



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ
Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

&

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής



**ΔΙΑΔΥΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»**

**Δυνατότητες και περιορισμοί επικοινωνίας και
ανταλλαγής δεδομένων μη επανδρωμένου
αεροχήματος με μικροδορυφόρο**

**Capabilities and constrains of communication data transfer
between Unmanned Aerial Vehicles and Microsatellites**

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή:

Κυριάκος Καραναγνώστης

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνων Καθηγητών :

Καθηγητής Νικήτας Νικητάκος

Καθηγητής Ιωάννης Κούκος

Δρ Γεώργιος Μαντζούρης

Αθήνα

Μάιος 2020

Δυνατότητες και περιορισμοί επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο

Κυριάκος Καραναγνώστης

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Δήλωση συγγραφέα διπλωματικής διατριβής

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος Κυριάκος Καραναγνώστης, του Σωτηρίου, με αριθμό μητρώου 105, φοιτητής του Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι: *«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής διατριβής και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διατριβή. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η διατριβή προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική διατριβή».*

Ο δηλών

Ημερομηνία

__ Μαΐου 2020

Περίληψη

Οι μικροδορυφόροι και τα μη επανδρωμένα αεροχήματα είναι δύο τεχνολογίες που έχουν κάνει αλματώδη πρόοδο τα τελευταία χρόνια, έχοντας αλλάξει σε μεγάλο βαθμό τα δεδομένα και τις ισορροπίες στο διάστημα και τον αέρα αντίστοιχα ενώ παράλληλα έχουν προσδώσει την δυνατότητα και σε φορείς χωρίς την οικονομική δυνατότητα ανάπτυξης, κατασκευής και λειτουργίας κλασικών μεγάλων δορυφόρων, να έχουν πρόσβαση σε αυτούς τους τομείς.

Η συνεργασία και κυρίως η ικανότητα επικοινωνίας των μη επανδρωμένων αεροχημάτων με έναν ή με έναν αστερισμό μικροδορυφόρων (microsatellite constellation) είναι ένα υψίστης σημασίας ζήτημα καθώς η συνέργεια αυτών των δύο μπορεί να μας προσδώσει πολλά από τα επιμέρους οφέλη αυτών των δύο τεχνολογιών.

Στην παρούσα διατριβή θα εξετάσουμε την δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος και ενός μικροδορυφόρου με σκοπό τον απομακρυσμένο έλεγχο του πρώτου με τους περιορισμούς και τις ιδιαιτερότητες που ενέχουν αυτοί οι δύο κλάδοι για την εκτέλεση ενός κλασικού σεναρίου επιτηρήσεως και έρευνας θαλασσίου χώρου.

Λέξεις κλειδιά : Μικροδορυφόρος, Μη επανδρωμένο αερόχημα, επικοινωνία, συνεργασία, απομακρυσμένος έλεγχος, επικοινωνία οπτικής επαφής, Επικοινωνία πέραν του ορίζοντα

Abstract

Microsatellites and UAV's are two technologies that have undertaken huge progress the last two decades having the potential to affect seriously the status quo and the whole map of Space and Air presence respectively. What is more, they have given the capability to stakeholders that do not have the financial background for R&D, manufacturing and operation of the classic large satellite systems, to be able to have access to these fields.

The cooperation and most importantly the ability to communicate and establish links between a UAV and a microsatellite or a constellation of microsatellites it is of utmost importance, taking into consideration that the synergy of these two assets will give the end user the benefits of both "worlds".

In the current thesis, we will map the capabilities of communication between a UAV and a microsatellite with the goal of remote controlling the first taking into consideration the restrictions and special needs of each of the two technologies in a classic scenario of maritime search and patrol mission.

Keywords : Microsatellite, Unmanned Aerial Vehicle, communication, cooperation, remote control, LOS communication, BVLOS communication

Αφιερώνεται στην σύζυγό μου και στα πέντε μας παιδάκια

Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Κούκο, για τη συνεχή καθοδήγησή του και την ανιδιοτελή υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής. Η προθυμία με την οποία προσέφερε απλόχερα τη βοήθειά του καθ' όλο αυτό το διάστημα, καθώς και οι γνώσεις που αποκόμισα ήταν καταλυτικοί παράγοντες.

Ομοίως, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή κ. Νικήτα Νικητάκο και τον Δρ. Γεώργιο Μαντζούρη για την εξίσου σημαντική και συνεχή βοήθεια καθ' όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού μου.

Το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω όμως στην οικογένειά μου και κυρίως στην σύζυγό μου Ευαγγελία η οποία με στήριξε πέραν του δέοντος και που χωρίς τη δική της υποστήριξη θα ήταν αδύνατη τόσο η συμμετοχή μου στο πρόγραμμα, όσο και η εκπόνηση αυτής της διατριβής.

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΜΕΡΟΣ «Α»

- 1. Θεωρητικό Υπόβαθρο**
 - 1.1. Μικροδορυφόροι**
 - 1.2. Μη επανδρωμένα αεροχήματα**
 - 1.3. Ασύρματες Επικοινωνίες**
 - 1.3.1. Γενικές Αρχές**
 - 1.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τις ασύρματες επικοινωνίες**
 - 1.3.3 Ιδιαιτερότητες στην επικοινωνία μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο**
 - 1.3.4 Link Budget**
- 2. Απαιτήσεις επικοινωνίας μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο**
 - 2.1 Έλεγχος αεροχήματος**
 - 2.2 Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας**
 - 2.3 Έλεγχος περιβάλλοντος**
 - 2.4 Ωφέλιμο φορτίο**

ΜΕΡΟΣ «Β»

- 3. Διαθέσιμες επιλογές και χαρακτηριστικά επικοινωνιακού εξοπλισμού**
 - 3.1. Εξοπλισμός Μικροδορυφόρου**
 - 3.2. Εξοπλισμός μη επανδρωμένου αεροχήματος**
- 4. Δυνατότητες συνεργασίας μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο**
- 5. Βελτιστοποίηση συνεργασίας μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο**
- 6. Περιορισμοί στην συνεργασία μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο**
- 7. Ανακεφαλαίωση**
- 8. Συμπεράσματα**

9. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα
Βιβλιογραφία

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: 1,2 and 3 Cubesat Structure Design (CubeSatSHop)

Εικόνα 2: Cubesat Solar Panels (Space Information Labs)

Εικόνα 3: Cubesat Battery Pack (IMT)

Εικόνα 4: Electronic Power System (Nano Avionics)

Εικόνα 5: Cubesat UHF Tx & Rx Modem (Nano Avionics)

Εικόνα 6: Cubesat omnidirectional UHF Antenna (GOM Space)

Εικόνα 7: Cubesat Attitude Control (Ispispace)

Εικόνα 8: Command and Data Handling (Clyde Space)

Εικόνα 9: Cubesat Optical Earth Observation Camera (GomSpace)

Εικόνα 10: P POD launcher (Ispispace)

Εικόνα 11: Ενδεικτικοί τύπου ατράκτων μη επανδρωμένων αεροχημάτων (FSD, auav.com.au)

Εικόνα 12: UAV engines (Hirth Engines)

Εικόνα 13: Αυτόματος πιλότος μη επανδρωμένου αεροχήματος (Micropilot)

Εικόνα 14: Data Link suites for UAS (Thales)

Εικόνα 15: EO Sensors for UAS (CONTROP Precision Technologies)

Εικόνα 16: UAV Cargo Payload (Yates Electrospace Corporation)

Εικόνα 17: Φορητός σταθμός εδάφους (UAV factory)

Εικόνα 18: Εγκατεστημένος σταθμός εδάφους UAV (General Atomics Aeronautical Systems)

Εικόνα 19: Electromagnetic Spectrum

Εικόνα 20: Electromagnetic Spectrum (Radio and Optical Spectrum)

Εικόνα 21: Radio Frequency Bands

Εικόνα 22: S Band Microsatellite modem (ISIS)

Εικόνα 23: UAV data modem (Cubic)

Εικόνα 24: Microsatellite Patch antenna (Spacecom)

Εικόνα 25: UAV directional antenna (Jem Engineering)

Εικόνα 26: Σχεδιάγραμμα οπτικής επαφής μικροδορυφόρου και μη επανδρωμένου αεροχήματος

Εικόνα 27: USG-212 Gimbal (UKr Spec Systems)

Εικόνα 28: USG-212 Gimbal Specs (UKr Spec Systems)

Εικόνα 29: LiteWave Compact Satellite modem (Advantech Wireless)

Εικόνα 30: ANT2150DUP antenna (GOMspace)

Εικόνα 31: MBA-0162 Antenna for UAV (JEM Engineering)

Εικόνα 32: *Simulated BER performance of APSK and QAM in multipath channels with different power levels*

Εικόνα 33: Έξυπνη διαχείριση ανάλυσης εικόνας σε σενάριο έρευνας ναυαγίου/ναυαγού

Εικόνα 34: Average BER on a single path fading channel with LOS, with and without the application of a turbo code

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ενδεικτικό κόστος και χρόνος κατασκευής δορυφόρων

Πίνακας 2: Κατηγοριοποίηση μη επανδρωμένων αεροχημάτων με βάση το βάρος τους

Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση μη επανδρωμένων αεροχημάτων με βάση την εμβέλεια, το ύψος πτήσης και την αυτονομία

Πίνακας 4: UA Categories from a Spectrum Perspective

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια και ιδιαίτερα την τελευταία εικοσαετία η ανθρωπότητα έχει προάγει και εξελίξει πολλές τεχνολογίες οι οποίες έχουν την απαρχή τους πολλές δεκαετίες πιο πριν και έχουν επί χρόνια χρησιμοποιηθεί και αξιοποιηθεί σε πάρα πολλές εφαρμογές τόσο στρατιωτικές όσο και εμπορικές. Η πρόοδος όμως στο πεδίο της σμίκρυνσης και συρρίκνωσης τόσο των ηλεκτρονικών όσο και των υπόλοιπων υποσυστημάτων που τις απαρτίζουν δίνει πολλές νέες διαστάσεις και προοπτικές που ήταν αδύνατον ακόμα και να τις φανταστεί κανείς στο παρελθόν.

Ο τομέας του διαστήματος και συγκεκριμένα των δορυφόρων και της τεχνολογίας γύρω από αυτούς, καθώς και η τεχνολογία γύρω από τις ιπτάμενες μηχανές εντός της ατμόσφαιρας της γης είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Οι δορυφόροι έχουν εξελιχθεί σε μικρο και νάνο-δορυφόρους και τα μη επανδρωμένα αεροχήματα σε μικρά, μεσαία, και μεγάλα.

Η εξέλιξη όμως και η πρόοδος της τεχνολογίας σχεδόν ποτέ δεν έρχεται χωρίς την δημιουργία καινούργιων προβλημάτων και εμποδίων που χρειάζονται λύσεις και τρόπους να αντιμετωπισθούν. Ένα τέτοιο εμπόδιο και κομβικό σημείο είναι η επικοινωνία των μη επανδρωμένων αεροχημάτων με τους μικροδορυφόρους, καθότι μόνο μέσω της συνέργειας των δύο αυτών τεχνολογιών θα επωφεληθούμε τα μέγιστα και θα λάβουμε τα πλεονεκτήματα που μπορεί κάθε μία από αυτές ξεχωριστά να μας προσφέρει.

Από την πρώτη αποστολή του πρώτου τεχνητού δορυφόρου στο διάστημα το 1957 με τον Sputnik 1 από την Σοβιετική ένωση έως και την πρώτη αποστολή των πρώτων πικοδορυφόρων από τις ΗΠΑ το 2000 ο άνθρωπος έχει στείλει αμέτρητους τεχνητούς δορυφόρους στο διάστημα για διάφορους σκοπούς από ερευνητικούς και επιστημονικούς, μέχρι στρατιωτικούς, κατασκοπευτικούς και φυσικά εμπορικούς.

Αντιστοίχως από τους αδερφούς Ράιτ το 1902 με το πρώτο επανδρωμένο αεροσκάφος και την πρώτη μη επανδρωμένη πτήση ενός ιπτάμενου στόχου από το Αγγλικό αεροπλανοφόρο HMS Argus το 1922, έχουμε φτάσει σε σημείο όπου δεν είναι σήμερα καθόλου περίεργη η εμφάνιση ενός ή περισσότερων εμπορικών drone να ίπτανται σε καθημερινή βάση στον ουρανό από επάνω μας. Επίσης εδώ και πάνω

από μια δεκαετία δεν νοείται πολεμική σύρραξη όπου τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη να μην παίζουν καθοριστικό ρόλο σε αυτήν.

Μια από τις κινητήριες δυνάμεις που έχουν ωθήσει αυτές τις δύο τεχνολογίες να εξελιχθούν είναι η ανάγκη για μείωση του κόστους κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης των αντιστοίχων ‘μεγάλων’ αδερφών τους. Έτσι ένας μικροδορυφόρος έχει κόστος εκατοντάδες φορές μικρότερο από έναν κλασικό δορυφόρο και το αντίστοιχο συμβαίνει και με την σύγκριση ενός επανδρωμένου αεροσκάφους σε σχέση με ένα μη επανδρωμένο.

Η σμίκρυνση και η συρρίκνωση που έχει επέλθει και εφαρμοσθεί μπορεί να κατέστη εφικτή με την πρόοδο της τεχνολογίας, κυρίως στον τομέα των ηλεκτρονικών, έχει επιφέρει όμως πολλούς περιορισμούς και συμβιβασμούς οι οποίοι θέτουν και τα όρια της χρήσης αυτών των μέσων μέχρι τουλάχιστον η τεχνολογία να επιτρέψει περαιτέρω βελτιστοποίηση τους.

Δύο μεγάλοι τέτοιοι περιορισμοί κυρίως για τους μικροδορυφόρους είναι ο περιορισμένος χώρος και το περιορισμένο βάρος που διαθέτουν για την φιλοξενία εξοπλισμού και υλικού καθώς και την υποστήριξη αυτών, π.χ. σε ενεργειακές απαιτήσεις. Ως εκ τούτου είναι εφικτή η εγκατάσταση εξοπλισμού περιορισμένων δυνατοτήτων.

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος θα δοθεί ένα θεωρητικό υπόβαθρο για τους μικροδορυφόρους, τα μη επανδρωμένα αεροχήματα και τις ασύρματες επικοινωνίες καθώς και τους παράγοντες που επιδρούν σε αυτές. Επίσης θα καταγραφούν οι απαιτήσεις της μεταξύ τους επικοινωνίας για τον απομακρυσμένο έλεγχο και μετάδοση εικόνας σε πραγματικό χρόνο σε ένα τυπικό σενάριο ελέγχου θαλασσίων συνόρων και θαλασσίου χώρου για εντοπισμό αντικειμένων και στόχων ενδιαφέροντος όπως παρανόμως εισερχομένων προσώπων (ΠΕΠ), ναυαγίων και ναυαγών και ύποπτων πλεούμενων για διακίνηση παράνομου φορτίου.

Στο δεύτερο μέρος παρατίθενται μερικές επιλογές επικοινωνιακού εξοπλισμού διαθέσιμου στο εμπόριο (commercial off the shelf – COTS), τόσο για μικροδορυφόρους όσο και για μη επανδρωμένα αεροχήματα, με τα χαρακτηριστικά αυτών και θα εξετασθεί εάν οι συνδυασμοί χρήσης τους καλύπτουν τις απαιτήσεις επικοινωνίας που έχουν προκύψει από το πρώτο μέρος. Στη συνέχεια θα αναλυθούν

οι περιορισμοί που θα προκύψουν από την ανάλυση αυτή και θα προταθούν τρόποι βελτιστοποίησης αυτών. Τέλος θα γίνει ανακεφαλαίωση με παράθεση συμπερασμάτων και προτάσεων για περαιτέρω έρευνα.

ΜΕΡΟΣ «Α»

1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Το διάστημα και οι τεχνητοί δορυφόροι έχουν χρησιμοποιηθεί από ποικίλους στρατιωτικούς, επιστημονικούς, εμπορικούς, περιβαλλοντικούς και άλλους σκοπούς. Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές αυτών είναι η αναμετάδοση επικοινωνιών οι οποίες είναι δύσκολο έως και ανέφικτο κάποιες φορές να υλοποιηθούν με χερσαίο μόνο εξοπλισμό και εγκαταστάσεις. Το ανάγλυφο του εδάφους, τα εμπόδια (φυσικά και τεχνητά) και η καμπυλότητα της γης είναι οι κύριοι λόγοι για αυτό.

Τα μη επανδρωμένα αεροχήματα με τους διάφορους αισθητήρες και δυνατότητες που αυτά διαθέτουν σχεδόν πάντα απαιτούν έναν ή και περισσότερους από έναν χειριστές να έχουν επικοινωνία μαζί τους από κάποιον σταθμό εδάφους για την μετάδοση σε πραγματικό χρόνο δεδομένων τόσο για τον έλεγχο του μη επανδρωμένου αεροσκάφους όσο και για την συλλογή των δεδομένων των αισθητήρων που αυτά φέρουν. Αν και ίπτανται σε διάφορα ύψη και αυξάνουν τον ραδιορίζοντα μεταξύ των συνδρομητών του δικτύου, δεν μπορούν πάρα ταύτα να απομακρυνθούν από το σταθερό μέρος του δικτύου (συνήθως ο σταθμός εδάφους) πέραν κάποιων δεκάδων χιλιομέτρων χωρίς η ποιότητα του δικτύου να μειωθεί τόσο ώστε η επικοινωνία να διακοπεί. Στις περιπτώσεις όπου μεσολαβεί χερσαίο έδαφος ανάμεσα στο μη επανδρωμένο αεροσκάφος και τον σταθμό ξηράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο σύστημα αναμετάδοσης αλλά αυτό απαιτεί πρότερο σχεδιασμό και δεν απαλλάσσετε των περιορισμών που αναφέρθηκαν ανωτέρω περί εμποδίων, ανάγλυφου και καμπυλότητας της γης.

Η χρήση δορυφόρων για την επέκταση της εμβέλειας των μη επανδρωμένων αεροχημάτων θεωρείται ως η μοναδική λύση ιδίως για τις μεγαλύτερες κατηγορίες όπου έχουν μεγάλες αυτονομίες και μπορούν να απομακρυνθούν εκατοντάδες ή και χιλιάδες χιλιόμετρα από την βάση τους.

1.1 Μικροδορυφόροι

Οι μικροδορυφόροι έκαναν την εμφάνισή τους στις αρχές του 21^{ου} αιώνα με την κινητήριο δύναμη για την ανάπτυξή τους να είναι ο περιορισμός του κόστους κατασκευής τους σε σχέση με τους αντίστοιχους μεγαλύτερων διαστάσεων. Πρέπει εδώ να διευκρινισθεί ότι ένα μεγάλο μέρος του κόστους ενός δορυφόρου αποτελεί και ο εξοπλισμός και οι διαδικασίες ελέγχου αυτού προ εκτοξεύσεως όσο και η εκτόξευση και η εναπόθεσή του στην κατάλληλη τροχιά. Οι μικροδορυφόροι λόγω του περιορισμένου μεγέθους τους και άρα και των αισθητήρων και λοιπού εξοπλισμού που μπορούν να φέρουν έχουν συγκεκριμένη και καθορισμένη αποστολή σε αντίθεση με τους μεγαλύτερους δορυφόρους που είναι συνηθισμένο να φέρουν εξοπλισμό για την εκτέλεση μεγάλου εύρους αποστολών. Καθ' ότι λοιπόν οι μικροδορυφόροι είναι απλούστεροι στην κατασκευή τους και την αποστολή τους, καθίσταται και οικονομικότερος ο έλεγχος τους. Επίσης η εκτόξευσή τους στο διάστημα γίνεται εκμεταλλευόμενοι άλλες διαστημικές εκτοξεύσεις ως δευτερεύον φορτίο και έτσι δεν απαιτείται αυτόνομη εκτόξευση μειώνοντας κατά πολύ το συνολικό κόστος τους.

Με τον όρο μικροδορυφόρος γενικά εννοείται ένας δορυφόρος μικρότερος από τους συμβατικούς μεγάλου μεγέθους και βάρους. Χωρίς να υπάρχει κάποια επίσημη και αυστηρή κατηγοριοποίηση αυτών, έχει επικρατήσει ο γενικός διαχωρισμός με κύριο κριτήριο το βάρος αυτών. Στον πίνακα 1, παρατίθενται ενδεικτικά κόστη κατασκευής καθώς και ο απαιτούμενος χρόνος για την κατασκευή των διαφόρων κατηγοριών αυτών.

Τύπος δορυφόρου	Μάζα (χγμ.)	Κόστος (\$)	Χρόνος υλοποίησης (κατασκευή έως εκτόξευση)
Συμβατικός	>1000	0.1-2 Δις.	> 5 έτη
Μεσαίου μεγέθους	500-1000	50-100 Εκατομ.	4 έτη
Μικρού μεγέθους	100-500	10-50 Εκατομ.	3 έτη
Μικροδορυφόρος	10-100	2-10 Εκατομ.	~ 1 έτος

Νανοδορυφόρος	1-10	0.2-2 Εκατομ.	~ 1 έτος
Πικοδορυφόρος	<1	20-200 Χιλ.	< 1 έτος
Φεμπτοδορυφόρος	<0.1	0.1-20 Χιλ.	< 1 έτος

Πίνακας 5: Ενδεικτικό κόστος και χρόνος κατασκευής δορυφόρων¹

Όπως διαφαίνεται από τον ανωτέρω πίνακα το κόστος κατασκευής και κτίσης ενός μεγάλου κλασικού δορυφόρου είναι εξαιρετικά μεγάλο. Γι' αυτόν τον λόγο η μίσθωση υπηρεσιών είναι η μοναδική λύση εκμετάλλευσης για κάποιον ο οποίος επιθυμεί να εκμεταλλευθεί τα πλεονεκτήματα που αυτός προφέρει. Οι υπηρεσίες αυτές παραμένουν εξαιρετικά ακριβές, ενδεικτικά για εκμίσθωση υπηρεσίας μετάδοσης δεδομένων για το σενάριο της εργασίας, και εύρους μόνο 128kbrps το κόστος ανέρχεται σε 15\$/km.

Πέρα από το κόστος, το οποίο βεβαίως είναι ο σημαντικότερος παράγοντας, ήδη από τον ανωτέρω πίνακα διαβλέπουμε ότι οι μικροδορυφόροι έχουν και άλλα πλεονεκτήματα όπως:

- Χρόνος κατασκευής, εκτελέσεως απαιτούμενων ελέγχων και προετοιμασίας για αποστολή στο διάστημα
- Μη απαίτηση για αυτόνομη εκτόξευση καθότι εκμεταλλεύονται νεκρό χώρο σε άλλες διαστημικές εκτοξεύσεις και αποστολές
- Είναι ιδανικοί για δημιουργία σμήνους και αστερισμών για εφαρμογές επικοινωνιών με χαμηλή απαίτηση σε εύρος ζώνης
- Αποτελούν ιδανική λύση για εκτέλεση επιθεωρήσεων μεγαλύτερων δορυφόρων που βρίσκονται ήδη σε τροχιά
- Συλλογή πληροφοριών από μεγάλο αριθμό διαφορετικών σημείων ενδιαφέροντος επί της γης
- Δίδουν την δυνατότητα σε φορείς όπως π.χ. πανεπιστήμια να έχουν πρόσβαση στο διάστημα για ερευνητικούς και άλλους σκοπούς

¹ Gao *et al.*, "Antennas for Modern Small Satellites," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, no. 4, pp. 40-56, Aug. 2009.

