπτώσεις. Η υψηλή ταχύτητα και η συνδεσιμότητα που προσφέρει η 6η γενιά θα επηρεάσει

τους τρόπους ζωής, την εκπαίδευση, την υγεία, την απασχόληση και πολλούς άλλους τομείς της κοινωνίας. Απαιτείται έρευνα και παρακολούθηση των κοινωνικών επιπτώσεων για να αντιμετωπιστούν πιθανές προκλήσεις και να εκμεταλλευτούν τα οφέλη της τεχνολογίας με τον βέλτιστο τρόπο.

- **Επίπτωση στην εργασία και την απασχόληση:** Η εξέλιξη της τεχνολογίας μπορεί να έχει αντίκτυπο στην αγορά εργασίας, με την εμφάνιση νέων επαγγελμάτων και την αυτοματοποίηση ορισμένων εργασιών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στις απαιτούμενες δεξιότητες και στις προοπτικές απασχόλησης. Είναι σημαντικό να δημιουργηθούν μηχανισμοί για την αναπροσαρμογή και εκπαίδευση του εργατικού δυναμικού, προκειμένου να αξιοποιηθούν οι νέες ευκαιρίες που προσφέρονται από την τεχνολογική ανάπτυξη.

Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται και η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών γίνεται πραγματικότητα, οι παραπάνω προβληματισμοί θα πρέπει να αντιμετωπιστούν μέσω συνεχούς έρευνας, καινοτομίας και συνεργασίας μεταξύ εταιρειών, κυβερνητικών φορέων, ακαδημαϊκών ιδρυμάτων και της κοινότητας γενικότερα.

Σε κάθε περίπτωση, η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών υπόσχεται να επανασχεδιάσει τον τρόπο που επικοινωνούμε και αλληλεπιδρούμε με την τεχνολογία. Από τις ταχύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και την υψηλή συνδεσιμότητα έως την υποστήριξη της ευφυούς πόλης και των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών, η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών αναμένεται να έχει ευρεία και βαθιά επίδραση σε πολλούς τομείς της κοινωνίας και της οικονομίας.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ανοικτά προβλήματα, απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη σε πολλούς τομείς. Οι εταιρείες και οι επιστήμονες πρέπει να συνεργαστούν για τη βελτίωση των τεχνολογιών και των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται, καθώς και για την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων που θα απαντήσουν στις προκλήσεις που προκύπτουν.

Συνολικά, η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών παρέχει μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών και δυνατοτήτων που θα επηρεάσουν την κοινωνία μας σε πολλούς τομείς. Με την κατανόηση και την αντιμετώπιση των προκλήσεων που προκύπτουν, μπορούμε να αξιοποιήσουμε πλήρως τα οφέλη που προσφέρει η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών. Αυτό απαιτεί συνεργασία μεταξύ εταιρειών, κυβερνήσεων, ερευνητικών οργανισμών και κοινωνίας γενικότερα για να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις και να προωθήσουν την ανάπτυξη και την υιοθέτηση των νέων τεχνολογιών.

Για να επιτύχουμε αυτόν τον στόχο, πρέπει να επενδύσουμε στην έρευνα και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, να προωθήσουμε την εκπαίδευση και την κατάρτιση σε σχετικούς τομείς και να δημιουργήσουμε προγράμματα υποστήριξης και χρηματοδότησης για τις επιχειρήσεις και τους ερευνητικούς φορείς που αναπτύσσουν και εφαρμόζουν τις τεχνολογίες της 6ης γενιάς.

1.4 Δομή πτυχιακής και μεθοδολογία

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι δομημένη σε πέντε κεφάλαια, κάθε ένα από τα οποία εξετάζει διαφορετικές πτυχές των κινητών επικοινωνιών, συγκρίνει τους διάφορους τύπους High Altitude Platform Stations (HAPS) και δίνει μία ολοκληρωμένη εικόνα γι' αυτές.

- **Εισαγωγή:** Εισαγωγή στις κινητές επικοινωνίες και την εξέλιξη τους. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι

γενιές κινητής τηλεφωνίας από την 1η έως την 6η περιγράφοντας τα κύρια χαρακτηριστικά της κάθε γενιάς, καθώς και τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, τις τεχνολογίες πρόσβασης και τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες σε κάθε περίπτωση.

- **Βιβλιογραφική έρευνα και προσεγγίσεις:** Εδώ παρουσιάζονται οι βασικές έρευνες και οι σημαντικότερες προσεγγίσεις που έχουν γίνει στον τομέα των HAPS, αλλά και των επικοινωνιών γενικότερα. Στοχεύει στη δημιουργία ενός θεωρητικού πλαισίου για την κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων. Γίνεται μία εισαγωγή στις High Altitude Platform Stations (HAPS) και περιγραφή της χρήσης τους ως ασύρματες πλατφόρμες επικοινωνίας σε υψηλό υψόμετρο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η ιστορία των HAPS, οι κατηγορίες και τα χαρακτηριστικά τους. Σε επόμενη υποενότητα αναλύονται οι περιπτώσεις χρήσης των High Altitude Platform Stations, οι τεχνολογικές τους προκλήσεις καθώς και οι προοπτικές εξέλιξης τους.

Παρουσίαση προτάσεων και πρωτοβουλιών για την αντιμετώπιση των ανοικτών προβλημάτων, όπως νομοθετικές πρωτοβουλίες για την προστασία της ιδιωτικότητας και τη διασφάλιση της ασφάλειας δεδομένων, εκπαιδευτικές προγράμματα για την αύξηση της ψηφιακής προσαρτημένης και ανάπτυξη των περιβαλλοντικά φιλικών τεχνολογιών και πρακτικών στα HAPS και την κινητή επικοινωνία.

- **High Altitude Platform Stations** Ο πυρήνας της εργασίας βρίσκεται σε αυτό το κεφάλαιο. Αναλύονται διεξοδικά οι HAPS, οι τεχνολογίες πίσω από αυτές και οι λειτουργικές τους ιδιότητες. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και περιορισμοί των HAPS σε σχέση με άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας. Πραγματοποιούνται οι εξής συγκρίσεις: Σύγκριση των HAPS με άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας, σύγκριση των HAPS με άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας όπως δορυφορικές επικοινωνίες, ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας και επίγεια δίκτυα. Ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών του κάθε συστήματος και των Ανοικτών προβλημάτων στις κινητές επικοινωνίες και τα HAPS. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται ένα μοντέλο υπολογισμού ισχύος για τις διάφορες πλατφόρμες.
- **Ανάλυση Επίδοσης και Αποτελέσματα** Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας και των συγκρίσεων μεταξύ των HAPS και παρουσιάζονται δεδομένα που υποστηρίζουν τα ευρήματα. Ανάδειξη των κυριότερων ευρημάτων και συμπερασμάτων που προκύπτουν από την έρευνα. Αξιολόγηση των προτεινόμενων λύσεων και προοπτικών για μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα της εναέριας επικοινωνίας με χρήση των HAPS.

Αναφορά σε πιθανούς περιορισμούς της έρευνας και προτάσεις για μελλοντικές μελέτες στον συγκεκριμένο τομέα χρήσης των HAPS. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα μπορεί να περιλαμβάνουν την εξέταση της επίδρασης των HAPS στην καλωδιοκεντρική επικοινωνία, την ανάλυση της βιωσιμότητας και του κόστους υλοποίησης των HAPS, καθώς και την ανάπτυξη και αξιολόγηση νέων τεχνολογιών και πρωτοκόλλων για την ενίσχυση της απόδοσης και της ασφάλειας των HAPS.

- **Συμπεράσματα και Προτάσεις Βελτίωσης** Σύνοψη των κύριων ευρημάτων και συμπερασμάτων που προέκυψαν από την έρευνα και τη σύγκριση των ειδών HAPS. Επισήμανση της σημασίας της έρευνας αυτής και των προτεινόμενων λύσεων για τη μελλοντική εξέλιξη του τομέα των κινητών επικοινωνιών
- **Βιβλιογραφία** Αναφορά στις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.

1.5 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιήσαμε μια ανασκόπηση των γενεών κινητών επικοινωνιών από την 1η έως την 6η γενιά. Εξετάσαμε τις βασικές χαρακτηριστικές τεχνολογίες και εξελίξεις κάθε γενιάς και εστιάσαμε ιδιαίτερα στην 6η γενιά, αναλύοντας τις τεχνολογίες κλειδιά και τα ανοικτά προβλήματα που προκύπτουν.

Η 1η γενιά κινητών επικοινωνιών: Η 1η γενιά, γνωστή και ως αναλογική κινητή τηλεφωνία, εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1980. Χαρακτηριζόταν από τη χρήση αναλογικών σημάτων και ήταν περιορισμένη σε φωνητικές κλήσεις.

Η 2η γενιά κινητών επικοινωνιών: Η 2η γενιά, γνωστή ως ψηφιακή κινητή τηλεφωνία, εισήχθη τη δεκαετία του 1990. Αντί για αναλογικά σήματα, χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή μετάδοση, παρέχοντας καλύτερη ποιότητα φωνής και αυξημένη χωρητικότητα και δυνατότητα αποστολής μηνυμάτων κειμένου (SMS).

Η 3η γενιά κινητών επικοινωνιών: Η 3η γενιά, γνωστή και ως 3G, εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και αρχές της δεκαετίας του 2000. Αποτελούσε ένα μεγάλο άλμα στις επικοινωνίες κινητής τηλεφωνίας, προσφέροντας υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και πρώτες υπηρεσίες δεδομένων όπως τον ιστό, η ηλεκτρονική αλληλογραφία και οι πολυμέσα.

Η 4η γενιά κινητών επικοινωνιών: Η 4η γενιά, γνωστή και ως 4G LTE, εμφανίστηκε περίπου στα μέσα της δεκαετίας του 2000. Αποτελούσε μια εξέλιξη της 3G και παρείχε ακόμα υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, βελτιστοποιημένη ποιότητα φωνής και επεκταμένες δυνατότητες πολυμέσων. Η τεχνολογία LTE επέτρεψε την ανάπτυξη εφαρμογών όπως το streaming βίντεο και οι φωνητικές κλήσεις υψηλής ποιότητας μέσω του διαδικτύου (VoIP).

Η 5η γενιά κινητών επικοινωνιών: Εισήχθη το 2019 και προσφέρει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, χαμηλότερη καθυστέρηση (latency), μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου και αυξημένη συνδεσιμότητα. Η τεχνολογία 5G αναμένεται να υποστηρίξει εφαρμογές όπως αυτόνομα οχήματα, Internet of Things (IoT), εικονικές πραγματικότητες και υγεία του μέλλοντος.

Η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών: Η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών αποτελεί την πιο πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα των κινητών επικοινωνιών. Παρουσιάζει αναβαθμισμένες τεχνολογίες και λειτουργίες, που αναμένεται να επαναπροσδιορίσουν τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε και χρησιμοποιούμε τα κινητά δίκτυα. Η τεχνολογία 6G αναμένεται να επαναπροσδιορίσει την επικοινωνία μας με υπερυψηλές συχνότητες και νέα φάσματα όπως το THz. Αυτό θα επιτρέψει τη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων με απίστευτες ταχύτητες, αλλά θα απαιτήσει νέες τεχνολογίες όπως νέους τύπους κεραιών, καθώς και πρωτοκόλλων. Η 6G θα επιτρέπει την υπερσύνδεση όλων, από συσκευές IoT έως ανθρώπους και μηχανές, επιτρέποντας την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η 6G θα προσφέρει προηγμένες εμπειρίες AR/VR, ενσωματώνοντας τεχνολογίες όπως τα AR glasses και η επεξεργασία στον τοπικό υπολογιστή. Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση θα ενισχύσουν την αυτόνομη λειτουργία των δικτύων, προβλέποντας και αντιλαμβάνόμενες πρότυπα και συμπεριφορές. Τα ανοικτά προβλήματα που προκύπτουν με την εισαγωγή της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών απαιτούν ολοκληρωμένη προσέγγιση και συνεργασία μεταξύ εταιρειών, επιστημόνων, κυβερνήσεων και της κοινωνίας γενικότερα. Με σωστή διαχείριση, η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών μπορεί να προσφέρει επαναστατικές δυνατότητες και να συμβάλει στη βελτίωση της κοινωνίας, της οικονομίας και του τρόπου ζωής μας.

Σε σύνοψη, η 6η γενιά κινητών επικοινωνιών φέρνει μαζί της τεχνολογίες κλειδιά που θα επαναπροσδιορίσουν τον τρόπο που επικοινωνούμε και λειτουργούμε. Από την αύξηση της ταχύτητας και της χωρητικότητας των δικτύων, μέχρι την ανάπτυξη της πραγματικότητας επαυξημένης και των αυτόνομων οχημάτων, η 6η γενιά ανοίγει νέες δυνατότητες και προκλήσεις. Με τη σωστή διαχείριση των προβλημάτων ασφάλειας, ιδιωτικότητας, διαχείρισης δεδομένων, υποδομής και περιβάλλοντος, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το πλήρες δυναμικό των τεχνολογιών της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προηγμένες επικοινωνίες, ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, βελτιωμένη υγεία και εκπαίδευση, και προώθηση της καινοτομίας και της οικονομικής ανάπτυξης.

Ωστόσο, για να αξιοποιήσουμε πλήρως το δυναμικό της 6ης γενιάς κινητών επικοινωνιών, πρέπει να αντιμετωπίσουμε τις προκλήσεις που προκύπτουν. Η ασφάλεια των δεδομένων, η προστασία της ιδιωτικότητας, η αποτελεσματική διαχείριση των δεδομένων, η επέκταση της συνδεσιμότητας σε απομακρυσμένες περιοχές και η προστασία του περιβάλλοντος αποτελούν ζητήματα που απαιτούν προσεκτική ανάλυση και ανάπτυξη κατάλληλων λύσεων.

Κεφάλαιο 2ο: Βιβλιογραφική έρευνα και προσεγγίσεις

2.1 Εισαγωγή

Η σημασία της σύγκρισης και αξιολόγησης διαφορετικών τεχνολογικών πλατφορμών δεν μπορεί να υποτιμηθεί στον σύγχρονο, ραγδαία εξελισσόμενο τεχνολογικό κόσμο. Ειδικά όταν πρόκειται για τα High Altitude Platform Stations (HAPS), το θέμα είναι πολύπλοκο και σημαντικό. Τα HAPS, αναπτυσσόμενα με εντυπωσιακή ταχύτητα, αποτελούν κεντρικό θέμα στις ερευνητικές προσπάθειες για την παροχή ασύρματων υπηρεσιών ευρείας κάλυψης.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην εξέταση και σύγκριση διάφορων HAPS, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των δυναμικών, των πλεονεκτημάτων, των προκλήσεων και των δυνατοτήτων που παρέχουν.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε τις βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για την υποστήριξη της εργασίας αυτής. Αυτές οι πηγές αποτελούν το θεμέλιο για την κατανόηση των HAPS και των διάφορων στοιχείων που συνθέτουν τον συγκεκριμένο τομέα. Ακόμη, θα συζητήσουμε τις διάφορες προσεγγίσεις που εφαρμόστηκαν στην εργασία αυτή, παρέχοντας έτσι ένα σαφές πλαίσιο για την κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων.

Σε αυτή την προσπάθεια, προσπαθούμε να συγκεντρώσουμε και να αναλύσουμε όλη την απαραίτητη βιβλιογραφία που θα καταστήσει τον αναγνώστη ικανό να κατανοήσει τις δυναμικές που αφορούν τα HAPS, χωρίς να αγνοεί την τεχνική τους πλευρά και την τεχνολογική τους σημασία.

2.2 Βιβλιογραφική έρευνα

Τις δεκαετίες 1990 και 2000, ξεκίνησαν αρκετές ερευνητικές εργασίες προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή εφαρμογή των μεγάλων υψομέτρων πλατφόρμες τηλεπικοινωνιών και τηλεπισκόπησης. Μεγάλα έργα ξεκίνησαν στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ιαπωνία και τη Νότια Κορέα [20]- [21]. Οι πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (HAPS) είναι τοποθετημένες σε αεροσκάφη πάνω από 20 χλμ. υψόμετρο, στη στρατόσφαιρα, προκειμένου να συνθέσουν ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ή να εκτελέσουν τηλεπισκόπηση, για πολιτικές ή στρατιωτικές εφαρμογές. Αυτά τα αεροσκάφη μπορεί να είναι αεροπλάνα, αερόπλοια ή αερόστατα, επανδρωμένα ή μη επανδρωμένα. Η στρατόσφαιρα είναι το στρώμα της ατμόσφαιρας όπου αρχίζει η θερμοκρασία αυξάνεται με το υψόμετρο. Αμέσως μετά την τροπόπαυση, η οποία έχει σταθερή θερμοκρασία περίπου -60°C , η στρατόσφαιρα ξεκινά σε υψόμετρο 7 km στους πόλους και 18 km στον Ισημερινό, που εκτείνεται σε περίπου 50 km [22]. Ένα αξιοσημείωτο γεγονός για την ιδέα των HAPS ήταν ο αρχικός ορισμός ζώνης συχνοτήτων για τις τηλεπικοινωνίες του υπηρεσίες στην Παγκόσμια Διάσκεψη Ραδιοεπικοινωνιών 1997 (WRC-97), που διοργανώθηκε από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU), η οποία ασχολείται με τη ρύθμιση της χρήσης των ραδιοσυχνοτήτων. Στο συνέδριο αυτό, ο όρος «Μεγάλου Υψομέτρου Σταθμός Πλατφόρμας» (HAPS) έχει ιδρυθεί, ο οποίος ορίζεται ως ένας τηλεπικοινωνιακός σταθμός που βρίσκεται σε υψόμετρο 20 έως 50 km και σε καθορισμένο σταθερό σημείο σε σχέση με τη Γη. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι, εκείνη την εποχή, υπήρχε ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη HAPS χρήση ως συμπλήρωμα επίγειου και δορυφορικού δικτύου επικοινωνιών. [23]

Με τα χρόνια, έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετοί όροι για αυτό το είδος αεροσκάφους, όπως: «High Altitude Powered Platform», «High Altitude Aeronautical Platform», «High Altitude Airship», «Stratospheric Platform»,

«Stratospheric Airship» και «Atmospheric Satellite». Ο όρος “High Altitude Long Endurance” (HALE), μερικές φορές χρησιμοποιείται για την επισήμανση HAPS, είναι γενικά πιο συνδεδεμένο με συμβατικά μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV), με ανώτατο όριο εξυπηρέτησης περίπου 18 χλμ., όπως το Global Hawk. Επί του παρόντος, η έκφραση «High Altitude Platform» (HAPS), που υιοθετήθηκε από τον ITU, ήταν η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη. Το υψόμετρο που υιοθετήθηκε για τη λειτουργία HAPS, περίπου 20 km, παρακινείται από το γεγονός ότι σε αυτά τα υψόμετρα η ταχύτητα του ανέμου είναι λιγότερο έντονη και, κατά συνέπεια, το HAPS απαιτεί λιγότερη δύναμη για τη διατήρηση της θέσης [24]. Το υψόμετρο δίπλα στα 20 χλμ. έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι βρίσκεται πάνω από το ισχυρά ρεύματα ανέμου (jet stream) που υπάρχουν μεταξύ 10 και 15km. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη περιοχή κάλυψης για τηλεπικοινωνίες, ότι μπορεί να βρίσκεται πάνω από τις συνήθεις εμπορικές αεροπορικές κυκλοφορίες και επίσης όσον αφορά το χαμηλότερο κόστος υλοποίησης, ανάπτυξης και συντήρησης. Τα HAPS διακρίνονται από μειωμένη κάλυψη σε σύγκριση με τους δορυφόρους. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, τα HAPS δεν θεωρούνται ανταγωνιστές δορυφόρου στην τεχνολογία της βιβλιογραφίας.

Από την άλλη πλευρά, η εστίαση είναι στην αποτελεσματική και απρόσκοπτη ενσωμάτωση διαφορετικών αεροδιαστημικών τεχνολογιών των αεροδιαστημικών τμημάτων (GEO, LEO και HAPS) με επίγεια ασύρματα δίκτυα για την επέκταση της εμβέλειας της ασύρματης ευρυζωνικής συνδεσιμότητας. Το μέγιστο ύψος για τον ελεγχόμενο εναέριο χώρο ποικίλλει από χώρα σε χώρα, με τα 20 km (65.000 ft) να είναι μία τυπική τιμή, που καθορίστηκε την εποχή του εμπορικού υπερηχητικού αεροσκάφους Concorde [22]. Το επίκεντρο αυτής της αναθεώρησης θα είναι απευθείας στις τεχνολογίες που σχετίζεται με την εναέρια πλατφόρμα, που εισάγεται στο αεροναυτικό γνωστικό πεδίο της μηχανικής, χωρίς λεπτομερείς πτυχές του τομέα των τηλεπικοινωνιών, όπως οι τεχνολογίες λείζερ για δεδομένα, ο σύνδεσμος και οι ηλεκτρονικά σαρωμένες συστοιχίες κεραιών.

Αυτές οι πλατφόρμες μπορούν να είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους, ανάλογα με το είδος τους, την τεχνολογία που χρησιμοποιούν, τις υπηρεσίες που παρέχουν, και τον τρόπο λειτουργίας τους.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλύσουμε διεξοδικά την βιβλιογραφία που αναφέρεται στα HAPS, θα περιγράψουμε τις διάφορες κατηγορίες τους, και θα εξετάσουμε τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε αυτές. Θα εξετάσουμε επίσης τις εφαρμογές τους, τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν, και τις προοπτικές τους για το μέλλον.

2.2.1 Ιστορία των High Altitude Platform Stations

Οι στρατοσφαιρικές πτήσεις άνω των 15 χιλιομέτρων είχαν ήδη πραγματοποιηθεί τη δεκαετία του 1930, σε μπαλόνια με γόνδολες υπό πίεση, επανδρωμένα από πρωτοπόρους όπως ο Ελβετός Auguste Piccard. Το 1950 και το 1960, αεροσκάφη με αεριωθούμενη πρόωση, όπως Canberra, U-2 και SR-71, και πειραματικά αεροσκάφη με πρόωση πυραύλων, όπως το X-1 και το X-15, έφτασαν σε υψόμετρα στρατόσφαιρας. Ένα από τα πρώτα πειραματικά έργα ειδικά για την έρευνα HAPS, που ξεκίνησε το 1969, ήταν το μη επανδρωμένο αερόπλοιο High Platform II, που κατασκευάστηκε από την εταιρεία Raven, με την υποστήριξη του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ. Σκοπός ήταν να αναλυθεί η σκοπιμότητα των πλατφορμών για αναγνώριση σε μεγάλο υψόμετρο. Το όχημα είχε μήκος 25 μέτρα, βάρος 62 κιλά, ηλεκτρική πρόωση με έλικα και ισχύ 300 W που τροφοδοτούνταν από ηλιακές κυσέλες. Πραγματοποιήθηκε μια πτήση το 1970, με διάρκεια λίγο μεγαλύτερη από μία ώρα, φτάνοντας σε ύψος περίπου 21 km. Το High Platform II (Σχήμα 2.14) έγινε το πρώτο αερόπλοιο που πραγματοποίησε μια στρατοσφαιρική πτήση με κινητήρα. Άλλες μελέτες, υποστηριζόμενες από το Υπουργείο



Σχήμα 2.1: High Platform II Αερόπλοιο, 1970, [23]

Άμυνας των ΗΠΑ (DoD), ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1970, ως Powered Balloon (POBAL) και High Altitude Superpressure Powered Airship (HASPA), αλλά κανένα από αυτά δεν είχε συνέχεια [24].

2.2.2 Κατηγορίες των High Altitude Platform Stations

Γενικά, οι πλατφόρμες HAPS μπορούν να ταξινομηθούν σε επανδρωμένες ή μη επανδρωμένες εναέριας πλατφόρμες. Στη δεκαετία του 1960, επανδρωμένα HAPS με τζετ αναπτύχθηκαν όπως το B-57 Canberra και το Lockheed F-104 [25]. Τα περισσότερα από αυτά τα επανδρωμένα HAPS χρησιμοποιήθηκαν για μετεωρολογία, επιστημονικούς σκοπούς ή στρατιωτικές εφαρμογές. Το Proteus είναι ένα παράδειγμα επανδρωμένου HAPS που έχει σχεδιαστεί για τηλεπικοινωνιακή χρήση. Ωστόσο, οι τυπικές εφαρμογές επικοινωνιών απαιτούν παρατεταμένη υποστήριξη και είναι δύσκολο για τους πιλότους να πετάξουν για πολύ μεγάλη διάρκεια στο αφιλόξενο στρατοσφαιρικό περιβάλλον. Επομένως, οι μη επανδρωμένες πλατφόρμες HAPS είναι πιο δημοφιλείς και προτιμότερες για επικοινωνίες. [26] Με βάση την υποκείμενη φυσική αρχή που παρέχει τη δύναμη ανύψωσης για τα HAPS, ταξινομούνται ως αεροστατικά (γνωστές και ως ελαφρύτερες από τον αέρα) πλατφόρμες ή αεροδυναμικές (γνωστές και βαρύτερες από τον αέρα) πλατφόρμες. Ενώ οι αεροστατικές πλατφόρμες χρησιμοποιούν την άνωση για να επιπλέουν στον αέρα, οι αεροδυναμικές πλατφόρμες χρησιμοποιούν δυναμικές δυνάμεις που δημιουργούνται από την κίνηση μέσω του αέρα [27], [28]. Οι αεροστατικές πλατφόρμες εμφανίζονται σε δύο σχήματα, μπαλόνια ή αερόπλοια, και χρησιμοποιούν ένα ανυψωτικό αέριο σε ένα φάκελο για την παροχή άνωσης ώστε να επιπλέει στον αέρα [28].

Τα αερόστατα είναι συνήθως μη ηλεκτροκίνητες πλατφόρμες και μπορούν να προσδεθούν για να ελέγχουν εύκολα τις πτήσεις τους. Ωστόσο, τα δεμένα μπαλόνια στη στρατόσφαιρα έχουν εγκαταλειφθεί λόγω περιορισμών της ασφάλειας του αέρα και σήμερα τα δεμένα HAPS περιορίζονται κυρίως σε ένα μέγιστο υψόμετρο 2 km. Το Google Loon είναι ένα παράδειγμα αερόστατων που προορίζονται για επικοινωνιακές προτάσεις. Είναι κατασκευασμένο από φύλλα πολυαιθυλενίου μεγάλου μεγέθους, εξοπλισμένο με κεραίες και ηλιακούς συλλέκτες, και μπορεί να παραμείνει πάνω από 100 ημέρες στη στρατόσφαιρα. Έχουν διεξαχθεί αρκετές δοκιμές με



Σχήμα 2.2: Ένα μπαλόνι Loon στην εκδήλωση εκτόξευσης του Christchurch τον Ιούνιο του 2013. [29]

την απελευθέρωση δεκάδων μπαλονιών, σε μέρη όπως η Νέα Ζηλανδία, η Αυστραλία και η βορειοανατολική Βραζιλία. Τον Φεβρουάριο του 2016, μετά από συμφωνία με την κυβέρνηση της Σρι Λάνκα, η Google ξεκίνησε δοκιμές για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο στη χώρα χρησιμοποιώντας τα μπαλόνια Project Loon, σε κοινή δουλειά με τοπικές εταιρείες λειτουργίας. Ένα άλλο σημαντικό γεγονός το 2016, στο Πουέρτο Ρίκο, ήταν η δοκιμή ενός γερανού αυτόματης εκτόξευσης που κατασκευάστηκε ειδικά για το έργο, που επέτρεψε την εκτόξευση ενός μπαλονιού σε μόλις 30 λεπτά [26].

Τα αερόπλοια είναι συνήθως κινητήριες πλατφόρμες με συστήματα πρόωσης και μπορούν να παραμείνουν στη στρατόσφαιρα για αρκετούς μήνες ή χρόνια [30]. Αν και το τεράστιο μέγεθος των αερόπλοιων αυξάνει τη δυναμική αντίσταση κατά τη διάρκεια της πτήσης και επιβάλλει σημαντικές προκλήσεις για την απογείωση και την προσγείωση, προσφέρει μεγάλη ευελιξία όσον αφορά τα ωφέλιμα φορτία και την παραγόμενη ενέργεια από ηλιακά κύτταρα [28]. Τα αεροδυναμικά HAPS χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες και έλικες ως σύστημα πρόωσης. Σε αντίθεση με τις αεροστατικές πλατφόρμες, τα αεροδυναμικά αεροσκάφη έχουν περιορισμένη χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου με υψηλότερη αντίσταση σε ισχυρούς ανέμους και τυρβώδεις συνθήκες [31]. Επιπλέον, ένα αεροδυναμικό HAPS πρέπει να κινηθεί προς τα εμπρός και να κάνει κύκλους γύρω από την προβλεπόμενη περιοχή για να διατηρείται η κάλυψη σε μια σχεδόν ακίνητη θέση. Επίσης, απαιτούν μεγάλους μεγέθους πτερύγια (35 έως 80 m) για ανύψωση λόγω της μειωμένης πυκνότητας αέρα στα υψόμετρα λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, η ακτίνα της κυκλικής κίνησης θα είναι πολύ μεγάλη, γεγονός που απαιτεί προσαρμογές

στις δέσμες κατάδειξης κεραιών και επικοινωνιών. [26]

Τα High Altitude Platform Stations (HAPS) αναδεικνύονται ως μια σύγχρονη καινοτομία στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, λειτουργώντας από υψηλές ατμοσφαιρικές στρώσεις. Στον τομέα των HAPS που λειτουργούν ως αεροπλάνα, διακρίνουμε διάφορες κατηγορίες. Τα ηλιακά τροφοδοτούμενα αεροπλάνα χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά συστήματα για να λειτουργούν και, λόγω της ικανότητάς τους να πετούν σε πολύ υψηλά υψόμετρα, έχουν πρόσβαση σε σταθερό φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας, επιτρέποντας τους να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια για τη νύχτα. Τα επανδρωμένα αεροπλάνα είναι συμβατικότερες μορφές που έχουν προσαρμοστεί για τον ρόλο των HAPS, με την ανάγκη για πιλότους και συχνά με μικρότερο χρόνο αεροπορικής λειτουργίας συγκριτικά με άλλα συστήματα. Τα μη επανδρωμένα αεροπλάνα, ή UAVs, είναι αυτοματοποιημένα συστήματα που μπορούν να πετούν για εκτεταμένες περιόδους και συχνά χρησιμοποιούνται για ειδικές εφαρμογές. Τέλος, τα αεροπλάνα εξελιγμένης τεχνολογίας ενσωματώνουν τεχνολογικές καινοτομίες για αυξημένη αποτελεσματικότητα και λειτουργικότητα. Συνολικά, τα HAPS που λειτουργούν ως αεροπλάνα παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων, ενώ αντιμετωπίζουν και σημαντικές προκλήσεις.

