



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ
ΓΩΝΙΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ
ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ (HIGH ALTITUDE PLATFORMS)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΔΩΔΕΚΑΤΟΣ

ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Σ. ΕΥΣΤΑΘΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων: Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ
ΓΩΝΙΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ
ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ (HIGH ALTITUDE PLATFORMS)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ.ΔΩΔΕΚΑΤΟΣ

ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Σ.ΕΥΣΤΑΘΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων: Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Ιουλίου 2008.

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008

.....
ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ.ΔΩΔΕΚΑΤΟΣ

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

.....
ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Σ.ΕΥΣΤΑΘΙΑΔΗΣ

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

Copyright © Νικόλαος Γ.Δωδεκάτος, 2008

Copyright © Ευστάθιος Σ.Ευσταθιάδης, 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος – All rights reserved

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

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

Περίληψη

Η αυξανόμενη ζήτηση για σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες έχει οδηγήσει στην επιτυχημένη αλλά και ραγδαία ανάπτυξη των επιγείων αλλά και των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών. Τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί μια νέα τεχνολογία η οποία βασίζεται σε στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (HAPS, High Altitude Platform Stations) οι οποίες έχουν την μορφή αεροσκαφών, αερόπλοιων ή μη-επανδρωμένων ηλιακά τροφοδοτούμενα αεροσκαφών, τα οποία λειτουργούν σε σχεδόν στατική θέση σε υψόμετρα μεταξύ 15 και 30 km από την επιφάνεια της Γης.

Τα συστήματα που βασίζονται στις στρατοσφαιρικές πλατφόρμες (HAPS, High Altitude Platform Stations) έχουν την δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας, αλλά μπορούν επίσης να λειτουργήσουν συμπληρωματικά στα επίγεια και στα δορυφορικά συστήματα. Εξαιτίας της μοναδικής τους θέσης από την οποία παρέχουν υπηρεσίες υπερτερούν έναντι των υπαρχόντων συστημάτων.

Λέξεις κλειδιά

Παρεμβολές, δορυφορικά συστήματα, στρατοσφαιρικές τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες, προσομοίωση, ζώνη αστικής κάλυψης

Abstract

The increasing demand for fixed broadband services has led to the successful but also to the rapid deployment of both terrestrial and satellite communication systems. In recent years a new technology has been proposed, based on High Altitude Platform Stations (HAPS), which can be aircraft, airship, or unmanned solar-powered aircraft operating in quasi-stationary position at heights between 15 and 30 Km from the surface of the Earth.

Systems based on High Altitude Platform Systems can operate as standalone or complementary to terrestrial and satellite systems. Due to the unique position of High Altitude Platform Stations (HAPS), they outperform the current existing technologies.

Keywords

Interference, fixed satellite service (FSS), high altitude platform stations (HAPS), simulation, urban area coverage

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή κ. Φ. Κωνσταντίνου για την ευκαιρία που μας έδωσε να μελετήσουμε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Ευχαριστούμε επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα Ν. Παπανικολάου για την πολύτιμη βοήθεια και το χρόνο του.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Δορυφορικές επικοινωνίες	
1.1 Εισαγωγή και ιστορική αναδρομή	17
1.2 Υπηρεσίες – εφαρμογές	18
1.3 Δομή δορυφορικού συστήματος	19
1.3.1 Διαστημικό τμήμα	20
1.3.2 Επίγειο τμήμα	22
1.4 Χαρακτηριστικά κεραίας	25
1.5 Τροχιά δορυφόρου	26
1.6 Γεωστατικός δορυφόρος	28
1.7 Ανάλυση ραδιοζεύξεων.....	29
1.8 Link budget – σχεδίαση ζεύξης	31
1.9 Βιβλιογραφία κεφαλαίου 1	34

Κεφάλαιο 2

Θόρυβος και παρεμβολές στα δορυφορικά συστήματα	
2.1 Θόρυβος τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.....	33
2.2 Σηματοθορυβικός λόγος.....	37
2.3 Επίδραση του μέσου μετάδοσης.....	39
2.4 Ανάλυση παρεμβολών.....	42
2.5 Είδη παρεμβολών.....	43
2.5.1 Παρεμβολές από γειτονικά δορυφορικά συστήματα.....	43
2.5.2 Παρεμβολές από επίγεια μικροκυματική ζεύξη.....	43
2.5.3 Παρεμβολές από διασταύρωση πόλωσης σε συστήματα με αναχρησιμοποίηση συχνότητας	44
2.5.4 Παρεμβολές ενδοδιαμόρφωσης	44
2.5.5 Παρεμβολή γειτονικού καναλιού	45
2.5.6 Ενδοσυμβολική παρεμβολή.....	45
2.6 Ανάλυση παρεμβολής σε ή από γειτονικά δορυφορικά συστήματα.....	45
2.7 Βιβλιογραφία κεφαλαίου 2	48

Κεφάλαιο 3

Στρατοσφαιρικές Τηλεπικοινωνιακές Πλατφόρμες.....		
3.1	Εισαγωγή.....	49
3.2	Περιγραφή του συστήματος.....	52
3.2.1	Στρατόσφαιρα.....	52
3.2.2	Πλατφόρμες.....	53
3.2.3	Έλεγχος τροχιάς	58
3.2.4	Αρχιτεκτονική.....	59
3.2.5	Ατμοσφαιρικές απώλειες.....	63
3.3	Συχνότητες και λειτουργικά χαρακτηριστικά	66
3.3.1	Ανάθεση συχνοτήτων.....	66
3.3.2	Περιοχές κάλυψης.....	68
3.3.3	Διαμόρφωση και κωδικοποίηση.....	70
3.3.4	Χαρακτηριστικά εναέριας πλατφόρμας.....	71
3.3.5	Χαρακτηριστικά επίγειων σταθμών.....	72
3.3.6	Παράμετροι εκπομπής συστήματος.....	74
3.3.7	Παράδειγμα προϋπολογισμού ζεύξης.....	75
3.4	Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3.....	78

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογές και υπηρεσίες.....		
4.1	Εισαγωγή.....	81
4.1.1	Επικοινωνίες ευρείας ζώνης	81
4.1.2	Κινητές επικοινωνίες.....	83
4.1.3	Τηλεπισκόπηση	84
4.1.4	Παροχή υπηρεσιών σε επείγουσες καταστάσεις	85
4.1.5	Εντοπισμός και πλοήγηση.....	86
4.1.6	Αναμετάδοση δορυφορικών σημάτων	86
4.1.7	Ναυτιλιακά συστήματα επικοινωνιών	87
4.1.8	Στρατιωτική χρήση	88
4.2	Τηλεπικοινωνιακή αγορά.....	89
4.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	96
4.3.1	HAPs και δορυφορικά συστήματα	97
4.3.2	HAPs και επίγεια μικροκυματικά συστήματα	100
4.4	Βιβλιογραφία κεφαλαίου 4	105

Κεφάλαιο 5

Μοντέλα σκίασης	
5.1 Εισαγωγή.....	107
5.2 Στατιστικό μοντέλο ανάπτυξης κτιρίων	107
5.3 Μέθοδος προσομοίωσης	109
5.4 Μοντέλο διάδοσης	110
5.5 Επίλογος	117
5.6 Βιβλιογραφία κεφαλαίου 5	119

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1: Βαθμίδα εισόδου	21
Σχήμα 1.2: Λειτουργικό διάγραμμα δορυφορικού επαναλήπτη	22
Σχήμα 1.3: Λειτουργικό διάγραμμα επίγειου σταθμού	23
Σχήμα 1.4: Θέση της τροχιάς στο χώρο	27
Σχήμα 1.5: Ισχύς στην κεραία λήψης	30
Σχήμα 1.6: Απώλειες στον εξοπλισμό των σταθμών	30
Σχήμα 1.7: Γεωμετρία της ραδιοζεύξης	31
Σχήμα 2.1: Σηματοθορυβικός λόγος στο uplink	39
Σχήμα 2.2: Σηματοθορυβικός λόγος στο downlink	39
Σχήμα 2.3: Γωνιακή απόσταση γειτονικών δορυφόρων	46
Σχήμα 3.1: Η στρατόσφαιρα	52
Σχήμα 3.2: Η ταχύτητα του ανέμου συναρτήσει του ύψους από τη γήινη επιφάνεια	53
Σχήμα 3.3: Πρόσφατη πτήση αερόστατου Zeppelin NT	54
Σχήμα 3.4: Το αερόστατο Zeppelin NT	55
Σχήμα 3.5: Ένα αερόπλοιο της εταιρείας Lindstrand	56
Σχήμα 3.6: Το αεροπλάνο Pathfinder Plus	56
Σχήμα 3.7: Διάφοροι τύποι UAV's	57
Σχήμα 3.8: Το στρατιωτικό UAV Predator	58
Σχήμα 3.9: Το στρατιωτικού τύπου X-47B UCAS, το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρία Northrop Grumman στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ	58
Σχήμα 3.10: Σενάριο επικοινωνίας μέσω HAP	60
Σχήμα 3.11: Η μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ένα HAP σε ύψος 17 km	62
Σχήμα 3.12: Ατμοσφαιρική απόσβεση για συχνότητες 28 GHz και 48 GHz	63
Σχήμα 3.13: Διαφορική λήψη χώρου	64
Σχήμα 3.14: Σκέδαση λόγω βροχής	66
Σχήμα 3.15: Επιφάνεια κάλυψης ενός HAP	69
Σχήμα 3.16: Σύγκριση ανάμεσα στο διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας εναέριου σταθμού HAP (Recommendation ITU-R S.672) και θεωρητικού διαγράμματος κεραίας κυκλικού ανοίγματος φωτιζόμενης από ανυψωμένη παραβολική συνάρτηση με βάση -10 dB	72
Σχήμα 3.17: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας εκπομπής επίγειου σταθμού HAP (Recommendation ITU-R F.699)	73
Σχήμα 4.1: Υψηλής ταχύτητας ασύρματη επικοινωνία και πρόσβαση στο internet μέσω ενός HAP	81
Σχήμα 4.2: Χρήση ενός HAP και ενός δορυφόρου για εντοπισμό και πλοήγηση	85
Σχήμα 4.3: Σύστημα αναμετάδοσης ναυτιλιακών επικοινωνιών με τη βοήθεια σταθμών HAAP (High Altitude Aeronautical Platforms)	86

Σχήμα 4.4: Παροχή επικοινωνίας από ένα HAP σε πεδίο μάχης.....	87
Σχήμα 4.5: Η πλατφόρμα Sky Station.....	88
Σχήμα 4.6: Η πλατφόρμα StratSat.....	89
Σχήμα 4.7: Η ιαπωνική στρατοσφαιρική πλατφόρμα.....	90
Σχήμα 4.8: Η πλατφόρμα ARC.....	91
Σχήμα 4.9: Το αεροσκάφος HALO – Proteus.....	92
Σχήμα 4.10: Το αεροσκάφος SkyTower.....	93
Σχήμα 4.11: Το αεροσκάφος Heliplat.....	94
Σχήμα 4.12: Το επικοινωνιακό σύστημα της General Atomics.....	95
Σχήμα 4.13: Απόσταση που διανύει το σήμα μέσα στη βροχή σε ένα στρατο- σφαιρικό και ένα επίγειο σύστημα	101
Σχήμα 4.14: Ισχύς λήψης από το τερματικό του σχήματος 4.13	102
Σχήμα 4.15: Μεταβολή στην ισχύ λήψης που οφείλεται στην οριζόντια απόκλιση του HAP από την προκαθορισμένη θέση λειτουργίας του	103
Σχήμα 5.1: Βασική γεωμετρία για LOS και NLOS περιπτώσεις	108
Σχήμα 5.2: Πιθανότητα οπτικής επαφής στις οδούς σε σχέση με τη γωνία ανύψωσης για διάφορες περιοχές	110
Σχήμα 5.3: Κανονικοποιημένο ιστόγραμμα και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας απωλειών σκίασης για 2.0 GHz για κατακόρυφη πόλωση σε μια πυκνή αστική περιοχή	111
Σχήμα 5.4: Αθροιστική συνάρτηση κατανομής για απώλειες σκίασης και για κατακόρυφη πόλωση για διάφορες γωνίες ανύψωσης (συνεχής γραμμή -αποτελέσματα εξομοίωσης, γραμμοσκιασμένη γραμμή – αθροιστική συνάρτηση κατανομής)	111
Σχήμα 5.5: Παράμετροι κανονικής κατανομής για απώλειες σκίασης για διάφορες γωνίες ανύψωσης για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση	112
Σχήμα 5.6: Παράμετροι κανονικής κατανομής για απώλειες σκίασης για διάφορες γωνίες ανύψωσης στους 2.0, 3.5 και 5.5 GHz	112
Σχήμα 5.7: CDF για μοντέλο σκίασης σε πυκνοκατοικημένη περιοχή, $f=3.5$ GHz	116
Σχήμα 5.8: Απώλειες για $f=2.0$ GHz	117
Σχήμα 5.9: Απώλειες για $f=5.5$ GHz	117

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 3.1: Ζώνες κάλυψης.....	70
Πίνακας 3.2: Παράμετροι εκπομπής πλατφόρμας.....	72
Πίνακας 3.3: Παράμετροι εκπομπής επίγειων σταθμών.....	73
Πίνακας 3.4: Ζεύξεις τερματικών.....	76
Πίνακας 3.5: Ζεύξεις πυλών (gateways).....	77
Πίνακας 5.1: Παράμετροι του ITU-R P.1410 για διάφορες περιοχές	107
Πίνακας 5.2: Παράμετροι για υπολογισμό της πιθανότητας οπτικής επαφής	110
Πίνακας 5.3: Παράμετροι κανονικής κατανομής για διάφορες περιοχές ($f=2$ GHz, $\theta=70^\circ$)	113
Πίνακας 5.4: Παράμετροι για εξίσωση 4, $f=2.0$ GHz, όλες οι περιοχές	113
Πίνακας 5.5: Παράμετροι για εξίσωση 4, $f=3.5$ GHz, όλες οι περιοχές	113
Πίνακας 5.6: Παράμετροι για εξίσωση 4, $f=5.5$ GHz, όλες οι περιοχές	114
Πίνακας 5.7: Παράμετροι για εξίσωση 4, $f=4.0$ GHz, όλες οι περιοχές	115