- Λόγω του μικρότερου τροχιακού τους ύψους η καθυστέρηση της μετάδοσης των δεδομένων από και προς αυτούς είναι σημαντικά μικρότερη (latency)

Τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν έναν μικροδορυφόρο είναι συνήθως τα εξής:

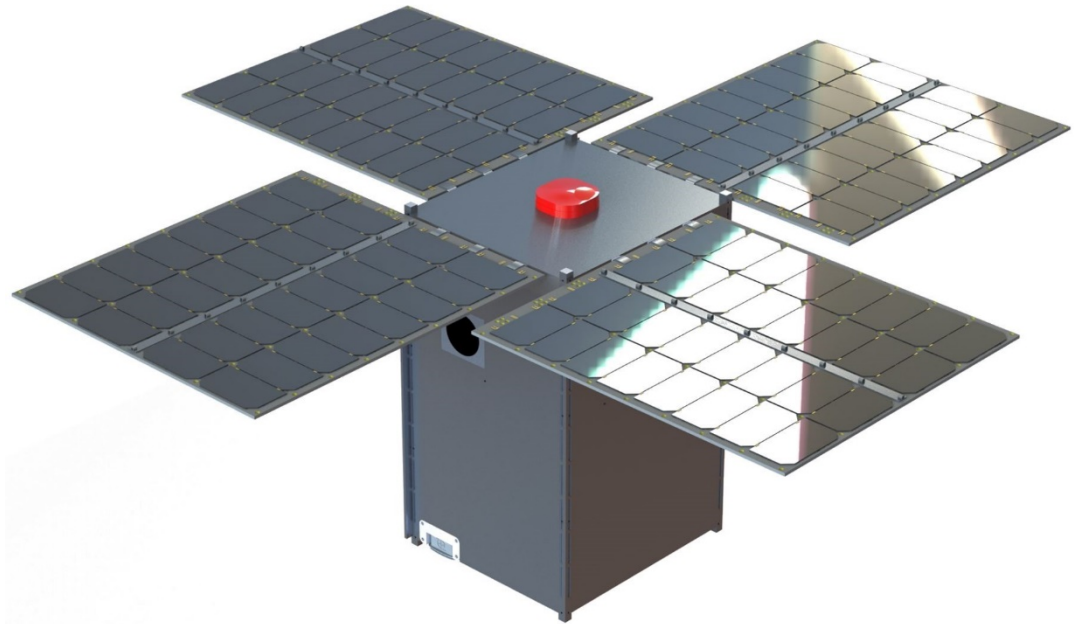
1. Δομικό μέρος: Είναι ο σκελετός του μικροδορυφόρου ο οποίος περικλείει τα υπόλοιπα τμήματα αυτού ενώ παρέχει την στήριξη για τα υποσυστήματα τα οποία μετά την εναπόθεση του σε τροχιά εξέρχονται αυτού π.χ. κεραιές, φωτοβολταϊκά πάνελ, κ.α. Απαιτείται να είναι ελαφρύς και ανθεκτικός τόσο σε καταπονήσεις επιταχύνσεως όσο και σε θερμικές και με το μικρότερο δυνατό όγκο.



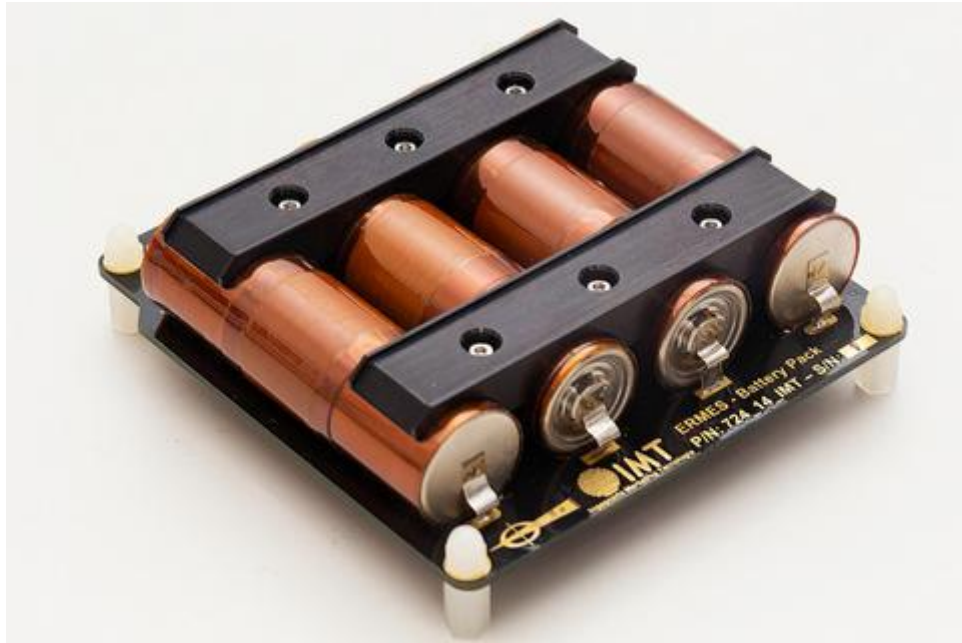
Εικόνα 34: 1,2 and 3 Cubesat Structure Design (CubeSatSHop)

2. Σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ισχύος : Απαρτίζει το σύνολο των συσσωρευτών, φωτοβολταϊκών πάνελ και των ηλεκτρονικών που επιβλέπουν, διαχειρίζονται και ρυθμίζουν την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται ο μικροδορυφόρος για την λειτουργία του. Καθότι μοναδική πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος, είναι ζωτικής σημασίας κατά την διάρκεια που ο μικροδορυφόρος βρίσκεται

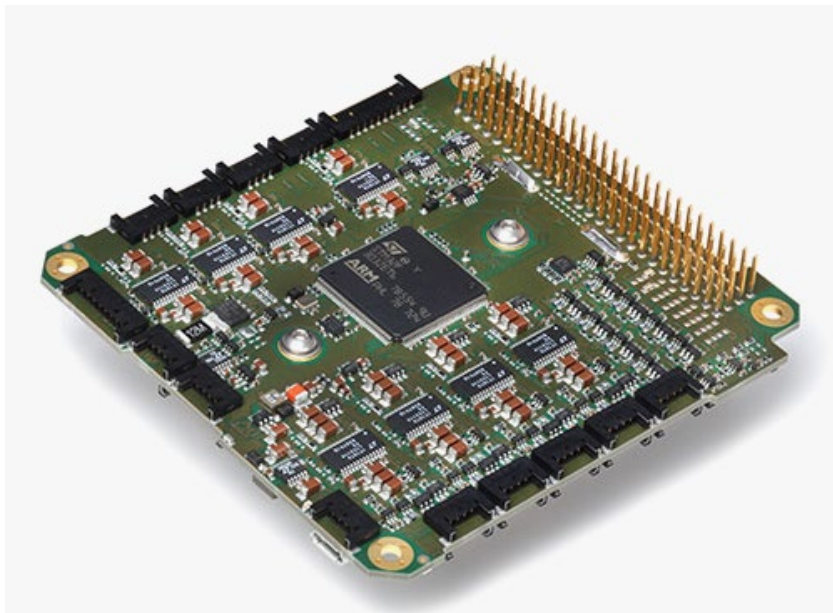
στο οπτικό πεδίο του ηλίου να φορτίζει μέσω των πάνελ τους συσσωρευτές του, έτσι ώστε να μπορεί να τροφοδοτείται με ηλεκτρική ισχύ κατά την διάρκεια της απουσίας του ηλιακού φωτός. Επιπρόσθετα κάθε υποσύστημα απαιτεί διαφορετική τάση και ένταση ρεύματος γεγονός το οποίο απαιτεί μετασχηματισμό (step-up, step down) της ηλεκτρικής ισχύος του συσσωρευτή για την ομαλή λειτουργία του μικροδορυφόρου. Τέλος στην περίπτωση που το διαθέσιμο φορτίο μειωθεί κάτω από ένα προκαθορισμένο ποσοστό πρέπει να περιορισθούν ορισμένες λειτουργίες για να εξασφαλισθούν κάποιες άλλες ζωτικότερης σημασίας μέχρι την φόρτιση και αύξηση εκ νέου του διαθέσιμου ηλεκτρικού φορτίου.



Εικόνα 35: Cubesat Solar Panels (Space Information Labs)



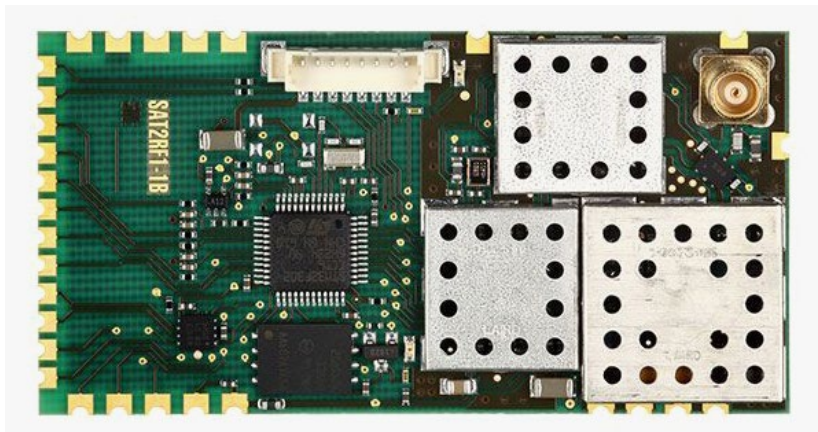
Εικόνα 36: Cubesat Battery Pack (IMT)



Εικόνα 37: Electronic Power System (Nano Avionics)

3. Σύστημα επικοινωνιών: Είναι το υποσύστημα αυτό που εξασφαλίζει την επικοινωνία του μικροδορυφόρου με τον επίγειο σταθμό ή και μεταξύ των υπολοίπων μικροδορυφόρων (εάν πρόκειται για αστερισμό) και μέσω του οποίου

αποστέλλονται τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες του μικροδορυφόρου στον χειριστή του στην γη, καθώς και άλλες πληροφορίες για την λειτουργία και την κατάσταση του. Επίσης ο χειριστής από το έδαφος αποστέλλει προς αυτόν εντολές και μπορεί να τηλεχειρίζεται τους αισθητήρες και τα υπόλοιπα υποσυστήματά του. Επιτρέπει δηλαδή την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του μικροδορυφόρου και του χειριστή του στην γη. Συνήθως αποτελείται από ένα ή και περισσότερα modem, και τουλάχιστο μίας κεραίας. Για το υποσύστημα αυτό θα γίνει εκτενέστερη μελέτη σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

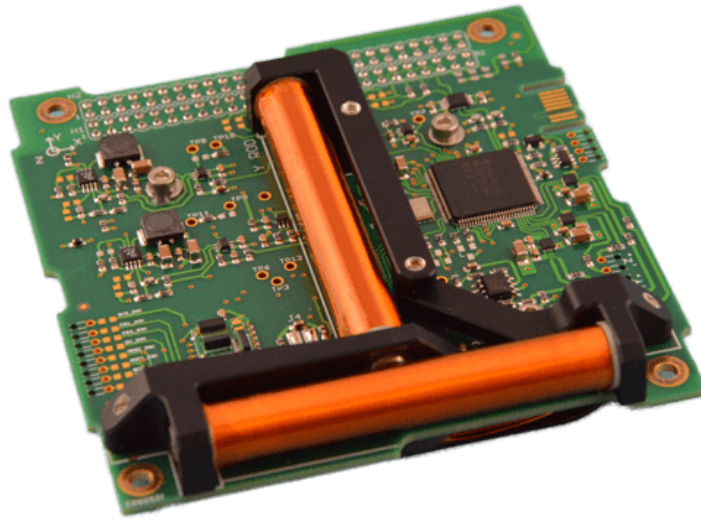


Εικόνα 38: Cubesat UHF Tx & Rx Modem (Nano Avionics)



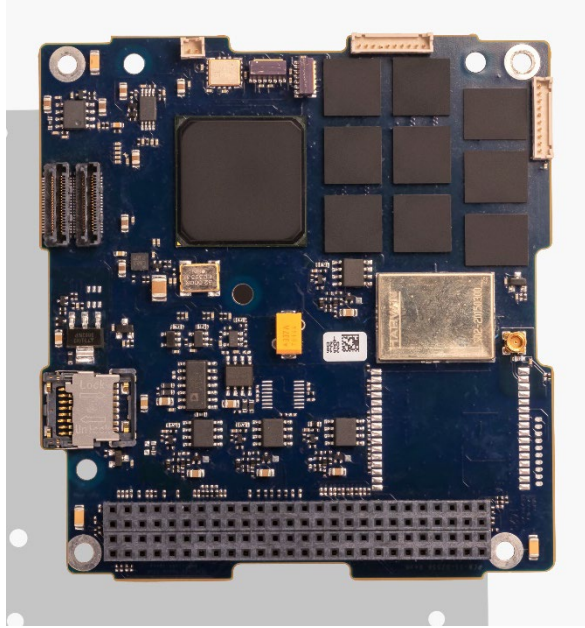
Εικόνα 39: Cubesat omnidirectional UHF Antenna (GOM Space)

4. Σύστημα ελέγχου της στάσης: Όλοι οι δορυφόροι και πολύ περισσότερο οι μικροδορυφόροι που στερούνται προωθητικού συστήματος και μηχανισμών να στρέφουν και να μετακινούν τα υποσυστήματά τους, πρέπει να έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό. Τόσο ως προς τον ήλιο για την φόρτιση των συσσωρευτών τους, για την κατεύθυνση των αισθητήρων τους στο επιθυμητό σημείο για την εκτέλεση της αποστολής τους όσο και για τον προσανατολισμό των κεραιών τους για να είναι δυνατή η επικοινωνία με τον σταθμό ελέγχου τους στην γη. Αυτή τη λειτουργία φέρνει εις πέρας το εν λόγω υποσύστημα. Η ακρίβεια την οποία επιτυγχάνει στην διατήρηση της ορθής θέσεως είναι ζωτικής σημασίας και είναι ένα από τα υποσυστήματα στα οποία έγινε σημαντική τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια για να μπορέσουν οι μικροδορυφόροι να εκτελέσουν με επιτυχία τις αποστολές τους.



Εικόνα 40: Cubesat Attitude Control (Isispace)

5. Σύστημα ελέγχου και διαχείρισης δεδομένων: Θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτό το υποσύστημα είναι ο «εγκέφαλος» του μικροδορυφόρου καθώς πρόκειται για τον κεντρικό υπολογιστή που επεξεργάζεται και διαχειρίζεται το σύνολο των λειτουργιών και των εντολών που αποστέλλονται από τον σταθμό εδάφους. Μέσω αυτού επικοινωνούν τα διάφορα υποσυστήματα του μικροδορυφόρου μεταξύ τους, ανταλλάζουν δεδομένα και συντονίζουν τις λειτουργίες τους για την επίτευξη του σκοπού του. Επίσης ο υπολογιστής αυτός επιτηρεί την κατάσταση όλων των υπόλοιπων υποσυστημάτων και αποστέλλει δεδομένα τηλεμετρίας στον σταθμό εδάφους για την ενημέρωση του χειριστή του.



Εικόνα 41: Command and Data Handling (Clyde Space)

6. Ωφέλιμο Φορτίο (Payload): Πρόκειται για το υποσύστημα για το οποίο εστάλη ο μικροδορυφόρος στο διάστημα. Είναι το σύνολο των αισθητήρων ή άλλου εξοπλισμού, τον έλεγχο, την λειτουργία και τα παραγόμενα δεδομένα του οποίου χρειάζεται ο χειριστής στον σταθμό εδάφους. Ενδεικτικά αναφέρουμε κάμερες λήψεως εικόνων, αισθητήρες ανίχνευσης διαφόρων ουσιών, αισθητήρες παρακολούθησης αεροσκαφών, πλοίων, αισθητήρες ερευνητικού χαρακτήρα από πανεπιστήμια, αναμεταδότες και η λίστα διαρκώς αυξάνεται.



Εικόνα 42: Cubesat Optical Earth Observation Camera (GomSpace)

Η εναπόθεση των μικροδορυφόρων σε τροχιά είναι ένα πολύ σημαντικό στάδιο της ζωής του και παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτέλεση της αποστολής του, καθώς η οποιαδήποτε δυσλειτουργία ή λάθος σε αυτή την φάση μπορεί να τον καταστήσει ανίκανο να την φέρει εις πέρας. Για να μειωθεί το κόστος εκτόξευσης των μικροδορυφόρων πολλές φορές έχει επιλεγεί ως τρόπος θέσεως σε τροχιά η μεταφορά αυτού ως δευτερεύον φορτίο σε κάποια άλλη διαστημική αποστολή και η εκτόξευσή του από το διαστημικό όχημα με την χρήση του ατρακτιδίου Poly-Picosatellite Orbital Deployer (P-POD). Πρόκειται για ελατηριωτό εκτοξευτήρα ο οποίος φιλοξενεί μικρούς συνήθως μικροδορυφόρους (1-3U μεγέθους), οι οποίοι εκτοξεύονται την κατάλληλη στιγμή από το κυρίως διαστημικό όχημα.



Εικόνα 43: P POD launcher (Isispace)

Η πρακτική αυτή του δευτερεύοντος φορτίου αν και έχει σχετικά χαμηλό κόστος της τάξης των 15.000-19.000\$/κιλό² έχει αρκετούς περιορισμούς. Η χρονική επιλογή της εκτόξευσης είναι δέσμια του κυρίως φορτίου, καθώς επίσης και η τροχιά αφέσεως αυτού πρέπει να τυγχάνει να είναι ίδια με αυτού. Έτσι πολλές φορές δεν είναι δυνατή η πρακτική αυτή και με την αύξηση των αποστολών με μικροδορυφόρους γίνεται όλο και πιο δύσκολη. Έχει ξεκινήσει παγκοσμίως εδώ και αρκετά χρόνια η ανάπτυξη συστημάτων αυτόνομης εκτοξεύσεως μικροδορυφόρων για την επίλυση των περιορισμών αυτών. Η Αμερικάνικη κυβέρνηση, η DARPA και η Virgin Galactic είναι ενδεικτικά μερικοί κατασκευαστές τέτοιων συστημάτων για εκτοξεύσεις μικροδορυφόρων με ωφέλιμο φορτίο από 50 έως 400 κιλά.

² Ajey Lele and Tushar Shrivastav (2016). Rocket Launchers for Small Satellites. Institute for Defence Studies and Analyses (IDSA)

1.2 Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα

Τα μη επανδρωμένα αεροχήματα αν και μας είναι ευρέως γνωστά την τελευταία δεκαετία, εντούτοις έχουν ξεκινήσει την ανάπτυξή τους περίπου μια δεκαετία μετά τα αντίστοιχα επανδρωμένα. Και τούτο είναι λογικό εάν αναλογισθούμε ότι η απαρχή της πτήσης είχε πολλές ανθρώπινες απώλειες αφενός, αφετέρου υπήρχαν αποστολές όπου δεν δύναται να επανδρωθούν λόγω της σίγουρης απώλειας του χειριστή τους, όπως χαρακτηριστικά στην περίπτωση των ιταμένων στόχων. Την τελευταία δεκαετία η εξέλιξη της τεχνολογίας και η σμίκρυνση και εδώ των ηλεκτρονικών κατέστησε δυνατή την μείωση του κόστους σε τέτοιο βαθμό όπου μπόρεσαν και απλοί πολίτες να αποκτήσουν ένα, με πολύ μεγάλες δυνατότητες και αξιοθαύμαστα χαρακτηριστικά (μεγάλες αυτονομίες, αποστάσεις πτήσεως, μη παρεμβαλόμενα δίκτυα, βίντεο υψηλής ανάλυσης, θερμική απεικόνιση).

Πλέον η χρήση τέτοιων συστημάτων έχει επεκταθεί σε πάρα πολλούς τομείς και ενδεικτικά μπορούμε να παραθέσουμε μερικούς για τους οποίους η εκμετάλλευση ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος έχει πολλαπλάσια οφέλη σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο μέσο.

- Ασφάλεια εγκαταστάσεων, συνόρων, θαλασσιών ζωνών, λιμανιών, στρατοπέδων
- Έγκαιρη ανίχνευση πυρκαγιών, παρακολούθηση τυφώνων, ατμοσφαιρικών φαινομένων
- Αστυνόμευση, παρακολούθηση υπόπτων και εγκληματιών, αναζήτηση και εντοπισμός κακοποιών, ενίσχυση της έρευνας της αστυνομίας, παρακολούθηση κυκλοφορίας
- Έρευνα και Διάσωση
- Αναμετάδοση επικοινωνιών
- Παροχή βοήθειας σε απομακρυσμένα και αποκλεισμένα άτομα
- Παρακολούθηση καλλιεργειών, υδάτινων και φυσικών πόρων
- Αεροφωτογραφίες, κινηματογραφίες, εναέρια διαφήμιση
- Μεταφορά φορτίων

Στον τομέα των μη επανδρωμένων αεροχημάτων η κατηγοριοποίηση αυτών είναι ακόμα πιο δυσδιάκριτη από αυτήν των μικροδορυφόρων. Η πιο απλή ίσως θα ήταν ο προσδιορισμός αυτών με βάση την άτρακτο, σε σταθερής πτέρυγας (fixed wind), περιστρεφόμενης πτέρυγας (rotary wing) και πολυκόπτερα (multicopter) ως τις πιο διαδεδομένες κατηγορίες. Αυτός ο προσδιορισμός όμως δεν λαμβάνει καθόλου υπόψιν κανένα άλλο χαρακτηριστικό ή δυνατότητα του αεροχήματος οπότε θεωρείται πολύ ελλιπής. Μια ίσως πιο διαδεδομένη κατηγοριοποίηση είναι αυτή του βάρους όπως παρατίθεται στον πίνακα 2

Περιγραφή	Εύρος Βάρους
Super Heavy	>2000 kg
Heavy	200 – 2000 kg
Medium	50 – 200 kg
Light	5 – 50 kg
Micro	<5 kg

Πίνακας 6: Κατηγοριοποίηση μη επανδρωμένων αεροχημάτων με βάση το βάρος τους

Αυτή η κατηγοριοποίηση ατύπως εννοεί ότι τα μεγαλύτερα και βαρύτερα συστήματα διαθέτουν μεγαλύτερες και τεχνολογικά πιο εξελιγμένες δυνατότητες από τα αντίστοιχα ελαφρύτερα, χωρίς όμως αυτές να αναφέρονται. Έτσι η πιο ενδιαφέρουσα ίσως κατηγοριοποίηση η οποία παρέχει και μια γενική εικόνα για τις δυνατότητες αυτών είναι αυτή που τα κατατάσσει ανάλογα με την αυτονομία, την εμβέλεια και το μέγιστο ύψος πτήσεως τους όπως στον πίνακα 3

Κατηγορία	Αυτονομία	Εμβέλεια	Ύψος Πτήσης
Μεγάλη	>24 ώρες	>1500 χμ	>30.000 πόδια
Μεσαία	5 – 24 ώρες	100 – 400 χμ	3.000 – 30.000 πόδια
Μικρή	<5 ώρες	<100 χμ	<3.000 πόδια

Πίνακας 7: Κατηγοριοποίηση μη επανδρωμένων αεροχημάτων με βάση την εμβέλεια, το ύψος πτήσης και την αυτονομία

Υπάρχουν και άλλες κατηγοριοποιήσεις με βάση άλλα χαρακτηριστικά όπως ενδεικτικά ο πτερυγικός φόρτος, ο τύπος του κινητήρα και ο τρόπος ελέγχου (Remote Human Pilot, Remote Human Operator, Semi-autonomous, Autonomous, Swarm). Για τον σκοπό της παρούσας μελέτης θα χρησιμοποιηθεί μια κατηγοριοποίηση η οποία λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε εύρος φάσματος επικοινωνιών για την επιτυχή εκτέλεση της αποστολής τους η οποία φαίνεται στην πίνακα 4.

UA Category	Weight (Kg)	Maximum Altitude (m)	Cruise Speed (km/h)	Endurance (hours)	Maximum Range (km)
Small	<25	<300	<111	<5	Visual LoS <3
Medium	25 – 2000	300 – 5.500	111 – 185	5 – 30	RF LoS 150-250
Large	>2000	>5.500	>185	>30	Beyond RF LoS

Πίνακας 8: UA Categories from a Spectrum Perspective³

Από τον ανωτέρω πίνακα και την συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο την μεγάλη (Large) κατηγορία καθότι οι αποστάσεις όπου δύναται να επιχειρήσει είναι μεγαλύτερες από την εμβέλεια διάδοσης επίγειων δικτύων αναμετάδοσης των απαιτούμενων επικοινωνιών.

Στην συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των επιμέρους υποσυστημάτων ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος κατ' αντιστοιχία με αυτή των μικροδορυφόρων του προηγούμενου κεφαλαίου.