Και οι δύο τύποι αεροστατικών και αεροδυναμικών τύπων HAPS έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι διαφορές είναι στο κόστος ανάπτυξης, τις περιοχές κάλυψης, τις χωρητικότητες ωφέλιμου φορτίου, το επίπεδο αντοχής, τον έλεγχο θέσης και τη διάρκεια πτήσης. [26] Η προβλεπόμενη περίπτωση χρήσης ή στόχος αποστολής παίζει σημαντικό ρόλο στην υπαγόρευση της καλύτερης επιλογής HAPS [30], [28]. Για παράδειγμα, ένα αεροδυναμικό HAPS μπορεί να είναι προτιμότερο για καταστροφές ή καταστάσεις έκτακτης ανάγκης λόγω του μειωμένου κόστους ανάπτυξης [31], της ευελιξίας στην απογείωση/προσγείωση και τον έλεγχο της κινητικότητας, ενώ ένα αεροστατικό HAPS φαίνεται να είναι πιο κατάλληλο για μακροπρόθεσμα σενάρια λόγω της μεγάλης χωρητικότητας ωφέλιμου φορτίου και της υψηλής ικανότητας παραγωγής ενέργειας με χρήση ηλιακών κυψελών. Ωστόσο, η τήρηση σταθμών είναι πιο δύσκολη και προκλητική για τις αεροστατικές πλατφόρμες όταν υπάρχουν ισχυροί άνεμοι και έντονες ταραγμένες συνθήκες. Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει προηγούμενες και πρόσφατες υλοποιήσεις HAPS. Όπως φαίνεται, στις περισσότερες περιπτώσεις, κάθε έργο HAPS υιοθετεί έναν συγκεκριμένο τύπο για την πλατφόρμα, αλλά ίσως χρειάζεται ένας υβριδικός τύπος HAPS που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο τρεχόντων τύπων για εγγύς μελλοντικές εφαρμογές κόμβων HAPS. Από αυτή την άποψη, και τα δύο έργα Loon και HAPSMobile υπέγραψαν μακροπρόθεσμη στρατηγική σχέση το 2019 για προώθηση και των δύο τύπων αεροστατικών και αεροδυναμικών συστημάτων HAPS [26]. Στον πίνακα 2.1, αναλύονται παραδείγματα υλοποιήσεων HAPS και τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

2.2.3 Παραδείγματα υλοποιήσεων HAPS

• HELIOS (ERAST PROGRAMM)

Το Πρόγραμμα Περιβαλλοντικής Έρευνας Αεροσκαφών και Τεχνολογίας Αισθητηρίων (ERAST), που ξεκίνησε το 1994 και διεξήχθη από τη NASA σε συνεργασία με τη βιομηχανία, είχε ως στόχο την ανάπτυξη και επίδειξη τεχνολογιών που επιτρέπουν σε ένα αεροσκάφος σε μεγάλο ύψος να εκτελεί αποστολές μεγάλης διάρκειας για περιβαλλοντική παρακολούθηση. Το πρόγραμμα ERAST αφορούσε μόνο αεροσκάφη σταθερής πτέρυγας, επομένως δεν συμπεριλήφθηκαν αερόπλοια. [23]

Η οικογένεια των μη επανδρωμένων αεροσκαφών ηλιακής ενέργειας που αναπτύχθηκε από την AeroVironment, για το Πρόγραμμα ERAST, έφτασε σε ρεκόρ υψομέτρου με το Pathfinder (21,48 km, 1997) και το Helios (29,52 km, 2001). Το Helios είχε άνοιγμα 75 m και συνολικό βάρος 1.052 κιλά, έχο-

Έργο	Τύπος HAPS	Οργανισμός	Χώρα	Χρονολογία Έργου	Περιγραφή
SHARP	Αεροδυναμικό	CRC	Καναδάς	1980-1987	◦Τροφοδοτείται από δέσμες μικροκυμάτων ◦1h διάρκεια πτήσης
Pathfinder, Centurion & Helios	Αεροδυναμικό	AeroVi- ronment NASA & ERAST	Ηνωμένες Πολιτείες	1994-2003	Υπηρεσίες HDTV, φωνής 3G, βίντεο, δεδομένων και σύνδεση υψηλής ταχύτητας.
Skynet	Αεροστατικό (Αερόπλοιο)	NAL Τώρα: JAXA	Ιαπωνία	1998-2005	◦Στόχος ήταν η υποστήριξη μελλοντικών επικοινωνιών με συνδέσμους υψηλής ταχύτητας. ◦Έχει μήκος περίπου 200m και διάρκεια πτήσης 3 χρόνια.
CAPANINA	Αεροστατικό (Μπαλόνι)	Πανεπιστήμιο του York	Ηνωμένο Βασίλειο	2003-2006	◦Βελτίωση της ευρυζωνικής πρόσβασης για αστικές και αγροτικές κοινότητες στην Ευρώπη. ◦Μετάδοση δεδομένων με ρυθμό 1,25 Gbps σχηματίζει ένα HAPS.
X-station	Αεροστατικό (Αερόπλοιο)	StratXX	Ελβετία	2005-Τώρα	◦Υποστηρίζει διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας (π.χ TV, ραδιόφωνο, κινητή τηλεφωνία, VoIP, τηλεπισκόπηση, τοπικό GPS). ◦Χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια και μπαταρίες, ωφέλιμο φορτίο 100 kg για πτήσης 1 έτους.
Elevate	Αεροστατικό (Μπαλόνι)	Zero 2 Infinity	Ισπανία	2009-Τώρα	◦Μεταφορά ωφέλιμων φορτίων για δοκιμές και επικύρωση νέων τεχνολογιών. ◦STRATOS: μεταφέρει έως και 100kg, 24h πτήσης.
Loon	Αεροστατικό (Μπαλόνι)	Θυγ. της Alphabet Inc. Priv: Google X	Ηνωμένες Πολιτείες	2011-Τώρα	◦Πανταχού παρούσα σύνδεση ◦Εως και 223 ημέρες πτήση, κάλυψη 40 km. ◦2019: 1 εκ. πτήσεις που πετούν 40 εκ. χλμ.
Zephyr S	Αεροδυναμικό	Airbus Defense και διάστημα	Ηνωμένο Βασίλειο	2013-Τώρα	◦Σύνδεση απομονομένων ανθρώπων. ◦Μετάδοση 100 Mbps με ωφέλιμο φορτίο 12kg ◦Πτήση 100 ημερών.
Aquila	Αεροδυναμικό	Facebook	Ηνωμένο Βασίλειο	2014-2018	◦Παροχή ευρυζωνικής κάλυψης για απομακρυσμένες περιοχές 80 km ◦πτήση 90 ημερών.
Stratobus	Αεροστατικό (Αερόπλοιο)	Thales Alenia Space	Γαλλία	2014-Τώρα	◦Παροχή τηλεπικοινωνιών 4G/5G. ◦Το μήκος του είναι 115m και μπορεί να 450kg ωφέλιμο φορτίο ◦5ετή αποστολή με ετήσια συντήρηση.
HAWK30	Αεροδυναμικό	HAPS-Mobile	Ιαπωνία	2017-Τώρα	◦Στόχος του είναι να συνδέσει κινητά, UAV, IoT. ◦Ακτίνα κάλυψης 100km για μήνες.
PHASA-35	Αεροδυναμικό	BAE Syst. & Prismatic	Ηνωμένο Βασίλειο	2018-Τώρα	◦ Σχεδιασμένο για υπηρεσίες (π.χ. 5G). ◦Ωφέλιμο φορτίο 15kg έως 1 χρόνο πτήσης.

Πίνακας 2.1: Κύρια Έργα HAPS



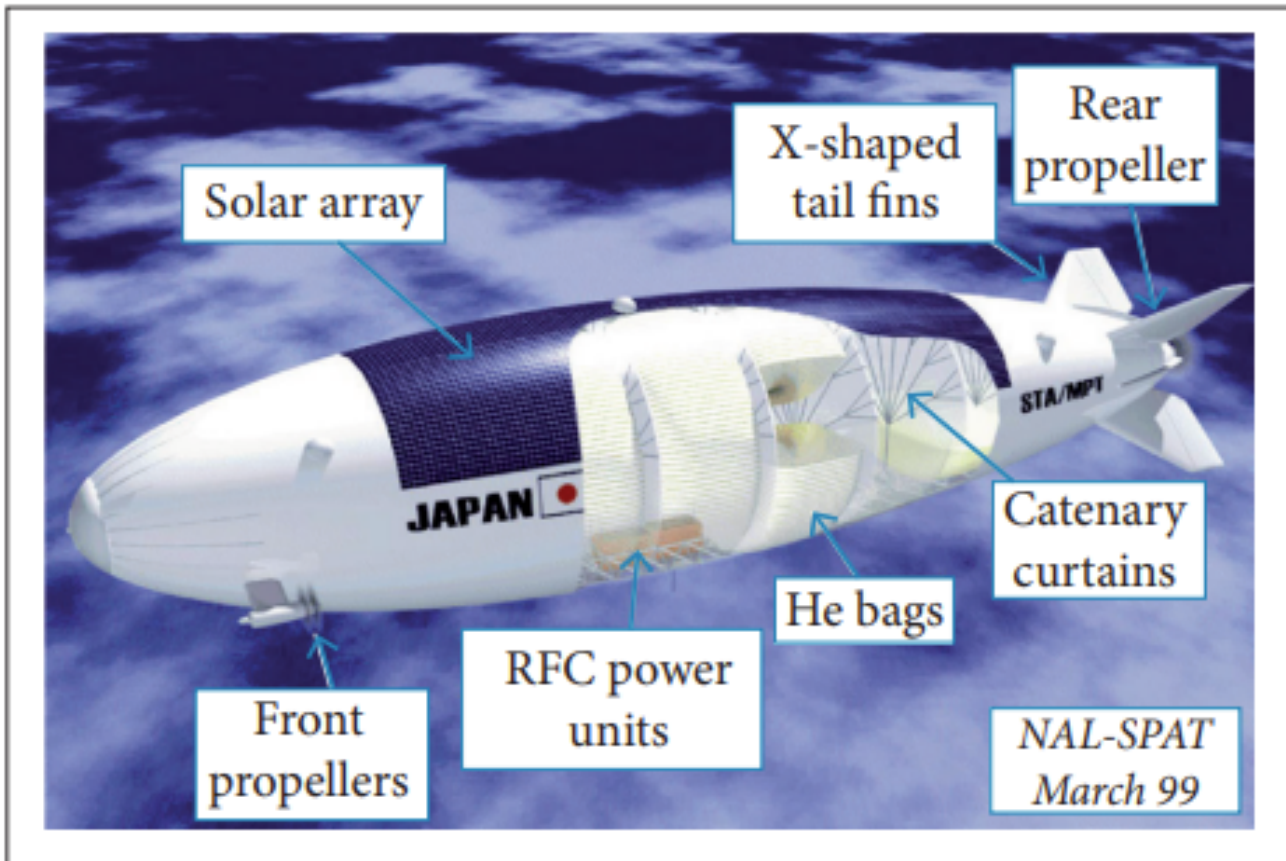
Σχήμα 2.3: HiSentinel80 Airship, SwRI, Aerostar [23]

ντας δοκιμαστεί σε διαφορετικές διαμορφώσεις πτήσης με 10 και 14 ηλεκτροκινητήρες [32]. Το 2000, η AeroVironment εκτίμησε ότι, για να μετατρέψει το Helios σε εμπορεύσιμο προϊόν, ειδικά για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, θα χρειαζόταν μια επένδυση 300 εκατομμυρίων δολαρίων, επιπλέον των 50 εκατομμυρίων δολαρίων που δαπανήθηκαν για το πρωτότυπο, μέχρι εκείνη τη στιγμή, από την εταιρεία και NASA [23]. Τον Ιούνιο του 2003, το πρωτότυπο Helios χάθηκε σε ένα ατύχημα κοντά στο νησί Kauai, στη Χαβάη [32]. Περίπου 30 λεπτά μετά την απογείωση, το Helios συνάντησε αναταράξεις, στα 853 μ., προκαλώντας ταλαντώσεις και δομική αστοχία του αεροσκάφους, το οποίο συνετρίβη στη θάλασσα. Το πρόγραμμα ERAST έκλεισε το 2004 [23].

- **HISENTINEL80**

Ο σκοπός του Προγράμματος HiSentinel ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος μη επανδρωμένου αερόπλοιου χαμηλού κόστους ικανού να μεταφέρει ωφέλιμα φορτία από 9 έως 90 κιλά σε μεγάλα ύψη, με διάρκεια πτήσης μεγαλύτερη από 30 ημέρες. Αυτή η πρωτοβουλία του αμερικανικού στρατού ξεκίνησε το 1996 με την οικογένεια των αερόπλοιων Sounder . Ο κύριος ανάδοχος για την ανάπτυξη ήταν το Southwest Research Institute (SwRI). Η αμερικανική εταιρεία Aerostar International, του ομίλου Raven, ανατέθηκε σε υπεργολαβία για την κατασκευή φακέλων και την υποστήριξη πτήσεων. Αυτά τα αερόπλοια θα εκτοξευόντουσαν από απομακρυσμένες τοποθεσίες χωρίς την ανάγκη ειδικών εγκαταστάσεων όπως μεγάλα υπόστεγα. [23] Για αυτό, τα αερόπλοια HiSentinel απελευθερώνονται όχι πλήρως φουσκωμένα, όπως και τα μετεωρολογικά μπαλόνια σε μεγάλο υψόμετρο. Στο τέλος της αποστολής, η μονάδα εξοπλισμού, η οποία περιλαμβάνει το ωφέλιμο φορτίο και την μπαταρία, αποσπάται από τον φάκελο και επιστρέφει στο έδαφος με αλεξίπτωτο [21].

- **STRATOSPHERIC PLATFORM (SPF)** Οι μελέτες σκοπιμότητας του Προγράμματος Ιαπωνικής Στρατοσφαιρικής Πλατφόρμας (SPF) ξεκίνησαν το 1998 και διήρκεσαν 18 μήνες, υπό την ηγεσία του Εθνικού

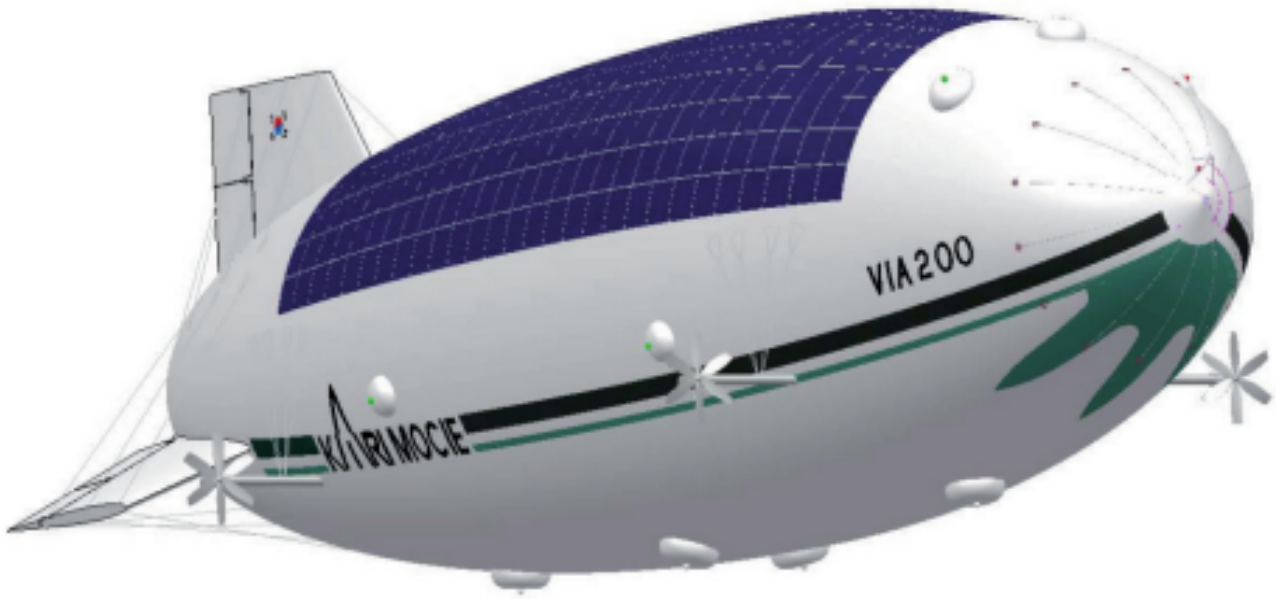


Σχήμα 2.4: SPF Airship, JAXA [23]

Αεροδιαστημικού Εργαστηρίου (NAL), επί του παρόντος του Ιαπωνικού Οργανισμού Αεροδιαστημικής Εξερεύνησης (JAXA). Ο στόχος του προγράμματος SPF ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος βασισμένου σε ένα μεγάλο μη επανδρωμένο αερόπλοιο, ικανό να διατηρεί θέση περίπου 20 km υψόμετρο, στοχεύοντας εφαρμογές σε μελλοντικά δίκτυα τηλεπικοινωνιών και επιστήμες γεωσκόπησης. Ο προγραμματισμός ήταν για μια ανάπτυξη 8 ετών [20].

Στο πρόγραμμα SPF, το αερόπλοιο πλήρους κλίμακας (Εικ. 4) θα έχει μήκος 245 m, μάζα 32 τόνους, ωφέλιμο φορτίο 1 τόνο, ενέργεια που παρέχεται από ηλιακές κυψέλες (φωτοβολταϊκά στοιχεία) κατά τη διάρκεια της ημέρας και αναγεννητικές κυψέλες καυσίμου (RFC) τη νύχτα. , καθώς και δυνατότητα διατήρησης θέσης σε υψόμετρο 20 km, με ανέμους έως 30 m/s. Το σχέδιο ήταν για συνεχή λειτουργία έως και 3 χρόνια, περιορισμένη από ενέργειες συντήρησης του συστήματος. Από το 2000, το πρόγραμμα έλαβε οικονομική υποστήριξη από το Millennium Project, που προωθείται από το Γραφείο του Πρωθυπουργού [20].

Ένα υπόστεγο, μήκους 80 μέτρων και ύψους 20 μέτρων, σε επταγωνικό σχήμα, κατασκευάστηκε στην πόλη Taiki, στο νησί Hokkaido. Για την επίδειξη των τεχνολογιών SPF Airship, αναπτύχθηκαν 2 δοκιμαστικά οχήματα, SPF-1 και SPF-2. Το μη τροφοδοτούμενο SPF-1 είχε μήκος 42 μέτρα, φτάνοντας σε υψόμετρο 16 km στη δοκιμή εκτόξευσης κάθετης θέσης, τον Αύγουστο του 2003 [33]. Το μη επανδρωμένο αερόπλοιο χαμηλού ύψους SPF-2, μήκους 68 μέτρων, είχε ως στόχο να επιδείξει ορισμένες από τις βασικές τεχνολογίες του SPF, όπως ο έλεγχος πτήσης, και να πραγματοποιήσει πειράματα για την παρατήρηση της Γης και τις τηλεπικοινωνίες. Η Fuji Heavy Industries ήταν ο κύριος ανάδοχος για την ανάπτυξη του SPF-2. Το 2004, το SPF 2 πραγματοποίησε 8 πτήσεις, σε υψόμετρα έως και 4 km [23]



Σχήμα 2.5: IA 200 Αερόπλοιο, KARI [23]

Το πρόγραμμα SPF τερματίστηκε το 2005, με συνολική δαπάνη περίπου 200 εκατομμυρίων δολαρίων, χωρίς να λάβει οικονομική υποστήριξη για τη συνέχιση της φάσης ανάπτυξης πλήρους κλίμακας. [33] Οι ερευνητικές δραστηριότητες εξαρτημάτων του συστήματος, όπως το σύστημα RFC, που θεωρείται ως μία από τις 2 βασικές τεχνολογίες, εκτός από τα ελαφρά υλικά για το φάκελο, συνεχίστηκαν στο JAXA [34]. Δεν βρέθηκαν πληροφορίες σχετικά με την παρούσα κατάσταση της έρευνας τεχνολογιών HAPS στην JAXA [23].

• STRATOSPHERIC AIRSHIP

Το πρόγραμμα κορεατικών στρατοσφαιρικών αεροσκαφών, που ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2000, είχε προγραμματιστεί να αναπτυχθεί σε 10ετή περίοδο. Ο απώτερος στόχος του προγράμματος ήταν ένα αερόπλοιο μήκους 200 m (VIA 200) (Εικ. 5), συνολικού βάρους 22 τόνων, με ικανότητα κράτησης θέσης σε υψόμετρο 20 km, με ανέμους έως 12 m/s, που μεταφέρει ένα 1.000 kg. ωφέλιμο φορτίο [21] - [35]. Πιθανές εφαρμογές θα ήταν το ρελέ επικοινωνίας και η επίγεια παρατήρηση. Το έργο έλαβε υποστήριξη από το Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Ενέργειας (MOCIE).

Το Korea Aerospace Research Institute (KARI) ολοκλήρωσε τη πρώτη φάση του Προγράμματος το 2004, με την ανάπτυξη ενός μη επανδρωμένου αερόπλοιου μήκους 50 μέτρων (VIA 50). Αυτό το αερόπλοιο είναι σε θέση να επιτύχει μέγιστο υψόμετρο 5 km και να μεταφέρει ωφέλιμο φορτίο 100 kg. [23] Επίσης σε αυτή την πρώτη φάση, ένα νέο υπόστεγο κατασκευάστηκε στο Goheung, στη νότια περιοχή της χώρας. Η πρώτη πτήση VIA 50 ήταν τον Οκτώβριο του 2003, στο Goheung [21].

Η δεύτερη φάση, για την ανάπτυξη του VIA 200, ξεκίνησε το 2004 αλλά σταμάτησε το 2005 [23]. Δεν υπάρχουν πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση του προγράμματος Stratospheric Airship στο KARI. Υπάρχει ένα έργο σε εξέλιξη στο KARI για την ανάπτυξη ενός μη επανδρωμένου αεροπλάνου ηλιακής ενέργειας για πτήσεις σε μεγάλο ύψος. Αυτό το ηλιακό UAV, EAV-3, παρόμοιο με το Zephyr 7, πραγματοποίησε πτήση έως και 14 χλμ. υψόμετρο τον Αύγουστο του 2015 [23].

• ZEPHYR



Σχήμα 2.6: Zephyr T and Zephyr S UAVs, Αεροσκάφος [23]

Η ανάπτυξη της οικογένειας UAV ηλιακών Zephyr σε μεγάλο υψόμετρο ξεκίνησε το 2001 [36]. Τον Ιούλιο του 2010, το Zephyr 7 (Εικ. 6), που αναπτύχθηκε από τη βρετανική εταιρεία QinetiQ, καθιέρωσε το τρέχον ρεκόρ αντοχής πτήσης των 336 ωρών και 21 λεπτών (14 ημέρες), πετώντας σε υψόμετρο περίπου 18 km σε μια περιοχή δοκιμών του αμερικανικού στρατού. στη Γιούμα της Αριζόνα [23]. Το Zephyr 7, με άνοιγμα φτερών 23 m, βάρος 55 κιλά και ωφέλιμο φορτίο 5 κιλά, έχει δύο έλικες που κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες και χρησιμοποιεί την ενέργεια από τα ηλιακά πάνελ την ημέρα και τις μπαταρίες λιθίου-θείου τη νύχτα [23]. Το 2013, η Astrium, επί του παρόντος Airbus Defense and Space, αγόρασε το Zephyr Project από την QinetiQ. Η Airbus αναπτύσσει την έκδοση Zephyr S (μονής ουράς), πρώην Zephyr 8, διατηρώντας το ωφέλιμο φορτίο στα 5 κιλά, αλλά με μεγαλύτερη αυτονομία με τη χρήση νέων ηλιακών κυψελών και μπαταριών και δομική μείωση βάρους [23]. Μια μελλοντική νέα έκδοση, η Zephyr T (twin-tail), θα έχει ωφέλιμο φορτίο 20 kg με αύξηση στο άνοιγμα των φτερών (Εικ. 8). Οι πτητικές δοκιμές ενός μοντέλου κλίμακας του Zephyr T ξεκίνησαν το 2016. Η πρώτη πτήση ενός Zephyr T πλήρους κλίμακας έχει προγραμματιστεί για το 2018 [23]. Τον Φεβρουάριο του 2016, η Airbus έλαβε από το Υπουργείο Άμυνας του Ηνωμένου Βασιλείου αίτημα για την παραγωγή και λειτουργία 2 Zephyr S, αξίας 13 εκατομμυρίων λιρών (περίπου 18 εκατομμύρια δολάρια), με προγραμματισμένες πτήσεις για το 2017 [23]. Αυτή είναι η πρώτη σύμβαση στον κόσμο για την παροχή λειτουργικού HAPS.

• HALE-D (HAA PROGRAM)

Ο στόχος του Προγράμματος του Αμερικανικού Στρατού Υψηλού Υψόμετρου (HAA), που ξεκίνησε το 2002, ήταν η ανάπτυξη ενός λειτουργικού συστήματος βασισμένου σε ένα αερόπλοιο μεγάλου υψόμετρου, ικανό να μεταφέρει ένα ωφέλιμο φορτίο (της τάξης των 907 έως 1.814 kg) σε ένα υψόμετρο. 20 χλμ για μήνες. Το έργο High Altitude Long Endurance Demonstrator (HALE-D), που ξεκίνησε το 2008, ήταν ένας επίδειξης τεχνολογίας HAA, με κύριο ανάδοχο τη Lockheed Martin [21]. Ο διαδηλωτής είχε μήκος 73 μ., συνολική μάζα 1.361 κιλά και ωφέλιμο φορτίο 36 κιλά. Σχεδιάστηκε για να διατηρεί πτήση σε ύψος 18 χλμ για 2 εβδομάδες. Η πρώτη και μοναδική πτήση HALE-D (Εικ. 7) πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2011 [37]. Σε αυτή την πτήση, το αερόπλοιο δεν ξεπέρασε το υψόμετρο των 10 km. Παρατηρήθηκε



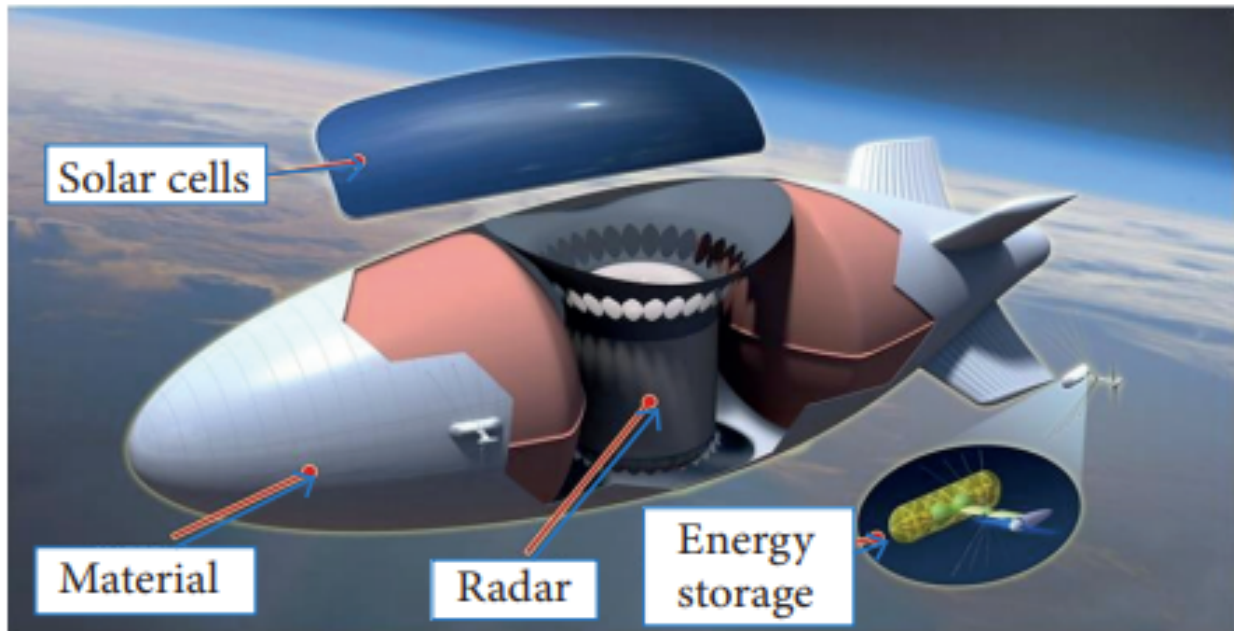
Σχήμα 2.7: HALE-D Αερόπλοιο, Lockheed Martin [23]

μια μείωση στον ρυθμό ανόδου, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει το αερόπλοιο για να εγκαταλείψει την απαγορευμένη περιοχή που ορίστηκε από την αμερικανική υπηρεσία ελέγχου εναέριας κυκλοφορίας (Federal Aviation Administration — FAA). Αποφασίστηκε να δοθεί εντολή έκτακτης ανάκτησης, με απελευθέρωση του αερίου ηλίου. Το αεροσκάφος κατέβηκε σε δέντρα, μετά από 2 ώρες και 40 λεπτά πτήσης. Κατά τη διάρκεια της επιχείρησης ανάκτησης, μετά την αφαίρεση του μεγαλύτερου μέρους του εξοπλισμού, βραχυκύκλωμα σε ηλιακούς συλλέκτες προκάλεσε φωτιά, καταστρέφοντας το αεροσκάφος. Από το ατύχημα δεν τραυματίστηκε κανένας. Μετά την ανάλυση ατυχήματος, επαληθεύτηκε ότι ο ρυθμός μείωσης της ανόδου προκλήθηκε από το πάγωμα στη βαλβίδα αέρα. Το πρόγραμμα ολοκληρώθηκε το 2011, χωρίς πρόβλεψη για κατανομή νέων πόρων του Υπουργείου Άμυνας [23]. Την περίοδο από το 2008 έως το 2012, το έργο HALE-D έλαβε 36,3 εκατομμύρια δολάρια (GAO 2012). Παρά το ατύχημα, που προκλήθηκε από αστοχία υποσυστήματος, οι εργασίες που πραγματοποιήθηκαν δείχνουν ότι είναι πολύ πιθανό το Έργο HALE-D να είναι επιτυχές σε περίπτωση που ξαναρχίσει [37].