Δορυφορικές επικοινωνίες

1.1 Εισαγωγή και ιστορική αναδρομή

Αδιαμφισβήτητα οι δορυφορικές τηλεπικοινωνίες παίζουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε ότι αφορά τον τομέα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. καθώς η τεχνολογία των δορυφορικών συστημάτων συνεχώς προοδεύει, οι δορυφορικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο. Εξυπηρετούν απαιτήσεις νέων εφαρμογών, διατηρώντας τη μοναδική ιδιότητα κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών, που τις ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα επικοινωνιακά συστήματα. Ο αντικειμενικός στόχος τους είναι η επίτευξη μεγαλύτερης εμβέλειας και χωρητικότητας, με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Ενώ μελέτες για διαστημικές πτήσεις είχαν ήδη δημοσιευτεί και είχαν γίνει προσπάθειες απογείωσης ρουκετών νωρίτερα, καταλυτική επίδραση στην ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών είχε ο Β΄ Παγκόσμιος Πόλεμος. Κατά τη διάρκειά του αναπτύχθηκαν οι απαραίτητες τεχνολογίες πυραύλων και μικροκυμάτων, που αποτέλεσαν το θεμέλιο των δορυφορικών επικοινωνιών. Εκτοξεύονται οι πρώτοι δορυφόροι που λύνουν το πρόβλημα επικοινωνίας επίγειων σταθμών χωρίς οπτική επαφή (SCOPE 1958, Courier 1960, Telstar 1962, Syncom 1963). Το 1965 εκτοξεύονται ο πρώτος εμπορικός γεωστατικός δορυφόρος INTELSAT και ο πρώτος επικοινωνιακός δορυφόρος MOLNYA. Στα αρχικά στάδια οι δορυφόροι χαρακτηρίζονται από μικρές ικανότητες και μεγάλο κόστος. Η ελάττωση κόστους επιτυγχάνεται στην πορεία με:

- την κατασκευή πιο αξιόπιστων πυραύλων εκτόξευσης
- την κατασκευή κεραιών πολλαπλής δέσμης με ελεγχόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας που προσαρμόζεται στην περιοχή κάλυψης και βελτιώνει έτσι την απόδοση της ζεύξης ενώ μειώνει τις παρεμβολές
- την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας αρχικά με την ορθογωνική πόλωση και μετά με τη χωρική απομόνωση και την κατασκευή ενισχυτών με μεγαλύτερη ισχύ

Η ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών δεν περιορίζεται στην απλή αντικατάσταση των ήδη υπαρχόντων τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων. Η αρχιτεκτονική του δικτύου είναι πολύ σημαντική, γιατί πέρα από τη μετάδοση και λήψη μεταξύ ανεξάρτητων σταθμών, επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ επίγειων σταθμών. Όταν οι αποστάσεις μεταξύ σταθμών - ειδικά κέντρων μεταγωγής - είναι της τάξης των εκατοντάδων χιλιομέτρων ή όταν επικρατούν δύσκολες καιρικές συνθήκες περιβάλλοντος, οι δορυφορικές ζεύξεις αποδεικνύονται οικονομικά συμφέρουσες και αντικαθιστούν τη μετάδοση με ομοαξονικά καλώδια και οπτικές ίνες.

1.2 Υπηρεσίες - εφαρμογές

Οι ιδιότητες των δορυφορικών επικοινωνιών που τους παρέχουν σοβαρό πλεονέκτημα έναντι των επίγειων συστημάτων είναι:

- η δυνατότητα εκπομπών προς το ευρύ κοινό
- το μεγάλο εύρος ζώνης
- γρήγορη εγκατάσταση και ευκολία αναδιάταξης

Οι ιδιότητες αυτές, σε συνδυασμό με την ελάττωση του μεγέθους των επίγειων σταθμών, την αύξηση του αριθμού αλλά και της γεωγραφικής διασποράς τους, ευνόησαν την παροχή των υπηρεσιών που καταγράφονται πιο κάτω.

- Μαζικές τηλεφωνικές συνδέσεις και ανταλλαγή τηλεοπτικών προγραμμάτων.
- Συστήματα πολλαπλών υπηρεσιών. Ομάδες χρηστών τηλεφωνίας και δεδομένων μοιράζονται έναν επίγειο σταθμό.
- Τερματικά συστήματα πολύ μικρής επιφάνειας VSAT (Very Small Aperture Terminal Systems). Με τη διασύνδεση VSATs μπορούν να παρακαμφθούν ολόκληρα

δημόσια δίκτυα. Η εφαρμογή ενός δικτύου VSAT είναι οικονομικά συμφέρουσα και προσφέρει ακόμα ταχύτερη πρόσβαση στο δίκτυο.

➤ Τηλεπικοινωνίες με κινητούς σταθμούς και προσωπικές τηλεπικοινωνίες. Υπάρχουν περιοχές που δεν καλύπτονται από τα επίγεια συστήματα κυψελωτής τηλεφωνίας και εκεί οι δορυφορικές επικοινωνίες μπορούν να συμπληρώσουν το κενό. Τώρα χρησιμοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών φωνής και δεδομένων σε αεροπλάνα, πλοία και οχήματα.

Μερικές σχετικές εφαρμογές είναι:

- ανίχνευση στόλων πλοίων
- παγκόσμια υπηρεσία τηλεϊδοποίησης
- ζωντανά τηλεοπτικά προγράμματα σε πλοία με τη βοήθεια προχωρημένων τεχνικών συμπίεσης εικόνας.

➤ Υπηρεσίες πολυμέσων. Ενσωματώνουν διαφορετικά μέσα όπως κείμενο, δεδομένα, ήχο, γραφικά, εικόνες και video σε κοινή ψηφιακή μορφή ώστε να υπάρχει η δυνατότητα για on-line υπηρεσίες όπως τηλε-εργασία, τηλε-εκπαίδευση, τηλε-ιατρική κ.α.

Υπάρχουν σαφώς και περιορισμοί στην εφαρμογή των δορυφορικών επικοινωνιών, που είναι οι εξής:

- υψηλό κόστος εισαγωγής συστήματος
- εξάρτηση της παροχής υπηρεσίας από τη διάρκεια ζωής του δορυφόρου και ανάγκη αντικατάστασης της ζεύξης
- καθυστέρηση μετάδοσης σήματος λόγω μεγάλης διαδρομής, στην περίπτωση γεωστατικών δορυφόρων

1.3 Δομή δορυφορικού συστήματος

Το δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από το διαστημικό τμήμα και το επίγειο τμήμα.

1.3.1 Διαστημικό τμήμα

Το διαστημικό τμήμα περιλαμβάνει το δορυφόρο και τα επίγεια συστήματα που είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο και την παρακολούθηση του δορυφόρου, δηλαδή τους σταθμούς παρακολούθησης, τηλεμετρίας και ελέγχου καθώς και το κέντρο ελέγχου όπου γίνεται η συντήρηση και ο έλεγχος των ζωτικών λειτουργιών του δορυφόρου.

Ο δορυφόρος δέχεται το σήμα που εκπέμπουν οι διάφοροι σταθμοί, το οποίο μεταδίδεται στην ατμόσφαιρα και υφίσταται αποσβέσεις και παρεμβολές. Η ύπαρξη πολλών φερόντων σημάτων που λαμβάνει ο δορυφόρος, υπονοεί τη χρήση τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης.

Στα αναλογικά συστήματα, ο δορυφορικός αναμεταδότης ενισχύει το σήμα που λαμβάνει καθώς και το θόρυβο και στη συνέχεια επανεκπέμπει το συνδυασμό τους σε διαφορετική συχνότητα.

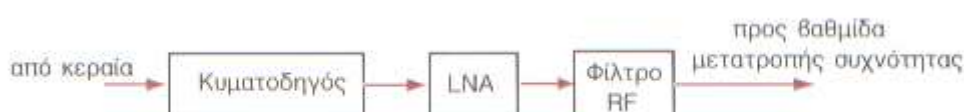
Στα ψηφιακά συστήματα, το σήμα που λαμβάνει ο δορυφορικός αναμεταδότης αποδιαμορφώνεται, αποκωδικοποιείται και αφού απαλλαχθεί από το θόρυβο και τις παρεμβολές, διαμορφώνεται και επανεκπέμπεται προς το σταθμό λήψης. Η ενίσχυση του σήματος επιβάλλεται λόγω των αποσβέσεων και παρεμβολών που έχει υποστεί το σήμα κατά τη μετάδοση και η μετατροπή συχνότητας αποσκοπεί στην αποφυγή παρεμβολής μεταξύ των προς τα άνω και προς τα κάτω σημάτων.

Ο δορυφόρος αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

- το σύστημα δέκτη / κάτω μετατροπέα συχνότητας
- τον πολυπλέκτη εισόδου
- τις βαθμίδες ενίσχυσης
- τον πολυπλέκτη εξόδου

Η κεραία λήψης τροφοδοτεί με το σήμα που λαμβάνει τις βαθμίδες φίλτρου ραδιοσυχνότητας και ενίσχυσης χαμηλού θορύβου στο δέκτη. Οι βαθμίδες αυτές

καθορίζουν τη συμμετοχή του εσωτερικού θορύβου ενός δέκτη στη διαμόρφωση της συνολικής στάθμης ισχύος θορύβου. Η συνολική ισχύς θορύβου εξαρτάται και από το εύρος ζώνης θορύβου του φίλτρου RF της βαθμίδας εισόδου. Αυτό εξαρτάται τόσο από το εύρος ζώνης διέλευσης, όσο και από τη συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου. Κακή επιλογή ή σχεδίαση των φίλτρων RF προκαλεί παραμόρφωση των δορυφορικών σημάτων και έχει άσχημες επιπτώσεις στην αξιοπιστία του συστήματος. Το φιλτράρισμα γίνεται με στόχο την ικανοποίηση διεθνών προδιαγραφών που αφορούν τις ραδιοσυχνότητες, την απόρριψη του εκτός ζώνης θορύβου και την καταστολή των παρεμβολών από φασματικά γειτονικούς διαύλους.

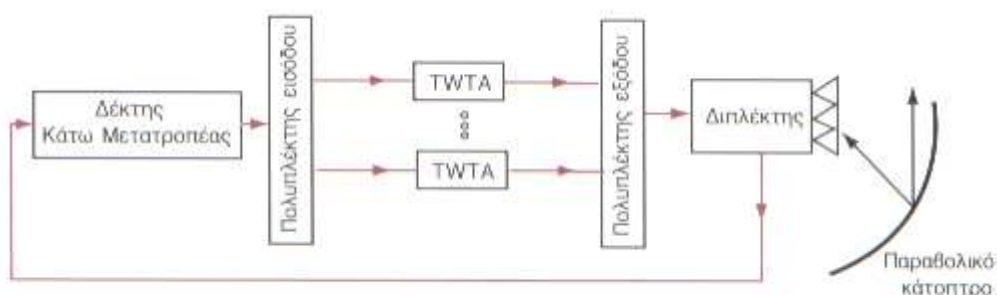


Σχήμα 1.1: Βαθμίδα εισόδου

Κατά τη μετατροπή συχνότητας επιτυγχάνεται η αλλαγή της φέρουσας συχνότητας του σήματος και η φασματική μετάθεση από την περιοχή ραδιοσυχνοτήτων στην περιοχή ενδιάμεσης συχνότητας, που έχει ως κίνητρο την επεξεργασία κάθε καναλιού από τυποποιημένα συστήματα ενδιάμεσης συχνότητας με υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος. Ένα σύστημα μετατροπής συχνότητας πρέπει να χαρακτηρίζεται από ευκινησία συχνότητας που καθορίζει το εύρος συχνοτήτων για τα σήματα εισόδου και εξόδου, ευστάθεια συχνότητας των ταλαντωτών, γραμμικότητα λειτουργίας.

Η ενίσχυση δορυφορικών συστημάτων εκτελείται στις βαθμίδες ενίσχυσης, που αποτελούνται από ενισχυτές ισχύος (HPA) ή ενισχυτές χαμηλού θορύβου (LNA). Σε αρκετές περιπτώσεις οι ενισχυτές συνδυάζονται με προενισχυτές, ζωνοπερατούς περιοριστές και κυκλώματα γραμμικοποίησης. Στην πλευρά εκπομπής χρησιμοποιούνται ενισχυτές ισχύος που προσδίδουν στο σήμα την τελική ισχύ εκπομπής. Στην πλευρά λήψης οι ενισχυτές χαμηλού θορύβου ενισχύουν το πολύ ασθενές σήμα και καθιστούν δυνατή την επεξεργασία του. Οι ενισχυτές εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά, η οποία χειροτερεύει τη συνολική επίδοση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

Ο τύπος ενισχυτή ισχύος που χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών είναι ο ενισχυτής τύπου σωλήνα οδεύοντος κύματος TWTA, που χρησιμοποιεί το μικροκυματικό σήμα για τον έλεγχο της φάσης των κυμάτων σε μία κοιλότητα συντονισμού. Οι ενισχυτές TWTA μπορούν να ενισχύσουν δορυφορικά σήματα που εξυπηρετούν εύρος 500 MHz. Οι ενισχυτές χαμηλού θορύβου που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι οι παραμετρικοί ενισχυτές και οι ενισχυτές τύπου GaAsFET. Χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμοκρασία θορύβου και χαμηλό κόστος, ενώ παρέχουν αξιοπιστία και ευστάθεια.