³ International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector, Report M.2171 (12/2009)

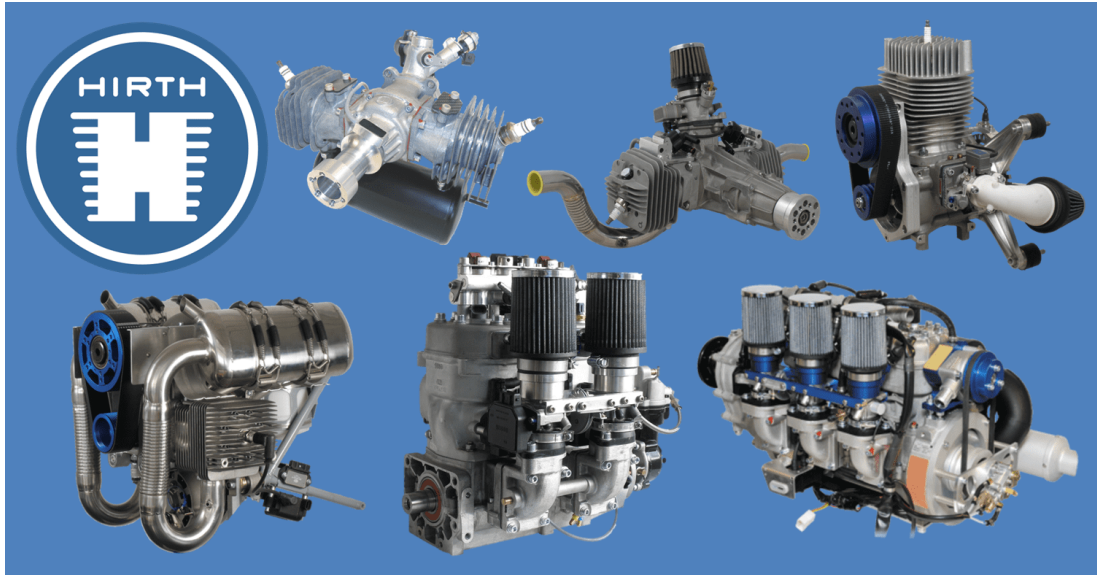
1. Ατρακτος ή σκάφος: Το δομικού τμήμα του μη επανδρωμένου αεροσκάφους που επιτυγχάνει την αεροδυναμική ανύψωσή του και διατήρησή του σε πτήση. Φιλοξενεί και παρέχει στήριξη και προστασία σε όλα τα άλλα επιμέρους υποσυστήματα αυτού. Άξιο ενδιαφέροντος είναι και υβριδικοί τύποι όπου συνδυάζουν χαρακτηριστικά από διάφορους βασικούς τύπους (π.χ. κάθετη από-προσγείωση, αλλά εκτέλεση πτήσεως με χρήση σταθερής πτέρυγας)



Εικόνα 44: Ενδεικτικοί τύποι ατράκτων μη επανδρωμένων αεροχημάτων (FSD, auav.com.au)

2. Προωστήριο σκεύος: Ο κινητήρας του αεροχήματος που του προσδίδει την απαιτούμενη ισχύ για την παραμονή του στον αέρα και την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδότηση των επιμέρους υποσυστημάτων του. Αν και οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν σημειώσει εκπληκτική πρόοδο τα τελευταία χρόνια και έχουν πολλά πλεονεκτήματα (π.χ. χαμηλή ακουστική υπογραφή), εν τούτοις στερούνται της αυτονομίας των θερμικών κινητήρων και έτσι όταν αναφερόμαστε σε

μη επανδρωμένο με μεγάλη αυτονομία και πτήση σε μεγάλες αποστάσεις συνήθως αυτό διαθέτει κινητήρα με καύσιμο.



Εικόνα 45: UAV engines (Hirth Engines)

3. Αυτόματος πιλότος: Ο Αυτόματος πιλότος είναι ο εγκέφαλος του μη επανδρωμένου αεροχήματος καθώς αυτός έχει τον έλεγχο της πτήσης, του χειρισμού των αισθητήρων και της επικοινωνίας με τον σταθμό εδάφους. Συνήθως αποτελείται από δύο ή περισσότερους υπολογιστές, ένας εκ των οποίων ελέγχει τις παραμέτρους της πτήσεως, επιτηρεί τα ζωτικά μέρη και ελέγχει την κατεύθυνση του αεροχήματος και ένας δεύτερος ο οποίος ελέγχει τους αισθητήρες, συλλέγει τις πληροφορίες που αυτοί παράγουν και τις αποστέλλει στον σταθμό εδάφους μέσω του συστήματος επικοινωνιών του αεροχήματος. Σε περίπτωση που κάποιος εκ των δύο αστοχήσει ο εναπομείναν αναλαμβάνει και το υπολογιστικό φορτίο του βεβλαμένου περιορίζοντας κάποιες λειτουργίες του αεροχήματος (συνήθως εις βάρος των αισθητήρων), έτσι ώστε ο έλεγχος της πτήσεως να εκτελείται απρόσκοπτα και στο χειρότερο σενάριο να μπορέσει το αερόχημα να επιστρέψει με ασφάλεια στην βάση του για αποκατάσταση της βλάβης. Επίσης σε περίπτωση διακοπής για οιονδήποτε λόγο της επικοινωνίας με τον σταθμό βάσεως, αναλαμβάνει να εκτελέσει αυτόνομα εντελώς την αποστολή ή να εκτελέσει κάποιο άλλο προκαθορισμένο σενάριο που έχει

επιλέξει ο χειριστής του (π.χ. παραμονή σε orbit για κάποιο χρονικό διάστημα για τυχόν επανασύνδεση με τον σταθμό βάσεως και εν συνεχεία επιστροφή για προσγείωση, είτε μέχρι και αυτοκαταστροφή αυτού).



Εικόνα 46: Αυτόματος πιλότος μη επανδρωμένου αεροχήματος (MicroPilot)

4. Δίκτυα επικοινωνιών: Αποτελεί τον ομφάλιο λώρου του αεροχήματος με τον σταθμό βάσης του. Βασίζεται σε ασύρματες ζεύξης δεδομένων, συνήθως κρυπτοκαλυμμένων, με τεχνολογίες για ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και στον θόρυβο (π.χ. spread spectrum, frequency hopping). Δια μέσου αυτών των δικτύων λαμβάνει εντολές, αποστέλλει την τηλεμετρία του και διακινεί τις ευαίσθητες πληροφορίες των αισθητήρων του. Είναι από τα πιο ευάλωτα υποσυστήματα καθώς η απόσταση, οι καιρικές συνθήκες, εμπόδια και άλλοι παράγοντες μπορούν να καταποντίσουν την συνοχή του δικτύου αυτού και να αναγκαστεί το αερόχημα να διακόψει την αποστολή του, ή να την φέρει μερικώς εις πέρας.



Εικόνα 47: Data Link suites for UAS (Thales)

5. Ωφέλιμο φορτίο (Payload): Το σύνολο των αισθητήρων που είναι εξοπλισμένο το αερόχημα, τα δεδομένα των οποίων χρειάζεται ο χειριστής του στο έδαφος. Καθότι, και ιδίως στις μεγάλες κατηγορίες των μη επανδρωμένων αεροχημάτων, το βάρος δεν είναι τόσο απαγορευτικός παράγοντας σε σχέση με την περίπτωση των μικροδορυφόρων, υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία, ενδεικτικά αναφέροντας μερικούς:

- Κάμερες φωτογραμμετρικές, οπτικές, υπέρυθρες και άλλων φασμάτων ειδικών εφαρμογών
- Αναμεταδότες επικοινωνιών
- Ραντάρ, Lidar, Ραντάρ χαρτογράφησης (SAR)
- Αισθητήρες μέτρησης και μελέτης της ατμόσφαιρας και άλλων περιβαλλοντικών μεταβλητών

- Φορτία διαφόρων τύπων (cargo)
- Όπλα για χρήση από στρατιωτικά αεροχήματα



Εικόνα 48: EO Sensors for UAS (CONTROP Precision Technologies)



Εικόνα 49: UAV Cargo Payload (Yates Electrospace Corporation)

6. Σταθμός Εδάφους (Ground Station): Ο σταθμός εδάφους είναι το τερματικό (συνήθως περισσότερα του ενός) όπου οι χειριστές από το έδαφος ελέγχουν τις λειτουργίες του μη επανδρωμένου αεροχήματος σε όλα τα στάδια της πτήσης. Πριν και κατά την διάρκεια της απογείωσης, την πλοήγηση στο σημείο ενδιαφέροντος, την παραμονή σε αυτό και την επιστροφή και προσγείωση. Επιπρόσθετα είναι το σημείο όπου συνήθως συλλέγονται τα δεδομένα των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και εν συνεχεία αποστέλλονται μέσω άλλων δικτύων στους ενδιαφερόμενους προς εκμετάλλευση αυτών. Γεωγραφικά δεν είναι απαραίτητο να είναι εγκατεστημένος ο σταθμός κάπου συγκεκριμένα αν και συνήθως αυτός εδρεύει στην βάση από την οποία το μη επανδρωμένο απογειώνεται και προσγειώνεται. Τέλος δύνανται να υπάρχουν πλέον του ενός πανομοιότυποι σταθμοί και ο ένας να μεταβιβάζει τον έλεγχο του αεροχήματος σε κάποιον από τους άλλους κατά την διάρκεια της πτήσεως.



Εικόνα 50: Φορητός σταθμός εδάφους (UAV factory)



Εικόνα 51: Εγκατεστημένος σταθμός εδάφους UAV (General Atomics Aeronautical Systems)

1.3 Ασύρματες Επικοινωνίες

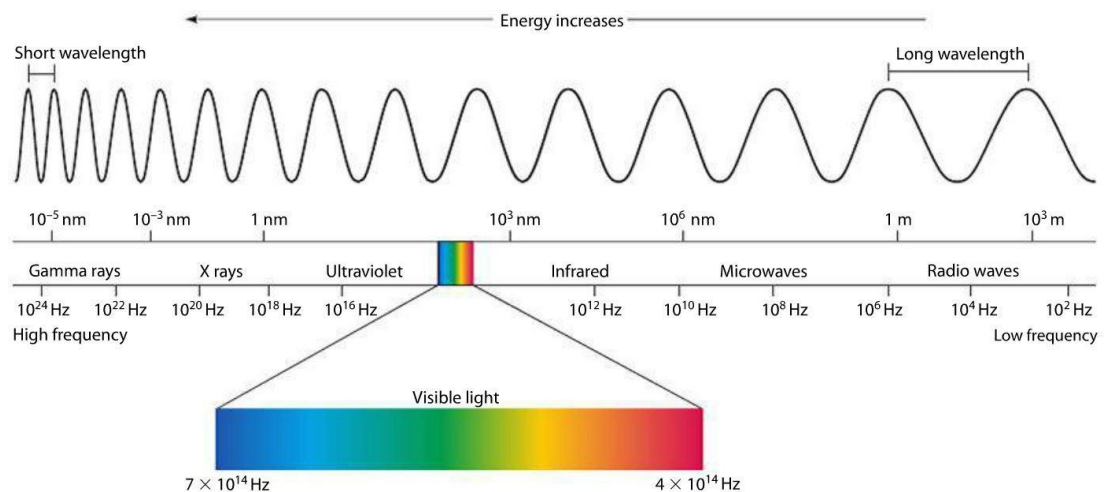
Η ανάγκη για επικοινωνία είναι στην φύση του ανθρώπου όπως μας πληροφορούν οι ανθρωπιστικές επιστήμες και όπως όλοι μας βιώνουμε και αντιλαμβανόμαστε από τα πρώτα χρόνια της ύπαρξης μας. Η ανάγκη της τηλεπικοινωνίας είναι μια πραγματικότητα διότι απαιτείται υπερβολική δαπάνη ενέργειας και χρόνου για να μπορέσει ο καθένας να μεταβεί όπου απαιτείται κάθε φορά και να μεταδώσει ο ίδιος την πληροφορία εκεί που πρέπει. Δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι τα πρώτα εμβρυικά βήματα στην τηλεπικοινωνία μπορούμε να τα εντοπίσουμε στην αρχαιότητα όταν οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν οπτικά σήματα (καπνό, ανακλάσεις ηλιακού φωτός) για να μεταδώσουν μια πληροφορία σε έναν απομακρυσμένο παρατηρητή και μάλιστα κωδικοποιημένη.

Με την ανακάλυψη του ηλεκτρισμού ξεκινάει και η επιστήμη της τηλεπικοινωνίας με τεχνολογικά μέσα και μπορούμε να την χωρίσουμε σε δύο μεγάλες και πολύ γενικές κατηγορίες που εξελίσσονται παράλληλα, αυτή της ενσύρματης (με την γενική έννοια του σύρματος) και της ασύρματης. Στην ενσύρματη επικοινωνία ως μέσο μετάδοσης χρησιμοποιείται κάποιος αγωγός (π.χ. χάλκινο καλώδιο) για την μετάδοση της πληροφορίας, το οποίο ξεκινάει από την πλευρά του αποστολέα και φτάνει έως την πλευρά του παραλήπτη. Καθ' ότι θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία η ασύρματη επικοινωνία θα αναφερθούμε περισσότερο σε αυτήν αν και πάρα πολλές αρχές αυτής είναι ίδιες ή με μικρές παραλλαγές με την ενσύρματη επικοινωνία.

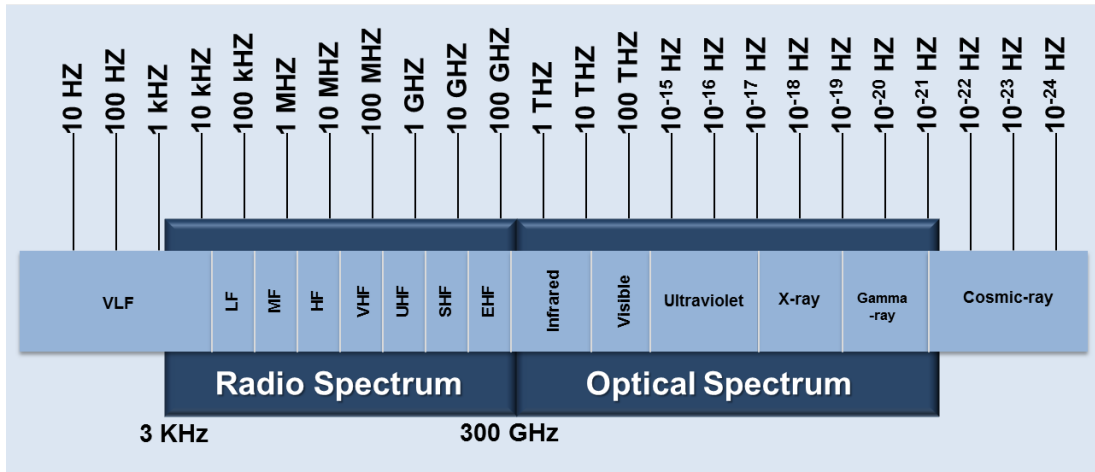
1.3.1 Γενικές αρχές Ασύρματης επικοινωνίας

Με τον όρο ασύρματη επικοινωνία εννοούμε την μετάδοση πληροφορίας από ένα σημείο σε ένα άλλο με την χρήση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και την διάδοση αυτής μέσα στον χώρο (Space, με την έννοια του ελεύθερου χώρου δηλαδή του αέρα στην γη και του κενού στο διάστημα). Πιο συγκεκριμένα το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η πρόκληση ροής ηλεκτρονίων (ή αλλιώς ροή ηλεκτρικού ρεύματος) μέσω επαγωγής στην πλευρά του δέκτη και στον αντίστοιχο εξοπλισμό αυτού με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία αυτός εν συνεχεία θα αποκωδικοποιήσει και θα τα μετατρέψει στην πληροφορία που είναι το επιθυμητό μήνυμα προς μετάδοση.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έχει χωριστεί προς ευκολία αναφοράς σε επιμέρους τμήματα ως κάτωθι:



Εικόνα 52: Electromagnetic Spectrum



Εικόνα 53: Electromagnetic Spectrum (Radio and Optical Spectrum)

IEEE		EU, NATO, US ECM.	
BAND	FREQUENCY RANGE	BAND	FREQUENCY RANGE
HF	3 to 30MHz	A	0 to 0.25GHz
VHF	30 to 3MHz	B	0.25 to 0.5GHZ
UHF	0.3 to 1.0GHz	C	0.5 to 1.0GHz
L	1 to 2GHz	D	1 to 2GHz
S	2 to 4GHz	E	2 to 3GHz
C	4 to 8GHz	F	3 to 4GHz
X	8 to 12GHz	G	4 to 6GHz
K _U	12 to 18GHz	H	6 to 8GHz
K	18 to 26GHz	I	8 to 10GHz
K _A	26 to 40GHz	J	10 to 20GHz
V	40 to 75GHz	K	20 to 40GHz
W	75 to 111GHz	L	40 to 60GHz
		M	60 to 100GHz

Εικόνα 54: Radio Frequency Bands

Κάθε συχνότητα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και αντιδρά διαφορετικά σε εξωτερικούς παράγοντες (επηρεάζεται διαφορετικά από αυτούς) όπως θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο και έτσι η επιλογή της κατάλληλης συχνότητας ανάλογα με την χρήση αποτελεί κομβικό σημείο στην σχεδίαση ενός ασυρμάτου δικτύου επικοινωνίας.

Στην συνέχεια θα παραθέσουμε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ασύρματης επικοινωνίας σε σχέση με την ενσύρματη.

Πλεονεκτήματα:

- Κόστος: Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη τόσο πιο συμφέρουσα είναι η εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου καθ' ότι το αντίστοιχο κόστος για τοποθέτηση καλωδίου μεγαλώνει με την απόσταση. Βεβαίως και το κόστος του εξοπλισμού για ασύρματη μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις αυξάνεται αλλά όχι στον βαθμό που αυξάνεται του σταθερού διαύλου με την χρήση καλωδίου.
- Φορητότητα: Η τοποθέτηση και εγκατάσταση καλωδίου στα ενσύρματα δίκτυα είναι μια σταθερή εγκατάσταση και δεν δύναται να μετακινηθεί σε μικρό χρόνο και απαιτεί επιπρόσθετο κόστος. Σε αντίθεση, ο ασύρματος εξοπλισμός μετάδοσης μετακινείται πολύ πιο εύκολα και έτσι απαιτεί ιδανική λύση για εφαρμογές όπου το πεδίο δράσεως αλλάζει γεωγραφικά ανά διαστήματα.
- Κινούμενοι συνδρομητές: Εάν έστω και ένας συνδρομητής του δικτύου έχει μεταβαλλόμενη θέση ακόμα και σε κοντινή απόσταση περίξ αυτού η χρήση καλωδίου είναι προβληματική. Αντίθετα με χρήση ασύρματου δικτύου, αρκεί η στροφή της κεραίας προς την εκάστοτε θέση του κινητού συνδρομητή ή εάν πρόκειται για μη κατευθυνόμενη λήψη (omni-directional) δεν απαιτείται ούτε αυτό για να συνεχίσει απρόσκοπτα να παραμένει συνδεδεμένος στο δίκτυο.

Μειονεκτήματα:

- Απαίτηση για οπτική επαφή μεταξύ των συνδρομητών: Εάν και υπάρχουν εξαιρέσεις (χρήση χαμηλής συχνότητας, χρήση αναμεταδοτών) γενικά η ασύρματη επικοινωνία δεν δύναται να εκτελεσθεί εάν μεταξύ του πομπού και του δέκτη παρεμβάλλονται εμπόδια διότι απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και αυτή δεν φθάνει στον δέκτη. Κάθε υλικό και ανάλογα με το πάχος του και άλλα χαρακτηριστικά του, επιδρά διαφορετικά στην κάθε συχνότητα όπως έχει ήδη αναφερθεί.

- Επίδραση ατμόσφαιρας και περιβάλλοντος: Αν και αυτό μπορεί να συσχετιστεί με το ανωτέρω πρόβλημα της οπτικής επαφής εν' τούτοις αναφέρεται και μελετάται ξεχωριστά διότι η επίδραση της ατμόσφαιρας και των πολλών φαινομένων μέσα σε αυτή είναι πολυσύνθετη, απρόβλεπτη και μεταβαλλόμενη χωρικά και χρονικά. Δύναται να περιορίσει την επικοινωνία ή ακόμα και να επηρεάσει το δίκτυο σε τέτοιο βαθμό όπου να την καταστήσει αδύνατη.
- Υπαγωγή σε ρυθμίσεις και περιορισμούς χρήσης φάσματος: Καθότι το μέσο μετάδοσης είναι ο χώρος και δεδομένου ότι αυτός είναι κοινός για όλους, είναι εύκολα κατανοητό ότι εάν δεν υπήρχε κάποια ρυθμιστική αρχή να επιβάλει κανονισμούς και νομοθεσίες, θα επικρατούσε αναρχία και τελικά θα καθιστούσε το μέσο ανίκανο να εξυπηρετήσει οποιοδήποτε δίκτυο. Επίσης η εξάπλωση των ασύρματων δικτύων είναι τόσο διαδεδομένη και με προοπτική αυτή να εκτιναχθεί ακόμα περισσότερο τα επόμενα χρόνια όπου σε συνδυασμό με το πεπερασμένο φάσμα που είναι διαθέσιμο καθιστούν πολύ περιοριστικό παράγοντα στην σχεδίαση ενός δικτύου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η παρέλευση 2 ετών για την έγκριση της σχετικής άδειας για χρήση φάσματος κατά την σχεδίαση του Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS), ενός συμπλέγματος 8 μικροδορυφόρων για την επιστημονική μελέτη τυφώνων και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων⁴.
- Περιορισμοί από άλλους παράγοντες: Επειδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει επίδραση στους ζωντανούς οργανισμούς και είναι μια διαρκής μελέτη και επίκεντρο πολλών αντιπαραθέσεων παγκοσμίως, υφίστανται περιορισμοί ως προς τις διάφορους παραμέτρους της χρήσης της, ιδίως σε κατοικημένες περιοχές αλλά και σε περιβάλλον που εν δυνάμει μπορεί να επηρεάσει ζώα ή ακόμα και το περιβάλλον το ίδιο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση των κεραιών της κινητής τηλεφωνίας στις κατοικημένες περιοχές και ακόμα πιο επίκαιρο παράδειγμα η επίδραση της τεχνολογίας 5G της κινητής τηλεφωνίας στον άνθρωπο.
- Ασφάλεια: Λόγο της χρήσης του χώρου (space) ως μέσο μετάδοσης της πληροφορίας, τα ασύρματα δίκτυα είναι περισσότερο εκτεθειμένα σε κινδύνους υποκλοπής της εκπομπής καθώς και σε κινδύνους παρεμβολών, είτε εσκεμμένων είτε

⁴ J. Alvarez and B. Walls, "Constellations, clusters, and communication technology: Expanding small satellite access to space," *2016 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, 2016, pp. 1-11.

ακούσιων σε συνδυασμό και με το κορεσμένο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που έχει ήδη αναφερθεί. Σε αντίθεση τα ενσύρματα δίκτυα δεν υπόκεινται σε αυτούς τους κινδύνους καθότι υποκλοπή σε ενσύρματο δίκτυο προϋποθέτει την φυσική πρόσβαση του δολιοφθορέα στο καλώδιο μετάδοσης. Επίσης δεν συντρέχει πιθανότητα παρεμβολών καθότι το καλώδιο ως αγωγός είναι απομονωμένος από το εξωτερικό περιβάλλον. Παρότι η επιστήμη της κρυπτογραφίας έχει κάνει τεράστια βήματα και το εκπεμπόμενο σήμα ακόμα και να υποκλαπεί είναι εξαιρετικά δύσκολο να εξαχθεί η μεταφερόμενη πληροφορία, εν' τούτοις ο κίνδυνος υπάρχει καθώς επίσης και ο εντοπισμός της ύπαρξης του σήματος και μόνο, ειδοποιεί για την ύπαρξη ενός ενεργού δικτύου, το οποίο και αυτό από μόνο του είναι μια σημαντική πληροφορία. Τέλος, δύναται από τον εντοπισμό της εκπομπής αυτής να ευρεθεί και η γεωγραφική θέση του πομπού, το οποίο εμπίπτει και αυτό στην κατηγορία της ασφάλειας.

Γενικά η χρήση ασύρματων δικτύων υψηλότερης συχνότητας έχει πλεονεκτήματα όταν η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες μετάδοσης δεδομένων στην μονάδα του χρόνου είναι μεγάλη. Όμως το μέγεθος, το βάρος και οι απαιτήσεις σε ισχύ είναι αυξημένες. Τρεις παράγοντες οι οποίοι είναι πολύ περιορισμένα διαθέσιμοι στους μικροδορυφόρους. Έτσι συχνότητες και ασύρματες μεταδόσεις σε συχνότητας στις μπάντες X, Ka και Ku όπως έχουν καταγραφεί στον πίνακα 21, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερους δορυφόρους δεν είναι προς το παρόν διαθέσιμες στο ευρύ κοινό για χρήση σε μικροδορυφόρους. Τα τελευταία χρόνια γίνεται μεγάλη

πρόοδος και ήδη έχουν γίνει μεγάλη έρευνα και δοκιμές^{5,6,7,8,9,10,11,12,13} και είναι πολύ ενθαρρυντικά τα αποτελέσματα για να μπορέσουμε στο κοντινό μέλλον να εξοπλίσουμε τους μικροδορυφόρους με τον κατάλληλο εξοπλισμό ώστε να αποκτήσουμε ασύρματα δορυφορικά δίκτυα σε αυτές τις υψηλές συχνότητες. Εμπορικά διαθέσιμα αυτή την στιγμή είναι κυρίως τα συστήματα που εκμεταλλεύονται την μπάντα συχνοτήτων ‘S’ οπότε η εργασία αυτή θα περιοριστεί σε χρήση αυτού του εύρους συχνοτήτων.