• INTEGRATED SENSOR IS STRUCTURE

Το Integrated Sensor Is Structure (ISIS) είναι ένα κοινό πρόγραμμα της Αμερικανικής Πολεμικής Αεροπορίας (USAF) και του Οργανισμού Προηγμένων Ερευνητικών Έργων Άμυνας (DARPA) που ξεκίνησε το 2004 με στόχο την ενσωμάτωση ενός μεγάλου ραντάρ στη δομή ενός μη επανδρωμένου αερόπλοιου μεγάλου υψόμετρου. Η Lockheed Martin ήταν ο κύριος ανάδοχος για την ανάπτυξη αερόπλοιων και η Raytheon για την ανάπτυξη ραντάρ. Στην εκδοχή επίδειξης του, το αερόπλοιο θα είχε μήκος 156 μ., συνολική μάζα 15.876 κιλά και ωφέλιμο φορτίο 1.316 κιλά, ικανό να πετάξει σε υψόμετρο 20 χιλιομέτρων για ένα χρόνο. Στην τελική έκδοση (Εικ. 8), το αερόπλοιο του ISIS θα είχε μήκος 305 m, συνολική μάζα 152.861 kg και ωφέλιμο φορτίο 17.599 kg. Το πρόγραμμα αναδιαρθρώθηκε το 2012, ξεκινώντας να επικεντρώνεται σε δραστηριότητες μείωσης του αναπτυξιακού κινδύνου για υλικά φακέλων ραντάρ και αερόπλοιων. Το Πρόγραμμα ISIS χρησιμοποίησε διδάγματα από το Army HALE-D Project [38]. Από το 2007 έως το 2012, δαπανήθηκαν 471 εκατομμύρια δολάρια για το πρόγραμμα ISIS, συμπεριλαμβανομένων των ερευνητικών δραστηριοτήτων ραντάρ. Το πρόγραμμα ISIS έκλεισε το 2015. [23]

• SOLAREAGLE (VULTURE PROGRAM)

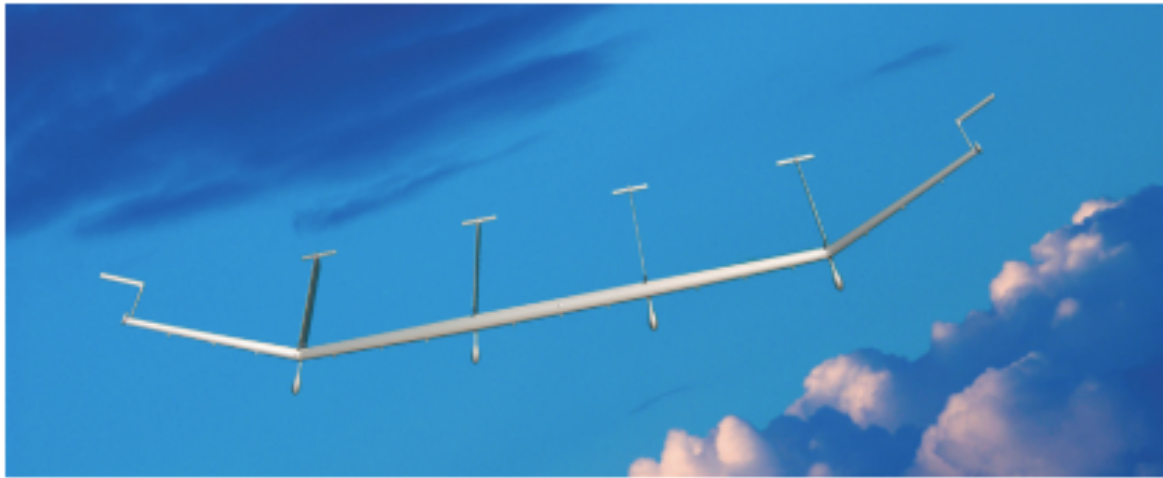


Σχήμα 2.8: ISIS Αερόπλοιο, Lockheed Martin, [23]

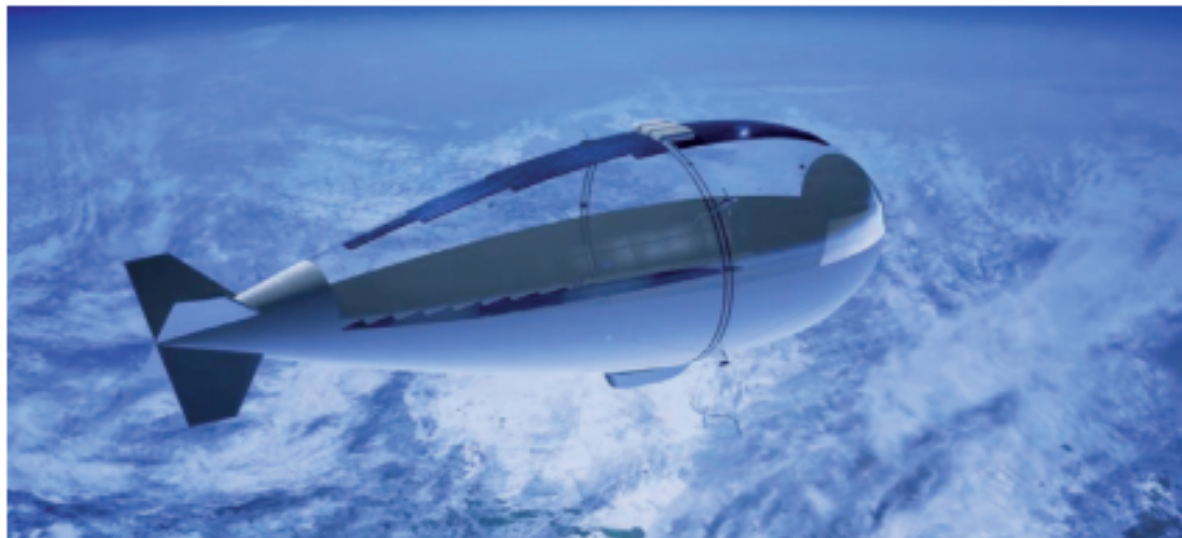
Το Πρόγραμμα Πολύ μεγάλου υψόμετρου, Ultra endurance, Loitering Theatre Unmanned Reconnaissance Element (Vulture), το οποίο συντονίστηκε από την DARPA, είχε ως σκοπό την ανάπτυξη ενός αεροπλάνου μεγάλου υψόμετρου με δυνατότητα παραμονής σε πτήση για 5 χρόνια, με ωφέλιμο φορτίο 454 kg, το οποίο καταναλώνει 5 kW. Αυτή η πλατφόρμα θα χρησιμοποιηθεί σε αποστολές πληροφοριών, επιτήρησης και αναγνώρισης (ISR) και επικοινωνιών [23].

Η πρώτη φάση του προγράμματος ξεκίνησε το 2008 με εννοιολογική σπουδών και διάρκειας 12 μηνών. Τρεις εταιρείες υπέγραψαν συμβόλαια για αυτή τη φάση: η Boeing (3,84 εκατομμύρια δολάρια), η Lockheed Martin (4,27 εκατομμύρια δολάρια) και η Aurora Flight Sciences (3,64 εκατομμύρια δολάρια) [23]. Η δεύτερη φάση (Risk Reduction Demonstration — RRD) ξεκίνησε το 2012 και περιελάμβανε την κατασκευή οχήματος υποκλίμακας, συμπεριλαμβανομένης της επίδειξης πτήσης διάρκειας 3 μηνών. Τρεις εταιρείες υπέβαλαν προτάσεις ηλιακών αεροπλάνων για τη δεύτερη φάση (Εικ. 9). Ο Οδυσσέας, που προτάθηκε από την Aurora, παρουσίασε ένα καινοτόμο concept. Τρία αεροσκάφη, το καθένα με άνοιγμα φτερών 49 m, θα απογειώνονταν χωριστά και θα ενώνονταν, από την άκρη του φτερού, για να σχηματίσουν ένα ενιαίο αεροσκάφος σε μεγάλο ύψος. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το αεροσκάφος θα έπαιρνε τη μορφή Z για να μεγιστοποιήσει τη δέσμευση ηλιακής ενέργειας. Τη νύχτα, το φτερό θα ήταν σε ευθεία μορφή για να ελαχιστοποιηθεί η αεροδυναμική αντίσταση. Η Boeing ήταν η νικήτρια που πραγματοποίησε τη δεύτερη φάση, με το άνοιγμα φτερών 122 m SolarEagle, σε συμβόλαιο 89 εκατομμυρίων δολαρίων. Η πρώτη πτήση είχε προγραμματιστεί για το 2014. Ο αρχικός εκτιμώμενος προϋπολογισμός της DARPA για τη Φάση 2 του Προγράμματος Vulture ήταν 155 εκατομμύρια δολάρια. [23]

Το 2012, το Πρόγραμμα Vulture αναδιαρθρώθηκε, με την ανάπτυξη του SolarEagle να διακόπτεται και να επικεντρώνεται μόνο σε τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας (Φωτοβολταϊκά κύτταρα) και αποθήκευσης ενέργειας (RFC). Δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με την παρούσα κατάσταση του προγράμματος Vulture και του έργου SolarEagle. [23]



Σχήμα 2.9: Vulture Πρόγραμμα — DARPA. Προτάσεις 2η φάση: Boeing (SolarEagle), Lockheed Martin, Aurora Συστήματα Πτήσεων [23]



Σχήμα 2.10: Stratobus Αερόπλοιο, Thales Alenia Space, [23]

• STRATOBUS

Οι μελέτες της τεχνικής ιδέας και του επιχειρηματικού μοντέλου του StratoBus Airship ξεκίνησαν στο Thales Alenia Space το 2010. Το StratoBus (Εικ. 10) είναι ένα στρατοσφαιρικό μη επανδρωμένο αερόπλοιο μήκους 100 m, με διάμετρο 33 m, συνολικό βάρος μικρότερο από 5.000 kg, με 250 kg και 5 kW διαθέσιμα για ωφέλιμο φορτίο. Το λειτουργικό υψόμετρο είναι 20 km, σε περιόδους πτήσης ενός έτους, περιορισμένη από στάσεις συντήρησης, που περιλαμβάνει ανεφοδιασμό αερίου ανύψωσης. Ο σχεδιασμός του StratoBus ενσωματώνει μερικές καινοτόμες λύσεις, όπως τη χρήση ενός διαφανούς τμήματος φακέλου που επιτρέπει την αντανάκλαση του ηλιακού φωτός σε καθρέφτες συγκεντρωτών που κατευθύνονται σε ηλιακούς συλλέκτες μέσα στο αερόπλοιο (πατέντα Thales Alenia Space). Αυτό επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους και του βάρους των ηλιακών συλλεκτών και επίσης προστατεύει τα ηλιακά κύτταρα από την υποβάθμιση που προκαλεί το στρατοσφαιρικό περιβάλλον. Μια άλλη καινοτομία είναι η χρήση ενός μεγάλου δακτυλίου που στερεώνει τους κινητήρες και τη γόνδολα του εξοπλισμού, επιτρέποντας στο αερόπλοιο να περιστρέφεται για καλύτερη δέσμη του ηλιακού φωτός. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η ηλεκτρική ενέργεια θα παρέχεται από RFC. [23]

Ο διαστημικός σχεδιασμός Thales Alenia είναι διάρκειας 2 ετών για την ανάπτυξη βασικών τεχνολογιών, όπως το υλικό φακέλων και το RFC, 2 χρόνια για την κατασκευή του πρώτου πρωτότυπου και ένα έτος για τις δοκιμές πτήσης. Η πρόβλεψη είναι ότι το προϊόν μπορεί να προσφερθεί στην αγορά μετά το 2020. Τον Απρίλιο του 2016, το έργο έλαβε επένδυση 17 εκατομμυρίων ευρώ (περίπου 19 εκατομμύρια δολάρια) από τη γαλλική κυβέρνηση για τη 2ετή φάση ανάπτυξης βασικών τεχνολογιών. Μια πτήση επίδειξης έχει προγραμματιστεί για το 2018). [23]

• PROJECT LOON

Το Project Loon, από την Google, ξεκίνησε το 2012 και έχει στόχο να δημιουργήσει ένα δίκτυο στρατοσφαιρικών μπαλονιών για την παροχή πρόσβασης στο Διαδίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές [23]. Κάθε μπαλόνι (Εικ. 11) είναι τύπου υπερπίεσης με διάμετρο 15 m. Ο έλεγχος υψομέτρου γίνεται με προσθήκη ή αφαίρεση αέρα μέσα στο μπαλόνι, με τη χρήση ανεμιστήρα. Με αυτό, είναι δυνατό να ε-



Σχήμα 2.11: Τρία Μπαλόνια από το Έργο Loon της Google, [23]

πιλέξετε υψόμετρα όπου ο άνεμος είναι σε κατάλληλη κατεύθυνση. Το ύψος πτήσης είναι περίπου 20 χιλιόμετρα, διαρκεί έως και 100 ημέρες, χρησιμοποιώντας ενέργεια από ηλιακούς συλλέκτες. Η ιδέα είναι να εκτοξευθεί ένας αστερισμός από πολλά μπαλόνια, που σχηματίζουν έναν δακτύλιο σε καθορισμένο γεωγραφικό πλάτος [23]. Έχουν διεξαχθεί αρκετές δοκιμές με την απελευθέρωση δεκάδων μπαλονιών, σε μέρη όπως η Νέα Ζηλανδία, η Αυστραλία και η βορειοανατολική Βραζιλία. Τον Φεβρουάριο του 2016, μετά από συμφωνία με την κυβέρνηση της Σρι Λάνκα, η Google ξεκίνησε δοκιμές για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο στη χώρα χρησιμοποιώντας τα μπαλόνια Project Loon, σε κοινή δουλειά με τοπικές εταιρείες λειτουργίας. Ένα άλλο σημαντικό γεγονός το 2016, στο Πουέρτο Ρίκο, ήταν η δοκιμή ενός γερανού αυτόματης εκτόξευσης που κατασκευάστηκε ειδικά για το έργο, που επέτρεψε την εκτόξευση ενός μπαλονιού σε μόλις 30 λεπτά. [23]

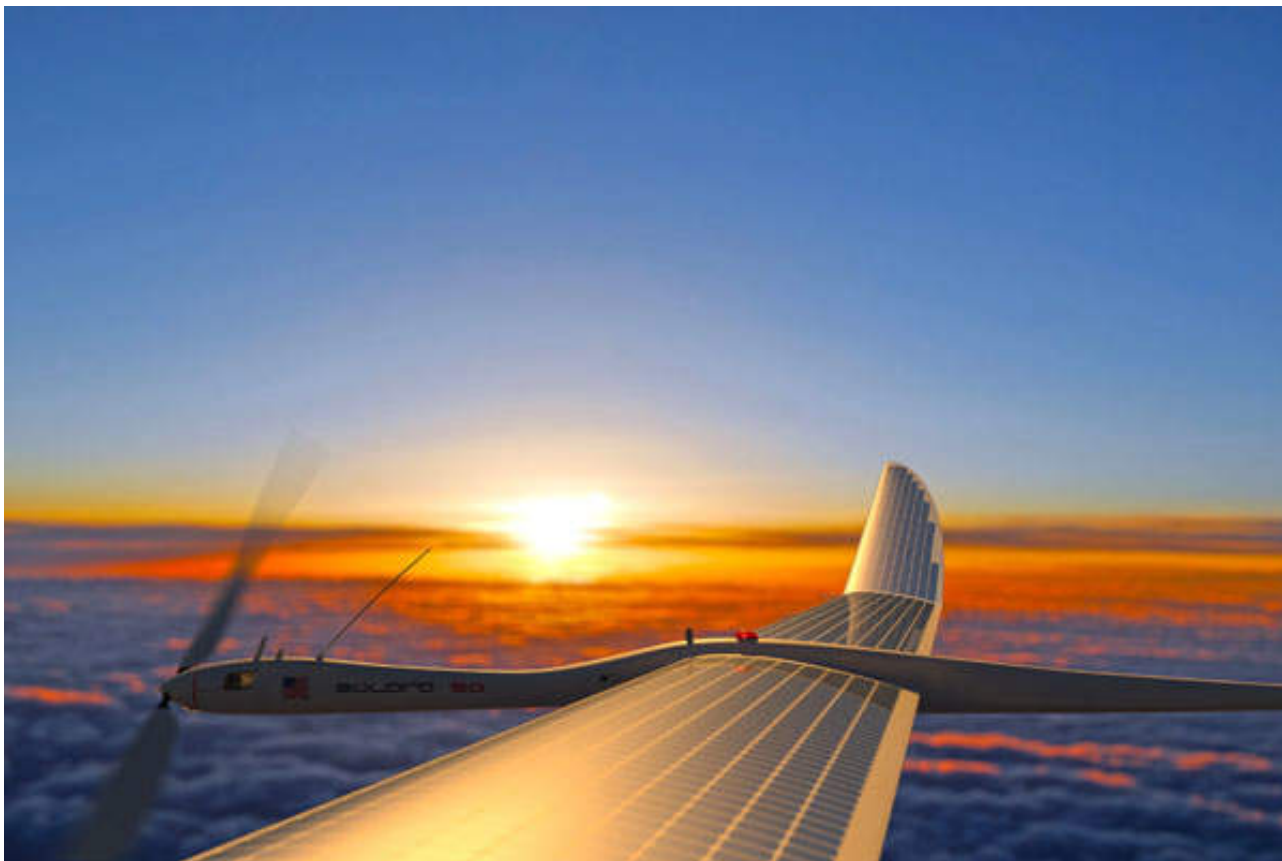
• SOLARA PROJECT

Τον Απρίλιο του 2014, η Google αγόρασε την αμερικανική εταιρεία Titan Aerospace, μια εταιρεία ανάπτυξης του UAV μεγάλου υψόμετρου Solara 50 (Εικ. 12). Το Solara 50 ανακοινώθηκε από την Titan Aerospace το 2013. Το αεροσκάφος έχει άνοιγμα φτερών 50 m και συνολικό βάρος 159 κιλά, με ωφέλιμο φορτίο 32 κιλά. Αναμένεται ότι το Solara 50 θα μπορεί να πετά σε 20 km για έως και 5 χρόνια [23].

Τον Μάιο του 2015, το πρωτότυπο του Solara 50 καταστράφηκε σε ένα ατύχημα στην πρώτη του πτήση, λίγο μετά την απογείωση, σε μια περιοχή δοκιμών στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ. Το ατύχημα προκλήθηκε από δομική αστοχία της πτέρυγας λόγω ρευμάτων αέρα (θερμικά) σε χαμηλό υψόμετρο. Η Google ανακοίνωσε ότι θα συνεχίσει την ανάπτυξη του Solara 50. [23]

• AQUILA

Τον Μάρτιο του 2014, το Facebook ανακοίνωσε την αγορά της βρετανικής εταιρείας Ascenta με προσωπικό που συμμετείχε στην ανάπτυξη του Zephyr στην QinetiQ, σε μια συμφωνία αξίας 20 εκατομμυρίων δολαρίων. Το UAV Aquila (Εικ. 13), που αναπτύσσεται από το Facebook, είναι ένα ιπτάμενο φτερό με άνοιγμα φτερών 42 m και συνολικό βάρος περίπου 400 κιλά. Το αεροσκάφος έχει τέσσερις έλικες που



Σχήμα 2.12: Solaris 50 Satellite, Aerospace Technology

κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες, με ισχύ που παρέχεται από ηλιακές κυψέλες κατά τη διάρκεια της ημέρας και επαναφορτιζόμενες μπαταρίες τη νύχτα. Το Aquila θα πετάξει μεταξύ 18 και 27 km υψόμετρο, για μια περίοδο 3 μηνών. Θα μεταφερθεί στη στρατόσφαιρα με ένα μπαλόνι ηλίου. Αναμένεται η χρήση σύνδεσης λέιζερ για να σχηματιστεί ένα δίκτυο επικοινωνιών υψηλής ταχύτητας. Σε περίπτωση παρεμπόδισης από σύννεφα, θα χρησιμοποιηθεί ασύρματη σύνδεση με κάποια μείωση του ρυθμού δεδομένων. Ένα μοντέλο σε κλίμακα 1:10 πραγματοποίησε πτητικές δοκιμές τον Μάρτιο του 2014, στο Ηνωμένο Βασίλειο [23]. Τον Φεβρουάριο του 2016, οι αρχές τηλεπικοινωνιών της Ινδίας αρνήθηκαν την άδεια στο Facebook για την ανάπτυξη της υπηρεσίας «Free Basics» στη χώρα, η οποία παρέχει δωρεάν πρόσβαση στο Διαδίκτυο, αλλά μόνο για ιστότοπους που επιλέγονται από την εταιρεία [39]. Σύμφωνα με το Facebook, αυτή η υπηρεσία θα συνδέει εκατομμύρια Ινδούς πολίτες χωρίς πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Δεν υπάρχουν πληροφορίες εάν αυτή η άρνηση θα επηρεάσει τα σχέδια του Facebook για την Aquila. [23]

- **Άλλα Έργα**

Εκτός από αυτά τα κύρια έργα HAPS που παρουσιάστηκαν παραπάνω, μπορούν να αναφερθούν αρκετά άλλα. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, υπάρχουν τρία έργα σε εξέλιξη για UAV μεσαίου και μεγάλου υψόμετρου, με στόχο την αυτονομία 1 εβδομάδας ή περισσότερο, χρησιμοποιώντας υδρογόνο ως καύσιμο: Global Observer (AeroVironment), Orion (Aurora Flight Sciences) και Phantom Eye (Boeing). Δύο έργα ελιγμών με αερόστατο υποστηρίχθηκαν από το Υπουργείο Άμυνας και τη NASA την περίοδο από το 2002 έως το 2010. Ωστόσο, είναι επί του παρόντος παράλυτοι: StarLight (Παγκόσμιες Υπηρεσίες Κοντά στο Διαστήματα) και Σύστημα Λεωφορείων Υψηλού Υψηλού (Near Space Corporation). Αυτά τα στρατοσφαιρικά μπαλόνια έχουν δυνατότητα ελέγχου που παρέχεται από ένα σύστημα πρόωσης που



Σχήμα 2.13: Aquila, Atmospheric Satellite, Facebook [23]

είναι εγκατεστημένο στη γόνδολα αναρτημένου ωφέλιμου φορτίου. Στο τέλος της διάρκειας της αποστολής, το ωφέλιμο φορτίο με τη μορφή αεροπλάνου διαχωρίζεται από τον φάκελο του μπαλονιού, ο οποίος απορρίπτεται και επιστρέφει στο έδαφος με ελεγχόμενη πτήση. [23]

Στην Ευρώπη, πολλά έργα που σχετίζονται με το HAPS πραγματοποιήθηκαν με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ιδιαίτερα την περίοδο 2002-2009. Το κύριο επίκεντρο αυτών των έργων ήταν η έρευνα σε θέματα τηλεπικοινωνιών. Παραδείγματα αυτών των έργων είναι τα HeliNet, CAPANINA, USEHAAS και COST297/HAPCOS (Grace and Mohorcic 2011). Στο έργο HeliNet, που ολοκληρώθηκε το 2003, το Politecnico di Torino εκπόνησε μελέτες για ένα στρατοσφαιρικό UAV με ονομασία HeliPlat με άνοιγμα φτερών 73 m, συνολική μάζα 815 kg και ωφέλιμο φορτίο 100 kg [40]. Το έργο Advanced Research in Telecommunications Systems (ARTES), από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA), που ολοκληρώθηκε το 2005, έκανε μια εκτίμηση ότι η ανάπτυξη 2 στρατοσφαιρικών πλατφορμών με ηλιακή ηλεκτρική πρόωση (αεροπλάνο και αερόπλοιο) θα απαιτούσε συνολικούς πόρους 270 εκατομμυρίων ευρώ (περίπου 302 εκατ. δολάρια), σε περίοδο 10 ετών [23]. Υπάρχουν ιδιωτικές εταιρείες με προτάσεις για έργα αερόπλοιων HAPS, αλλά χωρίς επιβεβαίωση της κατανομής οικονομικών πόρων για την ανάπτυξη αυτών των πρωτοβουλιών, όπως: STRATXX (Ελβετία), TAO Group (Γερμανία) και RosAeroSystems (Ρωσία).

2.2.4 Πλεονεκτήματα των HAPS

□ Πλεονεκτήματα και σύγκριση των HAPS σε σχέση με τα δορυφορικά δίκτυα

Στην παρούσα ενότητα, θα εξετάσουμε τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι Σταθερές Πλατφόρμες

Υψηλού Υψομέτρου (HAPS) σε σύγκριση με τους δορυφόρους στον τομέα των επικοινωνιών και των τηλεπικοινωνιών και σε σύγκριση με τα επίγεια δίκτυα. Τα HAPS αποτελούν μια εξελιγμένη τεχνολογία που ενδέχεται να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε αρκετούς τομείς, όπως περιοχές κάλυψης, ευκρίνεια, κόστος, και δυνατότητες εφαρμογής. Παρακάτω παρατίθενται τα πλεονεκτήματα των HAPS σε σχέση με τα δορυφορικά δίκτυα.

– Διάρκεια ορατότητας

Σε σύγκριση με τους δορυφόρους χαμηλής και μέσης γήινης τροχιάς, τα HAPS μπορούν να προσφέρουν διαρκή κάλυψη παρόμοια με εκείνη των γεωστατικών δορυφόρων. Τα HAPS μπορούν να διατηρήσουν σταθερότητα σε μεγάλο υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της Γης, παρέχοντας εκτεταμένη κάλυψη που μπορεί να εξυπηρετήσει τεράστιες γεωγραφικές περιοχές 24 ώρες το 24ωρο, σε αντίθεση π.χ. με τους LEO δορυφόρους, που έχουν ορατότητα διάρκειας λίγων λεπτών και ανάγκη μεταπομπής της σύνδεσης σε γειτονικό LEO δορυφόρο για την κάλυψη μίας συγκεκριμένης περιοχής στο χάρτη.

– Χαμηλότερος Χρόνος Καθυστέρησης (Latency)

Λόγω της χαμηλότερης ύψωσης των HAPS πάνω από τη Γη σε σύγκριση με τους δορυφόρους, ο χρόνος καθυστέρησης (latency) στις επικοινωνίες μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερος. Αυτό καθιστά τα HAPS κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση, όπως τηλεϊατρική, online gaming και τηλεεκπαίδευση.

– Χαμηλότερο Κόστος Εγκατάστασης και Συντήρησης

Η εγκατάσταση και η συντήρηση των HAPS είναι συνήθως πιο οικονομικές σε σύγκριση με τους δορυφόρους. Οι δορυφόροι απαιτούν υψηλό κόστος εκτόξευσης και συντήρησης στο διάστημα, ενώ τα HAPS μπορούν να τοποθετηθούν και να συντηρηθούν πιο οικονομικά.

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα των HAPS έναντι των δορυφόρων είναι πολλαπλά και καταδεικνύουν την αξία της αυξανόμενης χρήσης της τεχνολογίας HAPS σε εφαρμογές επικοινωνιών και τηλεπικοινωνιών. Στις επόμενες, θα εξετάσουμε περαιτέρω τις τεχνολογικές πτυχές και τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση των HAPS.

□ Πλεονεκτήματα σε σχέση με τα επίγεια δίκτυα

Η υπόσχεση των HAPS ως κύριο συστατικό της αρχιτεκτονικής ασύρματων δικτύων μπορεί να παρατεθεί ως εξής σύμφωνα με το [41].

– Ευνοϊκές συνθήκες καναλιών

Το HAPS αναμένεται να απέχει μόλις 20 χλμ. με συνδέσεις οπτικής επαφής (LoS). Αυτή η απόσταση, σε συνδυασμό με την υψηλή πιθανότητα των καναλιών LoS παρέχει μια σχετικά χαμηλή εξασθένηση καναλιού. Ως εκ τούτου, είναι δυνατή μια άμεση σύνδεση με το επίγειο UE. Σε χαμηλό υψόμετρο, σε σύγκριση με τους δορυφόρους LEO που βρίσκονται σε απόσταση 400 km έως 2000 km, αυτό παρέχει έναν πολύ πιο ευνοϊκό προϋπολογισμό σύνδεσης. Όσον αφορά την κατερχόμενη ζεύξη, οι αντίστοιχες ευνοϊκές συνθήκες καναλιού παρέχουν υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) για την κατερχόμενη ζεύξη και κάλυψη πλεονέκτημα, μεταξύ άλλων και για πολυκατοικημένες περιοχές.

– (Σχεδόν) Γεωστατικές θέσεις

Η θέση ενός HAPS είναι σχετικά ακίνητη. Αυτό σημαίνει ότι η χωρητικότητα δεν σπαταλιέται με την περιφορά σε μη κατοικημένες περιοχές (π.χ. ωκεανούς), ενώ ανά πάσα στιγμή μπορεί να ενεργοποιηθεί η συνδεσιμότητα από την ίδια τοποθεσία. Η σταθερή κατάσταση ενός HAPS αποφεύγει την εισαγωγή μιας σημαντικής μετατόπισης Doppler. Επιπλέον, δεν απαιτείται παρακολούθηση των συσκευών. Η σταθερότητα ενός HAPS παρέχει επίσης τη βάση για έναν κύριο κόμβο διαχείρισης κινητικότητας, ο οποίος μπορεί να συμβάλει στη διαχείριση μεταβίβασης.

– **Μικρότερο αποτύπωμα σε σύγκριση με τους δορυφορικούς κόμβους**

Το μικρότερο αποτύπωμα λόγω χαμηλότερου υψομέτρου, σε σύγκριση με τους δορυφορικούς κόμβους, παρέχει υψηλότερη απόδοση περιοχής και βελτιωμένη ικανότητα χρήσης πόρων.

– **Μεγάλη πλατφόρμα**

Ένα HAPS μπορεί να είναι μεγαλύτερο από ένα μεγάλο κτίριο και σύμφωνα με τις συστάσεις του προτύπου ITU, η θέση του πρέπει να διατηρείται σε έναν κύλινδρο με ακτίνα 400 m και ύψος ± 700 m [42]. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλο για συστήματα πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO) και μαζική-MIMO (M-MIMO). Σε συνδυασμό με τα κύματα χιλιοστού (mmWave), είναι δυνατές πολύ στενές δέσμες που βελτιώνουν τον λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR) για όλους τους χρήστες. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η χρήση ενός HAPS για την κάλυψη ακόμη και ενός προσωρινού hot spot στο έδαφος. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου μεγέθους ενός HAPS, μπορεί να εξοπλιστεί με φαδιά ηλιακά πάνελ και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας για να το διατηρήσει με την ενέργεια που χρειάζεται.