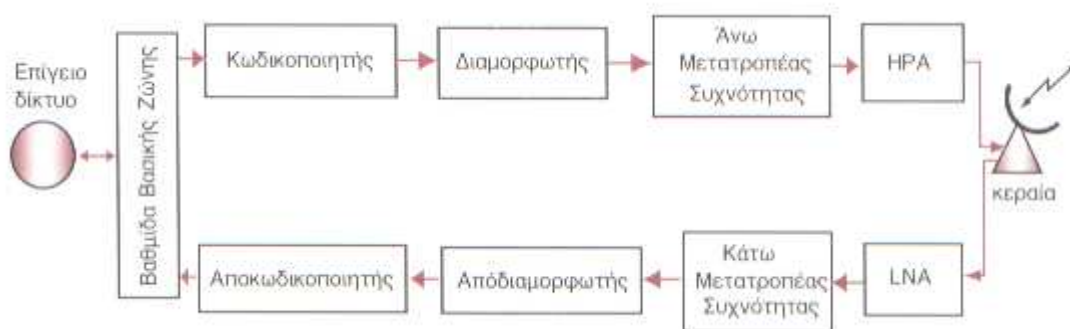
Σχήμα 1.2: Λειτουργικό διάγραμμα δορυφορικού επαναλήπτη

1.3.2 Επίγειο τμήμα

Το επίγειο τμήμα του δορυφορικού συστήματος αποτελείται από όλους τους επίγειους σταθμούς. Οι σταθμοί συνδέονται με τον εξοπλισμό του χρήστη, είτε απευθείας (VSAT), είτε μέσω επίγειου δικτύου.

Οι επίγειοι σταθμοί είναι πομποδέκτες με κοινή κεραία και ο διαχωρισμός μεταξύ εκπομπής και λήψης επιτυγχάνεται μέσω ενός διπλέκτη. Κάθε σταθμός αποτελείται από την κεραία, ένα σύστημα ανίχνευσης και σκόπευσης, ένα σταθμό εκπομπής και ένα σταθμό λήψης. Περιλαμβάνει εξοπλισμό για τη διασύνδεση με το επίγειο δίκτυο και εγκαταστάσεις παρακολούθησης και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με τον όγκο και τύπο πληροφοριών που μεταφέρει η ζεύξη καθορίζεται το μέγεθος των σταθμών.

Στην είσοδο του πομπού καταφθάνουν τα σήματα πληροφορίας από τους χρήστες. Συνδυάζονται με τη μέθοδο της πολυπλεξίας και διαμορφώνονται στην ενδιάμεση συχνότητα του συστήματος. Το σήμα που θα μεταδοθεί αλλάζει συχνότητα, ενισχύεται και εκπέμπεται από την κεραία του σταθμού προς το δορυφορικό αναμεταδότη. Όταν ο σταθμός λάβει σήμα από τον δορυφόρο το οδηγεί στην RF βαθμίδα ενίσχυσης χαμηλού θορύβου. Ακολουθεί μετατροπή συχνότητας στην ενδιάμεση συχνότητα, έπειτα αποδιαμορφώνεται, αναδημιουργείται και μεταδίδεται στους χρήστες.



Σχήμα 1.3: Λειτουργικό διάγραμμα επίγειου σταθμού

Στον επίγειο σταθμό υπάρχει σύστημα ανίχνευσης που διατηρεί την κεραία του σκοπευμένη προς τη διεύθυνση του δορυφόρου, παρά την κίνηση του συστήματος. Ο προσανατολισμός του άξονα της κεραίας που σκοπεύει προς ένα δορυφόρο ορίζεται από δύο γωνίες, το αζιμούθιο και τη γωνία ανύψωσης. Οι γωνίες αυτές καθορίζονται ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους λ και του σχετικού δορυφορικού μήκους L του σταθμού.

Η γωνία αζιμουθίου είναι η γωνία που πρέπει να στραφεί ωρολογιακά η κεραία από το βορρά μέχρι το επίπεδο διεύθυνσης του δορυφόρου. Το επίπεδο αυτό περνάει από το κέντρο της γης, το σταθμό και το δορυφόρο. Μπορεί να υπολογισθεί από τις σχέσεις

$\xi = 180^\circ + \alpha$, όταν ο δορυφόρος είναι δυτικά του επίγειου σταθμού και αναφέρεται στο βόρειο ημισφαίριο

$\xi = 180^\circ - \alpha$, όταν ο δορυφόρος είναι ανατολικά του επίγειου σταθμού και αναφέρεται στο βόρειο ημισφαίριο

$\xi = 360^\circ - \alpha$, όταν ο δορυφόρος είναι δυτικά του επίγειου σταθμού και αναφέρεται στο νότιο ημισφαίριο

$\xi = \alpha$, όταν ο δορυφόρος είναι ανατολικά του επίγειου σταθμού και αναφέρεται στο νότιο ημισφαίριο
όπου

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan L}{\sin l}\right) \quad (1.1)$$

Η γωνία ανύψωσης είναι η γωνία κατά την οποία πρέπει να στραφεί η κεραία στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει το δορυφόρο, από την οριζόντιο στη διεύθυνση του δορυφόρου. Υπολογίζεται ως εξής

$$E = \arctan\left(\frac{\cos l \cos L - \frac{Re}{Re+Ro}}{\sqrt{1 - (\cos l \cos L)^2}}\right) \quad (1.2)$$

όπου Re η ακτίνα της γης και Ro το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου.

Η μεγάλη γωνία ανύψωσης είναι απαραίτητη σε εφαρμογές συστημάτων επικοινωνίας με κινητούς σταθμούς, γιατί ελαχιστοποιεί την παρεμπόδιση του ραδιοκύματος λόγω απόκρυψης του δορυφόρου από κτίρια και εμπόδια γενικότερα. Επίσης μειώνονται τα φαινόμενα πολλαπλής διαδρομής σήματος, που οφείλονται σε διαδοχικές ανακλάσεις σε εμπόδια. Διευκολύνεται η παρακολούθηση του δορυφόρου και συνεπώς μειώνεται η πολυπλοκότητα και το κόστος του σταθμού. Ακόμα, ελαχιστοποιείται ο θόρυβος που λαμβάνει η κεραία του επίγειου σταθμού από το έδαφος ή από άλλα επίγεια συστήματα.

Οι βασικές μέθοδοι ελέγχου σκόπευσης της κεραίας του επίγειου σταθμού είναι:

- Χειρονακτική σκόπευση – χρησιμοποιείται σε κεραίες μικρών διαστάσεων με μεγάλο εύρος δέσμης κύριου λοβού και χαμηλές απαιτήσεις ακρίβειας
- Προγραμματιζόμενη σκόπευση – αξιοποιεί την πληροφορία για τη θέση του δορυφόρου και του επίγειου σταθμού

- Αυτόματη σκόπευση – βασίζεται στη συνεχή σύγκριση πλατών ή φάσεων των σημάτων που φτάνουν στο σταθμό από το δορυφόρο

1.4 Χαρακτηριστικά κεραίας

Οι κεραίες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα παραβολικά κάτοπτρα που έχουν συμμετρικό διάγραμμα ακτινοβολίας με υψηλή κατευθυντικότητα και μικρούς πλευρικούς λοβούς.

Απολαβή μιας κεραίας είναι ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολείται ή λαμβάνεται ανά μονάδα στερεάς γωνίας από την κεραία σε μία διεύθυνση, προς την ισχύ που εκπέμπεται ή λαμβάνεται από ιστροπική κεραία με την ίδια ισχύ τροφοδοσίας. Για παραβολικού τύπου κεραία, η απολαβή στη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας είναι

$$G_{max} = n \left(\pi \frac{D}{\lambda} \right)^2 = n \left(\pi \frac{Df}{c} \right)^2 \quad (1.3)$$

όπου D η διάμετρος του ανακλαστήρα, n η απόδοση της κεραίας και λ το μήκος κύματος του σήματος.

Η απόδοση n είναι γινόμενο συντελεστών οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη το νόμο πρόσπτωσης ακτινοβολίας στην κεραία, απώλειες από διάχυση, απώλειες από ατέλειες της επιφάνειας, απώλειες από αντιστάσεις κ.α.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας δείχνει τη μεταβολή του κέρδους σε συνάρτηση με τη διεύθυνση. Ο κύριος λοβός περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας και οι πλευρικοί λοβοί πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα για την αποφυγή παρεμβολών και την αποδοτικότερη αξιοποίηση του ραδιοφάσματος.

Για κεραίες διαμέτρου μεγαλύτερης από 100 μήκη κύματος, για το μέγιστο κέρδος πλευρικών λοβών έχει καθοριστεί το ανώτατο όριο

$$G(\theta) = 29 - 25 \cdot \log(\theta) \quad [\text{dB}] \quad (1.4)$$

όπου θ είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του πλευρικού λοβού και του κύριου άξονα της κεραίας, ενώ για κεραίες διαμέτρου μικρότερης των 100λ, το ανώτατο όριο κέρδους που έχει καθοριστεί για τους πλευρικούς λοβούς είναι

$$G(\theta) = 52 - 10 \log\left(\frac{D}{\lambda}\right) - 25 \log(\theta) \quad (1.5)$$

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος κεραίας είναι η ενεργός ιστροπικά εκπεμπόμενη ισχύς EIRP (Effective Isotropic Radiated Power), η οποία είναι το γινόμενο της διαθέσιμης ισχύος του φέροντος που εξετάζεται στην είσοδο της κεραίας επί την απολαβή της κεραίας στη διεύθυνση του δορυφόρου.

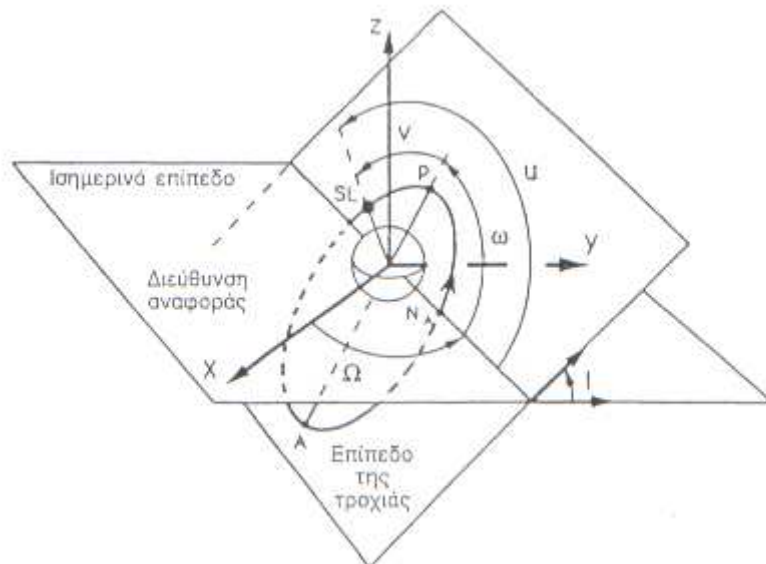
Ο δείκτης ποιότητας του σταθμού G/T ορίζεται στην είσοδο του δέκτη, για μια ελάχιστη ανύψωση και συνθήκες καθαρού ουρανού, ως ο λόγος της σύνθετης απολαβής λήψης G προς τη θερμοκρασία θορύβου T του επίγειου σταθμού. Η σύνθετη απολαβή λήψης καθορίζεται από την πραγματική απολαβή λήψης της κεραίας λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες που υφίσταται το σήμα στη γραμμή μεταφοράς μεταξύ κεραίας και δέκτη $G = G_R/L$. Η θερμοκρασία θορύβου του συστήματος T είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας T_A , των απωλειών γραμμής μεταφοράς μεταξύ κεραίας και δέκτη, θερμοκρασίας θορύβου δέκτη κ.α.

1.5 Τροχιά δορυφόρου

Η τροχιά του δορυφόρου είναι καθοριστική για σημαντικές παραμέτρους του συστήματος όπως η επιφάνεια κάλυψης, η κλίση, η χρονική καθυστέρηση και οι παρεμβολές. Ο δορυφόρος κινείται συνήθως σε τροχιά ελλειπτική με τη γη στην εστία της έλλειψης. Η τροχιά του δορυφόρου καθορίζεται μέσω ενός συνόλου παραμέτρων. Η έλλειψη έχει μεγάλο ημιάξονα a και μικρό ημιάξονα b . Η εκκεντρότητα της έλλειψης χαρακτηρίζει τη μορφή της τροχιάς και υπολογίζεται με τη σχέση $e=c/a$ όπου c η απόσταση της γης από το κέντρο της έλλειψης. Υπάρχουν δύο χαρακτηριστικά σημεία στην τροχιά του δορυφόρου:

- το περίγειο – το σημείο ελάχιστης απόστασης από τη γη $r_{\pi} = a-c = a(1-e)$
- το απόγειο – το σημείο μέγιστης απόστασης από τη γη $r_A = a+c = a(1+e)$

Η θέση του επιπέδου της τροχιάς στο χώρο καθορίζεται μέσω κάποιων παραμέτρων:



Σχήμα 1.4: Θέση της τροχιάς στο χώρο

Η κλίση της τροχιάς θ_i ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του επιπέδου της τροχιάς του δορυφόρου και του ισημερινού επιπέδου.

Ο κόμβος ανόδου είναι το σημείο τομής της τροχιάς του δορυφόρου με κατεύθυνση προς το Βορρά με το ισημερινό επίπεδο. Η γωνία ανόδου Ω είναι η γωνία μεταξύ του άξονα x και της ευθείας που ενώνει το κέντρο της γης με τον κόμβο ανόδου.