Πρέπει πάραυτα να αναφέρουμε και την προσπάθεια που γίνεται εδώ και δεκαετίες για την χρήση συχνοτήτων στην περιοχή του οπτικού φάσματος για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Η χρήση του φωτός έχει υλοποιηθεί σε ενσύρματα δίκτυα (με την χρήση οπτικών ινών) αλλά παραμένουν πολλά εμπόδια για την εφαρμογή της σε ασύρματα δίκτυα. Το μεγάλο της όφελος, αυτό της μετάδοσης τεράστιας ποσότητας δεδομένων στην μονάδα του χρόνου (στην κατηγορία των Gbps), έχει πολλά εμπόδια μέχρι να υλοποιηθεί κυρίως λόγω της ραγδαίας πτώσης της

⁵ A. H. Wahyud, J. T. Sri Sumantyo, A. S. Budiayanta and A. Munir, "3D Printed Wideband Circularly Polarized Pyramidal Horn Antenna," *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*, Toyama, 2018, pp. 868-871.

⁶ Q. Luo, L. Zhang and S. Gao, "Wideband monofilar square spiral antenna at Ka-band frequencies," *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver, BC, 2015, pp. 2077-2078.

⁷ Jan A. King, et al. (2012). Nanosat Ka-Band Communications - A Paradigm Shift in Small Satellite Data Throughput. 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites

⁸ Parya Fathi and Javad Aliasgari. (2018). Design and Fabrication of Compact 2x2 Dual Linear Polarized Wideband and High Gain Array for Ku-Band Satellite Communication Application. *International Journal of Electronics and Communications*

⁹ G. S. Sethi, A. Srivastava, C. Chiu, V. Chigrinov and R. D. Murch, "Design of a transparent LC based reconfigurable antenna," *2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, New Delhi, 2016, pp.1-4.

¹⁰ J. R. Dickinson, J. L. Alvarez, L. T. McDaniel, J. R. Pruitt, B. J. Walls and K. P. Zajicek, "CYGNSS command and data subsystem and electrical power subsystem phase A and B developments," *2014 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, 2014, pp. 1-10.

¹¹ S. Chen, S. Yu, S. Wang, C. Chang and M. Shie, "Development of a low cost and high data rate X-band transmitter for micro-satellite applications," *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, 2017, pp. 1115-1118.

¹² M. Menicholas, J. Deluna, R. Manno and Y. Shu, "Low cost Ka-band transmitter for CubeSat systems," *2017 Topical Workshop on Internet of Space (TWIOS)*, Phoenix, AZ, 2017, pp. 1-4.

¹³ Laura M. Bradbury, et al. (2018). NorSat-2: Enabling advanced maritime communication with VDES. *Acta Astronautica*

ποιότητας του δικτύου λόγω της απομείωσης από ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Όπως θα αναφερθεί και στην συνέχεια όσο μεγαλύτερη η συχνότητα μετάδοσης τόσο περισσότερο επηρεάζεται από ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως υγρασία, βροχή, σκόνη και άλλα. Επίσης η απαίτηση για ακριβή ευθυγράμμιση της πηγής εκπομπής με αυτή του δέκτη απαιτεί ακρίβεια χιλιοστών της μοίρας κάτι που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί ακόμα και για σταθερούς πομποδέκτες. Επίσης λόγω της κατευθυντικότητας της εκπομπής δεν έγκειται σε περιορισμούς χρήσης φάσματος ενώ ταυτόχρονα παρέχει και μεγαλύτερη ασφάλεια υποκλοπής και παρεμβολής ενός τέτοιου δικτύου. Παρ' όλα αυτά η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στο διάστημα όπου το κενό δεν επηρεάζει την ποιότητα του οπτικού φωτός, έχει ήδη εφαρμοσθεί και προσπάθειες έχουν γίνει και για την εφαρμογή της και στην γη με πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα^{14,15,16,17}.

Εν συνεχεία θα καταγράψουμε τα βασικά υποσυστήματα από τα οποία αποτελείται ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας και κάποιες έννοιες που έχουν εφαρμογή σε αυτά.

1. Πομποδέκτης (modem): Ο εξοπλισμός (hardware) ο οποίος μετατρέπει και κωδικοποιεί την προς μετάδοση πληροφορία σε μορφή τέτοια ώστε η κεραία την οποία τροφοδοτεί να μπορέσει να εκπέμψει. Το προϊόν αυτής της διαδικασίας είναι ένα ηλεκτρικό ρεύμα, η κυματομορφή του οποίου περιέχει την απαιτούμενη πληροφορία. Το ίδιο ηλεκτρικό ρεύμα με τα ίδια ή παραπλήσια χαρακτηριστικά θα κληθεί να αποκωδικοποιήσει και να εξάγει την πληροφορία ο αντίστοιχος εξοπλισμός στην πλευρά του δέκτη.

¹⁴ In Keun Son and Shiwen Mao. (2016). A Survey of Free Space Optical Networks. Digital Communications and Networks

¹⁵ C. Petit et al., "Adaptive optics results with SOTA," 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), New Orleans, LA, 2015, pp. 1-7.

¹⁶ K. Fukuda, T. Hashimoto, T. Kuwahara, H. Kunimori and K. Yoshida, "Development of small optical transmitter for microsattellites," 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Tokyo, 2014, pp. 370-375.

¹⁷ M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourthquarter 2014.

Οι πομποδέκτες έχουν διάφορα χαρακτηριστικά και παραμέτρους λειτουργίας όπως θα καταγραφούν στην συνέχεια και θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο για την εξεύρεση του κατάλληλου εξοπλισμού για τον σχεδιασμό του δικτύου επικοινωνίας του θέματος της εργασίας.

- Εύρος συχνοτήτων λειτουργίας: Πρόκειται για το υποστηριζόμενο από το modem εύρος συχνοτήτων εκπομπής και λήψης που μπορεί να υποστηρίξει και ουσιαστικά επιλέγεται ανάλογα την περιοχή συχνοτήτων που θα χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό του δικτύου.
- Διαμόρφωση κυματομορφής – Τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων: Λόγω της ανάγκης εξοικονόμησης εύρους φάσματος αλλά και της αλλοίωσης του εκπεμπόμενου σήματος από διάφορους παράγοντες που θα αναλυθούν, για την εξάλειψη αυτών και την διατήρηση της ορθότητας της πληροφορίας εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές διόρθωσης των σφαλμάτων και τεχνικές συμπίεσης του σήματος. Η επιλογή της διαμόρφωσης επηρεάζει το εύρος φάσματος (bandwidth) που θα χρησιμοποιηθεί.
- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (data rate): Συναρτήσεως της συχνότητας και της διαμόρφωσης του σήματος πρόκειται για την μέγιστη θεωρητική ποσότητα μετάδοσης πληροφορίας στην μονάδα του χρόνου την οποία μπορεί το modem να υποστηρίξει. Το τελικό εύρος φάσματος και άρα το πραγματικά διαθέσιμο καθορίζεται από πάρα πολλούς παράγοντες που θα εξετασθούν και θα υπολογισθούν στην συνέχεια της εργασίας.
- Διαθέσιμες πύλες και υποδοχείς εισόδου και εξόδου: Πρόκειται για τους διαθέσιμους υποδοχείς που διαθέτει το modem για να μπορεί να συνεργασθεί με έτερα υποσυστήματα του από τα οποία θα δεχθεί την προς μετάδοση πληροφορία.
- Αποθηκευτικός χώρος: Πρόκειται όπως και στους υπολογιστές για την μνήμη που διαθέτει και μπορεί να εκμεταλλευθεί για την αποθήκευση πληροφοριών κατά την διάρκεια της επεξεργασίας και εκπομπής τους. Αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό ιδίως όταν η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων είναι πιο μικρή από τον ρυθμό που καταφθάνει η προς μετάδοση πληροφορία.
- Απαίτηση ηλεκτρικής ισχύος: Καθορίζει την απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ για την τροφοδοσία του, τόσο για την εκτέλεση των εσωτερικών του λειτουργιών όσο και για την τροφοδοσία της κεραίας για την εκπομπή του εξερχόμενου σήματος.

- Αντοχές σε καταπονήσεις και συνθήκες λειτουργίας: Πρόκειται για τις αντοχές σε καταπονήσεις, θερμικές, μηχανικές και ηλεκτρομαγνητικές για την απρόσκοπτη λειτουργία του. Ιδιαίτερα σημαντικοί παράγοντες ιδίως σε εφαρμογές όπου η απομόνωση των κραδασμών ή η ενεργητική ψύξη του είναι αδύνατη, όπως δηλαδή για χρήση σε έναν μικροδορυφόρο.
- Διαστάσεις και βάρος: Εξίσου σημαντικές παράμετροι για χρήση σε εφαρμογές όπου ο χώρος και το διαθέσιμο βάρος είναι περιορισμένα.

Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία του software defined radio (SDR). Πρόκειται για πομποδέκτη ο οποίος μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του με την χρήση λογισμικού και κατ' επέκταση με εντολές από τον χειριστή του. Αυτού του είδους οι πομποδέκτες έχουν βρει εφαρμογή σε πάρα πολλές περιπτώσεις όπου η αντικατάσταση και τοποθέτηση καινούργιου εξοπλισμού είναι δύσκολη έως ακόμα και αδύνατη όπως στην περίπτωση των μικροδορυφόρων. Μετά τον σχεδιασμό και την εκτόξευσή του δεν υπάρχει δυνατότητα για μετατροπή των χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων που έχουν τοποθετηθεί σε αυτόν. Όμως στην περίπτωση του modem το οποίο εμπίπτει στην κατηγορία του Software Defined Radio είναι δυνατόν να παραμετροποιηθούν τα χαρακτηριστικά του και να προσαρμοστούν σε αυτό νέες δυνατότητες ή να τροποποιηθούν οι υπάρχουσες.



Εικόνα 55: S Band Microsatellite modem (ISIS)



Εικόνα 56: UAV data modem (Cubic)

2. Κεραία (antenna): Ο εξοπλισμός (hardware) ο οποίος εκπέμπει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα όταν διατρέχεται από το ηλεκτρικό ρεύμα που την τροφοδοτεί ο πομπός και λαμβάνει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα στην πλευρά του δέκτη οδηγώντας το σε αυτόν. Λόγω των απαιτούμενων γεωμετρικών και τεχνικών ιδιοτήτων και διαστάσεων που πρέπει να διαθέτει, είναι ένα υποσύστημα που σε εφαρμογές μικρών διαστάσεων και διαθέσιμου βάρους αποτελεί έναν μεγάλο περιοριστικό παράγοντα (bottleneck) κατά την σχεδίαση του δικτύου επικοινωνίας. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει πολύ μεγάλη έρευνα για την βελτιστοποίηση κεραιών κατάλληλων για χρήση σε μικροδορυφόρους, οι οποίες να επιτρέπουν μεγάλο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων αλλά να είναι μικρές σε μέγεθος και βάρος. Η ανάπτυξη της εκτύπωσης 3D έχει συνεισφέρει και σε αυτόν τον τομέα με πολλές επιτυχημένες δοκιμές. Τεχνικά χαρακτηριστικά των κεραιών που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή κατά την φάση της σχεδίασης ενός ασύρματου δικτύου παρατίθενται στην συνέχεια.

- Εύρος συχνοτήτων λειτουργίας: Όπως και για τους πομπούς, δηλώνει το εύρος (ελάχιστο – μέγιστο) των συχνοτήτων όπου η κεραία μπορεί να εκπέμψει και να λάβει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

- Κατευθυντικότητα εκπομπής: Πρόκειται για τον δείκτη που μας δείχνει πόσο κατευθυντικά στον χώρο η κεραία συγκεντρώνει την εκπομπή της σε σχέση με μια κεραία αναφοράς που εκπέμπει περιφερειακά σε 360°. Όσο πιο κατευθυντική μια κεραία τόσο περισσότερη ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε ένα σημείο στον χώρο. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι μπορούμε να συγκεντρώσουμε περισσότερη ενέργεια σε έναν απομακρυσμένο δέκτη και άρα να αυξήσουμε την ποσότητα των δεδομένων που μπορεί αυτός να λάβει, είτε μπορούμε να τον απομακρύνουμε περισσότερο και αυτός να εξακολουθεί να λαμβάνει την εκπομπή. Επίσης η κατευθυντικότητα έχει το πλεονέκτημα ότι δεν εντοπίζεται ούτε υποκλέπτεται ούτε παρεμβάλλεται μια εκπομπή εκτός της κατεύθυνσης αυτής που η ενέργεια διαδίδεται. Στον αντίποδα όμως έχουμε το μειονέκτημα ότι η κεραία του πομπού πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένη με την κεραία του δέκτη καθώς οποιαδήποτε παρέκκλιση δεν θα κατευθύνει την ακτινοβολία από τον πομπό στον δέκτη και θα έχουμε απομείωση της λαμβανόμενης ενέργειας έως και παντελή αστοχία του δικτύου. Το εν λόγω πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα πολύπλοκο όταν οι κεραίες πομπού και δέκτη είναι συνεχώς κινούμενες και πρέπει ανά πάσα στιγμή να είναι ευθυγραμμισμένες για να λειτουργεί το ασύρματο δίκτυο.

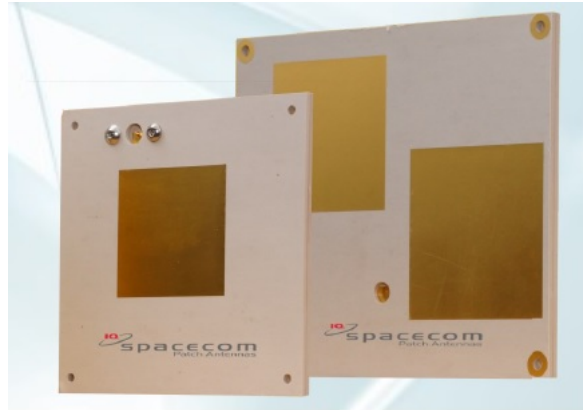
- Ισχύς εκπομπής: Η μέγιστη ισχύς που δύναται να την τροφοδοτήσει ο πομπός για να εκπέμψει το διαμορφωμένο σήμα. Όσο μεγαλύτερη ισχύς τόσο πιο μακριά δύναται να ταξιδέψει αυτό πριν απομειωθεί όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

- Πολικότητα (Polarization): Ένα χαρακτηριστικό της κεραίας που φανερώνει την πολικότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εξέρχεται από αυτήν. Είναι απαραίτητο οι κεραίες πομπού και δέκτη να έχουν την ίδια πολικότητα.

- Εύρος φάσματος λειτουργίας (bandwidth): Πρόκειται για το εύρος εκατέρωθεν της συχνότητας που θα κληθεί να λειτουργήσει η κεραία που δύναται να εκμεταλλευθεί και όσο πιο μεγάλο τόσο περισσότερη πληροφορία μπορεί να εκπέμψει στην μονάδα του χρόνου.

- Εύρος δέσμης μισής ισχύος (half power beamwidth): Πρόκειται για την γωνία εντός της οποίας η ισχύς του σήματος είναι πάνω από το 50% της μέγιστης ισχύος εκπομπής της κεραίας. Είναι σημαντικό η κεραία του δέκτη να τοποθετείται εντός αυτού του εύρους για αύξηση της απόστασης λήψης και αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (data rate).

- Θερμοκρασία θορύβου κεραίας: Πρόκειται για έμφυτο παρασιτικό θόρυβο των κεραιών που αλλοιώνει την ποιότητα του δικτύου. Πέρα από έμφυτο χαρακτηριστικό κάθε κεραίας επηρεάζεται και από εξωτερικούς παράγοντες όπως ο ήλιος, η θερμοκρασία του χώρου που βρίσκεται η κεραία και η κοσμική ακτινοβολία. Λαμβάνεται υπόψιν στην μελέτη και σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου.



Εικόνα 57: Microsatellite Patch antenna (Spacecom)



Εικόνα 58: UAV directional antenna (Jem Engineering)

1.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τις ασύρματες επικοινωνίες

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε και θα καταγράψουμε όλους εκείνους τους παράγοντες που επηρεάζουν είτε θετικά είτε αρνητικά τις ασύρματες επικοινωνίες και πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν θετικά το δίκτυο πρέπει να ενισχυθούν και να τις εκμεταλλευτούμε ενώ αντίθετα οι αρνητικοί παράγοντες πρέπει να παρακαμφθούν, να αμβλυνθούν είτε εάν δεν δύναται να απαλειφθούν εντελώς, θα πρέπει να σχεδιασθεί το δίκτυο έτσι ώστε να υπερκεραστούν.

- Συχνότητα λειτουργίας: Η συχνότητα επηρεάζει και διαμορφώνει πολλούς παραμέτρους, όπως η απαίτηση σε ισχύ, το μέγεθος και το βάρος του πομπού και του δέκτη και των κεραιών τους, το εύρος φάσματος που θα χρησιμοποιηθεί συναρτήσει και της διαμόρφωσης που θα επιλεγεί. Επίσης επηρεάζεται διαφορετικά από τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και την διάδοση στον χώρο. Όσο μεγαλύτερη η συχνότητα τόσο περισσότερο απομειώνεται από αυτά (βροχή, ομίχλη, σκόνη, υδρατμοί)

Εκφράζεται ως (F) και δίδεται σε (Hz)

- Ισχύς εκπομπής: Όσο μεγαλύτερη η ισχύς εκπομπής τόσο περισσότερη ενέργεια εκπέμπεται και τόσο περισσότερη ενέργεια θα φτάσει στον δέκτη.

Εκφράζεται ως (P_i) και η μονάδα μέτρησης είναι τα (W)

- Κατευθυντικότητα κεραίας: Τόσο του πομπού όσο και του δέκτη. Όσο πιο κατευθυντική και άρα πιο συγκεντρωμένη είναι η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εκπέμπεται, τόσο μικρότερες απώλειες θα υποστεί στην διαδρομή του και άρα τόσο περισσότερη θα καταλήξει στον δέκτη.

Εκφράζεται ως (G) και δίδεται σε (dBi)

- Σκέδαση της ακτινοβολίας: Η ατμόσφαιρα λόγω της σύστασής της και των διαφορών φαινομένων που συμβαίνουν μέσα σε αυτήν, δεν είναι ούτε ομοιογενής ούτε προβλέψιμη. Έτσι για τον υπολογισμό κάποιων απωλειών που αυτή προκαλεί στην

διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων λαμβάνονται στατιστικές τιμές για το κάθε φάσμα συχνότητας που έχουν προκύψει από έρευνες. Μια παράμετρος είναι η αλλαγή της κατεύθυνσης της ακτινοβολίας λόγω της ανομοιόμορφης θερμοκρασίας και πυκνότητας της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να μην διαδίδεται σε τελεία ευθεία γραμμή και άρα μέρος αυτής να μην φθάνει τελικά στον δέκτη.

- Απορρόφηση ακτινοβολίας: Καθώς η ατμόσφαιρα περιέχει υδρατμούς, σκόνη, αιωρούμενα σωματίδια, ρύπους και άλλα διάφορα σωματίδια, η ακτινοβολία υφίσταται απορρόφηση από αυτά. Η ποσότητα που θα απορροφηθεί εξαρτάται από την συχνότητα, την συγκέντρωση-πυκνότητα των σωματιδίων και το είδος αυτών. Γενικά ισχύει ότι μεγαλύτερες συχνότητες απορροφούνται περισσότερο. Επίσης φαινόμενα όπως βροχή και συννεφιά έχουν δραματική επίδραση σε αυτό. Ιδιαίτερα μεγάλη απορρόφηση παρουσιάζεται, για γωνίες θέασης 10° και μικρότερες (ως προς τον ορίζοντα) των δύο συνδρομητών ενός ασύρματου δικτύου.
- Απομείωση ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στον χώρο (Free Space Loss): Καθώς το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ταξιδεύει στον χώρο η ενέργεια αυτού μειώνεται. Η απόσταση και η συχνότητα της ακτινοβολίας καθορίζουν την μείωση αυτή.
- Απώλειες στον πομπό και τον δέκτη και στις κεραίες αυτών: Καθώς οι πομποδέκτες είναι ευαίσθητες κατασκευές με πολλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, αυτά όλα εμφανίζουν διαφορετικές και ποικίλες απώλειες κατά την εκπομπή και την λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Έτσι το σύμπλεγμα πομπού-κεραίας και δέκτη κεραίας περιγράφεται καλύτερα από τον όρο «Αποτελεσματική εκπεμπόμενη ισχύς» όπου περιλαμβάνει τις απώλειες αυτές και ουσιαστικά πρόκειται για την πραγματική ισχύ που τελικά εκπέμπεται.

Εκφράζεται ως Effective Isotropic Radiated Power ($EIRP_i$) και δίδεται σε (W)

- Θερμοκρασία θορύβου κεραίας: Όπως έχει ήδη αναλυθεί και στα χαρακτηριστικά των κεραιών, πρόκειται για απώλειες από διάφορους παράγοντες που προσθέτουν «θόρυβο» στο ασύρματο δίκτυο και άρα απομειώνουν την αποτελεσματικότητά του. Αυτές προκαλούνται τόσο από εσωτερικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων όσο και από εξωτερικούς όπως είναι το φόντο (background) το οποίο η κεραία βλέπει ανά πάσα στιγμή.

Εκφράζεται ως (T) και δίδεται σε βαθμούς Kelvin (K^ο)

- Απώλειες λόγω σφάλματος στην σκόπευση κεραίας πομπού και δέκτη: Όπως ήδη έχει αναφερθεί η κατευθυντικότητα των κεραιών για συγκέντρωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο σημείο ή περιοχή στον χώρο επιφέρει μεγάλες δυσκολίες στην ευθυγράμμιση των κεραιών του πομπού και του δέκτη όσο μεγαλύτερη είναι αυτή και όσο πιο γρήγορα μεταβάλλεται η σχετική τους θέση. Αν και υπάρχουν τεχνικές και μηχανισμοί για την μεταξύ τους ευθυγράμμιση εν τούτοις πάντα υφίσταται μια αστοχία η οποία προσθέτει έναν ακόμα παράγοντα απομείωσης της τελικής λαμβανομένης ενέργειας στον δέκτη.
- Διαμόρφωση σήματος: Η θεωρία και η επιστήμη της διαμόρφωσης των πληροφοριών για την μετάδοσή τους είναι μια διαρκώς εξελισσόμενη επιστήμη που ξεφεύγει του σκοπού της παρούσας εργασίας. Ως απλή αναφορά, αυτές αποτελούν την κωδικοποίηση των προς μετάδοση πληροφοριών με έξυπνο τρόπο ώστε να εκμεταλλευόμαστε στο μέγιστο δυνατό το διαθέσιμο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, προσθέτοντας ταυτόχρονα μηχανισμούς διόρθωσης της πληροφορίας καθώς αυτή υφίσταται αλλοιώσεις λόγω όλων των ανωτέρω παραγόντων που αναφέρθηκαν. Από τις πιο διαδεδομένες και εξελιγμένες για την χρήση του διαστήματος για εμπορικές εφαρμογές είναι η APSK που συνδυάζει διαμόρφωση τόσο στο πλάτος όσο και στην συχνότητα του εκπεμπόμενου σήματος για αύξηση της μεταδιδόμενη πληροφορίας.

1.3.3 Ιδιαιτερότητες στην επικοινωνία μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο

Παρ' ότι η ασύρματη επικοινωνία ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος με έναν μικροδορυφόρο εμπίπτει στα ασύρματα δίκτυα με την ευρεία έννοια, εν' τούτοις έχει πολλές ιδιαιτερότητες και παράγοντες που χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή και ανάλυση. Ενδεικτικά καταγράφονται στην συνέχεια και παρατίθενται μαζί με τους απαραίτητους τύπους για τον υπολογισμό τους¹⁸.