– **Ακόμη χαμηλότερη καθυστέρηση**

Το σχετικά χαμηλό υψόμετρο ενός HAPS παρέχει επίσης μια απόσταση μετ' επιστροφής 40 km έως 100 km, η οποία αντιστοιχεί σε καθυστέρηση μετ' επιστροφής 0,13 ms έως 0,33 ms. Ως εκ τούτου, η συνδεσιμότητα που βασίζεται στο HAPS δεν υποφέρει από τα προβλήματα υψηλής καθυστέρησης των δορυφορικών δικτύων, γεγονός που καθιστά ένα HAPS κατάλληλο για εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης.

– **Υβριδική συνδεσιμότητα**

Η ITU έχει ήδη αφιερώσει 600 MHz φάσματος για HAPS [43]. Εκτός από την αποκλειστική ζώνη και τις επίγειες κυψελοειδείς ζώνες, το FSO είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική για την παροχή πολυσυνδεσιμότητας σε ισχυρά και/ή συστήματα επικοινωνίας με υψηλό ρυθμό δεδομένων. Μια κορυφαία λύση είναι η γενίκευση των συνδέσεων ραδιοσυχνότητας πολλαπλών ζωνών (RF) με υβριδικές συνδέσεις RFFSO. Αυτή η προσέγγιση θα προκαλέσει μια αλλαγή της κλασικής αρχιτεκτονικής ραδιοπρόσβασης σε ένα πιο γενικευμένο πρότυπο αρχιτεκτονικής ασύρματης πρόσβασης.

2.2.5 Περιπτώσεις χρήσης των HAPS

Τα High Altitude Platform Stations (HAPS) αναδύονται ως μια σημαντική τεχνολογία με ευρεία εφαρμογή σε ποικίλους τομείς. Από την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μέχρι την επιστημονική έρευνα, οι περιπτώσεις χρήσεων των HAPS έχουν αναπτυχθεί με γοργούς ρυθμούς. Στην παρούσα υποενότητα θα εξετάσουμε μερικές από τις πιο σημαντικές και καινοτόμες περιπτώσεις χρήσεων των HAPS σε διάφορους τομείς.

Ένας από τους βασικούς τομείς όπου τα HAPS έχουν επαναστατήσει τη χρήση τους είναι οι τηλεπικοινωνίες. Σε περιοχές με περιορισμένη υποδομή τηλεπικοινωνιών, όπως απομακρυσμένες περιοχές και ακατοίκητα νη-

σιά, τα HAPS μπορούν να λειτουργήσουν ως επίγειες σταθμοί βάσεων, παρέχοντας ευρεία κάλυψη και υψηλές ταχύτητες στη σύνδεση. Επιπλέον, σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών όπου η επίγεια υποδομή έχει καταρρεύσει, τα HAPS μπορούν να ανακουφίσουν την έλλειψη επικοινωνίας, παρέχοντας σημαντική βοήθεια στις δραστηριότητες διάσωσης και ανακούφισης. Τα HAPS εξυπηρετούν επίσης καλά σε περιοχές με χαμηλό πληθυσμό π.χ. νησιά, ωκεανοί, αναπτυσσόμενες πόλεις κ.λπ. όπου το κόστος ανά συνδρομητή σε επίγεια συστήματα θα είναι πολύ υψηλό για τις χαμηλές πυκνότητες κυκλοφορίας λόγω των σημείων πρόσβασης που απαιτούνται για την κάλυψη αυτών των περιοχών. Οι υπηρεσίες επικοινωνίας που παρέχονται από τα HAPS χωρίζονται ευρέως σε υπηρεσίες χαμηλού ρυθμού δεδομένων για τερματικά κινητής τηλεφωνίας και υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας δεδομένων για σταθερά τερματικά. Σύμφωνα με το [44] μερικές από αυτές παρατίθενται παρακάτω.

- Ένας σταθμός βάσης HAPS εξοπλισμένος με κεραία ευρείας δέσμης ή με μια σειρά από κατευθυντικές κεραίες που καλύπτουν μικρότερες κυψέλες μπορεί να εξυπηρετήσει μια πολύ μεγάλη περιοχή, με ελλιπή ή περιορισμένη επίγεια υποδομή.
- Τα HAPS μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα για να παρέχουν επιπλέον κάλυψη υπηρεσιών σε περίπτωση καταστροφής π.χ. σεισμός, πλημμύρα, κ.λπ., ως αποκατάσταση μετά από αστοχία σε ένα κεντρικό δίκτυο ή ως γρήγορο, και ίσως ως προσωρινό, μέσο διασφάλισης συνεχούς, ποιοτικής υπηρεσίας σε περίπτωση ξαφνικής και προσωρινής αύξησης της τηλεκίνησης π.χ. ως αποτέλεσμα της εισροής τουριστών σε ένα συγκεκριμένο μέρος.
- Τα HAPS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη μιας εκδήλωσης, όπως μια μεγάλη αθλητική εκδήλωση ή μια ποπ συναυλία για την οποία η κατασκευή και η εγκατάσταση επίγειων συστημάτων θα είναι δαπανηρή και αντισυμβατική.
- Τα HAPS μπορούν να διαδραματίσουν ενεργό ρόλο στα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (GNSS) ως σύστημα αύξησης του GPS για την παροχή πλοήγησης και εντοπισμού θέσης.
- Τα HAPS μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς τηλεπισκόπησης και παρατήρησης/παρακολούθησης καιρού.
- Εκτός από το γεγονός ότι τα HAPS μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα, απαιτούν μόνο περιορισμένη ισχύ μετάδοσης λόγω της σχετικά κοντινής τους εμβέλειας και το περίβλημά τους είναι επίσης σε μεγάλο βαθμό διαφανές στα μικροκύματα παρά τον όγκο. Έτσι παρουσιάζουν πολύ χαμηλή διατομή ραντάρ. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν πολύ ελκυστικά για στρατιωτικές εφαρμογές όπως η αναγνώριση, οι επιχειρήσεις εκκαθάρισης ναρκών και οι επικοινωνίες για τις οποίες είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η χαμηλή πιθανότητα αναχαίτισης (LPI).

Τα High Altitude Platform Stations ανοίγουν νέους ορίζοντες στην τεχνολογία και τις εφαρμογές. Μέσω μιας ποικιλίας περιπτώσεων χρήσεων, από την ενίσχυση των τηλεπικοινωνιών μέχρι την περιβαλλοντική παρακολούθηση και τη διεξαγωγή επιστημονικής έρευνας, τα HAPS αναδεικνύονται ως ισχυρά εργαλεία για την αντιμετώπιση προκλήσεων και την παροχή καινοτόμων λύσεων σε παγκόσμια προβλήματα.

2.2.6 Τεχνολογικές προκλήσεις

Τα High Altitude Platform Stations (HAPS) αντιπροσωπεύουν μια επαναστατική τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να επιφέρει σημαντικές αλλαγές σε πολλούς τομείς. Με την ανάπτυξη και την επέκταση της χρήσης των

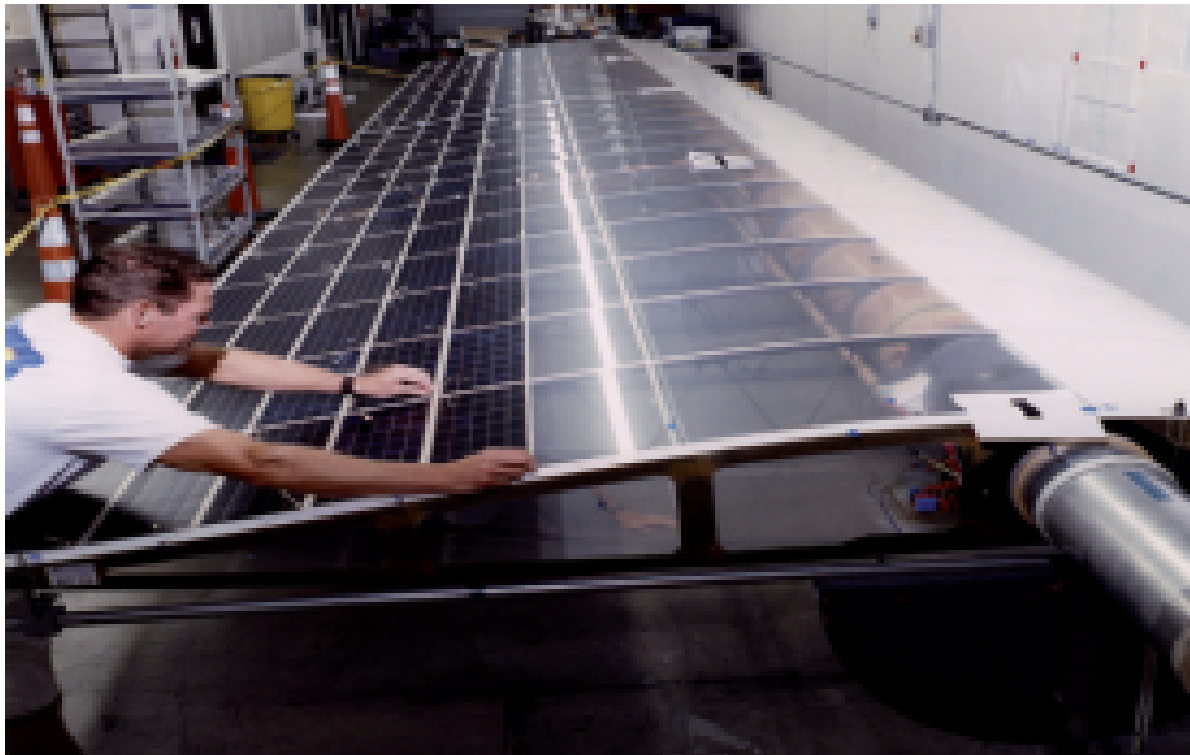
HAPS, υπάρχουν επίσης τεχνολογικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Στην παρούσα υποενότητα, θα διερευνήσουμε τις τεχνολογικές προκλήσεις που συνδέονται με τα HAPS και θα εξετάσουμε τις προοπτικές για το μέλλον της τεχνολογίας αυτής.

• Ελαφριές Κατασκευές

Σε υψόμετρο 20 km, χαρακτηριστικό της λειτουργίας των HAPS, ο αέρας είναι αραιωμένος, με πυκνότητα περίπου 7 τοις εκατό της στάθμης της θάλασσας. Καθώς η ανύψωση, αεροδυναμική και αεροστατική, η οποία εξουδετερώνει το βάρος του αεροσκάφους, είναι ευθέως ανάλογη με την πυκνότητα του αέρα, την περιοχή των φτερών στην περίπτωση των αεροπλάνων και τον όγκο στην περίπτωση αερόπλοιων και μπαλονιών, σχεδιασμένων να λειτουργούν ως HAPS, πρέπει να είναι περίπου 14 φορές μεγαλύτερο από ό,τι εάν το αεροσκάφος είχε διαστάσεις στις συνθήκες της επιφάνειας της θάλασσας, λαμβάνοντας υπόψη τα ίδια χαρακτηριστικά σχεδιασμού, όπως το συνολικό βάρος, το αεροδυναμικό σχήμα και την ταχύτητα λειτουργίας. Αυτές οι μεγάλες διαστάσεις οδηγούν σε πολύ σοβαρές απαιτήσεις βελτιστοποίησης του δομικού βάρους των HAPS. Στην περίπτωση αερόπλοιων και μπαλονιών, το υλικό του φακέλου πρέπει να έχει χαρακτηριστικά χαμηλού βάρους, υψηλή αντοχή, υψηλή ικανότητα αντοχής σε ζημιές (σκίσιμο, οπές καρφίτσας), χαμηλή διαπερατότητα στο ανυψωτικό αέριο, διατήρηση ευελιξίας σε χαμηλή θερμοκρασία και χαμηλή υποβάθμιση με υπεριώδη ακτινοβολία και όζον [45]. Συνήθως χρησιμοποιείται ελασματοποιημένο με εξωτερικό στρώμα, για προστασία του περιβάλλοντος και συγκράτηση αερίου, και εσωτερικές ίνες, για δομική αντοχή, ενώνονται με συγκολλητικό στρώμα. Ένα τυπικό πολυστρωματικό υλικό HAPS έχει πάχος 0,16 mm και πυκνότητα ανά περιοχή 130 g/m². [46]. Ως παράδειγμα της σημασίας της χρήσης προηγμένων υλικών για το περίβλημα αερόπλοιων μεγάλου υψομέτρου, μπορεί να αναφερθεί ότι το Ιαπωνικό Έργο SPF υπολόγισε ότι η μάζα της δομής αντιστοιχεί στο 52 τοις εκατό της συνολικής μάζας αερόπλοιων [20]. Επίσης για τα HAPS της κατηγορίας αεροπλάνων, οι ελαφριές κατασκευές είναι απαραίτητες. Μια τυπική κατασκευή πτερυγίων ενός αεροπλάνου HAPS, όπως το Helios (Σχήμα 2.14), από την AeroVironment, αποτελείται από σωληνοειδές ράβδο και νευρώσεις που χρησιμοποιούν σύνθετο υλικό (ανθρακόνημα), άκαμπτο αφρώδες άκρο και δέρμα από πλαστικό φιλμ [32]. Το βάρος των διαφόρων εξαρτημάτων ενός αεροπλάνου HAPS κατανέμεται κατά μήκος του ανοίγματος των φτερών για να μειωθεί η δομική πίεση στο φτερό. Για παράδειγμα, στο Zephyr, οι μπαταρίες είναι εγκατεστημένες στο φτερό [36]. Μία από τις τεχνολογίες που απαιτούνται για το σχεδιασμό αυτών των μεγάλων και πολύ ευέλικτων πτερυγίων είναι η ανάλυση αεροελαστικών φαινομένων, όπως το πτερυγισμό, και η επιρροή του στη σταθερότητα και τον έλεγχο του αεροπλάνου.

• Παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας

Όπως κάθε αεροσκάφος, έτσι και τα αεροσκάφη HAPS χρειάζονται μια πηγή ενέργειας για το σύστημα πρόωσης και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα και το ωφέλιμο φορτίο τους. Τα σχέδια HAPS με στόχο την επίτευξη πολύ μεγάλης διάρκειας ζωής, σε της τάξης των μηνών ή και ετών, εμποδίζουν τη χρήση πηγών ενέργειας που βασίζονται στα παραδοσιακά αεροπορικά καύσιμα, όπως avgas (αεροπορική βενζίνη) ή jet (αεροπορική κηροζίνη), και άλλα λιγότερο συνηθισμένα καύσιμα, όπως το ντίζελ ή τουδρογόνο. Η πυρηνική ενέργεια είναι μια τεχνικά εφικτή λύση, αλλά πολιτικά μη αποδεκτή από την κοινωνία, λόγω των σχετικών κινδύνων [47]. Η δυνατότητα μετάδοσης ισχύος στο αεροσκάφος από το έδαφος σταθμοί, μέσω μικροκυμάτων ή λέιζερ, έχει μελετηθεί, αλλά απέχει ακόμη πολύ από το να είναι λειτουργικά βιώσιμος [48]. Επί του παρόντος, η κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας που εξετάζεται για τα HAPS είναι ο Ήλιος [49].



Σχήμα 2.14: Κατασκευή πτερυγίων του Helios [4].

Η πιο συχνά υιοθετούμενη λύση για πολύ μεγάλες αντοχές HAPS είναι, κατά τη διάρκεια της ημέρας, η ηλιακή ενέργεια που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών κυψελών (ηλιακών κυψελών), και μέρος αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για τη φόρτιση ενός συστήματος αποθήκευσης, συνήθως επαναφορτιζόμενου μπαταρίες ή RFC για μεταγενέστερη χρήση τη νύχτα [50]).

Η χρήση RFC σε HAPS, αν και με πολλά υποσχόμενα πλεονεκτήματα, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες τεχνολογικές προκλήσεις. Στην Ιαπωνία, η έρευνα για το αερόπλοιο SPF που ορίζεται ως στόχος για το σύστημα RFC την επίτευξη ειδικής ενέργειας 450 Wh/kg. Τα τρέχοντα συστήματα έχουν ειδική ενέργεια 350 Wh/kg [34].

- **Λειτουργία σε χαμηλό υψόμετρο**

Τα σχέδια HAPS, τόσο τα αεροπλάνα όσο και τα αερόπλοια, είναι βελτιστοποιημένα για τις συνθήκες της στρατόσφαιρας, σε υψόμετρο κοντά στα 20 χιλιόμετρα, όπου το λεπτό αέρας είναι σχετικά ήρεμος και η ταχύτητα του ανέμου χαμηλή [51]. Καθώς το αποτέλεσμα, τα HAPS έχουν συστήματα πρόωσης χαμηλής ισχύος και ελαφριά και εύθραυστα δομές, σε σύγκριση με τα αεροσκάφη που έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε χαμηλότερα υψόμετρα. Οι ισχυροί άνεμοι και οι αναταράξεις που απαντώνται στην τροπόσφαιρα μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια του HAPS, όπως τα ατυχήματα του Helios το 2003 και του Solara 50 το 2015. Ως εκ τούτου, ένα σημαντικό σημείο των HAPS λειτουργία σε χαμηλό ύψος, ιδίως στις φάσεις της εκτόξευσης και της ανάκτησης, είναι η επιλογή των καιρικών παραθύρων όπου οι καιρικές συνθήκες είναι κατάλληλες [52]. Ένα παράδειγμα αυτών των περιορισμών είναι ότι, για τη λειτουργία του Zephyr, επιλέγονται ήρεμες καιρικές συνθήκες, όπως αυτές που συναντώνται σε περιοχές της ερήμου [36]. Ο τομέας των τεχνολογιών για την πρόγνωση του καιρού στην περιοχή επιχειρήσεων

και για την προσομοίωση της τροχιάς του αεροσκάφους στις συνθήκες που συναντώνται σε χαμηλές υψόμετρο είναι απαραίτητη για την επιτυχή λειτουργία των HAPS.

Μια άλλη σημαντική πτυχή που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις επιχειρήσεις HAPS είναι ο συντονισμός με τους οργανισμούς ελέγχου του εναέριου χώρου. Οι περισσότεροι του χρόνου πτήσης ενός HAPS βρίσκεται πάνω από το όριο υψομέτρου ελέγχου του εναέριου χώρου, που συνήθως ορίζεται στα 20 km (65.000 ft). Η εκτόξευση και η ανάκτηση οι οποίες πραγματοποιούνται σε χαμηλότερα ύψη, πρέπει να σχεδιάζονται σε συνεργασία με την υπηρεσία ελέγχου του εναέριου χώρου, με τον ορισμό συγκεκριμένων διαχωρισμένων περιοχών για την εν λόγω λειτουργία. Η ενσωμάτωση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε μη διαχωρισμένο εναέριο χώρο είναι ένα θέμα που δεν έχει ακόμη ρυθμίζεται, κυρίως λόγω του ζητήματος της αποφυγής αεροπορικών συγκρούσεων ("sense και αποφυγή"). Πτυχές στο πεδίο του διεθνούς δικαίου που σχετίζονται με την υπερπτήση άλλων χωρών πρέπει επίσης να αναλυθούν. [23]

- **Θερμική Διαχείριση**

Τα αεροσκάφη ελαφρύτερα από τον αέρα (LTA) επηρεάζονται άμεσα από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αερίου ανύψωσης και του εξωτερικής ατμόσφαιρας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπερθέρμανση, όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αερίου είναι υψηλότερη από εκείνη της εξωτερικής αέρα, ή υπερθέρμανση, στην αντίθετη περίπτωση [53]. Αυτό το διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, η αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης ή τα σύννεφα (albedo), η διαστολή του αερίου ανύψωσης κατά την ανάβαση ή συμπίεση κατά την κάθοδο, αλλαγές στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας (ημέρα/νύχτα) και η θέρμανση που προκαλείται από τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων [54]. Η επίδραση μπορεί να είναι στην αεροστατική δύναμη ανύψωσης ή στην εσωτερική πίεση, στην περίπτωση των αερόπλοιων υπερπίεσης. Η θερμική διαχείριση των αερόπλοιων HAPS, συμπεριλαμβανομένης της μαθηματικής μοντελοποίησης του θερμικού ισοζυγίου και της χρήσης μονωτικών υλικών, είναι μία τεχνολογία που πρέπει να εντατικοποιηθεί [55].

- **Αξιοπιστία**

Λειτουργία HAPS με μεγάλες περιόδους πτήσης, για μήνες ή ακόμη και χρόνια, απαιτεί εξοπλισμό με υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας [56]. Κατά τον ορισμό του εξοπλισμού HAPS, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ότι το περιβάλλον στη στρατόσφαιρα έχει πτυχές παρόμοιες με του διαστήματος, όπως πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έντονοι κύκλοι θερμοκρασίας (ημέρα/νύχτα) και έντονη ηλιακή ακτινοβολία και υπεριώδης ακτινοβολία. Ένα άλλο σημαντικό σημείο είναι ότι η χαμηλή πίεση σε μεγάλα υψόμετρα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα τόσο σε ηλεκτρικές σε ηλεκτρικά εξαρτήματα [57]. Για ένα λειτουργικό HAPS, είναι πιθανό να υιοθετηθούν διαστημικοί εξοπλισμοί και εξαρτήματα, συνήθως πολύ υψηλού κόστους. Τα ζητήματα υψηλής αξιοπιστίας πρέπει να εφαρμόζονται ακόμη και στο σύστημα HAPS στο σύνολό του, συμπεριλαμβανομένων των επίγειων σταθμών και τη ζεύξη δεδομένων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της αξιοπιστίας, όπως ανάλυση του τρόπου λειτουργίας, των επιπτώσεων και της κρισιμότητας (FMECA), θα πρέπει να πρέπει να προσαρμοστούν στην ειδική περίπτωση των συστημάτων HAPS.

2.2.7 Προοπτικές για το μέλλον

- **Βελτιώσεις στην Τεχνολογία Ενέργειας**

Τα HAPS αντιμετωπίζουν προκλήσεις σχετικά με την παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας σε υψηλά υψόμετρα. Μελλοντικές προοπτικές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών που θα βελτιώσουν την αποδοτικότητα των συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει:

Φωτοβολταϊκά Συστήματα Υψηλής Απόδοσης: Η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστημάτων με βελτιωμένη απόδοση σε χαμηλό φωτισμό και υψηλά υψόμετρα θα επιτρέψει στα HAPS να παράγουν ενέργεια από τον ηλιακό φωτισμό ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες.

Αποθήκευση Ενέργειας: Η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, όπως υβριδικά συστήματα μπαταριών και υδρογόνου, θα επιτρέψει στα HAPS να αποθηκεύουν την παραγόμενη ενέργεια και να τη χρησιμοποιούν όταν απαιτείται.

- **Αυξημένη Ευστάθεια και Ασφάλεια**

Στο μέλλον, η τεχνολογική εξέλιξη θα επικεντρωθεί στη βελτίωση της ευστάθειας και της ασφάλειας των HAPS κατά τη διάρκεια των πτήσεών τους. Η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων ελέγχου και σταθεροποίησης θα επιτρέψει στα HAPS να ανταπεξέλθουν σε μεταβολές των καιρικών συνθηκών και να διατηρήσουν σταθερή πτήση σε υψηλά υψόμετρα. Η χρήση προηγμένων αισθητήρων και συστημάτων πρόβλεψης μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα των HAPS να προσαρμόζονται σε αλλαγές στο περιβάλλον τους.

- **Εξελίξεις στην Επικοινωνία**

Ο τομέας της επικοινωνίας για τα HAPS έχει τεράστιες προοπτικές για ανάπτυξη. Στο μέλλον, αναμένεται η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων επικοινωνίας που θα προσφέρουν υψηλές ταχύτητες και αξιοπιστία, ανεξάρτητα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η χρήση προηγμένων τεχνολογιών δορυφορικών επικοινωνιών, λέιζερ και ραδιοεπικοινωνιακών συστημάτων μπορεί να επιτρέψει την αξιόπιστη επικοινωνία με τα HAPS ανεξάρτητα από τις δυσμενείς συνθήκες.

Οι προοπτικές για το μέλλον των High Altitude Platform Stations είναι λαμπρές, καθώς η τεχνολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει νέες και καινοτόμες λύσεις σε πολλούς τομείς, από την τηλεπικοινωνία έως την περιβαλλοντική παρακολούθηση και την έρευνα.

- **Αυτοματοποίηση και AI**

Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης θα επιτρέψει την αυτόνομη διαχείριση και τον έλεγχο των πλατφορμών, προσφέροντας καλύτερες υπηρεσίες και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα.

- **Πολυδυναμική χρήση**

Στο μέλλον, τα HAPS μπορεί να ενσωματώνουν διάφορες τεχνολογίες και να υποστηρίζουν πολλαπλές εφαρμογές, όπως είναι οι παρατηρήσεις της Γης, η κυκλοφορία ενημέρωσης, και οι τηλεπικοινωνίες.

2.3 Επίλογος

Συμπερασματικά, τα HAPS είναι ένας συναρπαστικός και προοδευτικός τομέας των τηλεπικοινωνιών, που έχει την δυνατότητα να παρέχει σημαντικές υπηρεσίες και να προσφέρει λύσεις σε δύσκολα προβλήματα τηλεπικοινωνιακής κάλυψης. Ωστόσο, παρά την εκτεταμένη βιβλιογραφία για τα HAPS, δεν φαίνεται να υπάρχει μια έρευνα που συγκρίνει αποτελεσματικά τους διάφορους τύπους των HAPS. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό κενό στην βιβλιογραφία, το οποίο θα αποτελέσει το επίκεντρο της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 3ο: High Altitude Platform Systems (HAPS)

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, θα εισέλθουμε στον ενδιαφέροντα κόσμο των High Altitude Platform Stations (HAPS). Τα HAPS αποτελούν μια πρωτοποριακή τεχνολογία που προσφέρει μια εναλλακτική λύση στα συμβατικά δίκτυα επίγειων και δορυφορικών επικοινωνιών. Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των δύο, προσφέρουν υπηρεσίες επικοινωνίας σε περιοχές όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι είναι δυσχερείς ή ανεφάρμοστες.

Για την αποτελεσματική αξιολόγηση και υλοποίηση των HAPS, είναι απαραίτητο να οριστούν σαφή κριτήρια σύγκρισης που θα επιτρέψουν την κατανόηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών τους. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλύσουμε τα βασικά κριτήρια σύγκρισης των HAPS και πώς αυτά συνδέονται με τις πρακτικές εφαρμογές τους, θα πραγματοποιήσουμε τη σύγκριση των HAPS με τους LEO δορυφόρους και θα αναφέρουμε τις διαφορές των HAPS και των UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) όσον αφορά τις δυνατότητες ωφέλιμου φορτίου επικοινωνίας και τις κατάλληλες εφαρμογές σύμφωνα με το [58].

Τέλος, η αξιοποίηση των HAPS σε πραγματικές συνθήκες απαιτεί την κατανόηση των ενεργειακών τους αναγκών. Σε αυτό το πλαίσιο, θα παρουσιάσουμε ένα μοντέλο υπολογισμού ισχύος για τα HAPS, το οποίο θα συμβάλλει στην κατανόηση της ενεργειακής τους απόδοσης και στη βελτιστοποίηση των συστημάτων τους.

Με την εξέταση αυτών των τριών βασικών στοιχείων - των HAPS ως τεχνολογίας, των κριτηρίων σύγκρισης και του μοντέλου υπολογισμού ισχύος - ελπίζουμε να προσφέρουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για το πώς τα HAPS μπορούν να αξιοποιηθούν στο μέλλον των τηλεπικοινωνιών.

3.2 Κριτήρια σύγκρισης HAPS

Η εξέλιξη των High Altitude Platform Stations (HAPS) έχει φέρει μια σειρά από διαφορετικές τεχνολογίες και προσεγγίσεις στον χώρο των επικοινωνιών. Ωστόσο, για να προβούμε σε μια συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών τύπων HAPS, είναι σημαντικό να ορίσουμε σαφή κριτήρια βάσει των οποίων θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση. Τα κριτήρια αυτά εξετάζονται παρακάτω.

- **Υψόμετρο Λειτουργίας** Το υψόμετρο στο οποίο ένα HAPS λειτουργεί είναι καθοριστικό για πολλούς παράγοντες. Σε μεγαλύτερα υψόμετρα, ο αέρας είναι λεπτότερος, οπότε η αεροδυναμική και η ψύξη μπορεί να επηρεαστούν. Επιπλέον, η επικοινωνιακή κάλυψη μπορεί να είναι ευρύτερη λόγω της αυξημένης οπτικής γωνίας, αλλά το σήμα ενδέχεται να απαιτεί περισσότερη ισχύ για να διατηρηθεί.
- **Δυνατότητα Κάλυψης** Η κάλυψη αφορά την περιοχή που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα HAPS. Είναι ουσιώδες να κατανοηθεί πόσο μεγάλη είναι η ζώνη εξυπηρέτησης, η ποιότητα του σήματος μέσα σε αυτήν τη ζώνη, καθώς και τυχόν περιοχές σκιάσεως ή περιοχές με μειωμένη ποιότητα.
- **Ενεργειακή Απόδοση** Το πόσο αποτελεσματικά ένα HAPS καταναλώνει ενέργεια καθορίζει τη διάρκεια λειτουργίας της. Οι πηγές ενέργειας, η ικανότητα ανανέωσης αυτής της ενέργειας (π.χ. ηλιακά πάνελ) και η συνολική αυτονομία της είναι σημαντικοί παράγοντες για τη βιωσιμότητα του HAPS.

- **Κόστος Εγκατάστασης και Λειτουργίας** Οικονομικά κριτήρια που σχετίζονται με την κατασκευή, την εκκίνηση, τη συντήρηση, αλλά και με τον απαιτούμενο εξοπλισμό για τη λειτουργία των HAPS. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας.
- **Δυνατότητες Συνδεσιμότητας και Επικοινωνίας** Η ποιότητα, η ταχύτητα και η σταθερότητα των επικοινωνιακών συνδέσεων που παρέχει το HAPS. Πόσο εύκολο είναι να προσαρμοστούν σε νέες τεχνολογίες ή να αντιμετωπίσουν διακοπές;
- **Ανθεκτικότητα σε Εξωτερικούς Παράγοντες** Το πόσο καλά ένα HAPS μπορεί να αντέξει σε δύσκολες συνθήκες, όπως αντίξοες καιρικές συνθήκες, ακραίους ανέμους ή υψηλές θερμοκρασίες.
- **Ευελιξία στην Προσαρμογή και Εξέλιξη** Η ικανότητα των HAPS να προσαρμοστούν σε νέες τεχνολογίες, νέες απαιτήσεις ή να ενσωματώσουν βελτιώσεις στον εξοπλισμό τους, χωρίς την ανάγκη για μεγάλες αλλαγές στην βασική τους δομή.
- **Ευκολία στην Εγκατάσταση και Δυνατότητα Μεταφοράς** Το πόσο γρήγορα και εύκολα μπορεί να εγκατασταθεί ένα HAPS, η αναγκαία υποδομή, καθώς και η δυνατότητα μετακίνησης της σε διάφορες τοποθεσίες ανάλογα με τις ανάγκες.