Η περίοδος της τροχιάς ή διάρκεια περιστροφής του δορυφόρου συνδέεται με το μεγάλο ημιάξονα της ελλειπτικής τροχιάς σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Kepler και είναι

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{a^3}{GM}} \quad (1.6)$$

Η συχνότητα των δορυφορικών μεταδόσεων όταν λαμβάνονται από τον επίγειο σταθμό αυξάνεται καθώς ο δορυφόρος πλησιάζει τη γη και μειώνεται καθώς ο δορυφόρος απομακρύνεται από τη γη. Αυτή η ολίσθηση στη συχνότητα οφείλεται στο φαινόμενο Doppler. Η μετακίνηση του δορυφόρου σε σχέση με τη γη προκαλεί μεταβολή της σχετικής απόστασης γης και δορυφόρου. Η θετική ή αρνητική μεταβολή της απόστασης προκαλεί στο δέκτη μια φαινόμενη αύξηση ή μείωση της συχνότητας της ραδιοζεύξης. Η ολίσθηση αυτή συχνότητας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση των δορυφορικών συστημάτων για την αποφυγή ανακρίβειας στις εκτιμήσεις διαφόρων παραμέτρων της ζεύξης.

1.6 Γεωστατικός δορυφόρος

Ο γεωστατικός δορυφόρος έχει περίοδο περιστροφής ίση με την περιστροφή της γης και ύψος 35.786 km. Η τροχιά του έχει μηδενική εκκεντρότητα και κλίση. Το επίπεδο τροχιάς του δορυφόρου είναι το ισημερινό επίπεδο και η ταχύτητα του ταυτίζεται με αυτή της γης. Ο δορυφόρος φαίνεται από τον επίγειο σταθμό ως ένα σταθερό σημείο στον ουρανό.

Η γεωστατική τροχιά παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Αφού ο δορυφόρος φαίνεται σταθερός από τον επίγειο σταθμό, η παρακολούθησή του γίνεται εύκολη και μειώνονται οι λειτουργικές απαιτήσεις του επίγειου σταθμού. Επίσης τα χαρακτηριστικά μετάδοσης παραμένουν αμετάβλητα. Η κάλυψη από γεωστατικούς δορυφόρους είναι επαρκής για τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές του πλανήτη. Λόγω σταθερής γεωμετρίας οι ζεύξεις μέσω γεωστατικών δορυφόρων παρουσιάζουν ελάχιστη ολίσθηση συχνότητας Doppler και προβλέψιμες παρεμβολές.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η γεωστατική τροχιά είναι η χρονική καθυστέρηση μετάδοσης λόγω μεγάλης απόστασης επίγειου σταθμού και δορυφόρου, η μείωση της ποιότητας της ζεύξης όταν ο ήλιος βρίσκεται στο εύρος του κύριου λοβού ακτινοβολίας του επίγειου σταθμού, η αβεβαιότητα της θέσης των δορυφόρων που οφείλεται στην μικρή εκκεντρότητα της τροχιάς τους και τέλος, η αδυναμία κάλυψης περιοχών με πολύ μεγάλο γεωγραφικό πλάτος.

1.7 Ανάλυση ραδιοζεύξεων

Ραδιοζεύξη αποκαλείται η εκπομπή ραδιοκυμάτων μεταξύ δύο επίγειων σταθμών μέσω ενός δορυφόρου. Η ραδιοζεύξη αποτελείται από δύο μέρη, τη ζεύξη από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο που ονομάζεται uplink και τη ζεύξη από το δορυφόρο προς τον επίγειο σταθμό που ονομάζεται downlink. Κάποια βασικά μεγέθη για την ανάλυση δορυφορικών ζεύξεων είναι η ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς, η πυκνότητα ροής ισχύος και η ισχύς λαμβανόμενου σήματος.

Η ενεργός ιστροπικά εκπεμπόμενη ισχύς είναι το γινόμενο $P_T G_T$ της ισχύος που εκπέμπεται από μια ιστροπική κεραία που τροφοδοτείται από μια πηγή με ισχύ P_T και της τιμής της απολαβής μετάδοσης G_T στη συγκεκριμένη διεύθυνση. Εκφράζεται σε W.

Μια επιφάνεια που βρίσκεται σε απόσταση R από την κεραία εκπομπής, δέχεται πυκνότητα ροής ισχύος,

$$\Phi = \frac{P_T \cdot G_T}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.7)$$

Η ισχύς που λαμβάνεται από μία κεραία λήψης με ενεργό επιφάνεια A_{Reff} που βρίσκεται σε απόσταση R είναι ίση με,

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot A_{\text{Reff}} \quad (1.8)$$

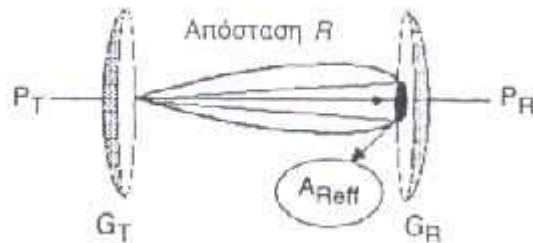
Η ενεργός επιφάνεια μιας κεραίας εκφράζεται σαν συνάρτηση της απολαβής λήψης ως εξής.

$$A_{\text{Reff}} = \frac{G_R}{4 \cdot \pi \cdot \lambda^2} \quad [\text{m}^2] \quad (1.9)$$

Έτσι προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για τη λαμβανόμενη ισχύ

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot R}\right)^2 \quad [\text{W}] \quad (1.10)$$

όπου η ποσότητα $L_{FS} = (4\pi R/\lambda)^2$ ονομάζεται απώλεια ελεύθερου χώρου και αναπαριστά το λόγο της λαμβανόμενης και εκπεμπόμενης ισχύος σε μία ζεύξη με ισοτροπικές κεραίες.

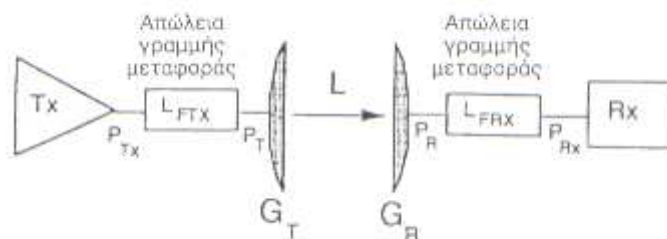


Σχήμα 1.5: Ισχύς στην κεραία λήψης

Η παραπάνω προσέγγιση είναι θεωρητική. Χρειάζεται στην πραγματικότητα να λάβουμε υπόψη επιπρόσθετες απώλειες που οφείλονται σε διάφορες αιτίες.

- Απώλειες που οφείλονται στην εξασθένηση των κυμάτων καθώς μεταδίδονται διαμέσου της ατμόσφαιρας. Η εξασθένηση οφείλεται στην παρουσία αερίων συστατικών στην ατμόσφαιρα, στο νερό – βροχή, νέφη, χιόνι και πάγος – και στην ιονόσφαιρα.

- Απώλειες στον εξοπλισμό εκπομπής και λήψης – απώλειες στη γραμμή μεταφοράς μεταξύ πομπού και κεραίας εκπομπής και μεταξύ κεραίας λήψης και δέκτη.

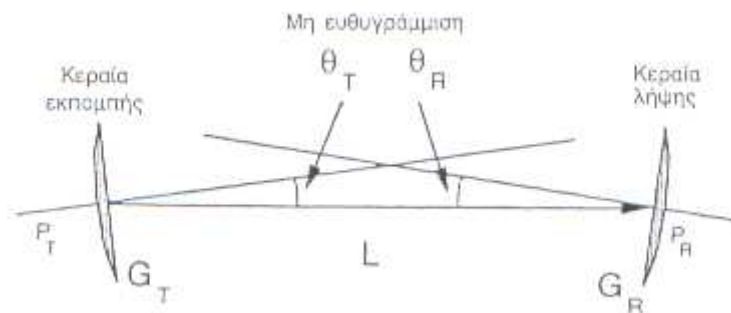


Σχήμα 1.6: Απώλειες στον εξοπλισμό των σταθμών

- Απώλειες που οφείλονται σε κακή σκόπευση της κεραίας – είναι συνέπεια της ατελούς ευθυγράμμισης των κεραιών εκπομπής και λήψης. Παρατηρείται μια πτώση στην απολαβή των κεραιών, η τιμή της οποίας υπολογίζεται ως εξής (αν θ_T, θ_R γωνίες εκπομπής και λήψης αντίστοιχα)

$$L_T = 12 \left(\frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (1.11)$$

$$L_R = 12 \left(\frac{\theta_R}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (1.12)$$



Σχήμα 1.7: Γεωμετρία της ραδιοζεύξης

- Απώλειες λόγω ασυμφωνιών των πολώσεων – παρατηρούνται όταν η κεραία λήψης δεν είναι απολύτως ευθυγραμμισμένη με την πόλωση του λαμβανόμενου κύματος.

1.8 *Link budget – σχεδίαση ζεύξης*

Το Link Budget, δηλαδή ο προϋπολογισμός ζεύξης, είναι η διαδικασία υπολογισμού των σημαντικότερων παραμέτρων και μεγεθών που χαρακτηρίζουν την αξιοπιστία και την ποιότητα της ζεύξης. Είναι ουσιαστικά ο υπολογισμός των κερδών και των απωλειών της ζεύξης, γι' αυτό και δανείζεται την ονομασία του από την οικονομική ορολογία. Παρέχει ένα εύχρηστο και ακριβή τρόπο προσδιορισμού των ελάχιστων, για ικανοποιητική λειτουργία και επίτευξη μιας επιθυμητής τιμής του

σηματοθορυβικού λόγου, τιμών των παραμέτρων του συστήματος για μία ορισμένη τοποθεσία.

Η ανάλυση αυτή καθορίζει τον τρόπο υπολογισμού του σηματοθορυβικού λόγου. Κατ' αρχάς υπολογίζεται η ισχύς του φέροντος σήματος που μας ενδιαφέρει. Υπάρχουν τέσσερις συνιστώσες που υπεισέρχονται στον υπολογισμό:

- Η ενεργός ιστροπικά εκπεμπόμενη ισχύς EIRP.
- Οι απώλειες λόγω διάδοσης του σήματος. Η ισχύς του σήματος μειώνεται καθώς διαδίδεται και απομακρύνεται από τον πομπό. Η απώλεια διάδοσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης που έχει διανύσει το σήμα.

$$L_s = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot D_s^2} \quad (1.13)$$

Η απόσταση D_s μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη μπορεί να υπολογιστεί αν γνωρίζουμε το γεωγραφικό μήκος του δορυφόρου l_s και το γεωγραφικό μήκος l_r και πλάτος ϕ_r του δέκτη. Η διαδικασία υπολογισμού είναι η ακόλουθη.

$$\delta = l_s - l_r \quad (1.14)$$

$$\beta = \arccos(\phi_r \cdot \cos \delta) \quad (1.15)$$

$$D_s = h \cdot \sqrt{1.141999 - 0.41999 \cdot \cos \beta} \quad (1.16)$$

όπου h το ύψος της τροχιάς του δορυφόρου

- Η εξασθένηση λόγω βροχής.
- Η ενεργός επιφάνεια της κεραίας. Το ποσό του σήματος που λαμβάνεται από το δέκτη εξαρτάται από την ενεργό επιφάνεια της κεραίας.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ισχύ του θορύβου. Οι συνιστώσες που καθορίζουν την ισχύ θορύβου είναι:

- Η συνολική θερμοκρασία θορύβου του συστήματος. Στην πλευρά του δέκτη η παραβολική κεραία συλλέγει το επιθυμητό σήμα και το θόρυβο, και τα διοχετεύει σ'

ένα κυματοδηγό. Ενισχύονται στη συνέχεια από τους ενισχυτές χαμηλού θορύβου και τους ενισχυτές ενδιάμεσης συχνότητας, πριν καταλήξουν στον αποδιαμορφωτή. Στη συνολική θερμοκρασία θορύβου συνεισφέρουν ο φυσικός θόρυβος από το περιβάλλον της κεραίας και ο θόρυβος λόγω του ενισχυτή χαμηλού θορύβου και του κυματοδηγού. Το ποσό του θορύβου που συλλέγει η κεραία από το έδαφος εξαρτάται από τους πλευρικούς λοβούς της κεραίας και τη γωνία ανύψωσής της. Όσο μειώνεται η γωνία ανύψωσης, ο θόρυβος εδάφους που συλλέγει η κεραία αυξάνεται. Η ατμόσφαιρα συμβάλλει στον καθορισμό της συνολικής θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος. Το ποσό του θορύβου που εισάγεται λόγω ατμόσφαιρας εξαρτάται από τις απώλειες του κυματοδηγού και την εξασθένηση λόγω βροχής. Όταν βρέχει η ισχύς φέροντος μειώνεται λόγω της εξασθένησης που προκαλεί η βροχή και η ισχύς θορύβου αυξάνεται γιατί η βροχή προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου. Η θερμοκρασία θορύβου λόγω ατμόσφαιρας υπολογίζεται ως εξής.

$$T_{atm} = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \left(\frac{1}{w}\right) T_{rain} \quad (1.17)$$

όπου

α η εξασθένηση βροχής,

w η απώλεια κυματοδηγού και

T_{rain} η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου βροχής

- Η σταθερά του Boltzmann. Η τυχαία επιτάχυνση των ηλεκτρονίων σε όλων των ειδών τα υλικά παράγει ηλεκτρική ισχύ θορύβου. Η σταθερά αυτή συσχετίζει τη θερμοκρασία με τη θερμική ενέργεια της κίνησης των ηλεκτρονίων. Η τιμή της σταθεράς είναι $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$.

- Το εύρος του δέκτη. Το εύρος του δέκτη καθορίζει την ποσότητα θορύβου που περνά από τους ενισχυτές ενδιάμεσης συχνότητας και καταλήγει στον αποδιαμορφωτή.