- Συνεχώς μεταβαλλόμενη θέση πομπού και δέκτη: Ένας μικροδορυφόρος σε τροχιά περίπου στα 600km από την επιφάνεια της γης έχει μια ταχύτητα περίπου

$$7,5\text{km/sec} \quad u = \sqrt{\frac{gM}{R}} \quad (1)$$

(g: επιτάχυνση της βαρύτητας, M: μάζα της γης, R: ακτίνα γης + ύψος μικροδορυφόρου) και μια περίοδο 96 λεπτά

$$P=2\pi*(R_{\gamma\eta\varsigma}+h)/u \quad (2)$$

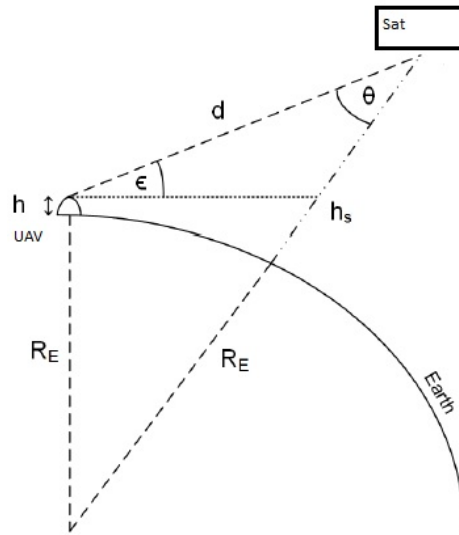
Επίσης ένα αερόχημα έχει μια ταχύτητα από 50-300km/h. Με τόσο υψηλές ταχύτητες η θέση των δύο συνδρομητών του δικτύου είναι εύκολα κατανοητό ότι αλλάζει ταχύτατα και στο συγκεκριμένο σενάριο όπου ο μικροδορυφόρος διαγράφει συγκεκριμένη τροχιά γύρω από την γη, έχουμε το εξής επαναλαμβανόμενο φαινόμενο: Από τον τύπο

$$d = -(R_E + h_u) \sin(\epsilon) + \left\{ (R_E + h_u)^2 \sin^2(\epsilon) + 2R_E(h_s - h_u) + (h_s^2 - h_u^2) \right\}^{1/2} \quad (3)$$

Υπολογίζεται ότι ο μικροδορυφόρος και το αερόχημα αποκτούν οπτική επαφή (LOS) καθώς ο μικροδορυφόρος «ανατέλλει» από τον ορίζοντα σε μια απόσταση 1.930km μεταξύ τους (με την παραδοχή ότι η τροχιά του δορυφόρου περνάει από πάνω ακριβώς από το αερόχημα, το ύψος πτήσης του αεροχήματος είναι 1.000m και η γωνία θέσης

¹⁸ Craig A. Kluever (2018). Space flight Dynamics. USA, John Wiley & Sons Ltd

του μικροδορυφόρου από το αερόχημα είναι 10° συνεχώς αυξανόμενη , λόγω της αυξημένης απορρόφησης της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα όπως έχει αναφερθεί ήδη στο κεφάλαιο 1.3.2). Εν συνεχεία αυτή μειώνεται μέχρι το ελάχιστο (h_s-h_u) στα 599km για να αρχίσει να αυξάνεται πάλι μέχρι τα 1.930km στην αντίθετη πλευρά του ορίζοντα.



Εικόνα 59:Σχεδιάγραμμα οπτικής επαφής μικροδορυφόρου και μη επανδρωμένου αεροχήματος

Η γωνία (θ) όπου ο μικροδορυφόρος διοπτρεύει το αερόχημα κυμαίνεται αντίστοιχα από $64,2^\circ$ μειούμενη έως τις 0° και αυξανόμενη έως πάλι τις $64,2^\circ$ εξαγόμενη από τον τύπο

$$\sin(\theta) = \cos(\epsilon) \frac{R_E + h_u}{R_E + h_s} \quad (4)$$

Παρατηρούμε επομένως μια ραγδαία μείωση και εν συνεχεία αύξηση της απόστασης των συνδρομητών μέσα σε 8,4 λεπτά όπου διαρκεί αυτό το παράθυρο της οπτικής τους επαφής.

- Διαθέσιμη ισχύς: Όπως έχει ήδη προαναφερθεί η διαθέσιμη ισχύς εκπομπής είναι περιορισμένη κυρίως από την πλευρά του μικροδορυφόρου. Έτσι έχουμε τον περιορισμό ότι ο πομπός του μικροδορυφόρου μπορεί να διαθέσει μέγιστο 2W ισχύος από στατιστικά δεδομένα από μικροδορυφόρους και αποστολές που ήδη έχουν τεθεί

σε τροχιά Στην πλευρά του μη επανδρωμένου αεροχήματος η διαθέσιμη ισχύς είναι αρκετά μεγαλύτερη με ισχύς 10W να είναι εύκολα επιτεύξιμες.

- Στόχευση κεραιών: Η συνεχώς μεταβαλλόμενη θέση των συνδρομητών του ασύρματου αυτού δικτύου και η χρήση κατευθυντικών κεραιών για αύξηση της λαμβανόμενης ενέργειας απαιτεί συνεχή ευθυγράμμιση των κεραιών τους για βέλτιστα αποτελέσματα. Ο μικροδορυφόρος από την πλευρά του θα έχει πάντα στραμμένη την κεραία του προς την επιφάνεια της γης με την βοήθεια του υποσυστήματος ελέγχου της στάσης του όπως έχει περιγραφεί ήδη. Το μη επανδρωμένο αερόχημα θα πρέπει να έχει τοποθετημένη την κεραία του πάνω σε μια περιστροφική πλατφόρμα η οποία αφενός θα σκοπεύει συνεχώς την θέση του μικροδορυφόρου στο διάστημα (επιτυγχάνοντας μεγάλη ακρίβεια σκόπευσης καθότι η θέση του μικροδορυφόρου είναι ανά πάσα χρονική στιγμή γνωστή από τους νόμους της τροχιακής μηχανικής) αφετέρου θα απαλλάσσει την κεραία από μετατοπίσεις και μετακινήσεις καθώς το αερόχημα θα ίπταται (pitch,roll,yaw).

1.3.4 Link Budget

Η σχεδίαση και θεωρητική αξιολόγηση ενός ασύρματου δικτύου είναι μια πολύπλοκη μαθηματική διαδικασία η ανάλυση της οποίας ξεφεύγει του σκοπού της εργασίας. Οι απαιτούμενοι μαθηματικοί τύποι για την εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο¹⁹. Για την υλοποίησή της έχουν βγει πολλά υπολογιστικά εργαλεία τα οποία υπολογίζουν τις απαραίτητες μεταβλητές και επιλύουν τις απαραίτητες μαθηματικές πράξεις. Στην πιο απλή της μορφή αυτή η εξίσωση μπορεί να τεθεί ως εξής:

$$C/N = C - 10\log(kTB) \quad (5)$$

Όπου:

- C/N ο λόγος λαμβανομένης ισχύος στην πλευρά του δέκτη προς τον λαμβανόμενο θόρυβο σε αυτόν.
- C η λαμβανομένη ισχύς στην πλευρά του δέκτη (dbW)
- k η σταθερά Boltzmann
- T η θερμοκρασία θορύβου (K°)
- B το χρησιμοποιούμενο εύρος φάσματος (Hz) (το οποίο εξαρτάται από την διαμόρφωση του σήματος και τον πομπό).

Το C δίδεται από τον τύπο

$$C = EIRP - L + G_R \quad (6)$$

Όπου:

- EIRP η ισοδύναμος εκπεμπόμενη ισχύς μια μη κατευθυντικής κεραίας (dbW)
- G_R η κατευθυντικότητα της κεραίας του δέκτη (dbi)
- L οι απώλειες που προκαλούν οι παράγοντες όπως καταγράφηκαν στο κεφάλαιο 1.3.2 (db). Οι σημαντικότερες και μεγαλύτερες απώλειες είναι αυτές που προκαλούνται από την απομείωση της ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος λόγω της διάδοσής του στον χώρο.

¹⁹ Anil K. Maini (2018). Handbook of Defence Electronics and Optronics - Fundamentals, Technologies and Systems. USA, John Wiley & Sons Ltd, chapter 4.5

- Για την απώλεια λόγω Free Space Loss (FSL) ισχύει ο τύπος

$$L_{FSL}=(4\pi d/\lambda) \quad (7)$$

Όπου:

- d η απόσταση του πομπού με τον δέκτη (m)
- λ το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος (m)
- Για της απώλειες λόγω της θερμοκρασίας του θορύβου των κεραιών ισχύει

$$G/T=G_r - 10\log(T_{sys}) \text{ (db)} \quad (8)$$

Όπου

- G/T δείκτης τους απόδοσης του συστήματος ανά μονάδα K°
- G_r η κατευθυντικότητα του δέκτη
- T_{sys} η παρασιτική θερμοκρασία του συστήματος

Αν και η τιμή της είναι συναρτήση πολλών παραγόντων και μεταβάλλεται με την γωνία θέασης, μια μέση τιμή $T=10 K^\circ$ είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση .

Μετά από μετασχηματισμούς και λαμβάνοντας υπόψιν τους ανωτέρω παράγοντες ο τύπος του Link Budget δίδεται ως:

$$C/N=EIRP - L + G/T - 10\log(k) - 10\log(B) \quad (9)$$

Η εξίσωση αυτή λύνεται και για της δύο διαδρομές του ασύρματου δικτύου εφόσον οι συνδρομητές λειτουργούν σε Duplex λειτουργία δηλαδή τόσο λαμβάνουν όσο και αποστέλλουν πληροφορίες μεταξύ τους, όπως εν προκειμένη περίπτωση θα εξετάσουμε στην αμφίδρομη επικοινωνία του μη επανδρωμένου αεροχήματος με τον μικροδορυφόρο. Εν συνεχεία βγαίνει το συνολικό Link Budget (από τα δύο επί μέρους).

$$C/N_{tot}=10\log(1/(10^{-(C/N_1)/10}+10^{-(C/N_2)/10})) \quad (10)$$

Όπου C/N_1 και C/N_2 τα δύο επιμέρους link budgets

Στην συνέχεια θα πρέπει αυτό να συγκριθεί με την ελάχιστη απαίτηση ρυθμού μετάδοσης σφαλμάτων (Bit Error Rate, BER) για της διάφορες τεχνικές

κωδικοποίησης για διόρθωση των σφαλμάτων επικοινωνίας μεταξύ των συνδρομητών του δικτύου και να εξαχθεί τελικά η εφικτότητα ή μη της επικοινωνίας μεταξύ των συνδρομητών αυτού. Αυτό θα γίνει με την χρήση του τύπου:

$$E_b/N_o = C/N_{tot} + 10 \log(B/\text{Data Rate}) \text{ (db)} \quad (11)$$

Όπου:

- E_b/N_o η ενέργεια ανά bit πληροφορίας προς τον θόρυβο του ασύρματου δικτύου
- C/N_{tot} το συνολικό C/N (υπολογίζοντας τις δύο διαδρομές της επικοινωνίας)
- Data Rate η απαιτούμενη ποσότητα μετάδοσης πληροφορίας στην μονάδα του χρόνου

Στο επόμενο κεφάλαιο θα καθορισθεί το μέγεθος της απαιτούμενης προς μετάδοση πληροφορίας στην μονάδα του χρόνου, της επικοινωνίας ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος με έναν μικροδορυφόρο.

2. Απαιτήσεις επικοινωνίας μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο

Για να μπορέσουμε να καταλήξουμε στην απαιτούμενη ποσότητα της πληροφορίας για μετάδοση στην μονάδα του χρόνου θα πρέπει να αναλύσουμε τον τρόπο και τις παραμέτρους λειτουργίας του μη επανδρωμένου αεροχήματος κατά την πτήση του για να φέρει εις πέρας την αποστολή του. Αυτές κατατάσσονται στις κάτωθι τέσσερις κατηγορίες κάθε μία από τις οποίες θα αναλυθεί περαιτέρω:

- Έλεγχος (Control): Οι απαιτήσεις ανταλλαγής δεδομένων με τον απομακρυσμένο χειριστή του για την ναυτιλία και την πλοήγηση του αεροχήματος σε όλες τις επιμέρους φάσεις της πτήσεως του.
- Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας (Air Traffic Control – ATC): Καθότι ο εναέριος χώρος είναι ένα συμφορημένο περιβάλλον τόσο από επανδρωμένες πτήσεις (πολιτικές, στρατιωτικές, μεταφορές φορτίων) όσο και από ενδεχόμενα άλλα μη επανδρωμένα αεροχήματα, υφίστανται αυστηρές και καθορισμένες νομοθεσίες και κρατικές υπηρεσίες ελέγχου για οποιοδήποτε μέσο ίπταται ανά πάσα στιγμή. Υπάρχει επίσης η υποχρέωση αμφίδρομης επικοινωνίας με τις υπηρεσίες αυτές.
- Έλεγχος περιβάλλοντος (Sense and Avoid): Το αερόχημα για την ασφαλή ναυτιλία του και πλοήγησή του είναι υποχρεωμένο να διαθέτει αισθητήρες οι οποίοι να αντιλαμβάνονται δυνητικά επικίνδυνες καταστάσεις και να τις αποφεύγουν. Το σύνολο των αισθητήρων αυτών και η αποστολή των δεδομένων αυτών στον απομακρυσμένο χειριστή αποτελεί αυτό το υποδίκτυο.
- Ωφέλιμο φορτίο (Payload): Ο απομακρυσμένος χειρισμός του ωφέλιμου φορτίου και τα δεδομένα που αυτό συλλέγει ορίζουν τις απαιτήσεις ανταλλαγής δεδομένων με τον σταθμό ελέγχου για την σε πραγματικό χρόνο μετάδοση αυτών στον απομακρυσμένο χειριστή.

Στην συνέχεια θα αναλυθεί κάθε μια κατηγορία διεξοδικά για την εύρεση των επί μέρους και τέλος της συνολικής απαιτούμενης ποσότητας ανταλλαγής δεδομένων.

2.1 Έλεγχος (Control)

Κατ' αντιστοιχία με ένα επανδρωμένο αεροπλάνο όπου ο πιλότος εκτελεί πολύπλοκες, απαιτητικές και εξειδικευμένες ενέργειες για την κατεύθυνση του αεροσκάφους από την εκκίνηση του, την τροχοδρόμηση, απογείωση, πτήση προς τον προορισμό του, προσγείωση και στάθμευση, στο μη επανδρωμένο αερόχημα αυτές οι λειτουργίες πρέπει να εκτελεσθούν απομακρυσμένα από τον χειριστή του ανάλογα με τον τρόπο κατεύθυνσης του εκάστοτε αεροχήματος. Υφίστανται πέντε τύποι ελέγχου ενός αεροχήματος κάθε ένας από τους οποίους έχει διαφορετικές απαιτήσεις ανταλλαγής δεδομένων για την εκτέλεση του.

- Απομακρυσμένος έλεγχος από χειριστή (Remote Human Pilot): Πρόκειται για την πιο απλή μέθοδο κατεύθυνσης ενός αεροχήματος με τις περισσότερες απαιτήσεις σε ανταλλαγή δεδομένων. Το αερόχημα δεν διαθέτει αυτόματο πιλότο ή άλλους αυτοματισμούς και ο χειριστής του από το έδαφος πρέπει να εκτελεί όλες τις απαραίτητες ενέργειες μέσα από ειδικά προς τούτο χειριστήρια. Ελέγχει πλήρως ο ίδιος όλες τις λειτουργίες και υποσυστήματα του αεροχήματος. Απαιτείται να έχει πλήρη επίγνωση του περιβάλλοντος ανά πάσα στιγμή του αεροχήματος. Τούτο επιτυγχάνεται με την μετάδοση σε πραγματικό χρόνο εικόνας για να διατηρεί ο χειριστής αίσθηση του περιβάλλοντος (situational awareness) καθώς και ένα πλήθος πληροφοριών που σχετίζονται με την κατάσταση του αεροχήματος και τις διάφορες παραμέτρους της πτήσης (ταχύτητα, ύψος, βαθμός ανόδου-καθόδου, κατάσταση κινητήρα, καύσιμο, άνεμο, θέση στον χώρο). Τα στοιχεία αυτά πρέπει να ανανεώνονται τουλάχιστον 20 φορές/δευτερόλεπτο (20Hz) γι' αυτό η απαίτηση του όγκου ανταλλαγής δεδομένων είναι μεγάλη. Ο χειριστής λαμβάνοντας υπόψιν του όλα αυτά τα δεδομένα, εκτελεί στα ειδικά προς τούτο χειριστήρια τις απαραίτητες ενέργειες οι οποίες αποστέλλονται στο αερόχημα για να τις εκτελέσει. Πρόκειται για πολύ βασικό τύπο ελέγχου αεροχήματος όπου σήμερα συναντάται σε ερασιτεχνικά αεροχήματα.
- Απομακρυσμένος έλεγχος από διαχειριστή (Remote Human Operator): Πρόκειται την πιο βασική μορφή πλοήγησης με αυτόματο πιλότο. Ο Αυτόματος πιλότος αναλαμβάνει να ελέγχει τις ζωτικές παραμέτρους για να ίπταται το αερόχημα

ασφαλώς και ο απομακρυσμένος χειριστής μεταβιβάζει ανά πάσα στιγμή τον αυτόματο πιλότο την κατεύθυνση, την ταχύτητα, το ύψος και τις λοιπές παραμέτρους που επιθυμεί να λάβει το αερόχημα. Υφίσταται και σε αυτόν τον τρόπο ελέγχου η απαίτηση για μετάδοση εικόνας για απόκτηση αντίληψης του περιβάλλοντος αλλά μόνο σε συγκεκριμένες φάσεις της πτήσεως αυτού, κυρίως στην απογείωση και την προσγείωση την οποία ελέγχει και εκτελεί ο ίδιος ο διαχειριστής, με τον αυτόματο πιλότο να αναλαμβάνει ύστερα την διατήρηση σε πτήση του αεροχήματος. Ο αυτόματος πιλότος αναφέρει κάθε δευτερόλεπτο πληροφορίες τηλεμετρίας του αεροχήματος για να έχει ο διαχειριστής αντίληψη της καταστάσεως αυτού και να επέμβει εάν χρειαστεί.

- Ημιαυτόνομος έλεγχος (Semi-autonomous): Ο αυτόματος πιλότος του αεροχήματος αναλαμβάνει όλες τις φάσεις της πτήσεως (από την απογείωση μέχρι την προσγείωση) και ο απομακρυσμένος χειριστής αναλαμβάνει τον έλεγχο του ωφέλιμου φορτίου όταν το αερόχημα φθάσει στην περιοχή ενδιαφέροντος. Οι απαιτήσεις ανταλλαγής δεδομένων αφορούν μόνο την τηλεμετρία για την επίγνωση της καταστάσεως του από τον απομακρυσμένο χειριστή. Σε αυτό τον τύπο ελέγχου δύναται να έχει προφορτωθεί το επιθυμητό δρομολόγιο στο αερόχημα και να το εκτελέσει αυτόνομα, υπάρχει όμως η δυνατότητα να επέμβει ο χειριστής ανά πάσα στιγμή και να τροποποιήσει όποιες παραμέτρους επιθυμεί.
- Αυτόνομος έλεγχος (Autonomous Operation): Το αερόχημα έχει την ικανότητα να ελέγχει όλες τις παραμέτρους της λειτουργίας του καθώς και το ωφέλιμο φορτίο και ο χειριστής δεν μπορεί να επέμβει στο αερόχημα. Αυτός ο τρόπος αν και απαιτεί την λιγότερη ενασχόληση του χειριστή, δεν επιλέγεται παρά μόνον όταν το αερόχημα θα επιχειρήσει σε περιβάλλον όπου δεν δύναται να υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία με τον σταθμό βάσης. Π.χ. σε δυσπρόσιτα μέρη, ή σε περιπτώσεις όπου είναι ζωτικής σημασίας να παραμείνει ανεντόπιστο το αερόχημα και οποιαδήποτε ανταλλαγή δεδομένων θα πρόδιδε την θέση αυτού.
- Έλεγχος σμήνους (Swarm Control): Πρόκειται για τύπου ελέγχου όπου συνεργάζονται δύο ή περισσότερα αεροχήματα μεταξύ τους για την εκτέλεση μιας αποστολής και γίνεται χρήση τεχνητής νοημοσύνης για την μεταξύ τους επικοινωνία και συντονισμό αυτών.

Στην πράξη και ιδίως σε εξελιγμένα, μεγάλης κατηγορίας και αυτονομίας αεροχήματα ο πιο συνηθισμένος τύπος ελέγχου είναι ο ημιαυτόνομος τρόπος, καθότι το αεροχέμα εκτελεί αυτόνομα την πτήση και όλες τις φάσεις αυτής, ο απομακρυσμένος χειριστής όμως ελέγχει το ωφέλιμο φορτίο κατά κρίση και με βάση τα συνεχώς μεταβαλλόμενα δεδομένα της αποστολής. Δύναται να μεταπέσει ακόμα και σε άλλον τύπο ελέγχου εάν το επιθυμεί για να ελέγξει περισσότερες λειτουργίες του αεροχήματος, π.χ. σε περίπτωση που υπάρξει κάποια δυσλειτουργία σε κάποιον αυτοματισμό, ή εάν προκύψει κάποια άλλη διαδικασία ανάγκης.

2.2 Έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας (Air Traffic Control)

Οτιδήποτε ίπταται εντός οποιοδήποτε FIR (Flight Information Region) οποιασδήποτε χώρας υπόκειται στις νομοθεσίες και κανόνες εναέριας κυκλοφορίας της χώρας αυτής. Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και η Ευρωπαϊκή ένωση έχουν κοινούς κανόνες και νόμους για τα κράτη μέλη τους οι οποίοι είναι περίπου ίδιοι με όλες τις χώρες παγκοσμίως. Έτσι επιτυγχάνεται η ασφάλεια της αεροναυτιλίας (ασφάλεια των ανθρώπων επιβατών αλλά και των πολιτών στο έδαφος) με το να υπάρχει έλεγχος, κατεύθυνση και τάξη στα ιπτάμενα μέσα. Με βάση αυτούς τους νόμους και κανονισμούς οτιδήποτε ίπταται εντός των περιοχών ελέγχων τους πρέπει αφενός να τηρεί συγκεκριμένες προδιαγραφές αφετέρου να ακροάται και να υπακούει κατά την διάρκεια της πτήσεως του στον εκάστοτε ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας. Χρησιμοποιείται η λέξη ακροάται γιατί αυτός ο έλεγχος γίνεται φωνητικά δια ζώσης του ελεγκτού και του πιλότου οποιοδήποτε αεροσκάφους. Με την είσοδο και την αύξηση του αριθμού των μη επανδρωμένων αεροχημάτων που ίπτανται, η νομοθεσία περιέλαβε και αυτού του είδους τα αεροχήματα, χωρίς να κάνει οποιαδήποτε διάκριση ή εξαίρεση λόγω του γεγονότος ότι δεν βρίσκεται χειριστής εντός αυτών. Είναι υποχρεωμένο κάθε μη επανδρωμένο αερόχημα να διαθέτει τον κατάλληλο εξοπλισμό και να είναι συνδρομητής στα δίκτυα του ελέγχου της εναέριας κυκλοφορίας, και οποιαδήποτε φωνητική επικοινωνία με τον ελεγκτή να μεταφέρεται στον άνθρωπο χειριστή του μη επανδρωμένου ο οποίος θα ανταποκρίνεται φωνητικά και θα εκτελεί τις απαραίτητες ενέργειες.

Πέραν αυτού του φωνητικού δικτύου, ο έλεγχος της εναέριας κυκλοφορίας απαιτεί και την χρήση ορισμένων ραδιοβοηθημάτων καθώς και εξοπλισμού ανταλλαγής δεδομένων με άλλα αεροσκάφη προς ανταλλαγή της θέσεως, και έγκαιρη ειδοποίηση σε περίπτωση κινδύνου συγκρούσεως, η ανάλυση των οποίων είναι πέραν του σκοπού αυτής της εργασίας. Τελικά υπάρχει η απαίτηση ενός συνόλου δεδομένων τα οποία πρέπει να λαμβάνει το μη επανδρωμένο αερόχημα, μέρος αυτών να μεταβιβάζει στον χειριστή του στο σταθμό εδάφους, οποίος να πράττει τις κατάλληλες ενέργειες και μέσω του μη επανδρωμένου αεροχήματος να αλληλοεπιδρά με τον ελεγκτή εναέριας κυκλοφορίας.

2.3 Έλεγχος Περιβάλλοντος (Sense and Avoid)

Καθότι ένα αερόχημα που δύναται να ίπταται πολλές ώρες και να επιχειρεί σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από την βάση του μπορεί να βρεθεί στον κίνδυνο πολλών επικίνδυνων καιρικών και άλλων φαινομένων τα οποία να αποβούν καταστροφικά εάν δεν μπορέσει εγκαίρως να τα αντιληφθεί και να τα αποφύγει. Όπως ακριβώς και με τα επανδρωμένα αεροσκάφη φαινόμενα όπως οι καταιγίδες και οι αναταράξεις προκαλούν καταστροφικές βλάβες και έχουν γίνει αιτία πολλών αεροπορικών ατυχημάτων ανά τον κόσμο. Ως εκ τούτου έχει γίνει υποχρεωτικό από τις διεθνείς νομοθεσίες για τα ιπτάμενα μέσα η εγκατάσταση ραντάρ τα οποία ανιχνεύουν εγκαίρως αυτά τα φαινόμενα (τα γνωστά ραντάρ καιρού) και με την χρήση των οποίων οι χειριστές εντοπίζουν και μεταβάλλουν κατάλληλα το δρομολόγιο τους για την αποφυγή αυτών. Τα δεδομένα αυτά πρέπει να αξιολογούνται από τον εκάστοτε χειριστή σε πραγματικό χρόνο και να λαμβάνονται οι απαραίτητες ενέργειες.