3.2.1 Σύγκριση Αεροδυναμικών Αεροπλάνων-Αεροστατικών Μπαλονιών

Παρακάτω γίνεται σύγκριση των αεροδυναμικών (airplanes) και αεροστατικών (balloons) HAPS:

- **Υψόμετρο Λειτουργίας:** Airplane: Τα αεροδυναμικά HAPS μπορούν να λειτουργούν σε υψόμετρα πολύ υψηλότερα από τα αεροστάτα. Συνήθως, αυτά τα συστήματα μπορούν να λειτουργούν σε υψόμετρα που αγγίζουν τα 20 χιλιόμετρα ή και περισσότερα. Αυτό τους παρέχει μεγαλύτερη επικοινωνιακή εμβέλεια και δυνατότητα εξυπηρέτησης ευρύτερων περιοχών. Balloons: Τα αεροστάτα συνήθως λειτουργούν σε προκαθορισμένα ύψη, που είναι σχετικά χαμηλά σε σύγκριση με τα αεροδυναμικά HAPS. Το ύψος αυτό είναι περιορισμένο και συνήθως κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως περίπου 20 χιλιόμετρα.
- **Δυνατότητα Κάλυψης:** Airplanes: Τα αεροδυναμικά HAPS μπορούν να μετακινηθούν σε διάφορες περιοχές με μεγαλύτερη ευελιξία, προσφέροντας ευρύτερη περιοχή κάλυψης. Balloons: Λόγω της φύσης τους, τα αεροστάτα έχουν περιορισμένη δυνατότητα κάλυψης. Μπορούν να παρέχουν σταθερή κάλυψη σε συγκεκριμένες περιοχές.
- **Ενεργειακή Απόδοση:** Airplanes: ΛΤα αεροδυναμικά HAPS, αν και εξαιρετικά χρήσιμα για μακροχρόνια αποστολή, έχουν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας λόγω της ανάγκης μηχανοκίνησης για πλοήγηση. Balloons: Τα αεροστάτα είναι συνήθως ενεργειακά αποδοτικά, καθώς δεν χρειάζονται μηχανοκίνηση για τη διατήρησή τους σε σταθερό ύψος. Εξαρτώνται κυρίως από την ηλιακή ενέργεια.
- **Κόστος Εγκατάστασης και Λειτουργίας:** Airplanes: Τα αεροδυναμικά HAPS συνήθως έχουν υψηλότερο κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας λόγω της πολυπλοκότητάς τους και της ανάγκης μηχανοκίνησης. Balloons: Συνήθως, τα αεροστάτα έχουν χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας λόγω της απλότητάς τους.
- **Δυνατότητες Συνδεσιμότητας και Επικοινωνίας:** Airplanes: Εξοπλισμένα με προηγμένα συστήματα επικοινωνίας, μπορούν να παρέχουν σταθερή και αξιόπιστη συνδεσιμότητα. Balloons: Παρέχουν συνδεσιμότητα, αλλά μπορεί να μην είναι τόσο σταθερά όσο τα αεροδυναμικά HAPS.

- **Ανθεκτικότητα σε Εξωτερικούς Παράγοντες:** Airplanes: Τα αεροδυναμικά HAPS μπορεί να υποστούν περισσότερες προκλήσεις από δυνατούς ανέμους και ακραίες καιρικές συνθήκες. Balloons: Ίσως είναι λιγότερο ανθεκτικά σε ακραίες συνθήκες λόγω της φύσης τους.
- **Ευελιξία στην Προσαρμογή και Εξέλιξη:** Airplanes: Έχουν τη δυνατότητα να ενημερώνονται και να προσαρμόζονται σε νέες τεχνολογίες. Balloons: Πιθανότατα πιο περιορισμένες δυνατότητες εξέλιξης.
- **Ευκολία στην Εγκατάσταση και Δυνατότητα Μεταφοράς:** Airplanes: Μεγαλύτερο βάρος και μέγεθος μπορεί να καθιστούν τη μεταφορά τους πιο δύσκολη. Balloons: Ευκολότερη εγκατάσταση και μεταφορά λόγω της απλότητάς τους.
- **Ωφέλιμο φορτίο:** Airships: Μπορούν να μεταφέρουν μεγαλύτερα φορτία, όπως προηγμένος εξοπλισμός. Balloons: Το ωφέλιμο φορτίο είναι συνήθως περιορισμένο λόγω της φύσης τους.
- **Τύπος Ενέργειας:** Airplanes: Χρησιμοποιούν συνδυασμό ενεργειακών πηγών, όπως καύσιμα ή ηλιακή ενέργεια, για την πλοήγηση και τη λειτουργία του εξοπλισμού. Balloons: Εξαρτώνται κυρίως από την ηλιακή ενέργεια και ειδικούς σταθεροποιητές για τη σταθερότητα τους.

Συμπερασματικά, και τα δύο συστήματα HAPS παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, εξαρτώμενα από τις ανάγκες της εφαρμογής. Η επιλογή μεταξύ τους πρέπει να βασίζεται στους στόχους, τον προϋπολογισμό και τις τεχνικές προκλήσεις του κάθε έργου.

3.2.2 Σύγκριση HAPS-GEO δορυφόρων

Παρακάτω γίνεται σύγκριση των HAPS με τους Γεωστατικούς Δορυφόρους (GEOs):

- **Υψόμετρο Λειτουργίας:** HAPS: Οι πλατφόρμες HAPS λειτουργούν σε μεσαία υψόμετρα, τυπικά μεταξύ 12,000 και 22,000 μέτρων, επάνω από το εμπορικό αεροπορικό εύρος αλλά κάτω από το διαστημικό εύρος. GEO: Οι γεωστατικοί δορυφόροι λειτουργούν σε πολύ υψηλό υψόμετρο, τυπικά περίπου 35,786 χιλιόμετρα από τη Γη, όπου η περιστροφική τους ταχύτητα ταιριάζει με την περιστροφική ταχύτητα της Γης.
- **Δυνατότητα Κάλυψης:** HAPS: Παρέχουν κάλυψη σε σχετικά περιορισμένες γεωγραφικές περιοχές, καθιστώντας τα ιδανικά για τοπικές ή περιφερειακές εφαρμογές. GEO: Λόγω του υψηλού τους υψομέτρου, μπορούν να παρέχουν κάλυψη σε ολόκληρες ηπείρους ή μεγάλες περιοχές.
- **Ενεργειακή Απόδοση:** HAPS: Αναμένεται να έχουν υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση ανά τετραγωνικό μέτρο κάλυψης σε σχέση με τους GEO, καθώς χρειάζονται ενέργεια για να παραμένουν στον αέρα και για τη λειτουργία των εξοπλισμών τους. GEO: Έχουν σχετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση ανά τετραγωνικό μέτρο κάλυψης, αλλά οι δορυφορικοί τροχιακοί πόροι είναι περιορισμένοι και η ανάγκη για διαστημικά συστήματα για τη διαχείρισή τους μπορεί να αυξήσει το συνολικό ενεργειακό κόστος.
- **Κόστος Εγκατάστασης και Λειτουργίας:** HAPS: Τα HAPS έχουν συγκριτικά χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας σε σχέση με τους γεωστατικούς δορυφόρους. Αυτό οφείλεται στην απουσία της ανάγκης για εκτόξευση δορυφόρου, τις σχετικά χαμηλές τεχνολογικές απαιτήσεις και τη δυνατότητα για ταχεία εγκατάσταση και αντικατάσταση. GEO: Η εκτόξευση, η συντήρηση και η επικοινωνία με τους γεωστατικούς δορυφόρους είναι πολύ κοστοβόρες. Το κόστος εκτόξευσης ενός δορυφόρου μπορεί να φτάνει τα εκατομμύρια δολάρια, ενώ η διάρκεια ζωής του δορυφόρου είναι περιορισμένη.

- **Δυνατότητες Συνδεσιμότητας και Επικοινωνίας:** HAPS: Λόγω του χαμηλότερου υψομέτρου τους, οι πλατφόρμες HAPS μπορούν να παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες επικοινωνίας και χαμηλότερη καθυστέρηση σε σχέση με τους γεωστατικούς δορυφόρους. Είναι ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ευαισθησία στο χρόνο απόκρισης, όπως η τηλεχειρουργία. GEO: Παρόλο που μπορούν να παρέχουν σταθερές και αξιόπιστες συνδέσεις, έχουν σημαντική καθυστέρηση επικοινωνίας λόγω του μεγάλου αποστάσεων μετάδοσης. Αυτό τους καθιστά λιγότερο ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερη ταχύτητα απόκρισης.
- **Ανθεκτικότητα σε Εξωτερικούς Παράγοντες:** HAPS: Οι πλατφόρμες HAPS είναι εκτεθειμένες σε καιρικές συνθήκες και μπορεί να υποστούν φθορές από ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως καταιγίδες ή ισχυροί άνεμοι. Ωστόσο, η τεχνολογία τους εξελίσσεται για να αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις. GEO: Λόγω του υψηλού υψομέτρου τους, είναι ανεπηρέαστοι από τις καιρικές συνθήκες της Γης. Ωστόσο, είναι εκτεθειμένοι σε κοσμική ακτινοβολία και διαστημικά φαινόμενα, όπως οι ηλιακές καταιγίδες.
- **Ευελιξία στην Προσαρμογή και Εξέλιξη:** HAPS: Οι πλατφόρμες HAPS είναι ευέλικτες και μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα σε νέες τεχνολογίες ή ανάγκες. Η δυνατότητα γρήγορης αντικατάστασης ή αναβάθμισης είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα. - GEO: Αν και είναι πιο σταθεροί και αξιόπιστοι, η αναβάθμιση ή η αντικατάσταση των γεωστατικών δορυφόρων είναι πολύ πιο δύσκολη και κοστοβόρα.
- **Ευκολία στην Εγκατάσταση και Δυνατότητα Μεταφοράς:** HAPS: Μπορούν να εγκατασταθούν και να μεταφερθούν σχετικά εύκολα, προσφέροντας ευελιξία στην κινητικότητα. GEO: Μόλις εκτοξευθεί ένας γεωστατικός δορυφόρος, δεν μπορεί να μετακινηθεί εύκολα ή να επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλη τροχιά.
- **Ωφέλιμο Φορτίο:** HAPS: Τα HAPS έχουν περιορισμένη χωρητικότητα φορτίου σε σύγκριση με τους γεωστατικούς δορυφόρους, αλλά είναι ικανά να φέρουν εξοπλισμό επικοινωνίας, αισθητήρες και άλλες τεχνολογίες. GEO: Έχουν τη δυνατότητα να φέρουν πολύ μεγαλύτερα και βαρύτερα φορτία.
- **Είδος Ενέργειας** HAPS: Τα περισσότερα HAPS χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια, με ηλιακά πάνελ για την παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και μπαταρίες για τη διατήρηση της λειτουργίας κατά τη διάρκεια της νύχτας. GEO: Χρησιμοποιούν ηλιακά πάνελ και μπορεί να έχουν διαθέσιμη ενέργεια σχεδόν διαρκώς λόγω της θέσης τους στο διάστημα.

Και τα δύο συστήματα έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η επιλογή μεταξύ HAPS και γεωστατικών δορυφόρων εξαρτάται από τις ανάγκες της εφαρμογής, το κόστος, τις τεχνικές απαιτήσεις και άλλους παράγοντες.

3.2.3 Σύγκριση HAPS-LEO δορυφόρων

Τα συστήματα HAPS έχουν μοναδικές ιδιότητες σε σύγκριση με το LEO δορυφόρους. Πρώτον, τα HAPS βρίσκονται συνήθως σε υψόμετρο 20 km, ενώ οι δορυφόροι LEO αναπτύσσονται σε υψόμετρα μεταξύ 350 και 2000 km. Ως εκ τούτου, ένα HAPS αντιμετωπίζει λιγότερες απώλειες διαδρομής επικοινωνίας και ισχυρότερους συνδέσμους οπτικής επαφής (LoS). Η υψηλή ποιότητα της σύνδεσης επικοινωνίας με το έδαφος του επιτρέπει να συνδέεται απευθείας με τον εξοπλισμό χρήστη (UE) χωρίς να απαιτείται ειδικός σχεδιασμός δέκτη. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα συστήματα LEO, όπου απαιτούνται εξελιγμένοι δέκτες με υψηλό κέρδος

κεραίας. Επίσης, λόγω του χαμηλού υψομέτρου του, ένα HAPS είναι πιο ελκυστικό για ευαίσθητες σε καθυστέρηση και κρίσιμες εφαρμογές από ένα Δορυφόρος LEO. Δεύτερον, τα συστήματα HAPS είναι σχεδόν ακίνητα, ενώ οι δορυφόροι LEO περιφέρονται γύρω από τη Γη με υψηλές ταχύτητες. Έτσι, σε αντίθεση με το HAPS, οι δορυφόροι υποφέρουν από φαινόμενα Doppler, συχνή μεταβίβαση και σπατάλη χωρητικότητας λόγω της τροχιάς τους σε περιοχές που δεν είναι πυκνοκατοικημένες για ένα μέρος της τροχιάς τους. Επιπλέον, λόγω των συνεχών κινήσεων των δορυφόρων LEO, απαιτείται σύστημα παρακολούθησης στον δέκτη. Τρίτον, τα HAPS είναι γιγάντιες πλατφόρμες. Τυπικά, τα αεροστατικά HAPS (π.χ. αερόπλοια) έχουν μήκη μεταξύ 100 και 200 m, ενώ τα αεροδυναμικά HAPS έχουν άνοιγμα φτερών μεταξύ 35 και 80 m. Αυτό είναι έως και 20 φορές το μέγεθος ενός τυπικού δορυφόρου LEO. Τέτοια μεγέθη HAPS επιτρέπουν την υποδοχή πολλών τεχνολογιών επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των μαζικών MIMO και των έξυπνων αναδιαμορφωμένων επιφανειών(RIS) . Επιπλέον, το HAPS μπορεί να φιλοξενήσει βαρύτερα ωφέλιμα φορτία, π.χ. εξοπλισμό αποθήκευσης και υπολογιστών. Τέλος, η διάρκεια ζωής του HAPS εκτιμάται ότι είναι από μερικούς μήνες έως αρκετά χρόνια, ανάλογα με τη φύση της αποστολής του. Αν και είναι χαμηλότερη από τη διάρκεια ζωής του δορυφόρου LEO, το HAPS προσφέρει άλλα πλεονεκτήματα. Πράγματι, μπορούν να ανακτηθούν στο τέλος της ζωής τους, σε αντίθεση με τους δορυφόρους. Επιπλέον, τα HAPS μπορούν να διατηρηθούν είτε στον ουρανό είτε φέρνοντάς τα πίσω στη Γη, γεγονός που καθιστά δυνατή την παράταση της διάρκειας ζωής τους.

3.2.4 Σύγκριση HAPS-UAV

Παρόλο που τα UAVs(Unmanned Aerial Vehicle) μπορούν να επικοινωνούν με τα επίγεια UE σε μικρές αποστάσεις έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα, ενώ διασφαλίζουν αξιόπιστες και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίες, τα συστήματα HAPS υπερτερούν των UAVs σε πολλές άλλες πτυχές.

- Πρώτον, λόγω του μεγαλύτερου υψομέτρου του HAPS, απολαμβάνουν μεγαλύτερη ακτίνα αποτυπώματος που κυμαίνεται μεταξύ 40 και 100 km για επικοινωνίες υψηλής απόδοσης, και αυτό μπορεί να επεκταθεί στα 500 km (ITU-R F.1500). Αντίθετα, το αποτύπωμα κάλυψης των UAV είναι πολύ μικρό, γεγονός που απαιτεί την ανάπτυξη δαπανηρών σμηνών UAV σε μεγάλες περιοχές. Επίσης, μια καλύτερη πιθανότητα LoS μπορεί να πραγματοποιηθεί με HAPS, ενώ οι συνδέσεις UAV είναι ευαίσθητες σε μπλοκαρίσματα και πολυώροφα κτίρια.
- Δεύτερον, δεδομένου ότι τα HAPS τροφοδοτούνται κυρίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, π.χ. ηλιακά πάνελ, ενώ τα UAV βασίζονται σε περιορισμένη χωρητικότητα μπαταρίας, τα HAPS μπορεί να διατηρήσει πολλαπλές και μεγαλύτερες αποστολές από τα συστήματα UAV.
- Τέλος, το μικρό μέγεθος των UAV περιορίζει το ωφέλιμο φορτίο επικοινωνίας και τις πιθανές εφαρμογές τους. Για παράδειγμα, οι συγγραφείς του [59] έδειξαν ότι τα UAV εξοπλισμένα με RIS αποδίδουν χειρότερα από τα HAPS που είναι εξοπλισμένα με RIS. Για τον ίδιο λόγο, η υψηλή αποθηκευτική και υπολογιστική ισχύς δεν μπορεί να αναπτυχθεί σε UAV, αντίθετα στα HAPS.

3.3 Μοντέλο υπολογισμού ισχύος

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στη διερεύνηση των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν την ισχύ που απαιτείται για τη λειτουργία των HAPS, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο αυτός ο υπολογισμός συμβάλλει

στην κατανόηση των επιδόσεών τους και τη βελτιστοποίησή τους για διάφορες εφαρμογές. Επιπλέον, θα αναλύσουμε τις μεταβλητές και τις παράγοντες που επηρεάζουν την ισχύ, όπως οι καιρικές συνθήκες, η γεωγραφική θέση και οι επιστημονικές απαιτήσεις του κάθε HAPS. Θα εξετάσουμε την εξέλιξη των ενεργειακών αναγκών κατά τη διάρκεια της πτήσης τους και τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα εξοπλισμού ανταποκρίνονται σε αυτές τις απαιτήσεις.

3.3.1 Κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο ραδιοπρόσβασης

Για τη συνολική κατανάλωση ενέργειας κάθε Σταθμού Βάσης (BS) i (gNB ή Small Cell, SC), δηλ. για το μοντέλο ισχύος που χρησιμοποιείται για τις συνδέσεις του δικτύου πρόσβασης, θεωρείται η γραμμική προσέγγιση στο [60] σύμφωνα με την οποία, η κατανάλωση ισχύος στο BS i είναι σχεδόν γραμμική και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{AN} = \sum_{i \in B} N_{TRX_i} (P_{0_i} + \Delta_p \cdot P_{out_i}) \quad (3.1)$$

όπου N_{TRX_i} είναι ο αριθμός των πομποδεκτών στον σταθμό βάσης i , το P_{0_i} αντιπροσωπεύει την ελάχιστη μη μηδενική ισχύ εξόδου του πομποδέκτη AN στον σταθμό βάσης i , Δ_p είναι η κλίση της κατανάλωσης ισχύος που εξαρτάται από το φορτίο, η οποία παίρνει διαφορετικές τιμές με βάση τον χρησιμοποιούμενο τύπο της κεραίας [60] και P_{out_i} είναι η κατανάλωση ενέργειας που εξαρτάται από το φορτίο. Το P_{out_i} δίνεται από την εξής σχέση:

$$P_{out_i} = \frac{P_{AN,max_i}}{C_{imax}} \sum_{u \in U} P_{i,PRB} \cdot (c_{i,u} \cdot x_{i,u}^u) \quad (3.2)$$

όπου $P_{max}(dbm)$ είναι η μέγιστη ισχύς εκπομπής του επίγειου σταθμού, η μεταβλητή $x_{i,u}^u$ αντιπροσωπεύει την ύπαρξη ή μη σύνδεσης μεταξύ του σταθμού βάσης i και του χρήστη u , $c_{i,u}$ είναι ο αριθμός των συνολικών resource blocks που απαιτούνται για να γίνει η σύνδεση μεταξύ του χρήστη u και του σταθμού βάσης i , το οποίο υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$c_{i,u} = \frac{r_u}{BW_{PRB} SE_{i,u}} \quad (3.3)$$

όπου r_u είναι ο απαιτούμενος ρυθμός των συσκευών των χρηστών, BW_{PRB} είναι το εύρος ζώνης ανά resource block και $SE_{i,u}$ είναι η φασματική αποδοτικότητα, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$SE_{i,u} = \min(N_{TRX_i}, N_{RX_u}) \log_2 \left(1 + \frac{N_{RX_u} \cdot SINR_{i,u}}{\min(N_{TX_i}, N_{RX_u})} \right) \quad (3.4)$$

όπου οι παράμετροι N_{TRX_i} , N_{RX_u} αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των κεραίων εκπομπής και λήψης των BS i και UE u , αντίστοιχα, και $SINR_{i,u}$ είναι η αναλογία του σήματος προς τον θόρυβο και την παρεμβολή από τον σταθμό βάσης i προς τον δέκτη u .

Το SNR που λαμβάνει ο χρήστης u από τον BS δίνεται από την σχέση:

$$SNIR_{ui}(dB) = P_i(dBm) + G_{T_x i}(dB) - L_{T_x i}(dB) - PL_{ui}(dB) - N_{th}(dBm) - NF_{UE}(dB) \quad (3.5)$$

όπου

$$P_i = 10 \log_{10} \left[\frac{P_{j_{max}}}{12 N_i N_{PRB_i, max}} \right] \quad (3.6)$$

είναι η ισχύς που κατανέμεται από το BS i σε κάθε subcarrier, με το $P_{j_{max}}$ να είναι η μέγιστη ισχύ μετάδοσης σε mW, N_i ο αριθμός των κεραιών του BS i και N_{PRB} ο μέγιστος αριθμός των physical resource blocks που του έχουν εκχωρηθεί. Η παράμετρος $G_{T_x i}$ είναι το κέρδος της κεραίας του σταθμού βάσης i και το $L_{T_x i}$ η απώλεια καλωδίου του πομπού, ενώ το PL_{ui} οι απώλειες διαδρομής μεταξύ UE u και BS i συμπεριλαμβανομένων των απωλειών λόγω βροχής, απορρόφησης των μορίων του οξυγόνου κτλ. Στη συνέχεια, το NF_{UE} αναφέρεται στον θερμικό θόρυβο και το NF στο σχήμα θορύβου του δέκτη. Έτσι, το SINR που λαμβάνει ο χρήστης u από το BS i ορίζεται από την εξής σχέση:

$$SINR_{ui}(dB) = SNR_{ui}(dB) - 10 \log_{10} \left(\frac{I}{N} + 1 \right) \quad (3.7)$$

όπου I είναι η συνολική παρεμβολή (σε watt) που δέχεται ο χρήστης UE u από τα όλους τους γειτονικούς σταθμούς βάσης, η οποία εξαρτάται από το εφαρμοσμένο σχήμα κατανομής συχνότητας. Τέλος, το N υποδηλώνει τη συνολική ισχύ θορύβου (σε watt) που λαμβάνει ο χρήστης u .

Για την ενεργό ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ, $EIRP$, σε dBW, έχουμε:

$$EIRP = P_{T_x} + G_{T_x i} - L_{T_x i} \quad (3.8)$$

όπου: P_{T_x} είναι η ισχύς του πομπού

$G_{T_x i}$ είναι το κέρδος της κεραίας του πομπού

$L_{T_x i}$ είναι οι απώλειες του πομπού

Για τον υπολογισμό της σηματοθορυβικής σχέσης σε dB ισχύει:

$$SNR = \frac{C}{N_0} - 10 \log_{10}(BW) \quad (3.9)$$

όπου $\frac{C}{N_0}$ είναι ο λόγος της ισχύος του φέροντος, C , προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου από το N_0 και BW είναι το εύρος ζώνης του φέροντος σε Hz.

3.3.2 Κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο backhaul

Μια παρόμοια προσέγγιση υιοθετείται για το μοντέλο ισχύος backhaul (BH). Και πάλι, η ισχύς κάθε πομπο-δέκτη BH έχει δύο μέρη: ένα στατικό (P_{0_l}) και μια μεταβλητή που κλιμακώνεται με τον συνολικό ρυθμό που δρομολογείται μέσω της σύνδεσης BH. Η ισχύς όλων των συνδέσεων BH που εξέρχονται από το BS i δίνεται έτσι από την παρακάτω σχέση:

$$P_{BH} = \sum_{l \in L} N_{TRX_i} (P_{0_l} + \Delta_p P_{out_l}) \quad (3.10)$$

όπου N_{TRX_i} είναι ο αριθμός των πομποδεκτών στο backhaul συνδέσμου, P_{0_l} είναι η ελάχιστη μη μηδενική ισχύς BH, Δ_p είναι ο δείκτης κλίσης της backhaul σύνδεσης για να ισοσταθμίσει την εκπεμπόμενη ενέργεια

και P_{out_l} είναι η ισχύς εξόδου του πομποδέκτη RF της ζεύξης BH που εξαρτάται από το φορτίο (i, j) στον BS i .

Για τον υπολογισμό του P_{out_l} , έχουμε:

$$P_{out_l} = SINR_l + \beta_l \quad (3.11)$$

όπου $SINR_l$ είναι το SINR που απαιτείται για την πετυχημένη μεταφορά του φορτίου μέσω του backhaul link, β_l είναι το σύνολο των απωλειών του συστήματος αφαιρώντας τα κέρδη του, το οποίο υπολογίζεται, σε dBm, με τον εξής τρόπο:

$$\beta_l = L_{T_x i} + L_{R_x i} + PL_l + LM + N_{TH} + NF_{UE} - G_{T_x i} - G_{R_x i} \quad (3.12)$$

όπου $L_{T_x i}$ και $L_{R_x i}$ είναι οι απώλειες των κεραιών στον πομπό και τον δέκτη, αντίστοιχα, PL_l είναι οι απώλειες διάδοσης (συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες κενού χώρου και οι συνολικές ατμοσφαιρικές απώλειες), LM είναι το κενό ασφαλείας του backhaul link (link margin), N_{TH} είναι ο θερμικός θόρυβος του συστήματος, NF_{UE} είναι ο συντελεστής θορύβου (noise figure) του δέκτη.

3.3.3 Υπολογισμός απωλειών διάδοσης

Οι απώλειες διάδοσης μεταξύ HAPS και του επίγειου σημείου τόσο στη περίπτωση του δικτύου ραδιοπρόσβασης όσο και στη περίπτωση του δικτύου backhaul δίνονται από τη σχέση:

$$PL_l = L_{FS} + L_{rain} + L_o + L_w \quad (3.13)$$

Παρακάτω θα αναλύσουμε την παραπάνω εξίσωση:

- **Απώλειες ελεύθερου χώρου**

Οι απώλειες ελεύθερου χώρου L_{FS} μεταξύ της κεραίας HAPS και της κεραίας του δέκτη δίνονται από τη σχέση:

$$L_{FS} = 20 \log\left[\frac{4\pi R}{\lambda}\right] = 20 \log\left(\frac{4\pi R}{\frac{c}{f}}\right) \quad (3.14)$$

όπου:

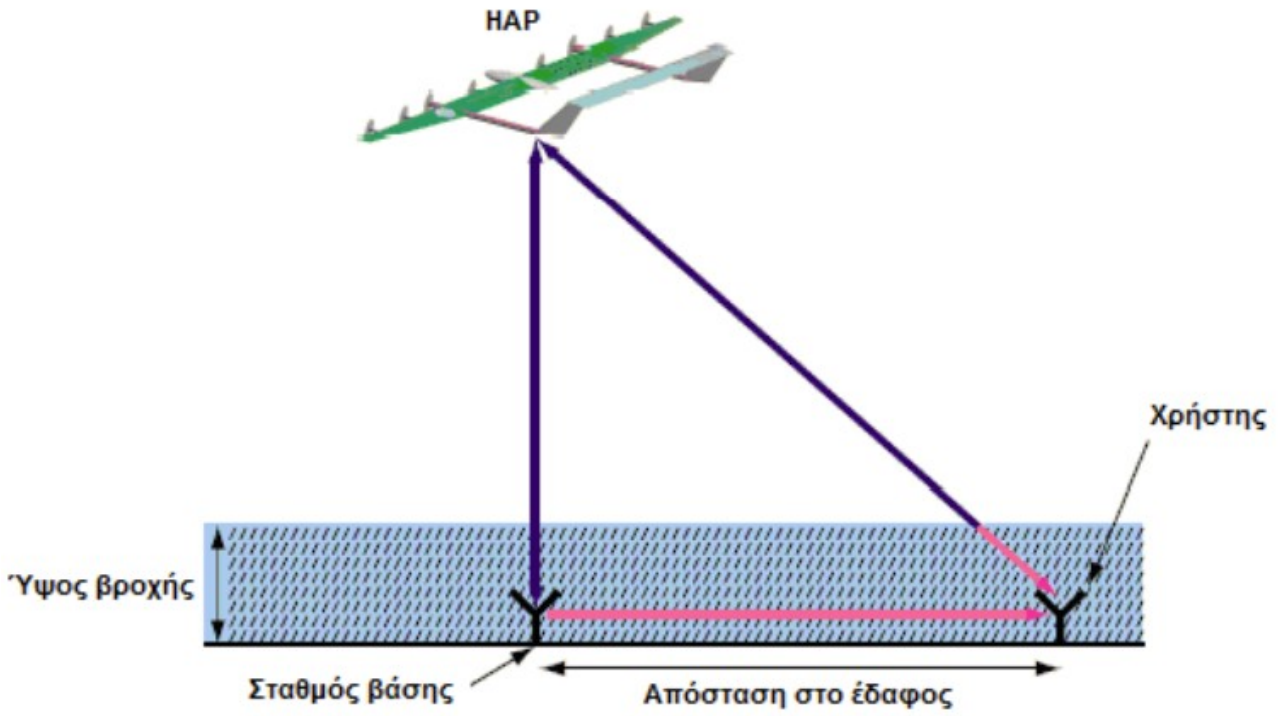
R : απόσταση του HAPS από τον επίγειο δέκτη

λ : μήκος κύματος του ραδιοκύματος που εκπέμπεται

c : η ταχύτητα του φωτός στο κενό που είναι ίση με $c = 3 \times 10^8 (m/s)$.

f : η συχνότητα σε Hz.