1.9 Βιβλιογραφία κεφαλαίου 1

- [1] Δορυφορικές Επικοινωνίες, Χ.Καψάλης – Π.Κωττής
- [2] Κεραίες και Ασύρματες Ζεύξεις,Χ.Καψάλης-Π.Κωττής
- [3] Link Budget Analysis, Robert Breeds

Κεφάλαιο 2

Θόρυβος και παρεμβολές στα δορυφορικά συστήματα

2.1 Θόρυβος τηλεπικοινωνιακών συστημάτων

Ο θόρυβος είναι σήμα με μηδενικό πληροφοριακό περιεχόμενο και αποτελείται από όλες τις ανεπιθύμητες συνιστώσες, η ισχύς των οποίων προστίθεται στο επιθυμητό φέρον κύμα που περιέχει την πληροφορία. Έτσι μειώνεται η ικανότητα του δέκτη να αναπαράγει σωστά την πληροφορία που περιέχεται στο λαμβανόμενο επιθυμητό φέρον κύμα. Οι πιθανές πηγές προέλευσης θορύβου είναι:

- Φυσικές πηγές ακτινοβολίας που βρίσκονται εντός της περιοχής της κεραίας λήψης
- Εξαρτήματα του εξοπλισμού λήψης – κυκλώματα του δέκτη

Η ανεπιθύμητη ισχύς θορύβου είναι εκείνη η οποία προκύπτει στο εύρος ζώνης B του επιθυμητού διαμορφωμένου κύματος. Το μοντέλο θορύβου που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το μοντέλο λευκού θορύβου. Η φασματική πυκνότητα ισχύος του λευκού θορύβου που μεταβιβάζεται από μία πηγή θορύβου σε προσαρμοσμένο φορτίο είναι

$$N_0 = k \cdot T_s \quad [\text{W/Hz}] \quad (2.1)$$

όπου k η σταθερά Boltzmann και η ισοδύναμη θερμοκρασία T_s της πηγής θορύβου σε Kelvin.

Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου μιας θορυβώδους πηγής είναι η φυσική θερμοκρασία μιας αντίστασης που παράγει, στο ίδιο εύρος συχνοτήτων, την ίδια διαθέσιμη ισχύ με την πηγή.

Η ισχύς θορύβου που συλλέγει μια κεραία με εύρος ζώνης B περί τη φέρουσα συχνότητα είναι

$$N = k \cdot T_s \cdot B \quad [\text{W}] \quad (2.2)$$

Ο θόρυβος που προκαλείται από τα κυκλώματα του δέκτη χαρακτηρίζεται από το συντελεστή θορύβου και την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου.

Ο συντελεστής θορύβου εκφράζεται ως εξής

$$F = \frac{P}{G \cdot k \cdot T_0 \cdot B} \quad (2.3)$$

όπου P η ισχύς εξόδου του κυκλώματος, G το κέρδος, B το εύρος ζώνης ενδιάμεσων συχνοτήτων και $T_0 = 290 \text{ K}$.

Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου T_R του δέκτη ορίζεται ως η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου πηγής, η οποία αν τοποθετηθεί στην είσοδο ισοδύναμου ιδανικού δέκτη έχει σαν αποτέλεσμα την ίδια ισχύ θορύβου στην έξοδο με αυτή που αντιστοιχεί στον εσωτερικό θόρυβο του δέκτη.

Η συνολική ισχύς θορύβου στην έξοδο της βαθμίδας είναι

$$N_{out} = G \cdot k \cdot B \cdot (T_0 + T_R) \quad (2.4)$$

Η σχέση που συνδέει το συντελεστή θορύβου με την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου είναι

$$F = 1 + \frac{T_R}{T_0} \quad (2.5)$$

Η κεραία του επίγειου σταθμού και του δορυφορικού αναμεταδότη συλλέγει, εκτός από το χρήσιμο σήμα, και θόρυβο από διάφορες ακτινοβολίες και παρεμβολές, όταν αυτός βρίσκεται στο εύρος ζώνης του συστήματος και στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Όταν η κεραία του δέκτη του επίγειου σταθμού είναι προσανατολισμένη προς το δορυφόρο, οι κύριες πηγές ουράνιου θορύβου είναι ο

θόρυβος από τον ουρανό, που προέρχεται από το μη ιονισμένο μέρος της ατμόσφαιρας και ο θόρυβος ο προερχόμενος από την ακτινοβολία της γης που συλλέγεται μέσω των δευτερευόντων λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας. Αν $T(\theta, \phi)$ είναι η θερμοκρασία θορύβου από το περιβάλλον της κεραίας στη διεύθυνση (θ, ϕ) και $G(\theta, \phi)$ το κέρδος της κεραίας, τότε η συνολική θερμοκρασία θορύβου της κεραίας προκύπτει από την ολοκλήρωση όλων των συνεισφορών του εξωτερικού θορύβου.

$$T = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \iint T(\theta, \phi) \cdot G(\theta, \phi) \cdot d\Omega \quad (2.6)$$

Ένας εξασθενητής που προκαλεί εξασθένηση L μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός αντιστάσεων σε θερμοκρασία T . Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του είναι

$$T_E = (L - 1) \cdot T \quad (2.7)$$

Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου μιας αλυσίδας δικτύων εκφράζεται ως εξής.

$$T_E = T_{e1} + \frac{T_{e2}}{G_1} + \frac{T_{e3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_{em}}{G_1 G_2 \dots G_{m-1}} \quad (2.8)$$

όπου T_{ei} , G_i , $i=1,2,\dots,m$ η θερμοκρασία θορύβου και το κέρδος ισχύος των επιμέρους δικτύων που σχηματίζουν την αλυσίδα.

Η αντίστοιχη σχέση για το συντελεστή θορύβου είναι

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_m - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot \dots \cdot G_{m-1}} \quad (2.9)$$

2.2 Σηματοθορυβικός λόγος

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο καθορίζει το σχετικό μέγεθος του λαμβανόμενου επιθυμητού φέροντος σήματος προς τη συνολική ισχύ θορύβου που υπολογίζεται στην είσοδο του δέκτη. Είναι ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την απόδοση της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Ορίζεται ως ο λόγος ισχύος του φέροντος προς την ισχύ του θορύβου, δηλαδή

$$CNR = \frac{P_R}{N} = \frac{P_T G_T G_R}{L} \frac{1}{k T_S B_{IF}} \quad (2.10)$$

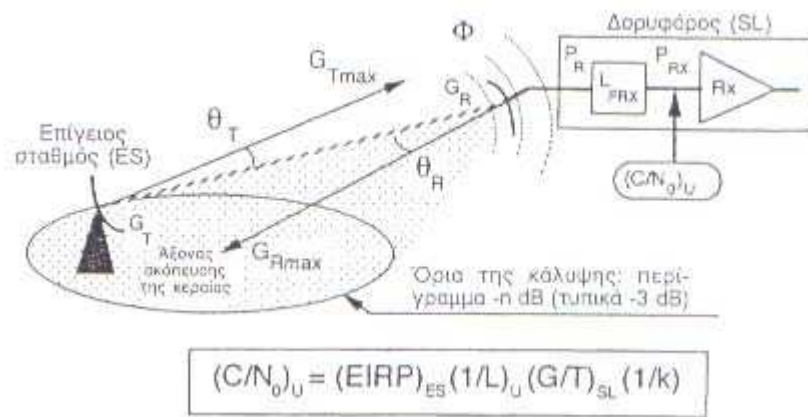
$$CNR = \frac{P_R}{N} = \frac{P_T G_T G_R}{L} \frac{1}{k T_S B_{IF}} \quad 2.10$$

όπου CNR ο σηματοθορυβικός λόγος, P_R η λαμβανόμενη ισχύς σήματος στο δέκτη, P_T η εκπεμπόμενη ισχύς του πομπού, G_T το κέρδος κεραίας του πομπού, G_R το κέρδος κεραίας δέκτη, L οι συνολικές απώλειες ζεύξης, k η σταθερά Boltzmann, T_S η συνολική θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο του δέκτη και B_{IF} το εύρος ζώνης ενδιάμεσων συχνοτήτων.

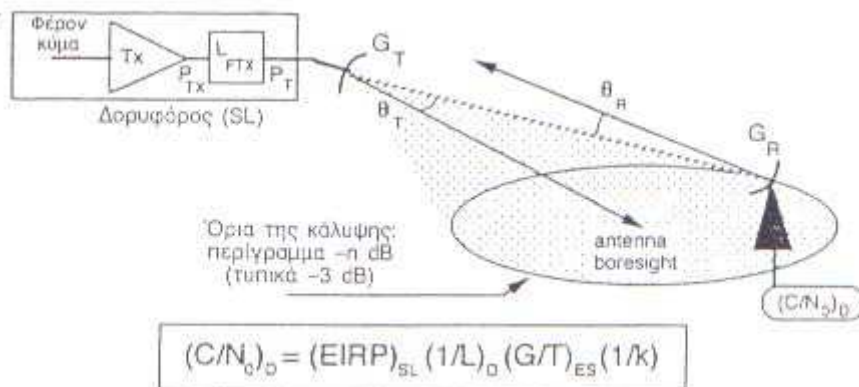
Ο σηματοθορυβικός λόγος μπορεί να οριστεί και ως ο λόγος ισχύος του φέροντος προς τη φασματική πυκνότητα θορύβου. Αυτός ο ορισμός διαθέτει το πλεονέκτημα ότι δεν προϋποθέτει τη γνώση του ισοδύναμου εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται. Ο λόγος στην περίπτωση αυτή εκφράζεται ως εξής.

$$\frac{C}{N_o} = P_T G_T \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \left(\frac{G_R}{T_S} \right) \left(\frac{1}{k} \right) \left(\frac{1}{L_R} \right) \quad (2.11)$$

όπου N_0 η φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου, $P_T G_T$ η ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) από τον πομπό, $(\lambda/4\pi R)^2$ οι απώλειες κενού χώρου που εξαρτώνται από την απόσταση και τη συχνότητα της ζεύξης, G_R/T_S ο λόγος κέρδους κεραίας δέκτη προς συνολική θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο του δέκτη (μέσω του παράγοντα αυτού μπορεί να βελτιωθεί ο σηματοθορυβικός λόγος, γιατί οι υπόλοιποι παράγοντες παραμένουν αμετάβλητοι μετά την εγκατάσταση του δορυφόρου), k η σταθερά Boltzmann και L_R οι υπόλοιπες απώλειες.



Σχήμα 2.1: Σηματοθορυβικός λόγος στο uplink



Σχήμα 2.2: Σηματοθορυβικός λόγος στο downlink

2.3 Επίδραση του μέσου μετάδοσης

Σημαντική επίδραση στην ανάλυση των δορυφορικών ζεύξεων έχει το μέσο

διάδοσης των δορυφορικών σημάτων. Όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στον κενό χώρο, υφίστανται απλά την εξασθένηση λόγω απόστασης. Στην πραγματικότητα όμως, λόγω των συνθηκών που επικρατούν στην ατμόσφαιρα και την ιονόσφαιρα, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υφίστανται επιπλέον απορρόφηση, διάχυση, διάθλαση και περιστροφή του επιπέδου πόλωσής τους. Το μέγεθος της επίδρασης των φαινομένων στην ποιότητα της δορυφορικής ζεύξης εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής του σήματος και τη γωνία ανύψωσης.

Οι περιοχές που έχουν μεγαλύτερη επίδραση στα διαδιδόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι η τροπόσφαιρα και η ιονόσφαιρα. Η απορρόφηση και η διάχυση προκαλούνται κυρίως από τα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η διάθλαση προκαλείται από τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, δηλαδή την τροπόσφαιρα. Το φαινόμενο της αποπόλωσης προκαλείται όταν το κύμα διαδίδεται μέσω ιονόσφαιρας ή ατμόσφαιρας παρουσία βροχής. Τα κυριότερα αποτελέσματα είναι η απορρόφηση και η αποπόλωση λόγω τροποσφαιρικών κατακρημνίσεων. Οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις χαρακτηρίζονται από το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο επίπεδο έντασης. Όταν επικρατούν μικρές εντάσεις σε μεγάλο ποσοστό χρόνου αναφερόμαστε σε συνθήκες καθαρού ουρανού.

Η ατμόσφαιρα διαθέτει έναν αριθμό παραθύρων στο ραδιοφάσμα συχνοτήτων, όπου η απόσβεση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι μικρή. Οι απορροφήσεις στην ατμόσφαιρα προκαλούνται από την ύπαρξη γραμμών απορρόφησης του οξυγόνου και των υδρατμών. Οι γραμμές απορρόφησης του οξυγόνου βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ 50 και 70 GHz και στα 118.74 GHz. Οι υδρατμοί παρουσιάζουν γραμμές απορρόφησης στα 22.3 GHz, στα 183.3 GHz και στα 323.8 GHz.

Η συνολική ατμοσφαιρική απόσβεση εξαρτάται από τη γωνία ανύψωσης, όπως αναφέραμε πιο πάνω. Η απόσβεση του σήματος από την ατμόσφαιρα είναι μικρότερη σε μεγάλα υψόμετρα, καθώς η πυκνότητα της ατμόσφαιρας μειώνεται όσο μεγαλώνει η απόσταση από τη γη. Έτσι οι κατακόρυφες μεταδόσεις είναι καλύτερες ποιοτικά από τις μεταδόσεις με μικρή γωνία ανύψωσης.

Η επίδραση της βροχόπτωσης είναι η δυσμενέστερη κατά τη διάδοση του δορυφορικού σήματος. Η απόσβεση που υφίσταται το σήμα κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης είναι πολλαπλάσια της ατμοσφαιρικής απόσβεσης χωρίς βροχή. Οι σταγόνες της βροχής απορροφούν και σκεδάζουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

προκαλώντας το φαινόμενο της απορρόφησης. Η αποπόλωση οφείλεται στην τυχαία κλίση που εμφανίζουν οι σταγόνες της βροχής ως προς τον ορίζοντα, κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης.