Στην περίπτωση των μη επανδρωμένων αεροχημάτων τα δεδομένα πρέπει να αποστέλλονται στον χειριστή στον σταθμό εδάφους ο οποίος έχει τον έλεγχο και την ευθύνη της ασφάλειας του αεροχήματος. Πρόκειται λοιπόν για το τρίτο υποδίκτυο ασύρματης ανταλλαγής δεδομένων που πρέπει να δύναται η επικοινωνία με τον μικροδορυφόρο να υποστηρίξει.

Ο Διεθνής Οργανισμός Τηλεπικοινωνιών εξέδωσε το 2009 μια μελέτη²⁰ μετά από απαίτηση της Αμερικάνικης Κυβερνήσεως για όλες τις ανωτέρω απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων αυτών οι οποίες συνοψίζονται στον κάτωθι πίνακα 5.

²⁰ International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector, Report M.2171 (12/2009)

Maximum non-payload throughput requirements* of a single UA (bit/s)

UA type	Control and NavAids	ATC relay	Non-payload surveillance data ⁽¹⁾
Large	2 437	4 855	287 849
Medium	2 437	4 855	279 120
Small	1 862	0	0

* Averaged over all operational phases.

⁽¹⁾ Includes video, weather radar, sense and avoid, etc.

Πίνακας 9: ITU Bandwidth Requirements for Control, ATC and Sense & Avoid

Ο ανωτέρω πίνακας καταγράφει τις υπολογισθείσες ανάγκες ανταλλαγής πληροφοριών με τον χειριστή του, την αρχή ελέγχου της εναέριας κυκλοφορίας, τους άλλους χρήστες του εναέριου χώρου προς αποφυγή συγκρούσεως και τις υπόλοιπες λειτουργίες όπως περιεγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο, με την μόνη κατηγορία που δεν έχει υπολογισθεί αυτή του ωφέλιμου φορτίου. Και τούτο είναι λογικό διότι η ποικιλία ωφέλιμων φορτίων (payloads) είναι πολύ μεγάλη, εξειδικευμένη και για κάθε εφαρμογή διαφορετική. Περιλαμβάνει δηλαδή τα τρία υποδίκτυα Control, ATC και Sense and Avoid. Η έννοια του video όπως αυτή αναφέρεται στην υποσημείωση (1) του πίνακα αναφέρεται στο βίντεο χαμηλής ανάλυσης για υποβοήθηση του χειριστή στην εκτέλεση της ναυτιλίας κυρίως κατά τις φάσεις της απογείωσης και προσγείωσης όπου η εγγύτητα στο έδαφος και οι μεγάλες ταχύτητες πτήσεως απαιτούν ακαριαίες και εξειδικευμένους χειρισμούς για την ασφαλή εκτέλεση τους. Έτσι η πληροφορία την οποία εξάγουμε και κρατάμε για τους υπολογισμούς που θα χρειαστούμε είναι ότι τα τρία υποδίκτυα αυτά απαιτούν περίπου 300.000 bits/s δηλαδή 0.3Mbps Data rate.

2.4 Ωφέλιμο φορτίο (Payload)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εξεύρεση της απαίτησης του όγκου των δεδομένων για την ποικιλία των διαθέσιμων ωφέλιμων φορτίων πρέπει να γίνει μελετώντας και αναλύοντας κάθε ένα από αυτά ξεχωριστά, καθώς δύναται να είναι από πολύ μικρό έως τεραστίων διαστάσεων της τάξεως των Gbps για κάποια από αυτά.

Όπως έχει ήδη δηλωθεί από την εισαγωγή σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της απαίτησης μετάδοσης δεδομένων κινούμενης εικόνας (video) για την χρήση σε ρόλο θαλάσσιας επιτήρησης και έλεγχο θαλασσίων συνόρων. Σε περαιτέρω ανάλυση των απαιτήσεων του εν λόγω σεναρίου είναι ο καθορισμός του τύπου και του μεγέθους των αντικειμένων τα οποία θέλουμε να διακρίνονται από το video προς μετάδοση για αξιοποίηση από τον χειριστή. Θεωρούμε την απαίτηση ικανότητας εντοπισμού αντικειμένου στο μέγεθος ενός ανθρώπου, το οποίο είναι ιδιαίτερα μικρό, ιδίως καθόσον η έρευνα θα διεξάγεται από κάποιο υψηλό ύψος (της τάξεως κάποιων λίγων χιλιάδων ποδιών). Έτσι υπάρχει η απαίτηση ο εν λόγω αισθητήρας να δύναται να μεταβάλλει το εύρος του οπτικού του πεδίου (ή πιο απλά να δύναται να κάνει zoom) και να έχει μεγάλη ανάλυση εικόνας την οποία θα μεταδίδει σε πραγματικό χρόνο στον χειριστή που θα εκτελεί την απομακρυσμένη έρευνα έτσι ώστε αυτός να λαμβάνει τις απαραίτητες αποφάσεις και να εκτελεί τις απαιτούμενες ενέργειες (π.χ. ειδοποίηση του λιμενικού σώματος σε περίπτωση εντοπισμού ΠΕΠ, κατεύθυνση των μέσων Έρευνας Διάσωσης σε περίπτωση εντοπισμού αγνοουμένου, ενημέρωση Κέντρου Επιχειρήσεων Πολεμικού Ναυτικού σε περίπτωση εντοπισμού υπόπτου/εχθρικού σκάφους). Επίσης θέτουμε την απαίτηση η έρευνα να μπορεί να αξιοποιήσει την μεγάλη αυτονομία ενός αεροχήματος μεγάλης κατηγορίας με παραμονή περί τις 20 ώρες σε πτήση. Έτσι θα πρέπει ο αισθητήρας να δύναται να εντοπίσει αντικείμενα ενδιαφέροντος και σε συνθήκες σκότους όπου μετά την δύση του ηλίου θα χρησιμοποιείται κάμερα υπερύθρων η οποία εντοπίζει και ανιχνεύει την θερμότητα των αντικειμένων.

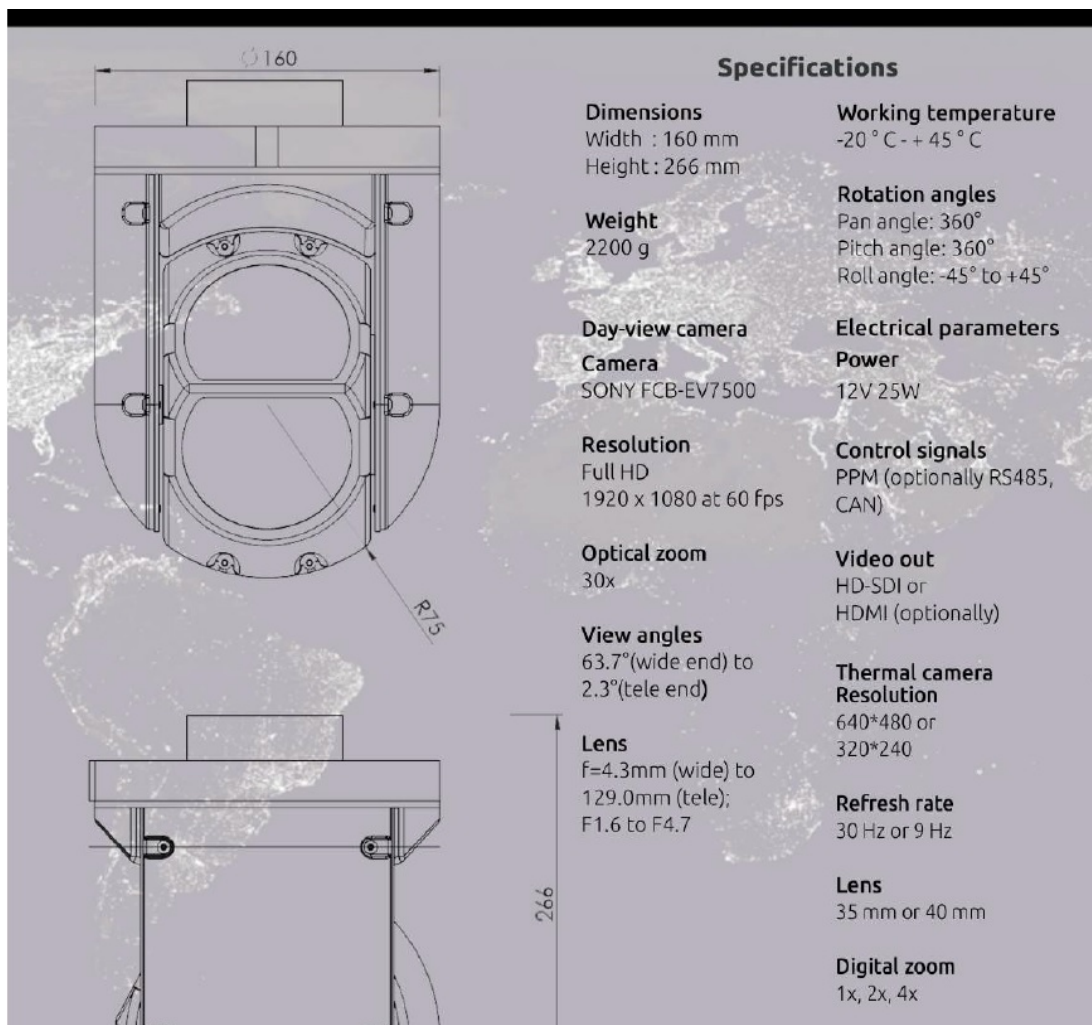
Το σύνολο των απαιτήσεων που θέσαμε εξυπηρετείται από μια διάταξη ηλεκτροοπτικού αισθητήρα υπερύθρων (EO/IR) που είναι ένας πολύ διαδομένος αισθητήρας (payload) που χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές από αυτές

που έχουν καταγραφεί στο κεφάλαιο 1.2. Η τοποθέτηση του γίνεται εντός ενός περιστρεφόμενου και πλήρως ελεγχόμενου από τον απομακρυσμένο χειριστή κελύφους (Gimbal) το οποίο παρέχει την απαραίτητη σταθεροποίηση, την απόσβεση των κραδασμών που προκαλούνται από τις κινήσεις του αεροχήματος και την απαραίτητη προστασία από τα καιρικά φαινόμενα των ευαίσθητων ηλεκτρονικών των αισθητήρων εντός αυτού.

Θα εξετασθούν έτσι δύο αισθητήρες καταγραφής και μετάδοσης εικόνας, ένας για χρήση κατά την ημέρα ο οποίος παρέχει υψηλή ανάλυση και λεπτομέρεια στην απεικόνιση και ένας ο οποίος παρέχει θερμική απεικόνιση κατά την διάρκεια της νύχτας.



Εικόνα 60: USG-212 Gimbal (UKr Spec Systems)



Εικόνα 61: USG-212 Gimbal Specs (UKr Spec Systems)

Λαμβάνοντας μια από τις πολλές διαθέσιμες υψηλού επιπέδου δυνατοτήτων λύσεις COTS (commercial off the shelf) για εμπορικές εφαρμογές και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά που δίδονται από τον κατασκευαστή έχουμε τα εξής δεδομένα:

1. Αισθητήρας ημέρας (Day-view camera resolution): Full HD 1920x1080 at 60fps
2. Θερμικός αισθητήρας (Thermal camera resolution): 640x480, Refresh Rate 30Hz

Αυτά είναι τα χαρακτηριστικά τα οποία θα περιγράψουμε και τα οποία επηρεάζουν τον όγκο και τις απαιτήσεις δεδομένων για την μετάδοση της

πληροφορίας των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο στον χειριστή στον σταθμό εδάφους.

3. Ανάλυση (Resolution): Πρόκειται για τον αριθμό των εικονοστοιχείων (pixels) όπου ο αισθητήρας καταγράφει. Όσο πιο πολλά καταγράφει τόσο πιο μεγάλη λεπτομέρεια αποθηκεύεται και τόσο πιο πολλές πληροφορίες γίνονται αντιληπτές στην μετέπειτα επεξεργασία και ανάλυση μια εικόνας. Επίσης τόσο πιο ποιοτικά μπορεί να επιλέξει ο αναλυτής να μεγενθύνει την εικόνα ψηφιακά, πριν αυτή αρχίσει να χάνει ποιότητα και να γίνει μη αξιοποιήσιμη. Στον αντίποδα, όσο πιο μεγάλη η ανάλυση είναι, τόσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος της πληροφορίας που αποθηκεύεται και στην περίπτωση της μετάδοσης της εικόνας τόσο μεγαλύτερη η ποσότητα της προς μετάδοσης πληροφορίας.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας οι αισθητήρες και η επεξεργαστική ισχύς των ηλεκτρονικών έχουν αυξήσει τις αναλύσεις που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η ποιότητα της εικόνας έχουν νόημα να είναι υψηλές. Τηλεόραση, ερασιτεχνική λήψη βίντεο και κινηματογράφος είναι μερικές ενδεικτικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται υψηλές αναλύσεις. Στο σενάριο της επιτήρησης θαλασσίου χώρου που εξετάζουμε η υψηλή ανάλυση προσδίδει το όφελος ότι ένα μικρό αντικείμενο δεν θα περάσει απαρατήρητο, θα ανιχνευθεί και θα καταγραφθεί από τον αισθητήρα και άρα θα γίνει αντιληπτό από τον χειριστή.

4. Ρυθμός λήψης εικόνων (frames per second): Είναι ο αριθμός των εικόνων που λαμβάνει ο αισθητήρας στην μονάδα του χρόνου. Καθότι το βίντεο είναι διαδοχικές εικόνες που λαμβάνονται και στην συνέχεια παρουσιάζονται δημιουργώντας την ψευδαίσθηση ότι εμπεριέχουν κίνηση, ο ρυθμός λήψεως των εικόνων αυτών προσδίδει την ομαλότητα στην κίνηση αυτή. Είναι ιδιαίτερα σημαντικός όταν το βίντεο περιέχει μεταβολή του οπτικού πεδίου, όπως στην περίπτωση που γίνεται έρευνα σε μια περιοχή και ο χειριστής περιστρέφει τον αισθητήρα για κάλυψη όλης της προς έρευνας περιοχής, καθώς χαμηλός ρυθμός λήψεως «θολώνει» την εικόνα του βίντεο και άρα ζωτικές πληροφορίες δύναται να «χαθούν» και να μην προσπέσουν στην αντίληψή του. Εξίσου και αυτός ο ρυθμός επηρεάζει το μέγεθος του παραγόμενου αποτελέσματος καθώς περισσότερες λήψεις μεταφράζονται σε εξίσου περισσότερα δεδομένα προς μετάδοση.

Ο συνδυασμός βίντεο με ανάλυση FHD (1920 x1080 pixels) και 30 fps είναι ένα πολύ ικανοποιητικό επίπεδο video που μας προσδίδει την ποιότητα που είναι απαραίτητη για έρευνα και εντοπισμό των αντικειμένων που έχουμε θέσει ως στόχο στο σενάριο της επιτήρησης θαλασσίου χώρου και βλέπουμε ότι είναι μέσα στις ικανότητες του αισθητήρα ημέρας του εν λόγω εξοπλισμού.

Ο θερμικός αισθητήρας που παρατηρούμε ότι παρέχει βίντεο 640x480 pixels παρότι φαίνεται χαμηλή η ανάλυση εν τούτοις δεν είναι για τους εξής λόγους. Πρώτον σε θερμική απεικόνιση δεν απαιτείται η λεπτομέρεια που απαιτείται σε μια απεικόνιση κάμερας ημέρας καθότι μας ενδιαφέρει ο εντοπισμός και η κατηγοριοποίηση και μόνον του αντικειμένου (άνθρωπος, σκάφος, μεγάλο πλοίο κτλ.). Δεν δύναται με θερμικό αισθητήρα να καταγραφούν πιο ακριβή χαρακτηριστικά όπως χρώμα που έχουν νόημα σε αισθητήρα ημέρας. Δεύτερον οι αισθητήρες θερμικής απεικόνισης έχουν εξαιρετικά αυξημένο κόστος (πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο) και αισθητήρες με μεγαλύτερες αναλύσεις αυξάνουν απαγορευτικά το κόστος πρόσκτησης τέτοιου εξοπλισμού, μη προσδίδοντας επιχειρησιακά οφέλη. Στην περίπτωση όμως που ο χειριστής επιθυμεί να καταγράψει ένα αντικείμενο ενδιαφέροντος με μεγαλύτερη λεπτομέρεια διαθέτει την επιλογή του περιορισμού του οπτικού πεδίου (zoom) για να το επιτύχει.

Λαμβάνοντας υπόψιν το βίντεο από τον αισθητήρα ημέρας (καθότι απαιτεί την περισσότερη ποσότητα δεδομένων από τους δύο) και τα χαρακτηριστικά αυτού που περιεγράφηκαν, η απαίτηση σε όγκο μετάδοσης δεδομένων είναι της τάξεως των 4Mbps²¹. Αθροίζοντας αυτό με την απαίτηση για τις τρεις κατηγορίες (control, Air Traffic Control, Sense and Avoid) καταλήγουμε ότι οι συνολικές απαιτήσεις μετάδοσης δεδομένων για την πλήρη εκτέλεση των λειτουργιών του μη επανδρωμένου αεροχήματος είναι 4,3Mbps τις οποίες προσαυξάνοντας και στρογγυλοποιώντας στα 4.5Mbps αποκτούμε και ένα περιθώριο της τάξεως των 200kbps.

²¹ Vinod Joseph and Brett Chapman. (2009). Deploying QoS for Cisco IP and Next Generation Networks. USA: Elsevier, page 84

ΜΕΡΟΣ «Β»

3. Διαθέσιμες επιλογές και χαρακτηριστικά επικοινωνιακού εξοπλισμού

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρατεθεί και θα αναλυθεί ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών του link budget για το ασύρματο δίκτυο μεταξύ του μικροδορυφόρου και του μη επανδρωμένου αεροχήματος. Θα προκύψει η τελική αξιολόγηση για την εφικτότητα ανταλλαγής της απαραίτητης ποσότητας δεδομένων που απαιτούνται για την εκτέλεση του πλήρους φάσματος των λειτουργιών του αεροχήματος, κατά την εκτέλεση του σεναρίου θαλασσίου ελέγχου που έχει τεθεί στον σκοπό της παρούσας εργασίας.

Όλος ο εξοπλισμός πληρεί την προδιαγραφή Commercial of the Self (COTS), είναι δηλαδή πλήρως διαθέσιμος για οποιονδήποτε αγοραστή επιθυμεί να τον αποκτήσει για εμπορικές (μη στρατιωτικές) εφαρμογές.

Πρέπει να διευκρινισθεί σε αυτό το σημείο ότι υφίσταται εξοπλισμός στρατιωτικών ή ειδικών προδιαγραφών ο οποίος έχει ανώτερα χαρακτηριστικά αλλά αφενός οι λεπτομερείς παράμετροι αυτού δεν είναι διαθέσιμοι για την εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών, αφετέρου η προμήθεια τέτοιου εξοπλισμού δεν είναι δυνατή για τον οποιονδήποτε και πιθανώς μια προσπάθεια αγοράς τέτοιου εξοπλισμού τελικά να μην μπορούσε να καταστεί δυνατή.

Κατά την έρευνα που διεξήχθη για του εξοπλισμού που θα παρατεθεί στα επόμενα δύο κεφάλαια διαπιστώθηκε ότι υφίσταται μεγάλη ποικιλία παρόμοιου εξοπλισμού από διάφορους κατασκευαστές που δραστηριοποιούνται στον χώρο αυτόν, και η επιλογή του εξοπλισμού έγινε κυρίως με γνώμονα την πληθώρα των τεχνικών παραμέτρων που ο κάθε προμηθευτής διαθέτει για τον εξοπλισμό του ο οποίος είναι απαραίτητος για την εκτέλεση των υπολογισμών του link budget όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 1.3.4.

3.1. Εξοπλισμός Μικροδορυφόρου

Για τον απαραίτητο εξοπλισμό του ασύρματου δικτύου που θα εγκατασταθεί στον μικροδορυφόρο έχει επιλεγεί το modem LiteWave Compact Satellite modem της εταιρείας Advantech Wireless²² και η κεραία ANT2150DUP της εταιρείας GOMspace²³. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στην συνέχεια.

1. Modem LiteWave Compact Satellite (Advantech Wireless):

- Υποστήριξη Data Rates έως 1Gbps
- Υποστήριξη διαμόρφωσης σήματος έως 1024 QAM
- Υποστήριξη της εξελιγμένης κυματομορφής DVB-S2/S2X η οποία αποτελεί την πιο αποδοτική σε χρήση φάσματος για έως και 2-3 φορές μεγαλύτερο όγκο μετάδοσης πληροφορίας σε σχέση με την Viterbi/Reed-Solomon.
- Ειδική σχεδίαση για ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας σε εφαρμογές όπως μικροδορυφόρους και άλλες κινητές πλατφόρμες όπως μη επανδρωμένα αεροχήματα
- Υποστηρίζει προγραμματισμό και παραμετροποίηση καθώς εμπίπτει στην κατηγορία του Software Defined Radio (SDR)
- Υποστήριξη εύρους συχνοτήτων (frequency bands): VHF/UHF/IF/L/S/C-band
- Βάρος modem: 120γρ.

²² https://advantechwireless.com/product/litewave-modem/?utm_source=everythingrf

²³ <https://gomspace.com/shop/subsystems/communication-systems/nanocom-ant2000.aspx>



Εικόνα 62: LiteWave Compact Satellite modem (Advantech Wireless)

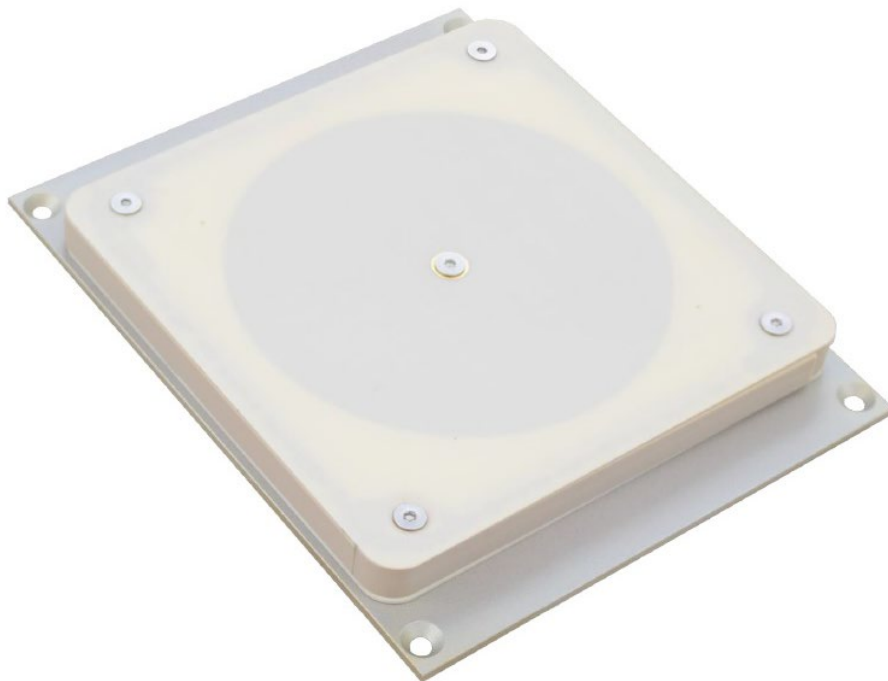
Μελετώντας τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες του ανωτέρω modem επιλέχθηκε η κυματομορφή DVB-S2X καθότι αποτελεί εξέλιξη της πλέον διαδεδομένης DVB-S2 που χρησιμοποιείται για μεγάλο φάσμα ασύρματων μεταδόσεων, προσφέροντας έως και 50% περισσότερη διακινούμενη πληροφορία. Επιλέχθηκε η διαμόρφωση σήματος 256APSK (καθότι βέλτιστη από τις υποστηριζόμενες), όπου πρόκειται για διαμόρφωση πλάτους και συχνότητας του σήματος με εξαιρετικά μεγάλη χωρητικότητα μεταφοράς πληροφορίας και ικανότητας διορθώσεως σφαλμάτων κατά την μετάδοση του σήματος.