- **Απώλειες λόγω βροχής**



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση της απόστασης εντός βροχής που καλύπτει η ακτινοβολία σε επίγεια και HAP συστήματα

Η μείωση της ισχύος των κυμάτων συνδέεται απευθείας με την ποσότητα των σταγόνων βροχής κατά μήκος της πορείας, τον όγκο αυτών των σταγόνων και την απόσταση που διανύουν μέσα στο φαινόμενο της βροχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Για να υπολογίσουμε τον ειδικό ρυθμό εξασθένησης λόγω βροχής (dB/km), ακολουθούμε την ακόλουθη διαδικασία:

Βρίσκουμε το ύψος της βροχής h_R από το [61],

$$h_R = h_0 + 0.36 \quad (3.15)$$

όπου h_0 είναι το μέσο ετήσιο ισοδύναμο ύψος της βροχής από την επιφάνεια της θάλασσας.

Έπειτα υπολογίζουμε το γεωμετρικό μήκος διαδρομής, L_S , σε km, για γωνία ανύψωσης $An > 5^\circ$. Έχουμε από το [62]:

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin(An)} \quad (3.16)$$

όπου h_S είναι το ύψος του επίγειου δέκτη. Για γωνία ανύψωσης $An < 5^\circ$, έχουμε:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{(\sin(An))^2 + \frac{2(h_R - h_S)}{R_E})^{1/2} + \sin(An)} \quad (3.17)$$

Μετέπειτα βρίσκουμε το γεωμετρικό μήκος, L_G , σε km:

$$L_G = L_S \cdot \cos(\theta) \quad (3.18)$$

Σειρά έχει να βρεθεί ο ρυθμός βροχόπτωσης, $R_{0.01}$, που υπολογίζεται μέσα από πίνακες σύμφωνα με το [63].

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ειδική εξασθένηση, γ_R (dB/km):

$$\gamma_R = kR_{0.01}^a \quad (3.19)$$

Για τα k και a υπολογίζονται ως εξής:

$$k = \frac{1}{2}(k_H + k_\nu(k_H k_\nu)\cos(El)^2\cos(2\phi)) \quad (3.20)$$

$$a = \frac{1}{2}(k_H a_H + k_\nu a_\nu + (k_H a_H - k_\nu a_\nu)\cos(El)^2\cos(2\phi)) \quad (3.21)$$

όπου k_H, k_ν, a_H, a_ν τα βρίσκουμε σε πίνακες στο [63] και εξαρτώνται από την συχνότητα.

Ακολουθεί ο υπολογισμός του παράγοντα οριζόντιας εξασθένησης, $r_{0.01}$:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78\sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (3.22)$$

Στην συνέχεια, βρίσκουμε το ζ (degrees):

$$\zeta = \tan\left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}}\right)^{-1} \quad (3.23)$$

Ανάλογα με το αποτέλεσμα, αν $\zeta > El$ τότε:

$$L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos(El)} \quad (3.24)$$

ενώ αν ισχύει $\zeta \leq El$ τότε:

$$L_R = \frac{(h_R - h_S)}{\sin(El)} \quad (3.25)$$

όπου L_R σε km.

Έπειτα βρίσκουμε το x , σε μοίρες, για το οποίο ισχύει ότι αν το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού είναι $|\phi| < 36^\circ$ τότε:

$$x = 36 - |\phi| \quad (3.26)$$

ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση ισχύει $x = 0$.

Επόμενος υπολογισμός είναι του παράγοντα κατακόρυφης προσαρμογής, $v_{0.01}$:

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin(El)}(31(1 - e^{-(El/(1+x))})\frac{\sqrt{L_R\gamma_R}}{f^2} - 0.45)} \quad (3.27)$$

Για το ενεργό μήκος διαδρομής, L_E (dB), ισχύει:

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad (3.28)$$

Τέλος, για τον τελικό υπολογισμό της ολικής εξασθένησης λόγω της βροχόπτωσης, L_{rain} , σε dB κάνουμε:

$$L_{rain} = \gamma_R L_E \quad (3.29)$$

- **Απώλειες λόγω οξυγόνου και άλλων αερίων**

Οι απώλειες λόγω οξυγόνου και άλλων αερίων στην ατμόσφαιρα για ραδιοκυματική διάδοση βασίζονται στη σύσταση ITU-R P.676 [64] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU). Έτσι, για τις υπόλοιπες ατμοσφαιρικές απώλειες, L_g , σε dB έχουμε:

$$L_g = \gamma \cdot R = (\gamma_o + \gamma_w)R \quad (3.30)$$

όπου R είναι το μήκος της διαδρομής σε χιλιόμετρα.

Για τις απώλειες λόγω οξυγόνου, χρησιμοποιούμε μέρος της συνολικής εξίσωσης που περιγράφει τις απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών αερίων. Η ειδική απώλεια από το οξυγόνο, γ_o , εξαρτάται από τη συχνότητα f , την πίεση P και τη θερμοκρασία T .

Η ειδική εξασθένηση των αερίων (specific gaseous attenuation), σε dB/km, υπολογίζεται ως εξής από το ITU-R P.676-11:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820f(N''_{Oxygen}(f) + N''_{WaterVapour}(f)) \quad (3.31)$$

όπου γ_o είναι η ειδική εξασθένηση λόγω του ξηρού αέρα, γ_w είναι η ειδική εξασθένηση λόγω των υδρατμών και τα $N''_{Oxygen}(f)$ και $N''_{WaterVapour}(f)$ είναι τα φανταστικά μέρη, τα οποία εξαρτώνται από την συχνότητα (imaginary parts of the frequencydependent complex refractivities).

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τα φανταστικά μέρη με τους εξής τύπους:

$$N''_{Oxygen}(f) = \sum i_{Oxygen} S_i F_i + N''_D(f) \quad (3.32)$$

$$N''_{WaterVapour} = \sum i_{WaterVapour} S_i F_i \quad (3.33)$$

όπου S_i είναι η φασματική δύναμη της γραμμής (the strength of the i th oxygen or water vapour line), F_i είναι η λειτουργία τοπικού εύρους ζώνης συχνότητας (the oxygen or water vapour line shape factor) και το $N''_D(f)$ είναι η σειρά ξηρότητας λόγω της απορρόφησης αζώτου που προκαλείται από την πίεση (the dry continuum due to pressure-induced nitrogen absorption and the Debye spectrum).

Για τον υπολογισμό του S_i για το οξυγόνο και τους υδρατμούς, αντίστοιχα, έχουμε:

$$S_i = a_1 \cdot 10^{-7} \cdot p \cdot \theta^3 \exp(a_2(1 - \theta)) \quad (3.34)$$

$$S_i = b_1 \cdot 10^{-1} \cdot e \cdot \theta^{3.5} \exp(b_2(1 - \theta)) \quad (3.35)$$

όπου p είναι η ατμοσφαιρική πίεση, e είναι η πίεση των υδρατμών και θ είναι η θερμοκρασία $\frac{300}{T}$, όπου T σε Κέλβιν, τα οποία όλα μπορούμε να τα βρούμε στο [65]. Για τα a_1, a_2, b_1, b_2 είναι σταθερές που τα παίρνουμε από πίνακες σύμφωνα με το [66].

Για τον υπολογισμό του F_i έχουμε:

$$F_i = \frac{f}{f_i} \left(\frac{\Delta f - \delta(f_i - f)}{(f_i - f)^2 + (\Delta f)^2} + \frac{\Delta f - \delta(f_i + f)}{(f_i + f)^2 + (\Delta f)^2} \right) \quad (3.36)$$

όπου f_i είναι η συχνότητα γραμμής του οξυγόνου ή των υδρατμών (the oxygen or water vapour line frequency) και Δf είναι το πλάτος της εκάστοτε γραμμής (the width of the line).

Για τον υπολογισμό του κάθε Δf για το οξυγόνο και τους υδρατμούς, αντίστοιχα, έχουμε:

$$\Delta f = a_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{0.8-a_4} + 1.1 \cdot e \cdot \theta) \quad (3.37)$$

$$\Delta f = b_3 \cdot 10^{-4} (p \cdot \theta^{b_4} + b_5 \cdot e \cdot \theta^{b_6}) \quad (3.38)$$

όπου τα $a_3, a_4, b_3, b_4, b_5, b_6$ τα παίρνουμε πάλι από τους πίνακες στο [66].

Το τελικό Δf μετά τον διαχωρισμό Zeeman για το οξυγόνο και διεύρυνση Doppler για τους υδρατμούς ορίζονται (modified to account for Zeeman splitting of oxygen lines and Doppler broadening of water vapour lines), αντίστοιχα, ως εξής:

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta f)^2 + 2.25 \cdot 10^{-6}} \quad (3.39)$$

$$\Delta f = 0.535 \Delta f + \sqrt{0.217(\Delta f)^2 + \frac{2.1316 \cdot 10^{-12} f_i^2}{\theta}} \quad (3.40)$$

Για τον συντελεστή διόρθωσης οξυγόνου (is a correction factor that arises due to interference effects in oxygen lines), δ , ισχύει:

$$\delta = (a_5 + a_6 \cdot \theta) \cdot 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8} \quad (3.41)$$

όπου a_5, a_6 τα παίρνουμε από τους ίδιους πίνακες. Αυτό ισχύει για το οξυγόνο αποκλειστικά, ενώ για τους υδρατμούς ισχύει $\delta = 0$.

Για την σειρά ξηρότητας λόγω της απορρόφησης αζώτου, N''_D ισχύει:

$$N''_D(f) = f \cdot p \cdot \theta^2 \left(\frac{6.14 \cdot 10^{-5}}{d(1 + (\frac{f}{d})^2)} + \frac{1.4 \cdot 10^{-12} \cdot p \cdot \theta^{1.5}}{1 + 1.9 \cdot 10^{-5} \cdot f^{1.5}} \right) \quad (3.42)$$

όπου d είναι το μήκος στο φάσμα του Debye (the width parameter for the Debye spectrum) και είναι ίσο με $5.6 \cdot 10^{-4} (p + e) \theta^{0.8}$

3.4 Επίλογος

Κατά τη διάρκεια αυτής της ενότητας, εξετάσαμε λεπτομερώς τη συνεισφορά διάφορων παραγόντων στην ισχύ των HAPS, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ενέργειας, των επικοινωνιών, των περιβαλλοντικών συνθηκών και πολλών άλλων. Κατανοήσαμε την επίδραση των παραγόντων αυτών στην ισχύ και τη διάρκεια της λειτουργίας των HAPS. Μέσω αυτής της ανάλυσης, αποκτήσαμε βαθύτερη κατανόηση των τεχνολογικών, ενεργειακών και επικοινωνιακών απαιτήσεων των HAPS.

Επιπλέον, αναδείξαμε τη σημασία της ανάπτυξης συστηματικών μοντέλων υπολογισμού ισχύος για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας των HAPS και την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων. Αυτά τα μοντέλα είναι αναγκαία για τον σχεδιασμό και την εκτέλεση αποστολών των HAPS και προσφέρουν σημαντική είσοδο για την ανάπτυξη βελτιωμένων τεχνολογιών και στρατηγικών για την αεροδιαστημική τους χρήση.

Τέλος, η ανάλυση αυτή διευκολύνει την καλύτερη κατανόηση της σημασίας της ισχύος για την αεροδιαστημική κοινότητα και τη συνεχιζόμενη εξέλιξη της τεχνολογίας των HAPS. Αυτή η ενότητα αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση και την αποδοτικότερη χρήση των HAPS για διάφορες εφαρμογές και αποστολές στον υψηλό αέρα.

Κεφάλαιο 4ο: Ανάλυση επίδοσης και αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Οι High Altitude Platform Stations (HAPS) αποτελούν μια προοπτική καινοτόμα τεχνολογική προσέγγιση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Με την ικανότητα λειτουργίας σε υψηλά υψόμετρα, αυτά τα συστήματα ανοίγουν νέους ορίζοντες στη διαχείριση και την κάλυψη τηλεπικοινωνιακών δικτύων, ειδικά σε περιοχές όπου η παραδοσιακή υποδομή είναι περιορισμένη ή ανύπαρκτη.

Παρά το ενδιαφέρον που υπάρχει για τα HAPS, η πραγματική τους απόδοση χρειάζεται να εξεταστεί διεξοδικά και να συγκριθεί με άλλες τεχνολογίες για να καθοριστεί η βιωσιμότητα και η αποδοτικότητά τους σε πραγματικές συνθήκες. Αυτό είναι ακριβώς το επίκεντρο της παρούσας ενότητας.

Μέσα από το περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB, πραγματοποιείται μια συστηματική ανάλυση των επιδόσεων των HAPS. Το MATLAB προσφέρει τον απαραίτητο υπολογιστικό ισχυρισμό και τα εργαλεία για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, επιτρέποντας τη διεξαγωγή σύνθετων προσομοιώσεων και αναλύσεων.

Στην ενότητα αυτή, θα εξετάσουμε τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση των HAPS, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας και θα συζητήσουμε τις σημαντικές ευρέσεις που προκύπτουν από αυτές. Ελπίζουμε ότι η παρούσα ανάλυση θα διαφωτίσει το δρόμο για μελλοντικές ερευνητικές προσεγγίσεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών πλατφορμών υψηλού υψόμετρου.

4.2 Περιβάλλον προσομοίωσης

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων και την ανάλυση των δεδομένων στην παρούσα πτυχιακή εργασία, χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB. Το MATLAB (Matrix Laboratory) είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την επεξεργασία και την ανάλυση δεδομένων, την εκτέλεση αλγορίθμων, την δημιουργία γραφικών παραστάσεων, καθώς και την ανάπτυξη διαδραστικών διεπαφών.

Στην δική μας περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2023a του MATLAB, η οποία περιλαμβάνει μια σειρά από βελτιώσεις και νέες λειτουργίες σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις. Η επιλογή του MATLAB ως προγραμματιστικού περιβάλλοντος ήταν ιδανική για την παρούσα εργασία, καθώς παρέχει εκτενείς βιβλιοθήκες και εργαλεία για την προσομοίωση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, όπως τα HAPS. Το λάπτοπ που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Lenovo. Το μοντέλο είναι το Yoga Slim 7 14ARE05 και ο επεξεργαστής είναι AMD Ryzen 5 4500U with Radeon Graphics (2.38 GHz). Η μνήμη RAM είναι 16GB (15.4 GB μπορούν να χρησιμοποιηθούν) καθώς και ο τύπος συστήματος είναι 64-bit.

Διαμέσου του MATLAB, καταφέραμε να αναπτύξουμε, να επεξεργαστούμε και να εκτελέσουμε σύνθετους αλγορίθμους, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις που βοήθησαν στην κατανόηση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, το περιβάλλον αυτό επέτρεψε την απεικόνιση των δεδομένων με γραφικές παραστάσεις, εξυπηρετώντας την οπτική ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Συγκρίνουμε δύο διαφορετικά είδη HAPS στο περιβάλλον προσομοίωσης. Ο πρώτος τύπος είναι τα αεροστατικά μπαλόνια και ο δεύτερος τύπος είναι τα αεροδυναμικά. Μελετάμε ένα HAPS και έναν επίγειο δέκτη. Ορίζουμε στο MATLAB τις μεταβλητές που θα χρησιμοποιήσουμε για να προσομοιώσουμε το κάθε μέγεθος.

Για το κέρδος του πομπού $G_{T_{x,i}}$, δηλαδή των δύο διαφορετικών HAPS υποθέτουμε δύο διαφορετικές τιμές για το καθένα, τα 32 dBi όταν χρησιμοποιείται η συχνότητα των 28 GHz και τα 42 dBi για συχνότητα ίση με 48 GHz [67]. Για το κέρδος του δέκτη δηλαδή του επίγειου σταθμού βάσης $G_{R_{x,i}}$ υποθέτουμε τα 20 dBi.

Κάθε κεραία έχει μία μέγιστη ισχύ την οποία μετράμε σε dBm ($P_{max}(dbm)$). Στην συνέχεια μετατρέπουμε τις τιμές από dbm σε watt με την εξής εξίσωση:

$$P(W) = 10^{\frac{P(dBm)-30}{10}} \quad (4.1)$$

Κάθε κεραία έχει ένα μέγιστο αριθμό από physical resource blocks, τα οποία είναι τα τμήματα εύρους ζώνης που μπορεί να διαθέσει στους χρήστες.

Ο δείκτης Δ_p είναι η παράμετρος που χρησιμοποιήσαμε στο μοντέλο υπολογισμού ισχύος, η οποία πολλαπλασιάζεται με την ισχύ της κεραίας και εξαρτάται από το φορτίο. Υποθέτουμε τις τιμές 4, και 8, για το αεροστατικό HAPS και 4, και 8 για το αεροδυναμικό HAPS, αντίστοιχα. Για την κατανάλωση ισχύος P_{idle} , η οποία δηλώνει την ισχύ που καταναλώνεται όταν ο πομπός βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας ("idle"), υποθέσαμε τις τιμές 0.2 W και 0.5 W για τα αεροστατικά HAPS και 1 W και 2 W για τα αεροδυναμικά, αντίστοιχα. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα αεροδυναμικά HAPS αναμένεται να έχουν έξτρα κατανάλωση ενέργειας λόγω της φύσης τους και της μικρής κίνησης που κάνουν όπως προαναφέρθηκε. Για το N_{TRX_i} , το οποίο καθορίζει τον αριθμό των κεραιών εκπομπής για κάθε HAPS επιλέξαμε τις τιμές 8, 32, και 8, 32 αντίστοιχα.

Στη συνέχεια ορίζουμε τις εξής μεταβλητές N_{RX_u} για τις απώλειες του παραλήπτη και την $L_{T_{x,i}}$ για τις απώλειες του πομπού. Και οι δύο τιμές είναι σε dB και είναι ίσες με 1 dB. Ο λόγος του σύνθετου κέρδους σε αναλογία με τη θερμοκρασία θορύβου $R_{gt_{UE}}$ επιλέχθηκε ίσο με 8.5 dB/K.

Για το backhaul δίκτυο εξετάζουμε διαφορετικές τιμές του εύρους ζώνης για τα δύο είδη HAPS και συγκεκριμένα: 100 MHz, 200 MHz και 400 MHz αντίστοιχα. Έπειτα υπολογίζουμε το εύρος ζώνης ανά ζεύγος πόρων (Resource Blocks) για μια δεδομένη συχνότητα με subcarrier spacing $\Delta_f = 15$ kHz. Δηλώνουμε τον παράγοντα θορύβου (Noise Figure) του τερματικού χρήστη (UE) $NF_{UE} = 6$ dB και στη συνέχεια υπολογίζουμε την ισχύ ανά subcarrier. Η συνολική ισχύς του πομπού P_t διαιρείται με τον αριθμό των τομέων $N_{sectors}$ και το αποτέλεσμα διαιρείται με τον συνολικό αριθμό των subcarriers (που υπολογίζεται ως $c_{i,u} * 12$ από το [68]). Στη συνέχεια μετατρέπουμε την ισχύ ανά subcarrier σε dBm, λαμβάνοντας υπόψη το κέρδος της κεραίας $G_{T_{x,i}}$ και τις απώλειες του καλωδίου $L_{T_{x,i}}$.

Στον κώδικα MATLAB ορίζουμε τις συντεταγμένες (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος και υψόμετρο) για δύο διαφορετικά σημεία: το HAPS (High-Altitude Platform Station) και ένα αναφορικό σημείο στη Γη στην δική μας περίπτωση πήραμε τις συντεταγμένες της Θεσσαλονίκης και βάλαμε το κάθε είδος HAPS να βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σημείο αναφοράς. Οι συντεταγμένες είναι οι εξής για το HAPS: Γεωγραφικό πλάτος: 40.63, Γεωγραφικό μήκος: 22.94, Ύψος HAPS: Το υψόμετρο του HAPS είναι 20 χιλιάδες μέτρα (ή 20 km) πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Όσον αφορά στο γεωγραφικό σημείο που διαλέξαμε για τις μετρήσεις, θεωρήσαμε τις εξής συντεταγμένες: Γεωγραφικό πλάτος: 40.63, Γεωγραφικό μήκος: 22.94 Ύψος του χρήστη: είναι 0 αφού βρίσκεται πάνω στη γη. Στη συνέχεια ορίζουμε ότι υπάρχουν 2 κεραίες λήψης N_{RX_u} και το f_{GHz} αναπαριστά τις συχνότητες λειτουργίας διαφορετικών τύπων HAPS (High-Altitude Platform Stations) σε GHz (gigahertz).

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την τιμή της ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος (EIRP) $EIRP$ για κάθε τύπο HAPS βασισμένη στις συχνότητες f_{GHz} και την αντίστοιχη τιμή κέρδους κεραίας $G_{T_{xi}}$. Υποθέσαμε το $P_{BH_{max}} = [36, 42, 36, 42]$ (dbm).

Παρακάτω στον πίνακα φαίνονται οι μεταβλητές και οι τιμές:

Μεταβλητή	Τιμή
$G_{R_{xi}}$	20 dBi
$L_{R_{xi}}$	1 dB
$L_{T_{xi}}$	1 dB
$R_{gt_{UE}}$	8.5 dB/K
BW per RB pair	$2 \times 180 \times 10^3$ Hz
NF_{UE}	6 dB
lat_{HAPS}	40.63 degrees
lon_{HAPS}	22.94 degrees
alt_{HAPS}	20×10^3 meters
lat_{user}	40.63 degrees
lon_{user}	22.94 degrees
alt_{user}	0 meters
N_{RX_u}	2
$EIRP_{max}$	85 dBm
T_C	25 Celsius
User data rate	5 Mbps

Πίνακας 4.1: Πίνακας μεταβλητών και τιμών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μεταβλητές και οι τιμές που έχουν δοθεί σε κάθε τύπο HAPS:

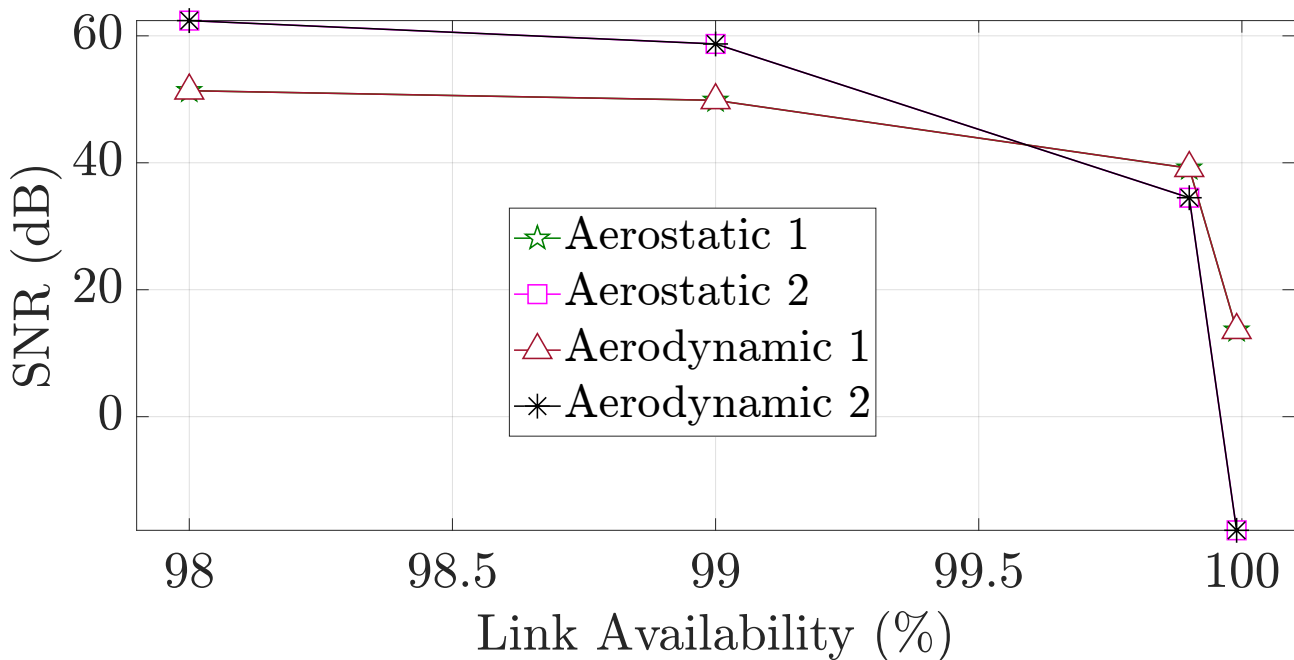
Μεταβλητή	Aerostatic 1	Aerostatic 2	Aerodynamic 1	Aerodynamic 2
$G_{T_{xi}}$	32 dBi	42 dBi	32 dBi	42 dBi
$P_{t_{dBm}}$	36 dBm	24 dBm	36 dBm	24 dBm
Δ_p	4	8	4	8
P_{idle}	0.5	1	1	2
$N_{sectors}$	1	1	1	1
N_{TRX_i}	8	32	8	32
BW_{BH}	100 MHz	200 MHz	100 MHz	200 MHz
f_{GHz}	28 GHz	48 GHz	28 GHz	48 GHz
$P_{BH_{max}}$	32 dBm	42 dBm	36 dBm	42 dBm

Πίνακας 4.2: Πίνακας μεταβλητών και τιμών για διαφορετικούς τύπους HAPS

4.3 Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας θα αναλυθούν τα αποτελέσματα της συγκρίσεως των HAPS, εστιάζοντας σε παραμέτρους που καθορίζουν την αποδοτικότητα και την ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχουν. Ένας σημαντικός τομέας που αξίζει να εξεταστεί είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα των HAPS, καθώς και η σχέση της με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους. Παράλληλα, το SNR αποτελεί μια από τις βασικότερες μετρικές για την ποιότητα των ασύρματων επικοινωνιών, έτσι το SNR των HAPS θα μας δώσει έναν ουσιαστικό δείκτη για την απόδοση των συστημάτων. Τέλος, η συχνότητα και το bandwidth είναι δύο ακόμη παράγοντες

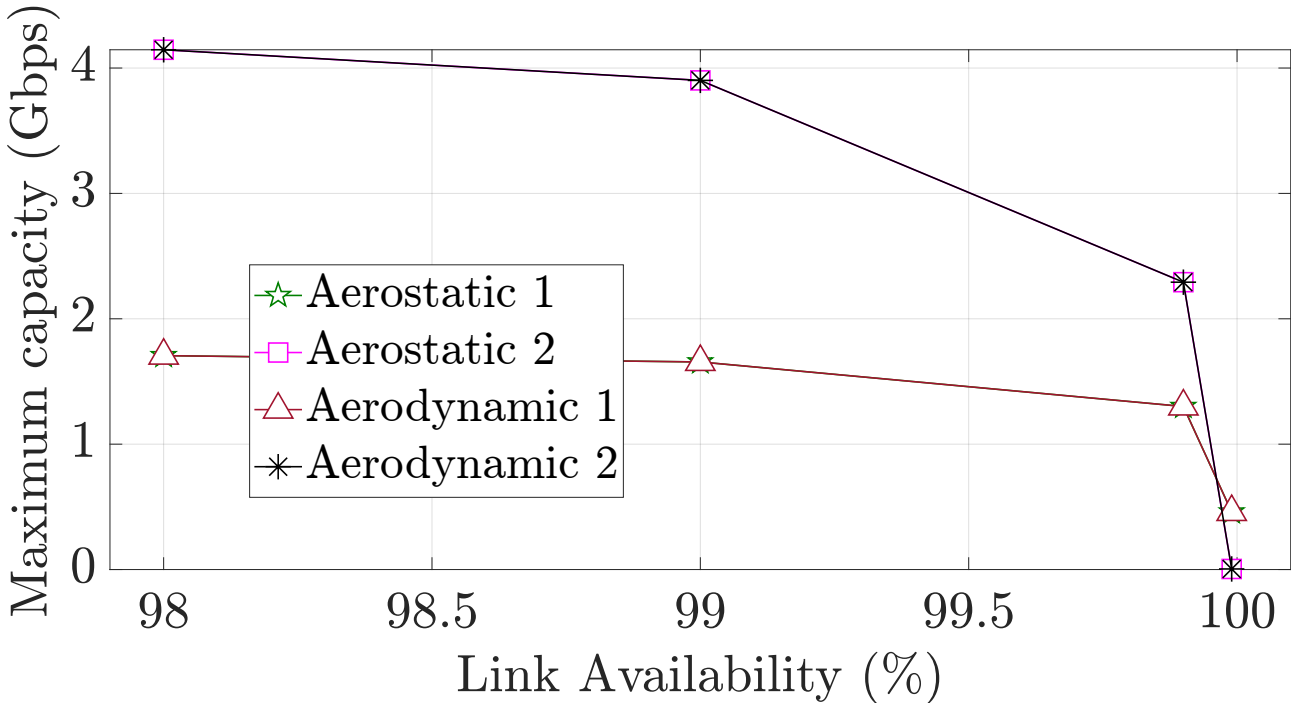
που καθορίζουν την ικανότητα των HAPS να υποστηρίξουν υψηλής ταχύτητας επικοινωνίες και να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών. Μέσω της εξέτασης αυτών των παραγόντων, το κεφάλαιο αποσκοπεί στην παροχή μιας ολοκληρωμένης εικόνας για τα πλεονεκτήματα, τις δυνατότητες, αλλά και τις προκλήσεις που συνδέονται με τη χρήση των HAPS στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Παρακάτω στα αποτελέσματα συγκρίνουμε τις δύο κυριότερες κατηγορίες των HAPS, τα αεροστατικά HAPS και τα αεροδυναμικά HAPS. Θέλουμε να μελετήσουμε την επίδραση διαφορετικών κερδών κεραίας πομπού για τα αεροστατικά και τα αεροδυναμικά HAPS. Λαμβάνουμε υπόψη μας δύο διαφορετικές τιμές, η καθεμία να αντιστοιχεί σε μία συχνότητα και συγκεκριμένο εύρος ζώνης, τα οποία συνοψίζονται στον παραπάνω πίνακα 4.2. Οι εικόνες απεικονίζουν τα δύο είδη HAPS ομαδοποιημένα βάση των συχνοτήτων τους, το αεροστατικό HAPS (π.χ. Balloon, Airship) με τις επικρατέστερες συχνότητες λειτουργίας στη βιβλιογραφία τα 28 GHz [22] (Aerostatic 1) και τα 48 GHz [22] (Aerostatic 2) και το αεροδυναμικό HAPS (π.χ. Airplane) στα 28 GHz (Aerodynamic 1) και στα 48 GHz (Aerodynamic 2), αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση του SNR (Signal-to-Noise Ratio) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) για τις διάφορες κατηγορίες HAPS.