Η βροχή είναι τυχαία χωροχρονική διαδικασία με μεγάλη ανομοιογένεια. Μπορεί να μελετηθεί μόνο με στατιστικό τρόπο. Τα χρονολογικά στατιστικά δεδομένα δείχνουν το ετήσιο ποσοστό χρόνου $p(\%)$ κατά το οποίο υπερβαίνεται η τιμή του ρυθμού μεταβολής της στάθμης του χρονομετρητή R (mm/h).

Ο Διεθνής Οργανισμός CCIR προτείνει το γεωγραφικό διαχωρισμό της Γης σε κλιματικές ζώνες. Κάθε ζώνη προσεγγίζει την ένταση της βροχόπτωσης με διαφορετικό είδος στατιστικής περιγραφής. Για κάθε ζώνη δίνεται η συσσωρευτική κατανομή της υπέρβασης του R για διάφορα ποσοστά του χρόνου.

Η τιμή της εξασθένησης λόγω βροχόπτωσης A ορίζεται ως το γινόμενο της ειδικής εξασθένησης A_0 (dB/km) και του ενεργού μήκους διαδρομής υπό βροχή L_e . Προκύπτει από τη σχέση

$$A = \int_0^{L_e} A_0 dl \quad (2.12)$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται κατά μήκος της διαδρομής μήκους L_e που διανύει υπό βροχή το δορυφορικό σήμα.

Η ειδική απόσβεση συνδέεται με την ένταση βροχόπτωσης μέσω της σχέσης

$$A_0 = a \cdot R^b \quad (2.13)$$

όπου οι συντελεστές a και b εξαρτώνται από τη συχνότητα, το είδος της πόλωσης και τη γωνία ανύψωσης της διαδρομής που ακολουθεί το κύμα.

Για να αντισταθμιστεί η απόσβεση που προκαλεί η βροχόπτωση απαιτείται η εκπομπή σημαντικά μεγαλύτερης ισχύος από τον πομπό του συστήματος.

Εκτός από την απόσβεση ισχύος που εισάγει, η βροχόπτωση αυξάνει κατά μεγάλο βαθμό τη θερμοκρασία θορύβου του ουρανού. Έτσι επηρεάζεται η θερμοκρασία θορύβου του συστήματος του δέκτη του επίγειου σταθμού και μειώνεται ο σηματοθορυβικός λόγος του κάτω τμήματος της δορυφορικής ζεύξης. Η αύξηση της

θερμοκρασίας θορύβου που εισάγει η απόσβεση βροχόπτωσης L_R είναι

$$\Delta T = T_R \left(1 - \frac{1}{L_R} \right) \quad (2.14)$$

Η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας του δορυφόρου δεν επηρεάζεται από την απόσβεση λόγω βροχόπτωσης γιατί είναι συνεχώς κατευθυνόμενη προς σημεία του ουρανού με σταθερή θερμοκρασία ίση με 290 K.

2.4 Ανάλυση παρεμβολών

Το φέρον δορυφορικό σήμα, εκτός από το θόρυβο δέχεται παρεμβολές που μειώνουν την απόδοση του δορυφορικού συστήματος. Το σήμα του uplink παρεμβάλλεται συνήθως από σήματα που εκπέμπονται από άλλους επίγειους σταθμούς και το σήμα του downlink παρεμβάλλεται από σήματα που δέχεται ο επίγειος σταθμός από γειτονικούς δορυφόρους. Ακόμα στα δορυφορικά συστήματα αναχρησιμοποίησης συχνότητας προστίθεται η παρεμβολή από το ορθογώνια πολωμένο κανάλι λόγω αποπόλωσης που εισάγει το σύστημα και το μέσο διάδοσης.

Για τη μαθηματική αντιμετώπιση των προβλημάτων με παρεμβολές υποθέτουμε ότι τα σήματα παρεμβολών είναι προσθετικά, ασυσχέιστα μεταξύ τους και με το θόρυβο. Έτσι προκύπτει η έκφραση του συνολικού σηματοθορυβικού λόγου ως εξής

$$\frac{1}{CNR_{TOT}} = \frac{1}{CNR} + \frac{1}{CIR} \quad (2.15)$$

όπου $CIR=C/I$, ο λόγος ισχύος του φέροντος σήματος προς την ισχύ της παρεμβολής.

Όταν το σύστημα λειτουργεί με επικρατούσα παρενόχληση το θόρυβο τότε ισχύει η προσέγγιση $CNR_{TOT} \approx CNR$, ενώ όταν επικρατούσα παρενόχληση είναι οι παρεμβολές ισχύει η προσέγγιση $CNR_{TOT} \approx CIR$.

Κατά τη σχεδίαση του δορυφορικού συστήματος είναι σημαντικό ο σηματοθορυβικός λόγος να ικανοποιεί τις προδιαγραφές διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας και να μην υπερβαίνει ένα όριο παρεμβολής σε σχέση με τα ήδη

υπάρχοντα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Η διαθεσιμότητα εκφράζεται από το χρονικό ποσοστό στη διάρκεια ενός έτους κατά το οποίο ο δέκτης διατηρεί το συγχρονισμό του. Αυτό συμβαίνει όταν ο ρυθμός λανθασμένων ψηφίων BER δεν υπερβαίνει μια στάθμη κατωφλίου που έχει συνήθως την τιμή 10^{-3} . Η διαθεσιμότητα ενός συστήματος εκφράζεται και από το χρόνο διακοπής της λειτουργίας του ή από την πιθανότητα διακοπής. Κατά τη λειτουργία του συστήματος υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, ο ρυθμός λαθών της ζεύξης διατηρείται σταθερός γιατί δεν υπάρχουν ατμοσφαιρικές μεταβολές κατά μήκος του δορυφορικού ραδιοδιαύλου. Όταν όμως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες αλλάζουν, και κυρίως όταν παρουσιάζεται βροχόπτωση, η απόσβεση που υφίσταται το μεταδιδόμενο σήμα μεταβάλλεται και έτσι ο ρυθμός λαθών της ζεύξης αυξομειώνεται. Η αξιοπιστία είναι το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο επιτυγχάνεται ρυθμός λαθών μεγαλύτερος από μία στάθμη. Ο Διεθνής Οργανισμός ITU-R παρέχει διεθνείς προδιαγραφές για τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία των δορυφορικών συστημάτων.

2.5 Είδη παρεμβολών

2.5.1 Παρεμβολές από γειτονικά δορυφορικά συστήματα

Η παρεμβολή που δημιουργείται από έναν επίγειο σταθμό σε ένα γειτονικό δορυφόρο οφείλεται στους πλευρικούς λοβούς ακτινοβολίας της κεραίας εκπομπής. Μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας κεραίες χαμηλών πλευρικών λοβών.

2.5.2 Παρεμβολές από επίγεια μικροκυματική ζεύξη

Στην περίπτωση παρεμβολής επίγεια τηλεπικοινωνιακής ζεύξης σε δορυφορική, η ισχύς παρεμβολής του επίγειου συστήματος που λαμβάνεται από τον επίγειο σταθμό εξαρτάται από τη φασματική πυκνότητα του δορυφορικού σήματος. Όταν το δορυφορικό σήμα είναι ευρείας ζώνης τότε όλη η ισχύς παρεμβολής λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό. Όταν όμως αναφερόμαστε σε δορυφορικό σήμα στενής ζώνης, η ισχύς παρεμβολής μειώνεται κατά ένα συντελεστή, ο οποίος είναι ο λόγος της ολικής παρεμβάλλουσας ισχύος και της ισχύος που βρίσκεται μέσα στη

ζώνη συχνοτήτων. Η επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας των επίγειων σταθμών μπορεί να μειώσει την παρεμβολή αυτή.

2.5.3 Παρεμβολή από διασταύρωση πόλωσης σε συστήματα με αναχρησιμοποίηση συχνότητας

Ο περιορισμός στη χρησιμοποίηση του περιζήτητου εύρους ζώνης ραδιοσυχνοτήτων οδηγεί στην ανάγκη αύξησης της πληροφοριακής χωρητικότητας μιας ζεύξης χωρίς την αύξηση του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης. Οι τεχνικές αναχρησιμοποίησης συχνότητας έχουν αυτό ακριβώς το επιθυμητό αποτέλεσμα. Μια τεχνική αναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι η χρήση διπλής πόλωσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Δύο ξεχωριστά φέροντα μπορούν να μεταδοθούν στην ίδια συχνότητα αν χρησιμοποιηθούν δύο ορθογώνια πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Προκύπτει όμως σημαντικό πρόβλημα παρεμβολής στην περίπτωση αυτή γιατί κατά τη μετάδοση των κυμάτων στην ατμόσφαιρα, ιδίως παρουσία βροχής, και λόγω της πεπερασμένης διασταύρωσης πόλωσης των κεραιών του δορυφόρου και του επίγειου σταθμού, εμφανίζεται το φαινόμενο της αποπόλωσης. Ως αποτέλεσμα το ένα κανάλι δημιουργεί παρεμβολή στο άλλο. Σε συνθήκες καθαρού ουρανού η συνολική διασταύρωση πόλωσης XPD_T υπολογίζεται ως εξής.

$$XPD_T^{-1} = XPD_E^{-1} + XPD_S^{-1} \quad (2.16)$$

όπου XPD_E ο διαχωρισμός διασταύρωσης πόλωσης της κεραίας του επίγειου σταθμού και XPD_S ο διαχωρισμός διασταύρωσης πόλωσης της κεραίας του δορυφόρου.

2.5.4 Παρεμβολή ενδοδιαμόρφωσης

Η παρεμβολή αυτή οφείλεται στα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης που παράγονται μέσα σε κανάλι του δορυφορικού αναμεταδότη. Η ενδοδιαμόρφωση είναι αποτέλεσμα της ενίσχυσης των φερόντων των καναλιών από τον ενισχυτή οδεύοντος κύματος, που έχει μη γραμμική χαρακτηριστική πλάτους και φάσης. Για την

αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιούνται συστήματα που λειτουργούν με τον ενισχυτή οδεύοντος κύματος κοντά στο σημείο κόρου.

2.5.5 Παρεμβολή γειτονικού καναλιού

Η παρεμβολή γειτονικού καναλιού εμφανίζεται σε δορυφορικά κανάλια περιορισμού ζώνης. Λόγω των επικαλυπτόμενων χαρακτηριστικών πλάτους των φίλτρων των καναλιών, ένα μέρος της ενέργειας κάποιου σήματος περιορισμένου κατά ζώνη, εισέρχεται σε γειτονικά κανάλια. Η παρεμβολή ελαχιστοποιείται αν χρησιμοποιηθούν κατάλληλες αποκλίσεις από τον κόρο των σημείων λειτουργίας του ενισχυτή εξόδου του δορυφορικού αναμεταδότη. Επίσης χρήσιμες αποδεικνύονται κατάλληλες τεχνικές φιλτραρίσματος από τον πολυπλέκτη εξόδου του δορυφόρου, καθώς και από το φίλτρο αποδιαμόρφωσης του δέκτη.

2.5.6 Ενδοσυμβολική παρεμβολή

Το φιλτράρισμα και η μη γραμμική χαρακτηριστική του ενισχυτή οδεύοντος κύματος του δορυφόρου αποτελούνεσωτερικές πηγές παρεμβολής. Αν χρησιμοποιηθούν κατάλληλα φίλτρα διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών, η ενδοσυμβολική παρεμβολή μειώνεται.

2.6 Ανάλυση παρεμβολής σε ή από γειτονικά δορυφορικά συστήματα

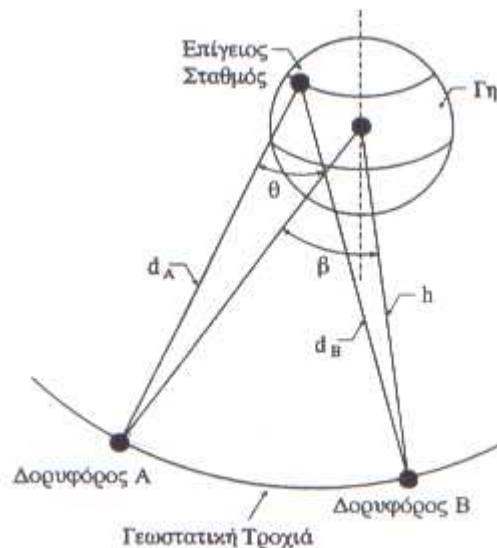
Κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού, η παρεμβολή που δημιουργεί ο επίγειος σταθμός του επιθυμητού συστήματος σε γειτονικό δορυφόρο προέρχεται από τους πλευρικούς λοβούς της κεραίας εκπομπής του σταθμού. Σύμφωνα με τους κανονισμούς των διεθνών οργανισμών τηλεπικοινωνιών οι επιτρεπόμενες τιμές στάθμης των πλευρικών λοβών σε σχέση με το κανονικοποιημένο κέρδος κύριου άξονα είναι

$$32 - 25\log(\theta) \text{ (dB)}, \quad \text{για } 1^\circ \leq \theta \leq 48^\circ$$

$$- 10 \text{ (dB)}, \quad \text{για } 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$
(2.17)

όπου θ είναι η γωνία εκτροπής από τον κύριο άξονα.