Το εν λόγω modem δύναται να χρησιμοποιηθεί και στον επιλεγέν εξοπλισμό του μη επανδρωμένου αεροχήματος, όπου θα επιλεγθούν οι ίδιες παράμετροι λειτουργίας, με μόνη διαφοροποίηση μεταξύ τους στην ισχύ εκπομπής. Για την χρήση του από τον μικροδορυφόρο θα επιλεγεί ισχύς 2W λόγω της περιορισμένης διαθέσιμης ισχύς όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 1.1, ενώ για την χρήση του από το μη επανδρωμένο αερόχημα θα χρησιμοποιηθεί ισχύς 10W καθότι δεν υφίσταται τόσο μεγάλος περιορισμός ενέργειας.

2. ANT2150DUP antenna (GOMspace)

- 8 dBi Gain με κυκλική πόλωση (επιλέξιμη αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη)
- Full Duplex λειτουργία (ξεχωριστή συχνότητα εκπομπής και λήψης)
- Βάρος κεραίας: 110γρ.
- Διαστάσεις κεραίας: 9.8 x 9.8mm ιδανικό για την τοποθέτηση του σε μικροδορυφόρο διάστασης από 1U και περισσότερο

Μελετώντας τα χαρακτηριστικά και λεπτομερείς τεχνικές προδιαγραφές για την κεραία αυτή που παρέχονται από τον κατασκευαστή, διαπιστώνεται ότι για τις συχνότητες 2250-2290Mhz η ευαισθησία της κεραίας είναι 8,5dBi, τιμή την οποία θα χρησιμοποιήσουμε και στους υπολογισμούς μας στο επόμενο κεφάλαιο για την ανάλυση του link budget. Επίσης η γωνία δέσμης εκπομπής ημίσειας ισχύος είναι 66° έως 68.5° κάτι που υπερκαλύπτει τις απαιτούμενες 64.2° που υπολογίσαμε στο κεφάλαιο 1.3.3



Εικόνα 63: ANT2150DUP antenna (GOMspace)

3.2. Εξοπλισμός μη επανδρωμένου αεροχήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για τον εξοπλισμό που θα επιλεγεί να τοποθετηθεί στο μη επανδρωμένο αερόχημα, το modem θα είναι ίδιο με αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στον μικροδορυφόρο με την μόνη διαφοροποίηση στην ισχύ εκπομπής. Τούτο μας παρέχει το επιπρόσθετο όφελος της άριστης συνεργασίας μεταξύ τους και ευκολίας παραμετροποίησης λιγότερου αριθμού διαφορετικού εξοπλισμού. Τα στοιχεία του modem αυτού και οι επιλογές της διαμόρφωσης και λοιπών παραμέτρων παραμένουν όπως περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 3.1.

Στον εξοπλισμό της κεραίας επελέγη η κεραία MBA-0162 της εταιρείας Jem Engineering με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μεγάλο εύρος υποστηριζόμενων συχνοτήτων λειτουργίας (400Mhz-2700Mhz)
- Έως 16dBi Gain στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας της (θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή 12dBi καθότι η συχνότητα που θα χρησιμοποιήσουμε είναι περί τα 2300MHz)
- Μέγιστη ισχύς εκπομπής 50W
- Κυκλική πόλωση (συμβατή με την κεραία του μικροδορυφόρου)
- Βάρος: 3.4Kg



Εικόνα 64: MBA-0162 Antenna for UAV (JEM Engineering)

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η κεραία αυτή θα πρέπει να τοποθετηθεί επάνω σε περιστρεφόμενη βάση (περιστρεφόμενη τόσο καθ' ύψος όσο και κατά διόπτευση) η οποία θα ελέγχεται από έναν μικροεπεξεργαστή ο οποίος θα έχει προφορτωμένη την τροχιά του μικροδορυφόρου και θα κατευθύνει ανά πάσα στιγμή την κεραία προς αυτόν. Η μελέτη και περιγραφή του εν λόγω συστήματος κατεύθυνσης ξεφεύγει του σκοπού της παρούσας εργασίας αλλά αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Η χρήση τέτοιων συστημάτων είναι ευρέως διαδεδομένη σχεδόν σε κάθε εφαρμογή που χρησιμοποιεί κατευθυντική κεραία μεταξύ κινητών συνδρομητών ασύρματων δικτύων και λύσεις υπάρχουν και διαθέσιμες στην αγορά (COTS).

4. Δυνατότητες συνεργασίας μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο

Στο σύνολο των προηγούμενων κεφαλαίων έχουν καταγραφεί και περιγραφεί όλα τα δεδομένα τα οποία μας είναι απαραίτητα για να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του Link Budget μεταξύ ενός μικροδορυφόρου και ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος. Στο κεφάλαιο 1.3.4 περιγράφηκε η έννοια του Link Budget και πως αυτός θα μας επιτρέψει να προσδιορίσουμε την εφικτότητα της επικοινωνίας μεταξύ των δύο συνδρομητών του ασύρματου δικτύου της εργασίας. Στο κεφάλαιο 2 υπολογίσθηκαν οι απαιτήσεις του όγκου των δεδομένων (data rate) που απαιτούνται για την πλήρη λειτουργία του αεροχήματος που εξετάζουμε σε όλες τις φάσεις της πτήσεως του και στο κεφάλαιο 3 καταγράφηκε ο εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση του ασύρματου δικτύου, με τις παραμέτρους λειτουργίας αυτού.

Στο παρόν κεφάλαιο θα εκτελεσθούν οι απαιτούμενοι μαθηματικοί υπολογισμοί και θα εξαχθεί η εφικτότητα της επικοινωνίας του προτεινόμενου δικτύου.

Παραδοχές:

- Οι υπολογισμοί θα εκτελεσθούν για την μέγιστη απόσταση μεταξύ του μικροδορυφόρου και του μη επανδρωμένου αεροχήματος δηλαδή 1930km όπως υπολογίσθηκε στο κεφάλαιο 1.3.3 με την χρήση του τύπου (3). Πρόκειται για τις χειρότερες συνθήκες διότι οι απώλειες λόγω απόστασης είναι πολύ αυξημένες. Μειούμενης της απόστασης κατά την κίνηση του μικροδορυφόρου θα βελτιώνεται η ποιότητα του ασύρματου δικτύου.
- Το εύρος φάσματος που θα χρησιμοποιηθεί (B) όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1.3.4 εξαρτάται από πολλές παραμέτρους του ασύρματου δικτύου κυρίως όμως από την κυματομορφή που θα επιλέξουμε για την διαμόρφωση του σήματος εκπομπής (εν προκειμένη περίπτωση DVB-S2X). Για την συγκεκριμένη διαμόρφωση και τις τυπικές παραμέτρους αυτής το απαιτούμενο εύρος φάσματος είναι 2.1Mhz, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και στους υπολογισμούς του Link Budget.

- Η θερμοκρασία θορύβου των κεραιών είναι μια παράμετρος που δεν δίδεται από κανέναν κατασκευαστή αλλά θερμοκρασία $T=10^\circ \text{ K}$ είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση και αυτή η τιμή θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς που ακολουθούν.
- Θα προστεθεί μια μείωση στην ισχύ του σήματος για ρεαλιστικότερη πρόβλεψη απρόοπτων παραγόντων οι οποίοι δεν δύνανται να υπολογισθούν στην διαδικασία της σχεδίασης του δικτύου. Θα είναι της τάξεως των -3db (L δείκτη αστάθμητοι παράγοντες, $L_{\text{ασ}}=-3\text{db}$). Αυτή η απομείωση θα προστεθεί τόσο στο uplink όσο και στο downlink της επικοινωνίας των συνδρομητών.

1. Uplink Link Budget (Αποστολή δεδομένων από το μη επανδρωμένο αερόχημα προς τον μικροδορυφόρο):

- $EIRP = W_{\text{πομπού uav}}(\text{db}) + \text{Gain}_{\text{κεραίας uav}}(\text{db}) = 10\log(10) + 12 = 22\text{db}$
- $L = -164.3\text{db}$ (Με χρήση του τύπου (7) για απόσταση 1930km)
- $L_{\text{ασ}} = -3\text{db}$
- $G/T = 8.5 - 10\log(10) = -1.5\text{db}$ (με χρήση του τύπου (8) για $T=10^\circ \text{ K}$)
- Bandwidth = 2.1 Mhz

Συνδυάζοντας τα ανωτέρω δεδομένα στον τύπο (9) υπολογίζεται ότι

$$\underline{C/N_{\text{uplink}} = 18.6\text{db}}$$

2. Downlink Link Budget (Αποστολή δεδομένων από τον μικροδορυφόρο στο μη επανδρωμένο αερόχημα):

- $EIRP = 10\log(2) + 8.5 = 11.5\text{db}$
- $L = -164.3\text{db}$ (όπως και στο Uplink)
- $L_{\text{ασ}} = -3\text{db}$
- $G/T = 12 - 10\log(10) = 2\text{db}$
- Bandwidth = 2.1 Mhz

Συνδυάζοντας τα ανωτέρω δεδομένα στον τύπο (9) υπολογίζεται ότι

$$\underline{C/N_{\text{downlink}} = 10.9\text{db}}$$

Υπολογίζοντας το συνολικό Link Budget με την χρήση του τύπου (10)

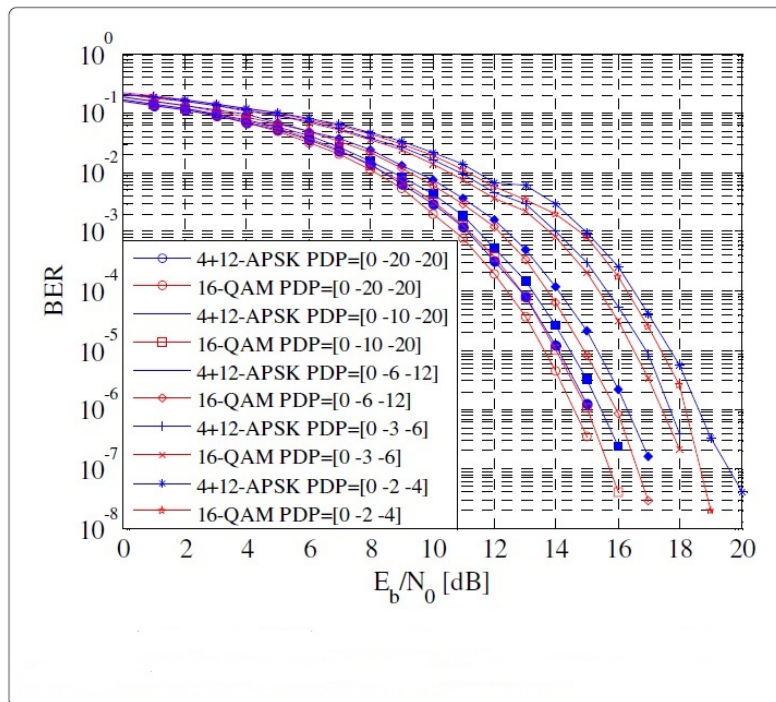
$$\underline{C/N_{total}=10.2db}$$

Τέλος απομένει να υπολογιστεί η ενέργεια ανά bit πληροφορίας προς τον θόρυβο του δικτύου και να εξαχθεί ο ρυθμός μετάδοσης σφάλματος Bit Error Rate (BER) για την κωδικοποίηση των δεδομένων που επελέγει κατά την σχεδίαση του ασύρματου δικτύου. Κάνοντας χρήση του τύπου (11) εξάγεται το αποτέλεσμα:

- Για Bandwidth= 2.1 Mhz
- Και απαίτηση Data Rate= 4.5 Mbps

$$\underline{E_b/N_o=10.2-10\log(2.1/4.5)=6.9db}$$

Με την τιμή που αυτή και μπαίνοντας αντίστροφα στον κάτωθι πίνακα:



Εικόνα 65: Simulated BER performance of APSK and QAM in multipath channels with different power levels²⁴

²⁴ Baldi, M., Chiaraluce, F., Angelis, A.d. *et al.* A comparison between APSK and QAM in wireless tactical scenarios for land mobile systems. *J Wireless Com Network* **2012**, 317 (2012) p.10

Βγαίνει το συμπέρασμα ότι για $E_b/N_0 = 6.9\text{db}$ η κωδικοποίηση 256APSK που επιλέξαμε μας δίνει BER περίπου 10^{-2} . Το εν λόγω σφάλμα είναι αρκετά υπολογίσιμο και θα εξετασθούν στο επόμενο κεφάλαιο τρόποι για να μειωθεί σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Εκτελώντας τους υπολογισμούς για την διάρκεια της ασύρματης επαφής του μικροδορυφόρου με το μη επανδρωμένο αερόχημα και μειούμενης της απόστασης μεταξύ τους καθώς ο μικροδορυφόρος ταξιδεύει ο λόγος E_b/N_0 μειώνεται έως την τιμή 10^{-7} τιμή που είναι σε πολύ αποδεκτά πλαίσια για την ποιότητα του δικτύου.

5. Βελτιστοποίηση συνεργασίας μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο

Λαμβάνοντας το αποτέλεσμα του κεφαλαίου 4 για τον ρυθμό σφαλμάτων στην μετάδοση των δεδομένων μεταξύ του μικροδορυφόρου και του μη επανδρωμένου αεροχήματος θα εξετασθούν στο παρόν κεφάλαιο μέθοδοι για βελτιστοποίηση και μείωση του ρυθμού αυτού.

Κατά την λήψη από τον δέκτη δεδομένα τα οποία περιέχουν σφάλματα, ο υπολογιστής που θα λάβει τα δεδομένα αυτά θα τα απορρίψει και θα ζητήσει εκ νέου από τον πομπό να του επαναπροωθήσει την πληροφορία που δεν ήταν σωστή. Αυτό απαιτεί χρόνο και επιπλέον δεδομένα να αποσταλούν στο ήδη κορεσμένο δίκτυο. Στην περίπτωση που η εσφαλμένη πληροφορία αποτελεί δεδομένο του video από τον αισθητήρα του αεροχήματος, ο σταθμός ελέγχου για την αποφυγή της πρόκλησης αυτού του επιπλέον δικτυακού φόρτου που περιγράφηκε δύναται να μην ζητήσει εκ νέου την αποστολή του, αλλά να προσπαθήσει με την χρήση έξυπνων αλγορίθμων να το «μαντέψει» (όπως για παράδειγμα συγκρίνοντας το με τα συνορεύοντα pixels και εμφανίζοντας τον μέσο όρο αυτών). Αυτό θα προκαλέσει αλλοιώσεις ή και παγώματα στην εικόνα του απομακρυσμένου χειριστή ανάλογα με την ποσότητα των σφαλμάτων αυτών. Στην συνέχεια καταγράφονται ορισμένοι τρόποι για να μειωθεί ο ρυθμός σφαλμάτων και να βελτιστοποιηθεί το πρόβλημα που περιγράφηκε.

- Χρήση μικρότερης ανάλυσης βίντεο έως ότου η απόσταση μεταξύ του μικροδορυφόρου και του αεροχήματος επιτρέψει την βελτιστοποίηση του BER: Ο πιο εύκολος τρόπος για να μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης σφαλμάτων είναι να μειωθεί ο όγκος της επικοινωνίας μεταξύ των συνδρομητών. Καθότι ο μεγαλύτερος όγκος που διακινείται είναι το video από τον αισθητήρα του αεροχήματος, και αυτού η παράμετρος που επηρεάζει κατά το περισσότερο τον όγκο του είναι η ανάλυσή του, δύναται να μειώνει το σύστημα την ανάλυση του μέχρι να μειωθεί η απόσταση οπότε να λαμβάνει ο χειριστής την πλήρη ανάλυση του. Επιλέγοντας μια μειωμένη ανάλυση στα 1280 x 720 (pixels) η οποία ανάλυση παραμένει υψηλής ευκρίνειας (HD) και επανυπολογίζοντας εξ αρχής το link budget της ασύρματης επικοινωνίας ο δείκτης

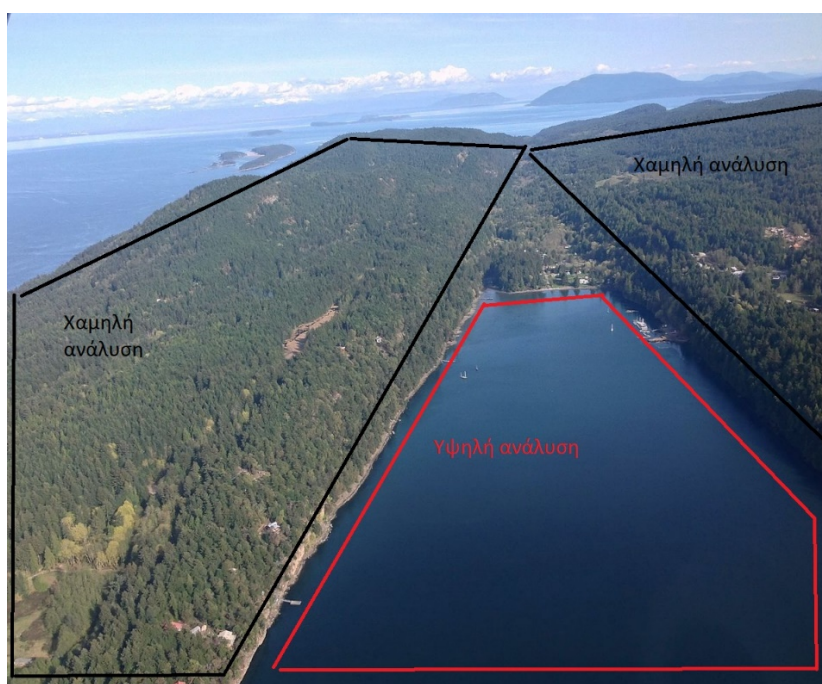
BER μειώνεται αισθητά από 10^{-2} σε λιγότερο από 10^{-3} δηλαδή **περισσότερο από 10 φορές λιγότερος θόρυβος**. Εν συνεχεία και μόλις η απόσταση μειωθεί μεταξύ τους, το σύστημα θα επιστρέψει στην αποστολή της πλήρης ανάλυσης του video.

- Χρήση μεγαλύτερης ισχύς εκπομπής για περιορισμένο χρονικό διάστημα: Με τον αυστηρό περιορισμό σε αποθέματα και διαθέσιμη ισχύ κυρίως από την πλευρά του μικροδορυφόρου η ισχύς εκπομπής της κεραίας αυτού είναι στα μέγιστα δυνατά πλαίσια για την αποφυγή εξαντλήσεως των συσσωρευτών αυτού. Για μικρό και σύντομο χρονικό διάστημα όμως (της τάξεως των 2 λεπτών ανά 96 λεπτά που έχει περίοδο επανέπισκεψης) δυνάμεθα να αυξήσουμε την ισχύ εκπομπής του κατά 1W (από τα 2W στα 3W) καθότι με αυτή την αύξηση **επιτυγχάνεται μείωση του ρυθμού μετάδοσης σφαλμάτων 5 φορές** κατά το κρίσιμο στάδιο της μεγάλης μεταξύ τους απόστασης και μέχρι αυτή να μειωθεί.
- Χρήση μεγαλύτερου αριθμού μικροδορυφόρων: Για να είναι απρόσκοπτη η επικοινωνία του μικροδορυφόρου με το μη επανδρωμένο αερόχημα θα πρέπει ανά πάσα στιγμή ένας μικροδορυφόρος να βρίσκεται σε επαφή και να έχει αποκαταστήσει επικοινωνία με το αερόχημα αυτό. Για την περίοδο των 96λεπτών που υπολογίστηκε με τον τύπο (2) αυτό απαιτεί 12 μικροδορυφόρους προς επίτευξη τούτου. Με την χρήση όμως περισσότερων δορυφόρων επί παραδείγματι άλλων 3^{ων}, συνολικά δηλαδή 15 δορυφόρων θα μειωνόταν η αρχική απόσταση απόκτησης επικοινωνίας με κάθε έναν από αυτούς (από 1930km στα 1517km) οπότε και **θα μειωνόταν περισσότερο από 10 φορές ο ρυθμός μετάδοσης σφαλμάτων** στην μεταξύ τους επικοινωνία.
- Έξυπνη διαχείριση της μετάδοσης της εικόνας video: Για την βέλτιστη απόδοση της ασύρματης επικοινωνίας του μη επανδρωμένου αεροχήματος με τον μικροδορυφόρο και τελικά με τον απομακρυσμένο χειριστή του, και με την σημαντικότητα της αποστολής όπου έστω και μια στιγμιαία διακοπή η σφάλμα στην μετάδοση του video μπορεί να αποκρύψει μια ευαίσθητη πληροφορία η οποία δεν θα είναι διαθέσιμη σε επόμενο χρόνο (π.χ. έναν ναυαγό), δύναται να εφαρμοστεί μια έξυπνη διαχείριση του όγκου των δεδομένων που ανταλλάσσονται έτσι ώστε να μειωθεί ακόμα περισσότερο αυτός και τελικά η απόδοση του δικτύου να βελτιωθεί περαιτέρω.

Σε ένα υποθετικό σενάριο όπου η αποστολή του μη επανδρωμένου αεροχήματος είναι ο εντοπισμός ενός ναυαγίου, μπορεί ο απομακρυσμένος χειριστής

(μέσα από το κατάλληλο λογισμικό) να ακολουθήσει την τακτική της έρευνας για εντοπισμό πρώτα του πλοίου που ναυάγησε και εν συνεχεία να ψάξει περίξ αυτού για ναυαγούς οι οποίοι το εγκατέλειψαν και βρίσκονται περίξ αυτού. Σε όλη την φάση της έρευνας για τον εντοπισμό του πλοίου, μέσω του λογισμικού, ο χειριστής θα μειώνει την απαίτηση της ανάλυσης του βίντεο που το μη επανδρωμένο αερόχημα θα μεταδίδει σε πραγματικό χρόνο, καθότι ένα πλοίο, λόγω του μεγέθους του, δύναται να εντοπισθεί και με χαμηλότερη ανάλυση. Όταν θα γινόταν ο εντοπισμός και το αερόχημα θα βρισκόταν στην περιοχή του ναυαγίου, ο χειριστής θα «ανέβαζε» την ανάλυση, καθότι θα περνούσε στην διαδικασία εντοπισμού ανθρώπων ναυαγών οι οποίοι αποτελούν μικρό αντικείμενο όπου απαιτείται η βέλτιστη ανάλυση της εικόνας για την αύξηση των πιθανοτήτων εντοπισμού τους. Όσο μεγαλύτερο το πλοίο ή το αντικείμενο ενδιαφέροντος τόσο χαμηλότερη ανάλυση θα δύναται ο χειριστής να επιλέξει για να μην μειωθεί η επιτυχία της αποστολής.

Παράλληλα και εκτός των ανωτέρω, σε οποιοδήποτε τμήμα της εικόνας κατά την έρευνα με μικρότερη ανάλυση, ο χειριστής θα δύναται να επιλέξει μέρος αυτής (ένα παράθυρο εντός της εικόνας) εντός του οποίου θα λαμβάνει την πλήρη ανάλυση εάν το επιθυμεί λόγω των αναγκών της εκάστοτε κατάστασης. Μια αναπαράσταση αυτού φαίνεται κάτωθι.



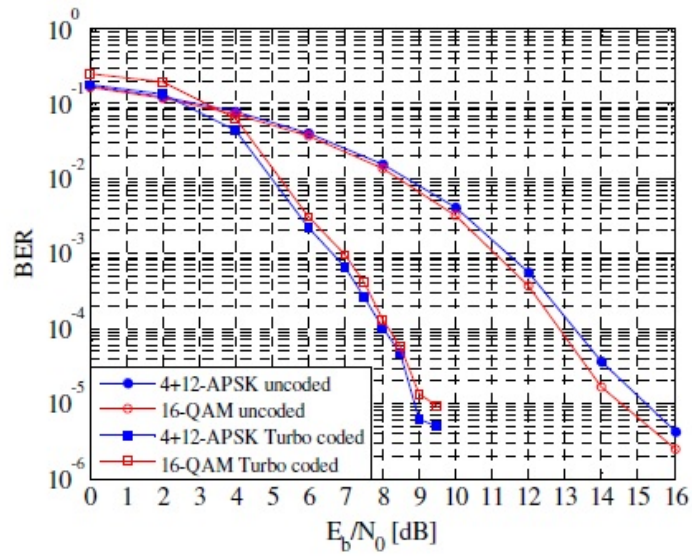
Εικόνα 66: Έξυπνη διαχείριση ανάλυσης εικόνας σε σενάριο έρευνας ναυαγίου/ναυαγού

Εάν για οποιονδήποτε λόγο ο χειριστής κρίνει ότι για μια χρονική στιγμή που έχει παρέλθει επιθυμεί να δει μέρος ή ολόκληρο το video σε ανάλυση μεγαλύτερη απ' ότι την είχε δει σε πραγματικό χρόνο αυτό θα είναι επίσης εφικτό καθ' ότι ο αισθητήρας του μη επανδρωμένου αεροχήματος συλλαμβάνει και αποθηκεύει την πλήρη ανάλυση καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας του για μεταγενέστερη επεξεργασία.