Παρατηρώντας την εικόνα 4.1, βλέπουμε την συσχέτιση του SNR (Signal-to-Noise Ratio) της ζεύξης, δηλαδή του λόγου του σήματος ως προς τον θόρυβο, σε συνάρτηση με τις διαφορετικές τιμές διαθεσιμότητας της ζεύξης μεταξύ ενός HAPS και του επίγειου σταθμού για τα διαφορετικά είδη HAPS. Θέλοντας να μελετήσουμε την επίδραση διαφορετικών κερδών κεραίας πομπού για τα αεροστατικά και τα αεροδυναμικά HAPS, λαμβάνουμε υπόψη μας δύο διαφορετικές τιμές, η καθεμία να αντιστοιχεί σε μία συχνότητα και συγκεκριμένο εύρος ζώνης, τα οποία συνοψίζονται στον παραπάνω πίνακα 4.2. Απεικονίζονται ομαδοποιημένα βάση των συχνοτήτων τους, το αεροστατικό HAPS 1 και το αεροδυναμικό HAPS 1 με συχνότητα λειτουργίας 28 GHz τα οποία συμπίπτουν μεταξύ τους, το ίδιο συμβαίνει με το αεροστατικό HAPS 2 με συχνότητα λειτουργίας τα 48 GHz και το αεροδυναμικό HAPS 2 με την εξίσου ίδια συχνότητα. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το Link Availability (διαθεσιμότητα της σύνδεσης) μειώνεται το SNR. Στον βωμό της πραγματοποίησης μιας αξιόπιστης και σταθερής σύνδεσης για μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου, το διαθέσιμο SNR της ζεύξης πέφτει για όλους τους τύπους HAPS. Ωστόσο στην περίπτωση του αεροστατικού και του αεροδυναμικού με συχνότητα λειτουργίας

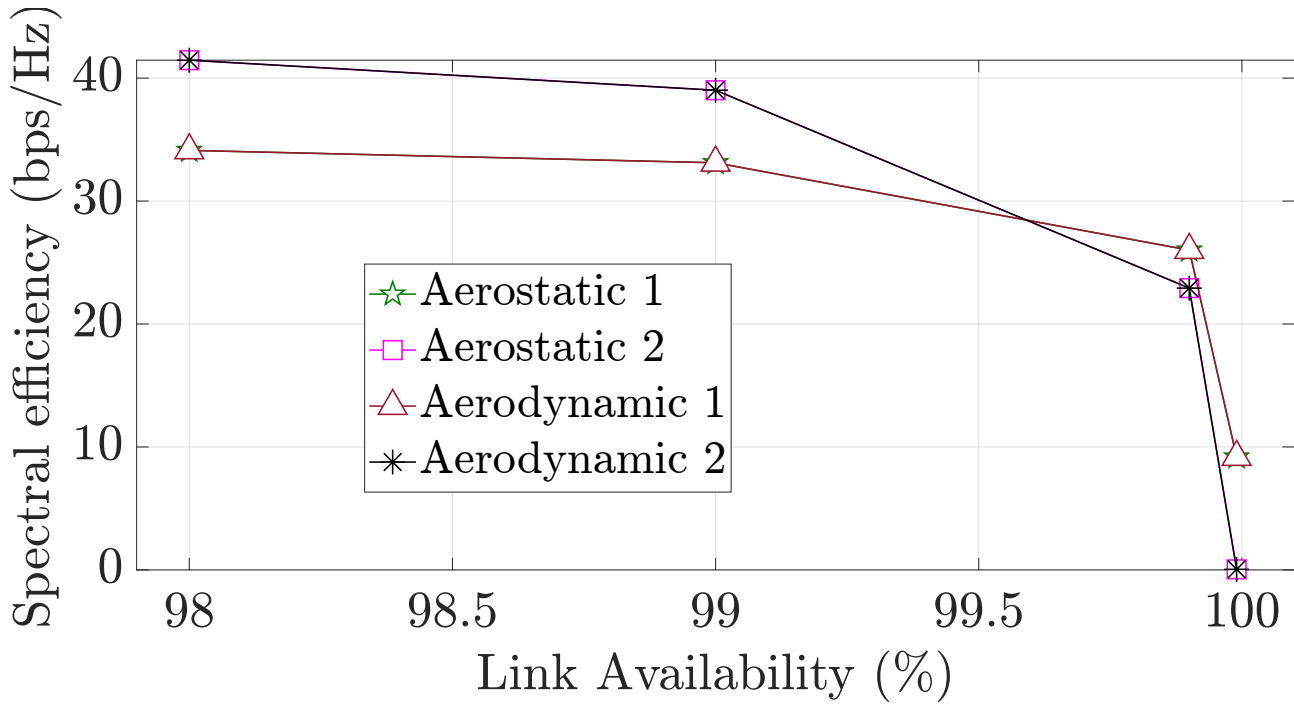
τα 48 GHz παρατηρούμε υψηλότερο SNR, άρα μπορούμε να στείλουμε περισσότερα δεδομένα χωρίς να έχουμε απώλειες. Ενώ στην περίπτωση του αεροστατικού και του αεροδυναμικού HAPS με συχνότητα λειτουργίας τα 28 GHz έχουμε χαμηλό SNR, άρα πέφτει πολύ η ισχύς που μένει διαθέσιμη για την αποστολή δεδομένων και κατά συνέπεια ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.



Σχήμα 4.2: Γραφική απεικόνιση της μέγιστης χωρητικότητας (Maximum Capacity) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.

Παρατηρώντας την εικόνα 4.2, βλέπουμε την γραφική απεικόνιση της μέγιστης χωρητικότητας (Maximum Capacity) της σύνδεσης σε συνάρτηση με το ποσοστό του χρόνου που η σύνδεση θα είναι αξιόπιστη μεταξύ ενός HAPS και ενός επίγειου σταθμού. Η μέγιστη χωρητικότητα της ζεύξης αναφέρεται στο μέγιστο όγκο δεδομένων που μπορεί να μεταφερθεί ανά δευτερόλεπτο (Gbps). Βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται η διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) ως ποσοστό του χρόνου τόσο μειώνεται η μέγιστη χωρητικότητα (Maximum Capacity) της σύνδεσης. Για ένα συγκεκριμένο Link Availability π.χ. 99% βλέπουμε ότι το Aerostatic 1 και το Aerodynamic 1 με την συχνότητα των 28GHz, αυτά που έχουν δηλαδή την πιο μικρή συχνότητα, έχουν και την πιο μικρή χωρητικότητα. Ενώ τα aerostatic 2 και aerodynamic 2 με την μεγαλύτερη συχνότητα των 48GHz έχουν μεγαλύτερη μέγιστη χωρητικότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι στις υψηλότερες συχνότητες έχουμε μέγιστο κέρδος κεραίας, με αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερο SNR, όπως είδαμε και στο προηγούμενο διάγραμμα και άρα μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα. Όσο αυξάνουμε το link availability, δηλαδή τις ανάγκες της σύνδεσης, η χωρητικότητα που θα έχουμε πέφτει και αυτό συμβαίνει και στις δύο περιπτώσεις.

Στην εικόνα 4.3, απεικονίζεται η γραφική αναπαράσταση της φασματικής αποδοτικότητας (Spectral Efficiency) σε συνάρτηση με το ποσοστό του χρόνου που η σύνδεση είναι διαθέσιμη (Link Availability) μεταξύ ενός HAPS και ενός επίγειου σταθμού. Η φασματική αποδοτικότητα συνδέεται με τον ρυθμό δεδομένων (data rate). Οπότε όπως δείξαμε στο πρώτο διάγραμμα, όταν μία συχνότητα έχει μεγαλύτερο κέρδος κεραίας, μεγαλύτερο αριθμό από κεραίες με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει καλύτερο SNR. Άρα όσο καλύτερο SNR, τόσο καλύτερο το data rate που μπορούμε να επιτύχουμε, άρα αυτό μεταφράζεται και σε μεγαλύτερη μέγιστη χωρητικότητα και φασματική αποδοτικότητα. Παρατηρούμε στην εικόνα ότι όσο αυξάνεται η αξιοπιστία της σύνδεσης, τόσο μειώνεται η φα-

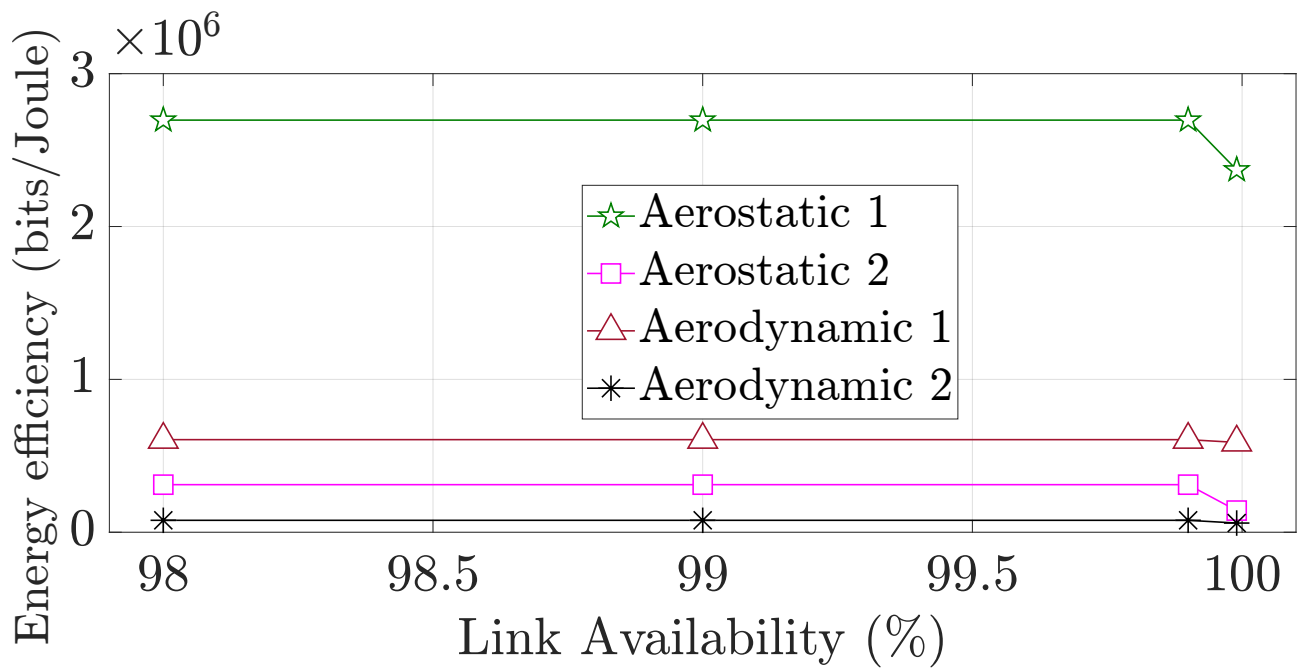


Σχήμα 4.3: Γραφική απεικόνιση του της φασματικής αποδοτικότητας (Spectral Efficiency) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.

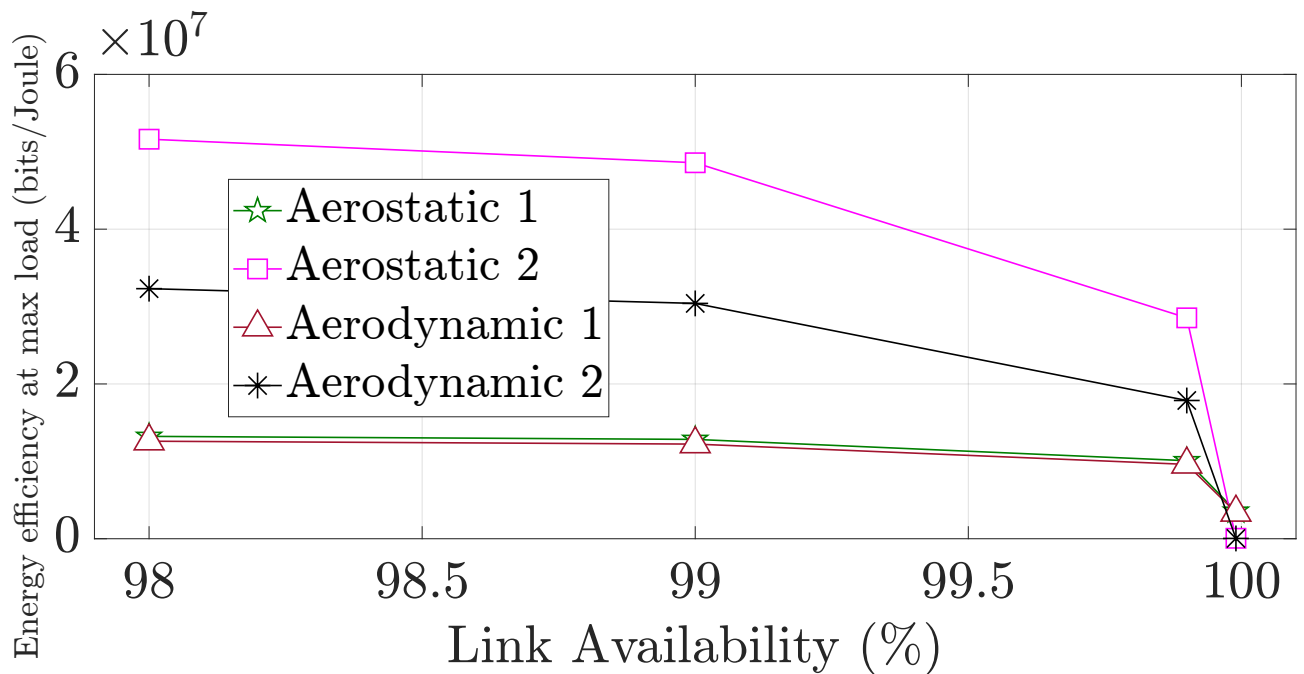
σματική αποδοτικότητα της, δηλαδή η ποσότητα πληροφοριών που μπορεί να μεταφερθεί για ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης που έχουμε ορίσει. Το αεροστατικό HAPS και το αεροδυναμικό HAPS με συχνότητα λειτουργίας τα 28 GHz μπορούν να μεταφέρουν μικρότερη ποσότητα δεδομένων σε σχέση με το αεροστατικό και το αεροδυναμικό με συχνότητα λειτουργίας τα 48 GHz.

Στην εικόνα 4.4, παρουσιάζουμε την ενεργειακή αποδοτικότητα (Energy Efficiency) ως προς τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) ανάμεσα σε έναν επίγειο σταθμό και ένα HAPS. Βάση του πόση ενέργεια καταναλώνει κάθε είδος HAPS, βλέπουμε ότι όσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνεται, τόσο περισσότερη είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα. Παρατηρούμε στην εικόνα ότι όσο αυξάνεται η διαθεσιμότητα της σύνδεσης, η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος παραμένει σταθερή μέχρι για 99% Link Availability. Άρα το αεροστατικό 1 με την μικρότερη συχνότητα έχει και την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή καταφέρει να μεταφέρει δεδομένα χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια, για τις περισσότερες τιμές διαθεσιμότητας της ζεύξης μεταξύ του HAPS και του επίγειου σταθμού., ακολουθεί το αεροδυναμικό 1, το αεροστατικό 2 και το αεροδυναμικό 2. Παίζει κυρίαρχο ρόλο η συχνότητα, όσο πιο μικρή είναι η συχνότητα τόσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνεται. Το αεροστατικό 1 καταναλώνει λιγότερη ενέργεια όπως προείπαμε, λόγω του $P_{idle} = 0.2W$ που έχουμε θέσει.

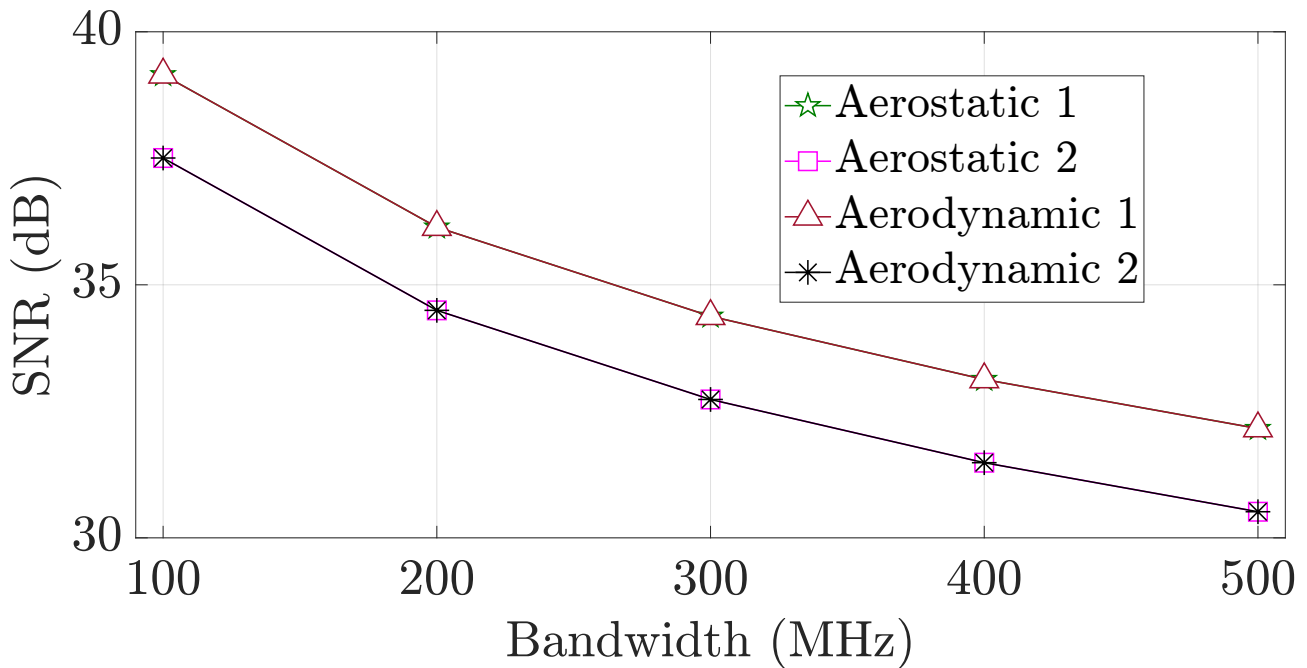
Παρατηρώντας στην παρακάτω εικόνα 4.5, βλέπουμε την απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας στο μέγιστο φορτίο (Energy Efficiency at max load) σε συνάρτηση με το ποσοστό που η σύνδεση μεταξύ ενός HAPS και ενός επίγειου σταθμού παραμένει διαθέσιμη (Link Availability). Η ενεργειακή αποδοτικότητα στο μέγιστο φορτίο είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος όταν η κίνηση είναι ίση με τη μέγιστη χωρητικότητα της ζεύξης. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η διαθεσιμότητα της σύνδεσης, τόσο μειώνεται η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι τον πρωταρχικό ρόλο κατέχει η μέγιστη χωρητικότητα της ζεύξης, η οποία όσο αυξάνεται η διαθεσιμότητα της σύνδεσης τόσο αυξάνεται, όπως βλέπουμε στο σχήμα



Σχήμα 4.4: Γραφική απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.



Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας στο μέγιστο φορτίο (Energy Efficiency at max load) του συστήματος σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης (Link Availability) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.



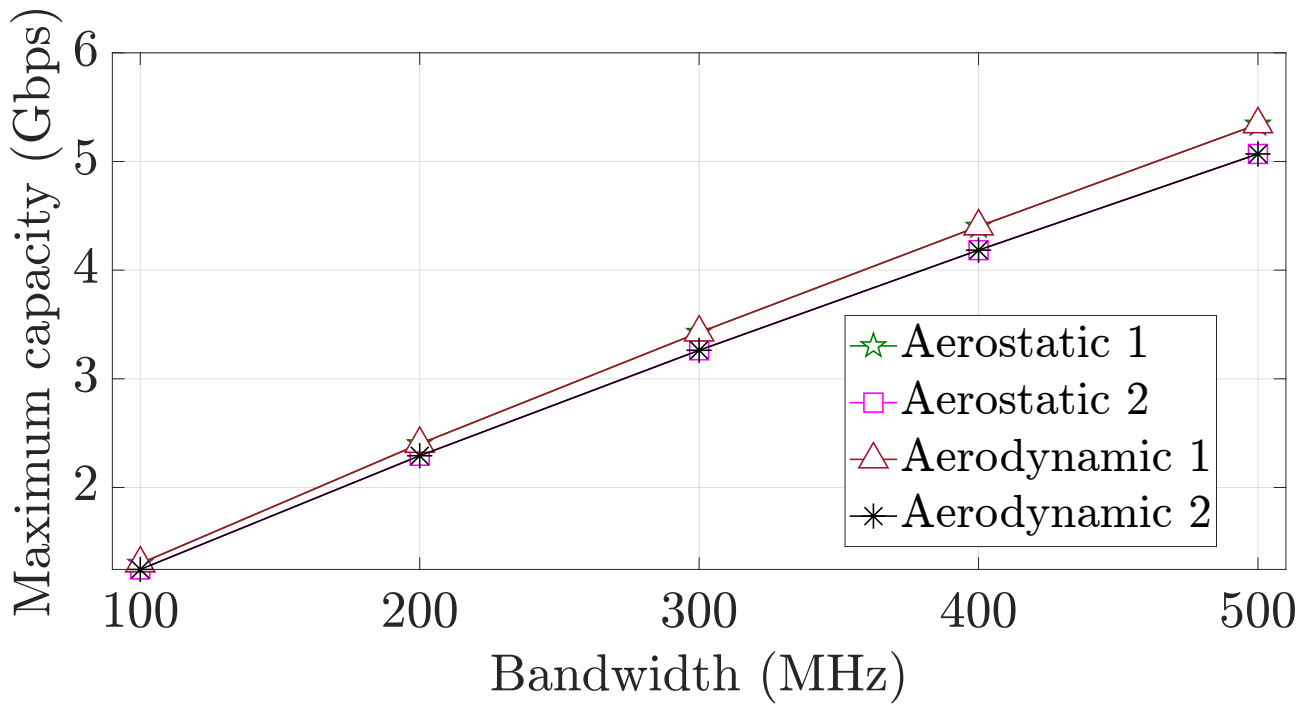
Σχήμα 4.6: Γραφική απεικόνιση του SNR (Signal-to-Noise Ratio) του συστήματος σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (Bandwidth)) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.

4.2. Το αεροστατικό HAPS 2 και το αεροδυναμικό 2 έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και η ενέργεια που χρειάζεται δεν είναι τόσο μεγάλη σε σχέση με το αεροστατικό 1 και το αεροδυναμικό 1.

Στα πρώτα διαγράμματα διακρίνουμε ότι μέχρι το 99% Link Availability όπως προείπαμε, βλέπουμε ότι έχουμε καλύτερα αποτελέσματα το να έχουμε μεγαλύτερη συχνότητα είναι χειρότερο από το να έχουμε την πιο μικρή. Το Link Availability που ορίσαμε στο MATLAB για την εξαγωγή των παρακάτω αποτελεσμάτων είναι το 99.9%, αυτό μας δίνει τα αντίθετα αποτελέσματα, δηλαδή ότι οι πιο χαμηλές συχνότητες έχουν γίνει καλύτερες από τις πιο υψηλές. Για πιο ισχυρό Availability, για να καταφέρουμε να το πετύχουμε αυτό στις υψηλότερες συχνότητες η απόδοση πέφτει πάρα πολύ και το SNR μειώνεται υπερβολικά.

Παρατηρώντας την παρακάτω γραφική απεικόνιση 4.6, βλέπουμε το SNR (Signal-to-Noise Ratio), το οποίο αναφέρεται στην αναλογία μεταξύ της ισχύος του επιθυμητού σήματος και της ισχύος του θορύβου σε ένα συστηματικό περιβάλλον επικοινωνίας και χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποιότητα της επικοινωνίας, σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (bandwidth) της σύνδεσης για τις τιμές που έχουμε ορίσει. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης τόσο μειώνεται το SNR. Συνολικά, το αεροστατικό HAPS και το αεροδυναμικό HAPS με συχνότητα λειτουργίας τα 28 GHz εφόσον έχουν υψηλό SNR μπορούν να πετύχουν καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας, με υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και λιγότερα σφάλματα στη μετάδοση. Ενώ στην περίπτωση των 48 GHz το εύρος ζώνης μειώνεται περισσότερο, άρα λιγότερα σήματα μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα στο ίδιο συχνοτικό εύρος. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα δεν μπορούν να διακριθούν καλύτερα από τον θόρυβο, καθώς η ενέργεια τους δεν κατανέμεται σε μια μεγαλύτερη ζώνη συχνοτήτων.

Παρατηρώντας την παρακάτω εικόνα 4.7, βλέπουμε την γραφική απεικόνιση της μέγιστης χωρητικότητας (Maximum Capacity) σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (bandwidth) της σύνδεσης μεταξύ ενός HAPS και ενός επίγειου σταθμού για τις τιμές του εύρους ζώνης που έχουμε ορίσει. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης, τόσο αυξάνεται και η μέγιστη χωρητικότητα της σύνδεσης σε δεδομένα. Αυτό σημαίνει ότι όσο περισσότερο

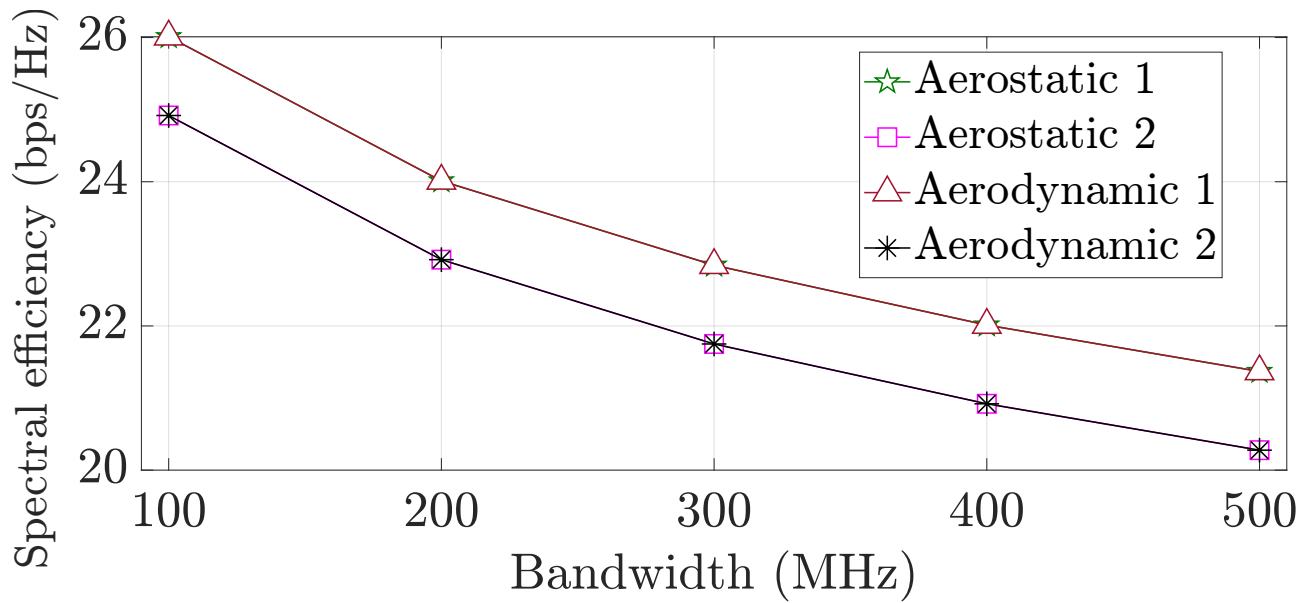


Σχήμα 4.7: Γραφική απεικόνιση της μέγιστης χωρητικότητας (Maximum Capacity) του συστήματος σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (Bandwidth)) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.

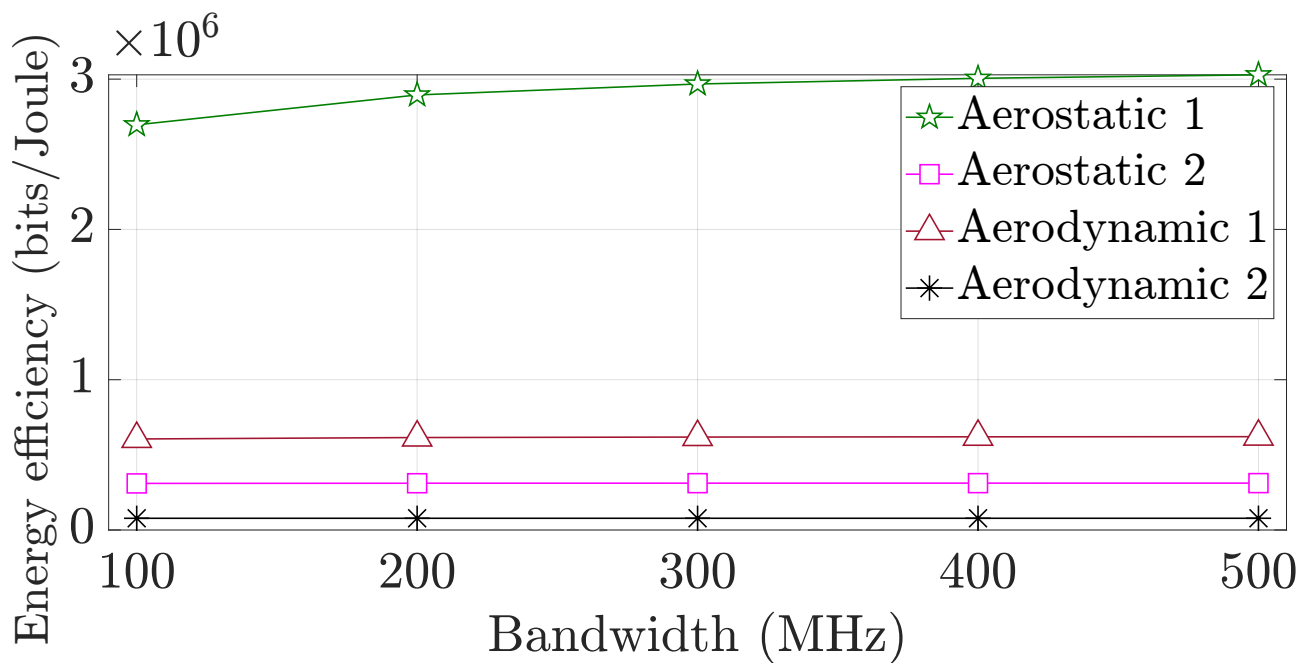
εύρος ζώνης έχει μια σύνδεση, τόσο περισσότερα δεδομένα μπορεί να μεταφέρει σε μια μονάδα χρόνου, καθιστώντας τη μέγιστη χωρητικότητα υψηλότερη. Αυτό αντικατοπτρίζει την ιδιότητα της μέγιστης χωρητικότητας να αυξάνεται γραμμικά με το εύρος ζώνης. Στην εικόνα τα αεροδυναμικά με τα αεροστατικά HAPS έχουν σχεδόν την ίδια μέγιστη χωρητικότητα της σύνδεσης σε σχέση με την αύξηση του εύρους ζώνης, με το αεροστατικό και το αεροδυναμικό HAPS στα 28 GHz να υπερέχουν ελάχιστα.