Για να υπολογίσουμε την ισχύ παρεμβολής που δημιουργείται από τον πλευρικό λοβό της κεραίας ενός επίγειου σταθμού σε γειτονικό δορυφόρο ή λαμβάνεται μέσω του πλευρικού λοβού της κεραίας από το γειτονικό δορυφόρο, είναι απαραίτητη η γνώση της τιμής της γωνιακής απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών γεωστατικών δορυφόρων, όπως φαίνονται από τον επίγειο σταθμό. Ορίζουμε τις ακόλουθες παραμέτρους, βασιζόμενοι στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.3: Γωνιακή απόσταση γειτονικών δορυφόρων

θ = γωνιακή απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών δορυφόρων A και B όπως φαίνεται από τον επίγειο σταθμό

β = γωνιακή απόσταση μεταξύ δορυφόρων στη γεωστατική τροχιά τους, ίση με τη διαφορά των γεωγραφικών μηκών των δορυφόρων

d_i = απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου i (i=A,B)

h = ακτίνα γεωστατικής τροχιάς

d = απόσταση δορυφόρων στη γεωστατική τροχιά

Από τη γεωμετρία του σχήματος προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις

$$d = d_A^2 + d_B^2 - 2d_A d_B \cos\theta$$

$$d = 2h^2 - 2h^2\cos\beta = 2h^2(1 - \cos\beta)$$

οπότε καταλήγουμε στη σχέση υπολογισμού της γωνιακής απόστασης

$$\theta = \arccos\left[\frac{d_A^2 + d_B^2 - 2h^2(1 - \cos\beta)}{2d_A d_B}\right] \quad (2.18)$$

2.7 Βιβλιογραφία κεφαλαίου 2

- [1] Satellite Communications Systems, G.Maral – M.Bousquet
- [2] Δορυφορικές Επικοινωνίες, Χ.Καψάλης – Π.Κωπής
- [3] Σχεδίαση Μικροκυματικών Ζεύξεων, Ι.Κανελλόπουλος

Κεφάλαιο 3

Στρατοσφαιρικές Τηλεπικοινωνιακές Πλατφόρμες

3.1 Εισαγωγή

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, στην εποχή της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης και χρήσης της τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας, ένας από τους πιο πολύτιμους και περιορισμένους φυσικούς πόρους είναι πλέον το εύρος ζώνης. Οι σύγχρονοι χρήστες απαιτούν υψηλής χωρητικότητας υπηρεσίες πολυμέσων, internet υψηλών ταχυτήτων, εξελιγμένη ποιότητα επικοινωνίας από και προς κινητά τερματικά. Ο ασύρματος τρόπος μετάδοσης συγκεντρώνει σήμερα το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες ευρείας ζώνης απ' ευθείας στους καταναλωτές. Συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης FWA (fixed wireless access) εγκαθίστανται για να παρέχουν τηλεφωνία σε επιχειρήσεις και οικιακούς χρήστες. Ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα BWA (broadband wireless access) σχεδιάζονται για να καλύψουν τις ανάγκες multimedia εφαρμογών, σε ρυθμούς τουλάχιστον 2 Mbps, και να υλοποιήσουν το λεγόμενο SOHO (small office / home office).

Ο περιορισμός του διατιθέμενου ραδιοφάσματος από τη μια μεριά και ο ραγδαίος πολλαπλασιασμός των χρηστών από την άλλη, καθιστούν αναπόφευκτη τη χρήση κάποιας στρατηγικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, που βασίζεται συνήθως πάνω σε μια σταθερή κυψελωτή δομή. Ο κύριος στόχος της αυξημένης χωρητικότητας επιβάλλει τη διαρκή μείωση του μεγέθους των κυψελών, οδηγώντας σε μικρο- ή πικο- κυψέλες σε περιοχές όπου η πυκνότητα των χρηστών είναι μεγάλη. Έτσι όμως αυξάνεται ολοένα ο αριθμός των απαιτούμενων σταθμών βάσης, μαζί με το κόστος υλοποίησης του συστήματος. Ταυτόχρονα γεννούνται σοβαρές ανησυχίες για τους πιθανούς κινδύνους υγείας και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την ακτινοβολία των επίγειων σταθμών.

Οι σύγχρονες τάσεις οδηγούν παράλληλα στη χρησιμοποίηση υψηλών συχνοτήτων, που δεν υποφέρουν ακόμα από μεγάλο “συνωστισμό” υπηρεσιών και

προσφέρουν σημαντικό εύρος ζώνης. Οι περιοχές των 28 GHz και 38 GHz ή ακόμα υψηλότερες ζώνες είναι διατεθειμένες σε ευρυζωνικές υπηρεσίες, υπηρεσίες LMDS (Local Multipoint Distribution Services) και MVDS (Multipoint Video Distribution Services), που περιλαμβάνουν internet υψηλής ταχύτητας, τηλεφωνία, τηλεόραση, βίντεο υπό αίτηση, εκπομπές ήχου προς το ευρύ κοινό, κλπ. Ωστόσο τα χιλιοστομετρικά μήκη κύματος που αντιστοιχούν στις παραπάνω συχνότητες έχουν δυο βασικά μειονεκτήματα:

- (α) απαιτούν διάδοση οπτικής επαφής LOS (line-of-sight)
- (β) υπόκεινται σε απώλειες λόγω καιρικών φαινομένων, ιδιαίτερος αποσβέσεις λόγω βροχής.

Οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν μια λύση στο πρόβλημα διάδοσης οπτικής επαφής και παρέχουν σήμερα πληθώρα υπηρεσιών ευρείας ζώνης σε πολλούς χρήστες. Εν τούτοις η επίδοση των γεωστατικών δορυφόρων (geostationary earth orbit satellites, GEO) περιορίζεται από το μεγάλο ύψος της τροχιάς τους που προκαλεί σημαντική εξασθένηση στο μεταδιδόμενο σήμα. Ο ίδιος παράγοντας συντελεί στην καθυστέρηση διάδοσης των δορυφορικών ζεύξεων, φαινόμενο που επηρεάζει όχι μόνο τη μετάδοση φωνής αλλά και κάποια πρωτόκολλα δεδομένων. Παράλληλα οι φυσικοί περιορισμοί στις διαστάσεις της κεραίας του δορυφορικού αναμεταδότη οδηγούν σε ένα κατώτατο όριο του μεγέθους των κυψελών που προβάλλονται στη γήινη επιφάνεια, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η βέλτιστη επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων. Η επικοινωνία μέσω δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (low altitude earth orbit satellites, LEO) παρακάμπτει ορισμένους από τους παραπάνω περιορισμούς, ωστόσο υποφέρει από προβλήματα έγκαιρης διαπομπής τόσο μεταξύ των κυψελών όσο και μεταξύ των δορυφόρων. Η ανάγκη ύπαρξης μεγάλου αριθμού δορυφορικών αναμεταδοτών LEO προκειμένου να παρασχεθεί συνεχής κάλυψη σε μια περιοχή αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα και το οικονομικό φορτίο και συνεπώς μειώνει την εμπορική επιτυχία μιας τέτοιας λύσης.

Έτσι παραμένει πάντα επίκαιρη η αναζήτηση πρωτοποριακών μεθόδων και νέων τεχνολογιών στον τομέα της ασύρματης μετάδοσης ευρείας ζώνης. Οι στρατοσφαιρικές τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες (High Altitude Platforms, HAPs) αντιπροσωπεύουν μια υβριδική τεχνολογική προσέγγιση στο πρόβλημα της ευρυζωνικής επικοινωνίας, καθώς συνδυάζουν όλα τα πλεονεκτήματα των επίγειων και δορυφορικών συστημάτων. Οι εν λόγω εναέριες πλατφόρμες δρουν ως σταθμοί

βάσης ή κόμβοι αναμετάδοσης και είναι τοποθετημένες σε αεροπλάνα ή μπαλόνια, επανδρωμένα ή μη. Είναι ψευδο – γεωστατικές και μπορούν να θεωρηθούν είτε ως κεραίες πολύ μεγάλου ύψους είτε ως δορυφόροι πολύ χαμηλής τροχιάς, προσφέροντας κάλυψη σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές αλλά και σε ευρύτερες γεωγραφικές εκτάσεις.

Τα αερόστατα, στα οποία στηρίζεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό η τεχνολογία των HAPs, έχουν ιστορία πολλών αιώνων που ξεκινά από την αρχαία Κίνα. Στη Δύση, τέτοιου είδους μπαλόνια ζεστού αέρα έκαναν την εμφάνισή τους αρχικά στη Γαλλία το 1783, ενώ στα 1900 πραγματοποιήθηκε η πρώτη πτήση του θρυλικού Zeppelin LZ1. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα αναπτύχθηκε η τεχνολογία των αερόπλοιων ηλίου (He) και το 1932 το πρώτο επανδρωμένο αερόστατο πέταξε ως τη στρατόσφαιρα σε υψόμετρο 16.940 m. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μια πρώιμη μορφή παροχής επικοινωνιών από τη στρατόσφαιρα έλαβε χώρα πριν το 1962 που τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος Telstar. Μόλις στα 1960, τηλεφωνήματα μεγάλων αποστάσεων έγιναν μέσω της ανάκλασης σημάτων από το Echo, ένα γιγαντιαίο μπαλόνι που είχε σκοπό την παθητική αναμετάδοση εκπομπών από τα εργαστήρια Bell στο Crawford Hill.

Μολονότι η τεχνολογία των αερόστατων δεν είναι καινούργια, η εφαρμογή τους για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς ήταν μέχρι σήμερα ιδιαίτερα περιορισμένη. Οι βασικότερες δυσκολίες στη χρήση τους προέρχονταν από την αδυναμία σταθερότητας και ικανοποιητικού ελέγχου θέσης για μεγάλες χρονικές περιόδους σε περιβάλλον με ανέμους. Τα HAPs προβλέπεται να λειτουργήσουν στη στρατόσφαιρα, μεταξύ 17 και 22 km πάνω από το έδαφος, υψόμετρο στο οποίο οι ροές των ανέμων είναι συνήθως ήπιες και σταθερές για τις περισσότερες περιοχές της υφής. Ο συνδυασμός της εξελισσόμενης τεχνολογίας των αερόπλοιων, (που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων βελτιωμένα υλικά κατασκευής και ηλιακές κυψέλες), και της αυξανόμενης ζήτησης για νέες υπηρεσίες καθιστούν τα HAPs μια εφαρμόσιμη και άκρως ελκυστική εναλλακτική πρόταση. Σημαντικές εφαρμογές τους είναι οι υψηλής ταχύτητας και ευρείας ζώνης ψηφιακές επικοινωνίες (interactive video, broadcasting, multimedia), οι κινητές επικοινωνίες, η τηλεπισκόπηση, η παρατήρηση του γήινου περιβάλλοντος και η συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων.

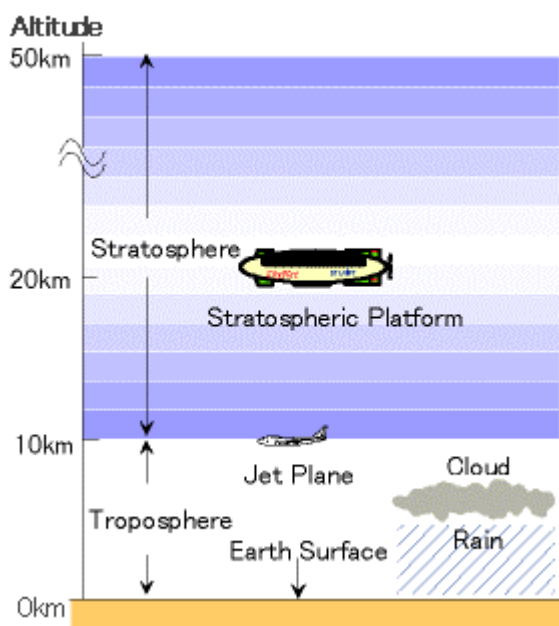
Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η συστηματική μελέτη γύρω από την τεχνολογία των HAPs ξεκίνησε ουσιαστικά το 1997, όταν οι Goran M.Djuknic,

John Freidenfelds και Yuriy Okunev έγραψαν ένα άρθρο με τίτλο “Establishing Wireless Communications Services via High Altitude Aeronautical Platforms: A Concept Whose Time Has Come?”. Το άρθρο αυτό, που δημοσιεύτηκε από την IEEE το Σεπτέμβριο του ίδιου έτους, σηματοδότησε την έξαρση του ενδιαφέροντος γύρω από την πρωτοποριακή ιδέα της παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από τη στρατόσφαιρα. Έδωσε παράλληλα το έναυσμα για τη διεξαγωγή πλήθους μελετών από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα αλλά και τη διεθνή βιομηχανία, ώστε σταδιακά η ιδέα να γίνει πράξη και να τεθεί σε εφαρμογή.

3.2 Περιγραφή του συστήματος

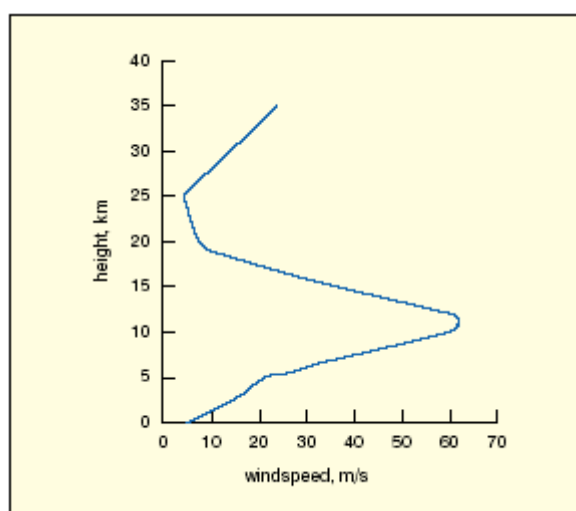
3.2.1 Στρατόσφαιρα

Η βασική ιδέα της τεχνολογίας των HAPs συνοψίζεται στη λειτουργία των εναέριων πλατφόρμων στη στρατόσφαιρα. Το κομμάτι της γήινης ατμόσφαιρας από την επιφάνεια του πλανήτη μας ως το υψόμετρο περίπου των 10 km αποτελεί την τροπόσφαιρα και χαρακτηρίζεται από έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα όπως σύννεφα και βροχοπτώσεις. Η στρατόσφαιρα εκτείνεται από τα 10 km ως τα 50 km από τη γη, έχει μια μέση θερμοκρασία της τάξεως των -60°C με -50°C (217 K), χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση περίπου το $1/15$ με $1/20$ της πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας και άφθονη ηλιακή ενέργεια εξαιτίας της απουσίας νεφών.