Ο ρόλος της τεχνητής νοημοσύνης σε μια τέτοια έξυπνη διαχείριση της ανάλυσης του βίντεο είναι τεραστίας σημασίας καθώς ένα εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο το οποίο θα δύναται να είναι εγκατεστημένο στο αερόχημα, θα αναλύει και θα επεξεργάζεται την εικόνα του video στην πλήρη της ανάλυση, παράλληλα και χωρίς να επηρεάζει τον απομακρυσμένο χειριστή, θα τον ειδοποιεί μόνον εάν κρίνει ότι έχει εντοπίσει ένα αντικείμενο ενδιαφέροντος. Σε αυτή την περίπτωση ο χειριστής θα επιλέγει εάν επιθυμεί να ερευνησει περαιτέρω την υπόδειξη αυτή, με μεγαλύτερη ανάλυση ενδεχομένως από αυτήν που χρησιμοποιούσε ο ίδιος.

Από όλες αυτές τις πρακτικές έξυπνης διαχείρισης της ανάλυσης της εικόνας, χωρίς να επηρεάζεται η αποτελεσματικότητα της αποστολής εξοικονομούνται τεράστιες ποσότητες δεδομένων και τελικά το ασύρματο δίκτυο λειτουργεί σε μικρότερο ποσοστό φόρτου εργασίας (load factor), προσφέροντας αποδοτικότερη λειτουργία, σημαντικά μικρότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και ομαλότερη λειτουργία.

- Χρήση Turbo Coding για περαιτέρω μείωση του ρυθμού μετάδοσης σφαλμάτων: Ο κώδικας Turbo coding είναι ένας έξυπνος κώδικας όπου παρέχει την δυνατότητα σε προγραμματιστικό επίπεδο και μέχρι ρυθμό σφαλμάτων της τάξεως 10^{-5} να υποβοηθήσει την διόρθωση των σφαλμάτων του δικτύου όπως φαίνεται στην κάτωθι απεικόνιση:



Εικόνα 34: Average BER on a single path fading channel with LOS, with and without the application of a turbo code²⁵

Ο κώδικας αυτός χρησιμοποιείται κατά κόρον στα σύγχρονα δίκτυα υψηλών απαιτήσεων όπως στην κινητή τηλεφωνία (3G/4G). Για το υπολογισθέν αρχικό E_b/N_0 ο θόρυβος με τον κώδικα αυτό **μειώνεται 15 φορές περίπου**.

²⁵ Baldi, M., Chiaraluce, F., Angelis, A.d. *et al.* A comparison between APSK and QAM in wireless tactical scenarios for land mobile systems. *J Wireless Com Network* **2012**, 317 (2012) p.10

6. Περιορισμοί στην συνεργασία μη επανδρωμένου αεροχήματος με μικροδορυφόρο

Παρ' όλες τις αναλύσεις και βελτιστοποιήσεις που μπορούν να υλοποιηθούν και να προβλεφθούν κατά την φάση της σχεδίασης του ασύρματου δικτύου της επικοινωνίας μεταξύ του μικροδορυφόρου και του μη επανδρωμένου αεροχήματος, εν τούτοις μπορεί κατά την εφαρμογή αυτής να προκύψουν απρόοπτοι παράγοντες και παράμετροι οι οποίοι θα δυσχεράνουν την λειτουργία και την ποιότητα του δικτύου.

- Περιβαλλοντικοί παράγοντες: Όπως έχει ήδη αναφερθεί η απόδοση του δικτύου (Link Budget) επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της ατμόσφαιρας και τα διάφορα μετεωρολογικά (και όχι μόνο) φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα σε αυτή. Έτσι ισχυρή βροχή, μεγάλες κατακόρυφες αναπτύξεις (σύννεφα με μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη, π.χ. cumulonimbus και άλλα καταγιδόφορα νέφη) ακόμα και χωρίς την παρουσία βροχής, χιονόπτωση, υγρασία, σκόνη, φαινόμενα της ιονόσφαιρας και ηλιακές καταιγίδες είναι μερικοί από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες οι οποίοι δύναται να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση του δικτύου και είτε να αναγκάσουν τους συνδρομητές να συνεργαστούν με μικρότερο διαθέσιμο data rate και μεγαλύτερο δείκτη BER, είτε να τους απαγορέψουν εξ' ολοκλήρου οποιαδήποτε συνεργασία.

- Θέματα αστοχιών υλικού και ύπαρξη εφεδρικών συστημάτων (Repair and Redundancy): Καθότι ο μικροδορυφόρος μετά την εκτόξευσή του δεν είναι ανακτήσιμος ούτε προσβάσιμος, οποιαδήποτε αστοχία σε οποιοδήποτε υποσύστημά του δεν δύναται να επισκευασθεί ούτε να αντικατασταθεί. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον περιορισμένο χώρο και τις αυστηρές προδιαγραφές βάρους, δεν επιτρέπουν ούτε την προ εκτοξεύσεως εγκατάσταση εφεδρικών συστημάτων για να επιτευχθεί η επιπλέον αξιοπιστία που προσφέρει η τακτική αυτή. Σε αντίθεση, στα μη επανδρωμένα αεροχήματα υφίσταται η δυνατότητα εγκατάστασης κάποιων εφεδρικών υποσυστημάτων (σε ζωτικής για την πτήση, την επικοινωνία και ορισμένα άλλα συστήματα), καθώς επίσης οποιαδήποτε βλάβη δύναται να αποκατασταθεί και επισκευασθεί στην βάση του αεροχήματος μετά την επιστροφή του, η κατά την προ

πτήσεως επιθεώρηση του και εντοπισμό οποιοδήποτε ευρήματος. Έτσι οποιαδήποτε αστοχία από την πλευρά του μικροδορυφόρου, θα επιφέρει μόνιμη απομείωση ή και ολική διακοπή της επικοινωνίας για το χρονικό παράθυρο όπου αυτός θα είναι ορατός από το αερόχημα και μέχρι την έλευση του επόμενου σε σειρά μικροδορυφόρου.

- Αναβάθμιση και ενημέρωση λειτουργιών του ασύρματου δικτύου: Η σύγχρονη τεχνολογία και δομή των επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από ραγδαία ανάπτυξη και επίλυση των ποικίλων προβλημάτων και αδυναμιών των υφιστάμενων συστημάτων ή ανάπτυξη καινοτόμων νέων. Η μη προσβασιμότητα όμως του μικροδορυφόρου μετά την εκτόξευσή του δεν δίνει την δυνατότητα για αναβάθμιση και εξέλιξη αυτού παρά μόνον σε περιορισμένο εύρος που αφορά το λογισμικό του που δύναται εν μέρη να αναβαθμισθεί από απόσταση από τον διαχειριστή του. Σε αντίθεση, το μη επανδρωμένο αερόχημα δύναται να υποστεί τροποποιήσεις και αναβαθμίσεις. Ιδιαίτερα δύσκολη και απαιτητική τεχνολογικά επίσης καθίσταται η αναβάθμιση μόνο μέρους του συνολικού συστήματος, καθώς ο ένας συνδρομητής παραμένει μη προσβάσιμος ενώ ο άλλος αναβαθμίζεται μεν αλλά πρέπει να συνεργασθεί με τον έτερο μη αναβαθμισμένο και κάποια στιγμή ίσως και τεχνολογικά παρωχημένο.

7. Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα εργασία τέθηκε το ζήτημα μελέτης και τεκμηρίωσης της δυνατότητας επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ ενός μικροδορυφόρου και ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος για την εκτέλεση ενός τυπικού σεναρίου έρευνας και ελέγχου θαλασσίου χώρου και θαλασσίων συνόρων.

Περιγράφηκε η δομή, οι κατηγορίες, τα πλεονεκτήματα και ενδεικτικά κόστη κατασκευής και εκτόξευσης ενός μικροδορυφόρου σε σχέση και με τους μεγάλους κλασικούς δορυφόρους. Αναλύθηκαν τα επιμέρους υποσυστήματα:

- Δομικό μέρος
- Σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ισχύος
- Σύστημα επικοινωνιών
- Σύστημα ελέγχου στάσης
- Σύστημα ελέγχου και διαχείρισης δεδομένων
- Ωφέλιμο φορτίο

Ακολούθησε περιγραφή, κατηγοριοποίηση, ενδεικτικά σενάρια χρήσης και ανάλυση των κάτωθι υποσυστημάτων των μη επανδρωμένων αεροχημάτων:

- Ατρακτος
- Προωστήριο σκεύος
- Αυτόματος πιλότος
- Δίκτυο επικοινωνιών
- Ωφέλιμο φορτίο
- Σταθμός ελέγχου εδάφους

Εν συνεχεία στο κεφάλαιο 1 έγινε εισαγωγή στην θεωρία των ασύρματων επικοινωνιών παραθέτοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι των ενσύρματων επικοινωνιών. Καταγράφηκαν τα υποσυστήματα του πομποδέκτη και της κεραίας ενός ασύρματου δικτύου με τα χαρακτηριστικά αυτών και ακολούθησε περιγραφή των παραγόντων που επηρεάζουν τις ασύρματες επικοινωνίες:

- Συχνότητα λειτουργίας
- Ισχύς εκπομπής

- Κατευθυντικότητα κεραίας
- Σκέδαση της ακτινοβολίας
- Απορρόφηση ακτινοβολίας
- Απομείωση ενέργειας ακτινοβολίας στον χώρο
- Απώλειες στον πομπό και τον δέκτη και τις κεραίες αυτών
- Θερμοκρασία θορύβου κεραίας
- Απώλειες λόγω σφάλματος στην σκόπευση κεραίας πομπού και δέκτη
- Διαμόρφωση σήματος

Στην συνέχεια αναλύθηκαν και εξάχθηκαν με μαθηματικούς τύπους, επιπλέον ιδιαιτερότητες του ασύρματου δικτύου μεταξύ του μικροδορυφόρου και του μη επανδρωμένου αεροχήματος για να ακολουθήσει εισαγωγή στο Link Budget ως εργαλείου υπολογισμού της ποιότητας του δικτύου αυτού.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύθηκαν οι απαιτήσεις επικοινωνίας του μη επανδρωμένου αεροχήματος σε απαιτήσεις ελέγχου, εναέριας κυκλοφορίας, ελέγχου περιβάλλοντος και ωφέλιμου φορτίου, μελετήθηκαν ξεχωριστά για να εξαχθούν οι επιμέρους απαιτήσεις τους και στην συνέχεια αθροίσθηκαν για να βγει η συνολική απαίτηση του αεροχήματος.

Στο «B» μέρος της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε ενδεικτικά εξοπλισμός διαθέσιμος στην αγορά (commercial of the self-COST) για την δόμηση του ασύρματου δικτύου τόσο για τον μικροδορυφόρο όσο και για το μη επανδρωμένο αερόχημα. Επιλέχθηκαν τα κάτωθι:

- Modem μικροδορυφόρου και μη επανδρωμένου αεροχήματος: Modem LiteWave Compact Satellite (Advantech Wireless)
- Κεραία μικροδορυφόρου: ANT2150DUP (GOMspace)
- Κεραία αεροχήματος: MBA-0162 (Jem Engineering)

Ακολούθησε επίλυση του Link Budget με βάση τις παραδοχές που έγιναν, τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που επελέγη, τα αποτελέσματα που υπολογίσθηκαν στο κεφάλαιο 1.3.3 από την τροχιακή μηχανική του μικροδορυφόρου και τις απαιτήσεις της επικοινωνίας του αεροχήματος στο κεφάλαιο 2.

Εν συνεχεία προτάθηκαν και αναλύθηκαν τρόποι βελτίωσης του εξαχθέντος αποτελέσματος:

- Με χρήση μικρότερης ανάλυσης βίντεο έως ότου η απόσταση μεταξύ του μικροδορυφόρου και του αεροχήματος επιτρέψει την βελτιστοποίηση του BER
- Με χρήση μεγαλύτερης ισχύς εκπομπής για περιορισμένο χρονικό διάστημα
- Με χρήση μεγαλύτερου αριθμού μικροδορυφόρων
- Με έξυπνη διαχείριση της μετάδοσης της εικόνας video
- Με χρήση Turbo Coding για περαιτέρω μείωση του ρυθμού μετάδοσης σφαλμάτων

Τέλος παρατέθηκαν ορισμένοι έμφυτοι περιορισμοί στην επικοινωνία του μικροδορυφόρου με το μη επανδρωμένο αερόχημα που αφορούν περιβαλλοντικούς παράγοντες, θέματα αστοχιών υλικού και ύπαρξης εφεδρικών συστημάτων και αναβάθμισης και ενημέρωσης λειτουργιών του ασύρματου δικτύου.

8. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση του θέματος της εργασίας για την δυνατότητα και τους περιορισμούς επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ ενός μικροδορυφόρου και ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος, της ανάλυσης των χαρακτηριστικών εκάστου από τους δύο συνδρομητές, την θεωρία των ασυρμάτων δικτύων και τις παραμέτρους που τα επηρεάζουν, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του διαθέσιμου εξοπλισμού και της θεωρίας του Link Budget υπολογίσθηκε ότι είναι δυνατή η μεταξύ τους επικοινωνία και ο απομακρυσμένος τηλεχειρισμός του αεροχήματος. Σε όλες τις φάσεις της πτήσεως του, και με αποτελεσματική χρήση του αισθητήρα του για την εκτέλεση της αποστολής του.

Συγκεκριμένα υπολογίσθηκε ότι για την χειρότερη περίπτωση (από άποψης μεταβλητών του δικτύου επικοινωνίας), όπου η απόσταση μεταξύ τους είναι στην μέγιστη τιμή της στα 1930km, ο λόγος λαμβανομένης ισχύος προς τον θόρυβο είναι $C/N_{total}=10.2\text{db}$. Αυτός δίνει με την σειρά του ενέργεια ανά bit πληροφορίας $E_b/N_o=6.9\text{db}$ και τελικά ο ρυθμός μετάδοσης σφάλματος (BER) είναι 10^{-2} .

Λόγω των πολλών περιορισμών και ιδιαίτερων συνθηκών η επικοινωνία αυτή έχει αυξημένο ρυθμό μετάδοσης σφαλμάτων κυρίως κατά την πρώτη επαφή τους και κατά το τέλος αυτής όπου η απόσταση μεταξύ τους, όπως προαναφέρθηκε, είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Όμως με υλοποίηση των προτάσεων βελτιστοποίησης που παρατέθηκαν ο ρυθμός μετάδοσης σφαλμάτων δύναται να μειωθεί περισσότερες από χίλιες φορές και τελικά η δυνατότητα της επικοινωνίας μεταξύ τους είναι και καθόλα εφικτή.

Οι προοπτικές που απορρέουν από το παρόν εγχείρημα είναι πολύ σημαντικές καθότι υφίσταται η δυνατότητα απομακρυσμένου χειρισμού ενός αεροχήματος σε περιοχές όπου η οπτική επαφή και η ασύρματη επικοινωνία με χρήση χερσαίου εξοπλισμού είναι αδύνατη ή για διάφορους λόγους μη αποτελεσματική ή εύκολα υποκλέψιμη και σκοπίμως δύναται να παρεμβληθεί. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της είναι το μειωμένο κόστος σε σχέση με την χρήση των υφιστάμενων δορυφορικών συστημάτων. Με ένα ενδεικτικό κόστος χρήσης υπηρεσίας μετάδοσης δεδομένων ταχύτητας 128kbps (1/35 της απαίτησης των 4.5Mbps που υπολογίσθηκε στην

παρούσα εργασία) να στοιχίζει 15\$/km, μια αποστολή όπου το αερόχημα θα διανύσει 1500χμ, περίπου το δρομολόγιο έρευνας του ανατολικού Αιγαίου μετ' επιστροφής έχει κόστος 22.500\$ μόνο για την μετάδοση αυτής της εξαιρετικά χαμηλής ταχύτητας δεδομένων. Είναι έτσι εύκολα αντιληπτό ότι μόνο και μόνο το κόστος επικοινωνίας μεταξύ του αεροχήματος και του απομακρυσμένου χειριστή του μπορεί να καταστήσει απαγορευτική την σχεδίαση ενός συστήματος λόγω μη διαθέσιμων οικονομικών πόρων. Αντίθετα η κατασκευή και η εναπόθεση σε τροχιά των μικροδορυφόρων που απαιτούνται για την διασφάλιση της επικοινωνίας θα αποσβέσει το κεφάλαιο που απαιτείται εντός μερικών ετών χρήσης του συστήματος.

9. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με την περάτωση της παρούσας εργασίας και με τα εξαχθέντα αποτελέσματα προτείνονται οι κάτωθι εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα για πληρέστερη μελέτη και υλοποίηση του εγχειρήματος του τηλεχειρισμού ενός μη επανδρωμένου αεροχήματος μέσω μιας συστοιχίας μικροδορυφόρων:

1. Μελέτη της τροχιακής μηχανικής για εξεύρεση των κατάλληλων παραμέτρων τοποθέτησως των μικροδορυφόρων στην βέλτιστη τροχιά για βελτιστοποίηση της απόδοσης του ασύρματου δικτύου επικοινωνίας με το αερόχημα.

2. Μελέτη των απαιτήσεων για την δημιουργία σμήνους για την απρόσκοπτη επικοινωνία χωρίς να υφίστανται νεκρά σημεία και κενά επικοινωνίας με τον απομακρυσμένο χειριστή του αεροχήματος.

3. Μελέτη του δικτύου μετάδοσης επικοινωνίας από τον μικροδορυφόρο που έχει ανά πάσα στιγμή επαφή με το μη επανδρωμένο αερόχημα στον απομακρυσμένο χειριστή μέσω αναμετάδοσης διαμέσου των υπολοίπων μικροδορυφόρων του σχηματισμού.

4. Υλοποίηση κατασκευής και εκτόξευση ενός δοκιμαστικού μικροδορυφόρου για έλεγχο επί του πεδίου (field trial) για επαλήθευση και περαιτέρω μελέτη των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία

- Κυριάκος Γκούσκος Κατσαρός (2019). Σχεδίαση και κατασκευή νανοδορυφόρου για θαλάσσιες και αμυντικές εφαρμογές στο Αιγαίο. ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ». Πανεπιστήμιο Αιγαίου & Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2019
- S. Gao *et al.*, "Antennas for Modern Small Satellites," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, no. 4, pp. 40-56, Aug. 2009
- Ajeey Lele and Tushar Shrivastav (2016). Rocket Launchers for Small Satellites. Institute for Defence Studies and Analyses (IDSA), 2016
- J. Alvarez and B. Walls, "Constellations, clusters, and communication technology: Expanding small satellite access to space," *2016 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, 2016, pp. 1-11
- A. H. Wahyud, J. T. Sri Sumantyo, A. S. Budiayanta and A. Munir, "3D Printed Wideband Circularly Polarized Pyramidal Horn Antenna," *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*, Toyama, 2018, pp. 868-871
- Q. Luo, L. Zhang and S. Gao, "Wideband monofilar square spiral antenna at Ka-band frequencies," *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver, BC, 2015, pp. 2077-2078
- Jan A. King, et al. (2012). Nanosat Ka-Band Communications - A Paradigm Shift in Small Satellite Data Throughput. 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2012
- Parya Fathi and Javad Aliasgari. (2018). Design and Fabrication of Compact 2x2 Dual Linear Polarized Wideband and High Gain Array for Ku-Band Satellite Communication Application. *International Journal of Electronics and Communications*, 2018
- G. S. Sethi, A. Srivastava, C. Chiu, V. Chigrinov and R. D. Murch, "Design of a transparent LC based reconfigurable antenna," *2016 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, New Delhi, 2016, pp. 1-4
- J. R. Dickinson, J. L. Alvarez, L. T. McDaniel, J. R. Pruitt, B. J. Walls and K. P. Zajicek, "CYGNSS command and data subsystem and electrical power subsystem phase A and B developments," *2014 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, 2014, pp. 1-10
- S. Chen, S. Yu, S. Wang, C. Chang and M. Shie, "Development of a low cost and high data rate X-band transmitter for micro-satellite applications," *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kuala Lumpur, 2017, pp. 1115-1118
- M. McNicholas, J. Deluna, R. Manno and Y. Shu, "Low cost Ka-band transmitter for CubeSat systems," *2017 Topical Workshop on Internet of Space (TWIOS)*, Phoenix, AZ, 2017, pp. 1-4
- Laura M. Bradbury, et al. (2018). NorSat-2: Enabling advanced maritime communication with VDES. *Acta Astronautica*
- In Keun Son and Shiwen Mao. (2016). A Survey of Free Space Optical Networks. *Digital Communications and Networks*
- C. Petit et al., "Adaptive optics results with SOTA," *2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*, New Orleans, LA, 2015, pp. 1-7
- K. Fukuda, T. Hashimoto, T. Kuwahara, H. Kunimori and K. Yoshida, "Development of small optical transmitter for microsattelites," *2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Tokyo, 2014, pp. 370-375

- J. Alvarez and B. Walls, "Constellations, clusters, and communication technology: Expanding small satellite access to space," 2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2016, pp. 1-11
- M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourthquarter 2014
- Wittig, Manfred. (2010). A highly innovative global broadband mobile communication system concept. *Acta Astronautica*. 66. p1113-1124, 2010
- Akyildiz, Ian & Jornet, Josep & Nie, Shuai. (2018). A New CubeSat Design with Reconfigurable Multi-Band Radios for Dynamic Spectrum Satellite Communication Networks. *Ad Hoc Networks*, 2018
- King, Jan & Ness, John & Bonin, Grant & Brett, Michael & Faber, Daniel. (2012). *Nanosat Ka-Band Communications – A Paradigm Shift in Small Satellite Data Throughput*, 2012
- N. Saeed, A. Elzanaty, H. Almorad, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri and M. Alouini, "CubeSat Communications: Recent Advances and Future Challenges," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020
- B. Epple and H. Henniger, "Discussion on design aspects for free-space optical communication terminals," in IEEE Communications Magazine, vol. 45, no. 10, pp. 62-69, October 2007
- J. C. Juarez, A. Dwivedi, A. R. Hammons, S. D. Jones, V. Weerackody and R. A. Nichols, "Free-Space Optical Communications for Next-generation Military Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 44, no. 11, pp. 46-51, November 2006
- Guerra, André & Ferreira, António & Costa, Maria & Nodar-López, Diego & Agelet, Fernando. (2017). Integrating Small Satellite Communication in an Autonomous Vehicle Network: A Case on Oceanography. *Acta Astronautica*, 2017
- M. McNicholas, J. Deluna, R. Manno and Y. Shu, "Low cost Ka-band transmitter for CubeSat systems," 2017 Topical Workshop on Internet of Space (TWIOS), Phoenix, AZ, 2017, pp. 1-4
- Grekhov, Andrii. (2019). *Recent Advances in Satellite Aeronautical Communications Modeling*. USA, IGI Global 2019
- H. Skinnemoen, "UAV & satellite communications live mission-critical visual data," 2014 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology, Yogyakarta, 2014, pp. 12-19
- K. Maeda and S. Nakasuka, "Results of development and operation of Hodoyoshi type microsattellites for remote sensing," 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, 2015, pp. 4196-4199
- T. Andre et al., "Application-driven design of aerial communication networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 5, pp. 129-137, May 2014
- International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector, Report M.2171 (12/2009)
- Jawhar, Imad & Mohamed, Nader & Al-Jaroodi, Jameela & Agrawal, Dharma & Zhang, Sheng. (2017). *Communication and Networking of UAV-Based Systems: Classification and Associated Architectures*. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018
- Fahlstrom, Paul & Gleason, Thomas. (2012). *Introduction to UAV Systems: Fourth Edition*. Introduction to UAV Systems: Fourth Edition. UK, Wiley, 2012

Arjomandi, Maziar. "Classification of Unmanned Aerial Vehicles." Course material for Mechanical Engineering 3016, University of Adelaide, Australia, 2007

Zeng, Yong & Zhang, Rui & Lim, Teng. (2016). Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 54, 2016

Vinod Joseph and Brett Chapman. (2009). Deploying QoS for Cisco IP and Next Generation Networks. USA: Elsevier

Baldi, M., Chiaraluce, F., Angelis, A.d. *et al.* A comparison between APSK and QAM in wireless tactical scenarios for land mobile systems. *J Wireless Com Network* **2012**, 317 (2012)

Austin, Reg. (2010). Introduction to Unmanned Aircraft Systems (UAS). UK, Wiley 2010

Anil K.Maini (2018). Handbook of Defence Electronics and Optronics - Fundamentals, Technologies and Systems. USA, John Wiley & Sons Ltd

Craig A. Kluever (2018). Space flight Dynamics. USA, John Wiley & Sons Ltd