Παρατηρώντας την παρακάτω εικόνα 4.8, βλέπουμε την γραφική απεικόνιση της φασματικής αποδοτικότητας (Maximum Capacity) σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (bandwidth) της σύνδεσης μεταξύ ενός HAPS και ενός επίγειου σταθμού για τις τιμές του εύρους ζώνης που έχουμε ορίσει. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης, τόσο μειώνεται η φασματική αποδοτικότητα του συστήματος. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει γιατί, με την αύξηση του εύρους ζώνης, αυξάνεται το εύρος των συχνοτήτων που είναι διαθέσιμο για τη μεταφορά δεδομένων. Ωστόσο, αυτό επίσης σημαίνει ότι περισσότερες συχνότητες πρέπει να διαχειριστούν, και ο χώρος φάσματος γίνεται πιο περιορισμένος για κάθε συχνότητα. Επιπλέον, η αύξηση του εύρους ζώνης μπορεί να συνεπάγεται περισσότερες παρεμβολές και θόρυβο στο φάσμα, που επιπλέον μειώνουν την αποδοτικότητα. Στην εικόνα βλέπουμε ότι το αεροστατικό και το αεροδυναμικό HAPS με συχνότητα λειτουργίας τα 28GHz έχουν περισσότερη φασματική αποδοτικότητα όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης, ενώ στην περίπτωση των HAPS με συχνότητα τα 48GHz, η φασματική αποδοτικότητα, δηλαδή πόσα bits μπορείς να στείλεις ανά δευτερόλεπτο, είναι πιο χαμηλή σε σχέση με την αύξηση του εύρους ζώνης.

Παρατηρώντας την παρακάτω εικόνα 4.9, βλέπουμε την γραφική απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency) σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (bandwidth) της σύνδεσης μεταξύ ενός HAPS και ενός επίγειου σταθμού για τις τιμές του εύρους ζώνης που έχουμε ορίσει. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης, η ενέργεια που απαιτείται για τη μεταφορά δεδομένων παραμένει σχετικά σταθερή, ανεξάρτητα από το εύρος της διαθέσιμης ζώνης για την περίπτωση του αεροστατικού και του αεροδυναμικού HAPS



Σχήμα 4.8: Γραφική απεικόνιση της φασματικής αποδοτικότητας (Spectral Efficiency) του συστήματος σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (Bandwidth)) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.



Σχήμα 4.9: Γραφική απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency) του συστήματος σε συνάρτηση με το εύρος ζώνης (Bandwidth) για τις διαφορετικές κατηγορίες HAPS.

με συχνότητα λειτουργίας τα 48 GHz, καθώς και για το αεροδυναμικό HAPS με συχνότητα λειτουργίας τα 28 GHz. Το αεροστατικό HAPS με συχνότητα λειτουργίας τα 28 GHz βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται το εύρος ζώνης, τόσο μειώνεται η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί το αυξημένο εύρος ζώνης συνήθως απαιτεί περισσότερη ενέργεια για τη μετάδοση των δεδομένων, ειδικά όταν αυξάνεται η ταχύτητα μετάδοσης.

4.4 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιήσαμε μια εκτενή ανάλυση της απόδοσης του συστήματος με τη χρήση προσομοιώσεων και αναλύσεων αποτελεσμάτων. Ο στόχος μας ήταν να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητα, την απόδοση και την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων και παραγόντων στη λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα, αναπτύξαμε ένα εξειδικευμένο περιβάλλον προσομοίωσης που επέτρεπε τη δημιουργία και την εκτέλεση σεναρίων προσομοίωσης που αντικατοπτρίζουν τον πραγματικό κόσμο. Το περιβάλλον του MATLAB μας επέτρεψε να παρακολουθούμε τη συμπεριφορά του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες. Συλλέξαμε και αναλύσαμε λεπτομερή δεδομένα από τις προσομοιώσεις μας. Αυτή η ανάλυση συμπεριλάμβανε την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος, την ενεργειακή αποδοτικότητα στο μέγιστο φορτίο, την διαθεσιμότητα της σύνδεσης μεταξύ του HAPS και του επίγειου σταθμού, την μέγιστη χωρητικότητα, την φασματική αποδοτικότητα, καθώς το SNR (Signal-to-Noise Ratio) και το εύρος ζώνης.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

5.1 Εισαγωγή

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας μας, θα παρουσιάσουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκριτική ανάλυση των High-Altitude Platform Stations (HAPS) σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, καθώς και προτάσεις βελτιώσεων για μελλοντικές έρευνες και επεκτάσεις. Το κεφάλαιο θα ολοκληρωθεί με έναν επίλογο που θα αναδείξει τη σημασία αυτής της έρευνας και τη συμβολή της στον τομέα των HAPS. Επιπλέον θα αναφερθούν και τρόποι εξέλιξης αυτής της εργασίας.

5.2 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο αυτής της πτυχιακής εργασίας, ερευνήσαμε τη σχέση μεταξύ ενεργειακής αποδοτικότητας, εύρους ζώνης και συχνότητας λειτουργίας στις υψηλές ατμοσφαιρικές πλατφόρμες (HAPS), εστιάζοντας σε δύο διαφορετικά είδη HAPS, μελετήσαμε την επίδραση διαφορετικών κερδών κεραίας πομπού για τα αεροστατικά και τα αεροδυναμικά HAPS. Λάβαμε υπόψη μας δύο διαφορετικές τιμές στο MATLAB, η καθεμία να αντιστοιχεί σε μία συχνότητα και συγκεκριμένο εύρος ζώνης, τα οποία συνοψίζονται στον παραπάνω πίνακα 4.2. Τα αεροστατικά και τα αεροδυναμικά, καθώς και σε δύο διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας, 28 GHz και 48 GHz. Οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα από αυτήν τη μελέτη προσφέρουν βαθύτερη κατανόηση του πώς διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση των HAPS σε ό,τι αφορά τη μετάδοση δεδομένων. Τα παραπάνω αποτελέσματα υπογραμμίζουν τη σημασία της συχνότητας λειτουργίας στον καθορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας, με υψηλότερες συχνότητες να προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα, αλλά σε αντάλλαγμα υψηλότερων απαιτήσεων για διαθεσιμότητα της σύνδεσης. Το SNR αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη σχεδίαση και την απόδοση των συστημάτων επικοινωνίας HAPS, και η συχνότητα λειτουργίας παίζει καθοριστικό ρόλο σε αυτήν τη σχέση. Όταν μία συχνότητα έχει μεγαλύτερο κέρδος κεραίας, μεγαλύτερο αριθμό από κεραίες με αποτέλεσμα να επιτυγχάνει καλύτερο SNR. Άρα όσο καλύτερο SNR, τόσο καλύτερο ρυθμό δεδομένων (data rate) που μπορούμε να επιτύχουμε, άρα αυτό μεταφράζεται και σε μεγαλύτερη μέγιστη χωρητικότητα και φασματική αποδοτικότητα. Παρατηρούμε ότι τα αεροστατικά HAPS είναι πιο αποδοτικά ενεργειακά, ενώ τα αεροδυναμικά μπορούν να σηκώσουν μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο.

Από την παρατήρηση των πρώτων διαγραμμάτων συμπεραίνουμε ότι, μέχρι το 99% διαθεσιμότητας της σύνδεσης (Link Availability), η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων είναι προτιμότερη από τη χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι, για χαμηλές απαιτήσεις διαθεσιμότητας, η χρήση υψηλότερων συχνοτήτων επιφέρει καλύτερη απόδοση.

Ωστόσο, όταν απαιτείται πολύ υψηλό Link Availability, όπως το 99.9%, παρατηρούμε μια αντίστροφη συμπεριφορά. Σε αυτήν την περίπτωση, η χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων γίνεται πιο αποδοτική από τη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, για πιο αξιόπιστες συνδέσεις, η απόδοση προσκρούει σε περιορισμούς, και το Signal-to-Noise Ratio (SNR) μειώνεται σημαντικά στις υψηλότερες συχνότητες.

Συνολικά, αυτά τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν την σημασία της επιλογής της συχνότητας λειτουργίας, του κέρδους κεραίας καθώς και το εύρος ζώνης που θέσαμε ανάλογα με τις απαιτήσεις διαθεσιμότητας της σύνδεσης, με την υψηλότερη συχνότητα να προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, αλλά με περιορισμένη διαθεσιμότητα σε ακραίες συνθήκες διακοπής.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα των HAPS συνεχίζεται, και η απόδοση τους ενδέχεται να βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου. Επομένως, η μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας και των χαρακτηριστικών επίδοσης των HAPS παραμένει ένα σημαντικό πεδίο έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και των ψηφιακών επικοινωνιών.

Το κλείσιμο αυτής της εργασίας αποτελεί πρόσκληση για μελλοντικές μελέτες και έρευνες στον συναρπαστικό κόσμο των HAPS, που υπόσχονται να επαναπροσδιορίσουν τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε και αναπτυσσόμαστε στον ψηφιακό μας πλανήτη.

5.3 Προτάσεις βελτίωσης για μελλοντικές επεκτάσεις

Η παρούσα εργασία ανοίγει τον δρόμο για πολλές μελλοντικές ερευνητικές προκλήσεις στον κόσμο των υψηλών ατμοσφαιρικών πλατφορμών (HAPS). Στην ενότητα αυτή, θα εξετάσουμε τις προοπτικές εξέλιξης της παρούσας έρευνας και πώς μπορεί να επεκταθεί και να εμβαθυνθεί προκειμένου να προσφέρει ακόμη περισσότερα στην κατανόηση και την εφαρμογή των HAPS. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες σημαντικές προοπτικές εξέλιξης της πτυχιακής αυτής εργασίας:

- Πρόβλημα ανάθεσης πόρων σε πολύπλοκα συστήματα, εναέρια-δορυφορικά σε ποσοτική ανάλυση. Το πρόβλημα ανάθεσης πόρων είναι ένα πολύ συνηθισμένο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται σε πολύπλοκα συστήματα, όπως εναέρια και δορυφορικά δίκτυα, και απαιτεί τη βέλτιστη ανάθεση διαθέσιμων πόρων (όπως επικοινωνιακά δορυφόροι, αεροσκάφη, σταθμοί εδάφους) σε διάφορες απαιτήσεις ή εργασίες (όπως επικοινωνία, παρακολούθηση, συλλογή δεδομένων) με τρόπο που να ελαχιστοποιεί κάποια κριτήρια κόστους ή βελτιστοποίησης, όπως τον χρόνο, την ενέργεια και το εύρος ζώνης. Η ποσοτική ανάλυση σε αυτό το πλαίσιο σημαίνει ότι προσπαθούμε να βρούμε ακριβείς αριθμητικές λύσεις για το πρόβλημα, αντί να βασιζόμαστε σε ευριστικές ή προσεγγιστικές λύσεις.
- Δημιουργία εργαλείου, στο οποίο εισάγεις την περιοχή κάλυψης και βγάζει τις προτιμότερες λύσεις. Η δημιουργία ενός εργαλείου που λαμβάνει ως είσοδο την περιοχή κάλυψης και παρέχει τις προτιμότερες λύσεις για τα HAPS (High Altitude Platform Stations) μπορεί να αποτελέσει μια πολύ χρήσιμη βελτίωση

για την πτυχιακή αυτή εργασία. Αυτό το είδος εργαλείων μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη δικτύων HAPS, καθώς επιτρέπει την αυτόματη εύρεση βέλτιστων συνδυασμών πόρων σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές.

- Σύγκριση με άλλα συστήματα Μία διεξοδική σύγκριση των HAPS με άλλα εναέρια, επίγεια και διαστημικά συστήματα μπορεί να αποτελέσει σημαντικό κομμάτι της εξέλιξης αυτής της πτυχιακής εργασίας. Η σύγκριση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί στο περιβάλλον προσομοίωσης MATLAB και μπορεί να εξετάσει την απόδοση, την αξιοπιστία, την περιοχή κάλυψης, τον χρόνο πτήσης κάθε είδους που συγκρίνεται, την βιωσιμότητα των διαφόρων συστημάτων, το μέσο ενέργειας που καταναλώνεται προκειμένου να μπορεί να διατηρηθεί το σύστημα στον αέρα, την ταχύτητα, την χωρητικότητα και το ωφέλιμο φορτίο που μπορεί η κάθε πλατφόρμα να χωρέσει.
- Οικονομική ανάλυση Επιπλέον είναι σημαντικό να διεξαχθεί οικονομική ανάλυση των HAPS και των συστημάτων τους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας, κατασκευής, των επενδύσεων και της αναμενόμενης απόδοσης.
- Διεθνής συνεργασία Τέλος, μια προοπτική εξέλιξης είναι η συμμετοχή σε διεθνείς ερευνητικές προσπάθειες και συνεργασία με άλλους επιστήμονες και ερευνητές που ασχολούνται με τα συστήματα HAPS. Η ανταλλαγή ιδεών και η συνεργασία μπορεί να ενισχύσουν την έρευνά μας και να δημιουργήσουν νέες ευκαιρίες για εξέλιξη και καινοτομία.

Σε αυτό το κεφάλαιο, αναδείχθηκαν μερικές από τις βασικές προοπτικές για τη μελλοντική εξέλιξη της εργασίας αυτής. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτούς τους τομείς θα συμβάλει στην επίτευξη προηγμένων λύσεων και στην ενίσχυση της αξίας της πτυχιακής αυτής εργασίας.

5.4 Επίλογος

Στην πτυχιακή αυτή εργασία παρουσιάστηκε μία εκτεταμένη σύγκριση των HAPS. Πρώτον, εξετάστηκε η εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών, εστιάζοντας στην 6G, και πώς τα HAPS συμβάλλουν σε αυτό το πλαίσιο. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής ανάλυση των HAPS, της ιστορίας τους, των πλεονεκτημάτων τους, των περιπτώσεων χρήσης και των τεχνολογικών προκλήσεων, καθώς και των προοπτικών τους για το μέλλον. Έπειτα έγινε σύγκριση μεταξύ αεροστατικών και αεροδυναμικών πλατφορμών HAPS, καθώς και μεταξύ HAPS, UAVs και δορυφόρων. Επίσης, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο υπολογισμού ισχύος για τα HAPS. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις στο MATLAB. Τονίζοντας την ανάγκη για συνεχή έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα των HAPS. Συνοψίζοντας, η τεχνολογία των HAPS ανοίγει νέες προοπτικές σε πολλούς τομείς, από τις επικοινωνίες και την περιβαλλοντική παρακολούθηση μέχρι τη διαστημική έρευνα. Παράλληλα, υπάρχουν ακόμη πολλά άδοξα τεχνολογικά και επιστημονικά εδάφη προς εξερεύνηση. Με τη συνεχή αφοσίωση στην έρευνα και την καινοτομία, τα HAPS έχουν τη δυνατότητα να μεταμορφώσουν τον τρόπο που αλληλεπιδρούμε και επικοινωνούμε στον ψηφιακό μας κόσμο, ανοίγοντας τον δρόμο για μια πληθώρα νέων εφαρμογών και ευκαιριών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, “Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1g to 5g,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1124–1148, 2018.
- [2] S. Onoe, “1.3 evolution of 5g mobile technology toward 1 2020 and beyond,” pp. 23–28, 01 2016.
- [3] A. A. A. Solyman and K. Yahya, “Evolution of wireless communication networks: From 1g to 6g and future perspective,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 12, no. 4, p. 3943, 2022.
- [4] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, “Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work!,” *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.
- [5] A. Gupta and R. K. Jha, “A survey of 5g network: Architecture and emerging technologies,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [6] A. Abrol and R. K. Jha, “Power optimization in 5g networks: A step towards green communication,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1355–1374, 2016.
- [7] I. F. Akyildiz, D. M. Gutierrez-Estevez, and E. C. Reyes, “The evolution to 4g cellular systems: Lte-advanced,” *Physical Communication*, vol. 3, no. 4, pp. 217–244, 2010.
- [8] M. H. Alsharif, A. H. Kelechi, M. A. Albreem, S. A. Chaudhry, M. S. Zia, and S. Kim, “Sixth generation (6g) wireless networks: Vision, research activities, challenges and potential solutions,” *Symmetry*, vol. 12, no. 4, 2020.
- [9] H. Benn, “Vision and key features for 5th generation (5g) cellular,” *Samsung R&D Institute UK*, 2014.
- [10] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, “Next generation 5g wireless networks: A comprehensive survey,” *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [11] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, “What should 6g be?,” *Nature Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 20–29, 2020.
- [12] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, “The roadmap to 6g: Ai empowered wireless networks,” *IEEE communications magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, 2019.
- [13] M. Alsharif, M. Albreem, A. Solyman, and S. Kim, “Toward 6g communication networks: terahertz frequency challenges and open research issues,” *Computers, Materials and Continua*, vol. 66, no. 3, 2021.
- [14] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair, and M.-S. Alouini, “Terahertz band: The last piece of rf spectrum puzzle for communication systems,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 1–32, 2019.
- [15] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, “6g wireless communications: Vision and potential techniques,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, 2019.

- [16] T. S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb, and G. C. Trichopoulos, "Wireless communications and applications above 100 ghz: Opportunities and challenges for 6g and beyond," *IEEE access*, vol. 7, pp. 78729–78757, 2019.
- [17] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, "Vision, requirements, and technology trend of 6g: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, 2020.
- [18] Q. Liu, S. Sarfraz, and S. Wang, "An overview of key technologies and challenges of 6g," 11 2020.
- [19] C. De Alwis, P. Kumar, V. Pham, K. Dev, A. Kalla, M. Liyanage, and w.-J. Hwang, "Towards 6g: Key technological directions," *ICT Express*, vol. 9, 10 2022.
- [20] Y. YOKOMAKU, "Overview of stratospheric platform airship r&d progress in japan," *The 2nd Stratospheric Platform Systems Workshop, September 21-22, 2000*, 2000.
- [21] Y.-G. Lee, D.-M. Kim, and C.-H. Yeom, "Development of korean high altitude platform systems," *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 13, pp. 31–42, 2006.
- [22] A. Widiawan and R. Tafazolli, "High altitude platform station (haps): A review of new infrastructure development for future wireless communications," *Wireless Personal Communications*, vol. 42, pp. 387–404, 08 2007.
- [23] F. A. D'Oliveira, F. C. L. de Melo, and T. Devezas, "High-altitude platforms — present situation and technology trends," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 8, pp. 249–262, 2016.
- [24] A. J. Colozza and J. L. Dolce, "Initial feasibility assessment of a high altitude long endurance airship," 2013.
- [25] D. H. DeVorkin, "Stratonauts: Pioneers venturing into the stratosphere, by manfred" dutch" von ehrenfried," *Quest: The History of Spaceflight Quarterly*, 2015.
- [26] G. Karabulut Kurt, m. g. khoshkholgh dashtaki, S. Alfattani, A. Ibrahim, T. Darwish, M. S. Alam, and A. Yongacoglu, "A vision and framework for the high altitude platform station (haps) networks of the future," 07 2020.
- [27] S. C. Arum, D. Grace, and P. D. Mitchell, "A review of wireless communication using high-altitude platforms for extended coverage and capacity," *Computer Communications*, vol. 157, pp. 232–256, 2020.
- [28] A. Mohammed, A. Mehmood, F.-N. Pavlidou, and M. Mohorcic, "The role of high-altitude platforms (haps) in the global wireless connectivity," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 11, pp. 1939–1953, 2011.
- [29] Wikipedia contributors, "Loon llc — Wikipedia, the free encyclopedia," 2023. [Online; accessed 21-September-2023].
- [30] S. Karapantazis and F.-N. Pavlidou, "Broadband communications via high-altitude platforms: A survey. iee communications surveys & tutorials," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 7, pp. 2 – 31, 02 2005.

- [31] A. Aragon-Zavala, J. L. Cuevas-Ruiz, and J. A. Delgado-Penín, *High-altitude platforms for wireless communications*. John Wiley & Sons, 2008.
- [32] T. E. Noll, S. D. Ishmael, B. E. Henwood, M. E. Perez-Davis, G. C. Tiffany, J. M. Madura, M. Gaier, J. M. Brown, and T. Wierzbanski, “Technical findings, lessons learned, and recommendations resulting from the helios prototype vehicle mishap,” 2007.
- [33] M. Onda and M. Sano, “Test vehicle proposal to next japanese stratospheric lta developments,” in *6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO)*, p. 7715, 2006.
- [34] S. Okaya, “R&d status of rfc technology for spf airship in japan,” 07 2011.
- [35] H. Bang, S. Lee, and H. Lee, “Nonlinear trajectory tracking using vectorial backstepping approach,” in *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 169–174, IEEE, 2008.
- [36] A. Rapinett, “Zephyr: a high altitude long endurance unmanned air vehicle (master’s thesis),” *Guildford: University of Surrey*, 2009.
- [37] S. P. Androulakis and R. Judy, “Status and plans of high altitude airship (haatm) program,” in *AIAA lighter-than-air systems technology (LTA) conference*, p. 1362, 2013.
- [38] C. T. Chaplain and U. S. G. A. Office, “Defense acquisitions: Future aerostat and airship investment decisions drive oversight and coordination needs,” 2012.
- [39] J. Hempel, “India bans facebook’s basics app to support net neutrality,” *Wired Magazine*, vol. 8, 2016.
- [40] G. Romeo, G. Frulla, E. Cestino, and G. Corsino, “Heliplat: design, aerodynamic, structural analysis of long-endurance solar-powered stratospheric platform,” *Journal of Aircraft*, vol. 41, no. 6, pp. 1505–1520, 2004.
- [41] M. S. Alam, G. K. Kurt, H. Yanikomeroglu, P. Zhu, and N. D. Đào, “High altitude platform station based super macro base station constellations,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 1, pp. 103–109, 2021.
- [42] I. Recommendation, “1500, preferred characteristics of systems in the fixed service using high-altitude platform stations operating in the bands 47.2-47.5 ghz and 47.9-48.2 ghz,” *International Telecommunications Union*, 2000.
- [43] E. Cianca, R. Prasad, M. De Sanctis, A. De Luise, M. Antonini, D. Teotino, and M. Ruggieri, “Integrated satellite-hap systems,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 12, pp. suppl–33, 2005.
- [44] A. A. O. OLADIPO, “Stratospheric propagation and haps channel modeling,” 2007.
- [45] H. Zhai and A. Euler, “Material challenges for lighter-than-air systems in high altitude applications,” 09 2005.
- [46] L. Liu, S. Cao, and M. Zhu, “Mechanical characteristics of stratospheric airship envelope of vectran fibre-reinforced-laminated composite,” *Materials Research Innovations*, vol. 19, no. suppl, pp. S5–606, 2015.
- [47] B. Sweetman, “Benefits of nuclear uavs,” *Defense Technology International*, p. 14, 2012.

- [48] R. M. Dickinson, "Power in the sky: Requirements for microwave wireless power beamers for powering high-altitude platforms," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 14, pp. 36–47, 2013.
- [49] X. Zhu, Z. Guo, and Z. Hou, "Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 71, 07 2014.
- [50] C. Nickol, M. Guynn, L. Kohout, T. Ozoroski, S. Aerospace, and V. Hampton, "High altitude long endurance uav analysis of alternatives and technology requirements development," *Collection of Technical Papers - 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, vol. 18, 01 2007.
- [51] L. Jamison, G. Sommer, and I. III, "High - altitude airships for the future force army," 08 2023.
- [52] L. Brooke, "High altitude lta platforms: capabilities and possibilities," in *AIAA 5th ATIO and 16th Lighter-Than-Air Sys Tech. and Balloon Systems Conferences*, p. 7319, 2005.
- [53] K. Harada, K. Eguchi, M. Sano, and S. Sasa, "Experimental study of thermal modeling for stratospheric platform airship," 11 2003.
- [54] W. Yao, X. Lu, C. Wang, and R. Ma, "A heat transient model for the thermal behavior prediction of stratospheric airships," *Applied Thermal Engineering*, vol. 70, p. 380–387, 09 2014.
- [55] J. Wu, X. Fang, Z. Wang, Z. Hou, Z. Ma, H. Zhang, Q. Dai, and Y. Xu, "Thermal modeling of stratospheric airships," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 75, pp. 26–37, 2015.
- [56] C. C. Bolkcom, "Potential military use of airships and aerostats," 2004.
- [57] S. H. Miller, R. Fesen, L. Hillenbrand, J. Rhodes, G. Baird, G. Blake, J. Booth, D. E. Carlile, R. Duren, F. G. Edworthy, *et al.*, "Airships: a new horizon for science," *arXiv preprint arXiv:1402.6706*, 2014.
- [58] S. Alfattani, W. Jaafar, H. Yanikomeroglu, and A. Yongaçoglu, "Multi-mode high altitude platform stations (haps) for next generation wireless networks," *arXiv preprint arXiv:2210.11423*, 2022.
- [59] S. Alfattani, W. Jaafar, Y. Hmamouche, H. Yanikomeroglu, and A. Yongaçoglu, "Link budget analysis for reconfigurable smart surfaces in aerial platforms," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1980–1995, 2021.
- [60] G. Auer, V. Giannini, C. Desset, I. Godor, P. Skillermark, M. Olsson, M. A. Imran, D. Sabella, M. J. Gonzalez, O. Blume, *et al.*, "How much energy is needed to run a wireless network?," *IEEE wireless communications*, vol. 18, no. 5, pp. 40–49, 2011.
- [61] ITU-R P.839-4, "Rain height model for prediction methods," tech. rep., Sep. 2013.
- [62] ITU-R P.618-14, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," tech. rep., ITU-R, 2023.
- [63] ITU-R P.453-14, "The radio refractive index: its formula and refractivity data," tech. rep., ITU-R, Aug. 2019.
- [64] I. ITU, "Attenuation by atmospheric gases," *International Telecommunication Union-Recommendation*, pp. 676–10, 2013.

- [65] ITU-R P.835-6, “Reference standard atmospheres,” tech. rep., ITU-R, Dec. 2017.
- [66] ITU-R P.676-13, “Attenuation by atmospheric gases and related effects,” tech. rep., ITU-R, Aug. 2022.
- [67] A. Malinowski and R. Zieliński, “High altitude platform — future of infrastructure,” *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 56, no. No 2, 2010.
- [68] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. USA: Academic Press, Inc., 1st ed., 2018.
- [69] M. Latva-aho, K. Leppänen, *et al.*, “Key drivers and research challenges for 6g ubiquitous wireless intelligence,” 2019.
- [70] S. Onoe, “1.3 evolution of 5g mobile technology toward 1 2020 and beyond,” in *2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, pp. 23–28, IEEE, 2016.
- [71] K. David and H. Berndt, “6g vision and requirements: Is there any need for beyond 5g?,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 72–80, 2018.
- [72] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M. Alouini, “From a human-centric perspective: What might 6g be?,” *CoRR*, vol. abs/1906.00741, 2019.
- [73] E. Calvanese Strinati, S. Barbarossa, J. L. Gonzalez-Jimenez, D. Ktenas, N. Cassiau, L. Maret, and C. Dehos, “6g: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 42–50, 2019.
- [74] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y.-J. A. Zhang, “The roadmap to 6g: Ai empowered wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, 2019.
- [75] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair, and M.-S. Alouini, “Terahertz band: The last piece of rf spectrum puzzle for communication systems,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 1–32, 2020.
- [76] A. L. Imoize, O. Adedeji, N. Tandiya, and S. Shetty, “6g enabled smart infrastructure for sustainable society: Opportunities, challenges, and research roadmap,” *Sensors*, vol. 21, no. 5, 2021.
- [77] A. Shahraki, M. Abbasi, M. J. Piran, M. Chen, and S. Cui, “A comprehensive survey on 6g networks: Applications, core services, enabling technologies, and future challenges,” *CoRR*, vol. abs/2101.12475, 2021.
- [78] A. Slalmi, H. Chaibi, A. Chehri, S. Rachid, and G. Jeon, “Toward 6g : Understanding network requirements and key performance indicators,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 32, 03 2021.
- [79] X. Fang, W. Wang, and X. Li, “A study of thermal simulation of stratospheric airships,” *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, vol. 28, pp. 5–9, 01 2007.
- [80] G. Maral, M. Bousquet, and Z. Sun, *Satellite communications systems: systems, techniques and technology*. John Wiley & Sons, 2020.

- [81] A. Varasteh, B. Madiwalar, A. Van Bemten, W. Kellerer, and C. Mas-Machuca, "Holu: Power-aware and delay-constrained vnf placement and chaining," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 2, pp. 1524–1539, 2021.
- [82] A. Mesodiakaki, A. Kassler, E. Zola, M. Ferndahl, and T. Cai, "Energy efficient line-of-sight millimeter wave small cell backhaul: 60, 70, 80 or 140 ghz?," in *2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, pp. 1–9, 2016.
- [83] R. A. Giro, L. Luini, and C. G. Riva, "Rainfall estimation from tropospheric attenuation affecting satellite links," *Information*, vol. 11, no. 1, 2020.
- [84] I. Rec, "itu-r p. 838-3. specific attenuation model for rain for use in prediction methods," *International Telecommunication Union-ITU, fevereiro*, pp. 838–3, 2005.
- [85] R. A. Giro, L. Luini, and C. G. Riva, "Rainfall estimation from tropospheric attenuation affecting satellite links," *Information*, vol. 11, no. 1, p. 11, 2019.
- [86] ITU-R P.837-7, "Characteristics of precipitation for propagation modelling," tech. rep., ITU-R, Jul. 2017.
- [87] ITU-R P.837-7, "Characteristics of precipitation for propagation modelling," tech. rep., ITU-R, Jul. 2017.
- [88] ITU-R P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," tech. rep., ITU-R, 2005.
- [89] A. Slalmi, H. Chaibi, A. Chehri, S. Rachid, and G. Jeon, "Toward 6g : Understanding network requirements and key performance indicators," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 32, 03 2021.
- [90] C. D. Alwis, A. Kalla, Q.-V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W.-J. Hwang, and M. Liyanage, "Survey on 6g frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 836–886, 2021.
- [91] S. A. H. Mohsan, A. Mazinani, W. Malik, I. Younas, N. Q. H. Othman, H. Amjad, and A. Mahmood, "6g: Envisioning the key technologies, applications and challenges," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 9, 2020.