Σχήμα 3.1: Η στρατόσφαιρα

Το υψόμετρο λειτουργίας των 17 με 22 χιλιομέτρων έχει επιλεγεί με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της μέσης ταχύτητας των ανέμων και των αναταράξεων που ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα σταθερότητας στην πλατφόρμα. Παρότι η σφοδρότητα των ανέμων διαφοροποιείται από τόπο σε τόπο και από εποχή σε εποχή, συνήθως παρουσιάζει μια μορφή πολύ κοντά σε αυτή του σχήματος 3.2. Το συγκεκριμένο υψόμετρο είναι επίσης ασφαλές από άποψη εναέριας κυκλοφορίας, καθώς όλα τα πολιτικά και τα περισσότερα στρατιωτικά αεροσκάφη πετούν σε ύψη χαμηλότερα των 55.000 ft.



Σχήμα 3.2: Η ταχύτητα του ανέμου συναρτήσσει του ύψους από τη γήινη επιφάνεια

3.2.2 Πλατφόρμες

Οι πλατφόρμες ενδέχεται να είναι αεροπλάνα, αερόπλοια ή αερόστατα, επανδρωμένα ή μη, με αυτόνομη λειτουργική ικανότητα αλλά και δυνατότητα τηλεχειρισμού από το έδαφος. Παρά το γεγονός ότι ο όρος HAP δεν είναι αυστηρά ορισμένος, θεωρούμε ότι αναφέρεται στα ηλιακής ενέργειας μη επανδρωμένα αεροπλάνα ή αερόπλοια που μπορούν να παραμείνουν σταθερά σε συγκεκριμένη θέση στον ορίζοντα για διάρκεια κάποιων μηνών. Ένας άλλος ευρέως χρησιμοποιούμενος όρος είναι ο όρος HAAP (High Altitude Aeronautical Platforms) καθώς και ο όρος HALE (High Altitude Long Endurance Platforms) που υπονοεί σκάφη ικανά για παραμονή έως και λίγων ετών σε δεδομένο σημείο της στρατόσφαιρας. Σε κάθε περίπτωση οι πτήσεις των πλατφόρμων είναι πλήρως

συμβιβασμένες με τους κανονισμούς του διεθνούς οργανισμού πολιτικής αεροπορίας ICAO (International Civil Aviation Organization) και έχουν την εξουσιοδότηση των τοπικών αεροπορικών διοικήσεων.



05-24 08:08 – Προετοιμασία για την πτήση



05-24 08:38 – Έξοδος



05-24 08:48 – Άφιξη στο σημείο εκκίνησης



05-24 09:04



05-24 09:06



05-24 09:09



05-24 09:10



05-24 09:14 – Τελικός έλεγχος και δοκιμή



05-24 09:15 – Το D-LZNT μπροστά στο Zeppelin hangar.



05-24 09:24 – Απελευθέρωση από τη βάση



05-24 09:25 – Το αερόπλοιο στον ουρανό

Σχήμα 3.3: Πρόσφατη πτήση αερόστατου Zeppelin NT

Η πρώτη μορφή εναέριων πλατφόρμων ήταν τα αερόστατα (μπαλόνια) των οποίων η χρήση περιορίστηκε για μεγάλο διάστημα σε ψυχαγωγικούς, μετεωρολογικούς ή στρατιωτικούς σκοπούς, πιθανότατα εξαιτίας των συχνών ατυχημάτων που συνέβαιναν από την ανάφλεξη του υδρογόνου. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο παρατηρείται μια αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος γύρω από τα αερόστατα, καθώς η τεχνολογία παρέχει νέα υλικά για το εξωτερικό περίβλημα σφαίρας των μπαλονιών. Τα υλικά αυτά είναι ανθεκτικά στη UV ακτινοβολία και προστατεύουν από ενδεχόμενες διαρροές του ηλίου (He), στοιχείο που έχει αντικαταστήσει πλέον το υδρογόνο.



Σχήμα 3.4: Το αερόστατο Zeppelin NT

Από τη άλλη μεριά, τα προτεινόμενα για τηλεπικοινωνιακή χρήση αερόπλοια λειτουργούν με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων και έλικας ώστε να επιτυγχάνεται η σταθερότητα της θέσης, ενώ πετούν αντίθετα προς τους επικρατούντες ανέμους σε ύψη 3 έως 22 km. Η απαραίτητη κινητήρια δύναμη για την προώθησή τους προέρχεται από ελαφριές ηλιακές κυψέλες, με τυπικό βάρος λιγότερο από 400 g/m², που καλύπτουν το επάνω μέρος της επιφάνειας του αερόπλοιου. Επιπλέον κατά τη διάρκεια της ημέρας αποθηκεύουν ενέργεια σε επαναφορτιζόμενα ηλεκτρικά στοιχεία καύσιμης ύλης (fuel cells), τα οποία τίθενται σε λειτουργία για την εξυπηρέτηση των

αναγκών της νύχτας. Ενδεικτικές τιμές για τις διαστάσεις αυτών των αερόπλοιων είναι 100 με 200 m σε μήκος, ενώ εκτιμάται ότι θα έχουν τη δυνατότητα υποστήριξης φορτίου περίπου 800 με 1000 kg. Το αναμενόμενο βάρος τους φτάνει τους 15 τόνους και οφείλεται ως επί το πλείστον στο βάρος του φυσικού καυσίμου που μεταφέρουν.



Σχήμα 3.5: Ένα αερόπλοιο της εταιρείας Lindstrand

Μια διαφορετική μορφή εναέριων τηλεπικοινωνιακών πλατφόρμων είναι τα μη επανδρωμένα αεροπλάνα που κινούνται με ηλιακή ενέργεια ενάντια στον άνεμο αλλά και τα επανδρωμένα αεροσκάφη με πιλότους που εκτελούν 8-ωρες βάρδιες. Τα τελευταία επιτυγχάνουν μια ψευδο – σταθερότητα θέσης πετώντας σε κυκλική κατά προσέγγιση τροχιά διαμέτρου όχι πάνω από 13 km. Έχουν άνοιγμα φτερών ως 80 m και δυνατότητα να μεταφέρουν κάτω από την άτρακτο 125 περίπου μικροκυματικές κεραίες, σε ύψος 16 με 19 km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 3.6: Το αεροπλάνο Pathfinder Plus

Τέλος, ως τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες μπορούν να λειτουργήσουν τα λεγόμενα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicles) καθώς και τα δεμένα στο έδαφος αερόστατα (tethered aerostats). Τα UAVs είναι μικρά, χωρίς πλήρωμα αεροσκάφη, εφοδιασμένα με καύσιμα που επαρκούν για σύντομες και χαμηλού ύψους αποστολές. Χρησιμοποιούνται ευρύτερα για στρατιωτικές παρακολουθήσεις. Τα δεμένα αερόστατα είναι αερόστατα που τροφοδοτούνται από καλώδιο, γεγονός που καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την πτήση πάνω από τα 5 με 8 km. Προφανής κίνδυνος υπάρχει στην περίπτωση αυτή για την εναέρια κυκλοφορία, αν οι πλατφόρμες δεν ίπτανται σε ζώνες που απαγορεύεται η πτήση άλλων αεροσκαφών.



Σχήμα 3.7: Διάφοροι τύποι UAV's



Σχήμα 3.8: Το στρατιωτικό UAV Predator

Ιστορικά και μόνο αναφέρουμε ότι μια πρώιμη ιδέα που σύντομα εγκαταλείφθηκε ήταν η χρήση μη επανδρωμένων αεροπλάνων τροφοδοτούμενων από το έδαφος με τη βοήθεια μικροκυματικών δεσμών. Τα προβλήματα στην περίπτωση αυτή ήταν μεταξύ άλλων η αποδοτικότητα της εκπομπής, το μεγάλο κόστος του επίγειου εξοπλισμού και ο κίνδυνος από την υψηλής ισχύος μικροκυματική ακτινοβολία προς το περιβάλλον και τα υπόλοιπα αεροσκάφη.



Σχήμα 3.9: Το στρατιωτικού τύπου X-47 B UCAS ,το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρία Northrop Grumman στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ

3.2.3 Έλεγχος τροχιάς

Είναι σαφές ότι για να εξασφαλιστεί η επιτυχημένη λειτουργία των HAPs δεν αρκεί η εξέλιξη της τεχνολογίας των χρησιμοποιούμενων αεροσκαφών. Απαραίτητη είναι η ανάπτυξη ενός επίγειου συστήματος υποστήριξης για την αιώρηση, την πρόσδεση, τη συντήρηση και την επιθεώρηση των πλατφόρμων. Αξιοπίστα συστήματα πλοήγησης, συστήματα ελέγχου απογείωσης, ανύψωσης και ηη

προσγείωσης, συστήματα ανίχνευσης και ελέγχου θέσης πρέπει οπωσδήποτε να περιλαμβάνονται στην επίγεια υποδομή, προκειμένου να έχουμε ένα ασφαλές και αποδοτικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Ο τηλεχειρισμός και η χρήση GPS (Global Positioning System) ενδέχεται να συμβάλλουν στη σωστή και προβλέψιμη λειτουργία των HAPs, ενώ σημαντικό ρόλο θα παίζει η έγκαιρη πρόγνωση των καιρικών συνθηκών στην περιοχή πτήσης τους. Με τη βοήθεια των σημάτων τηλεμετρίας πρέπει να παρακολουθείται διαρκώς η κατάσταση του εξοπλισμού που βρίσκεται πάνω στο αεροσκάφος και να δίνονται οι αντίστοιχες εντολές σε περιπτώσεις ανωμαλιών ή επικίνδυνων ατμοσφαιρικών φαινομένων. Οι αποφάσεις για δυνατότητα απογείωσης ή ανάγκη προσγείωσης και επισκευής μπορούν να ληφθούν μόνο εφόσον υπάρχει επαρκής γνώση της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειώσουμε ότι τα ρεύματα του αέρα δρουν προωστικά στην τροπόπαυση, δηλαδή στη μεταβατική ζώνη μεταξύ τροπόσφαιρας και στρατόσφαιρας, βοηθώντας την πλατφόρμα να κερδίσει ύψος. Όταν αυτή φτάσει περίπου στα 20 km χρειάζεται να ληφθεί μέριμνα για τη μεταφορά και σταθεροποίησή της στην προβλεπόμενη θέση. Θεωρώντας μια μέγιστη ταχύτητα ανέμου της τάξης των 20 m/sec, η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι ακτίνας 1 km σε οριζόντιο επίπεδο και ± 1 km σε κατακόρυφο επίπεδο. Περιοδικά (π.χ. κάθε 3 χρόνια) το αεροσκάφος οδηγείται πίσω στη βάση του για επιτήρηση και έλεγχο, ενώ η συνολική διάρκεια ζωής του μπορεί να φτάσει τα 10 χρόνια, ούσα βέβαια συνάρτηση της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας.

3.2.4 Αρχιτεκτονική

• Ζεύξεις

Υπηρεσίες μπορούν να προσφέρονται στους χρήστες μέσω των απ' ευθείας ζεύξεων (uplink και downlink) με την πλατφόρμα και των ζεύξεων μεταξύ του HAP και του υπάρχοντος επίγειου δικτύου οπτικών ινών. Δια – πλατφορμικές ζεύξεις χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός δικτύου από HAPs, ενώ υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης ζεύξης μεταξύ πλατφόρμας και δορυφόρου σε περίπτωση που αυτό κρίνεται σκόπιμο.

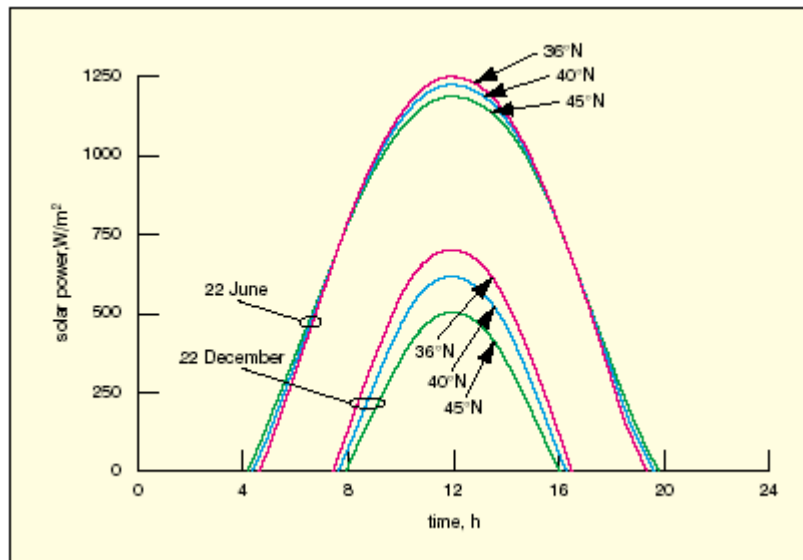
• **Κεραίες**

Προκειμένου να λειτουργήσει ικανοποιητικά η παραπάνω κυψελωτή σχεδίαση, οι κεραίες που βρίσκονται στις πλατφόρμες επιλέγονται να είναι κεραίες πολλαπλών δεσμών. Αυτό όμως έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία παρεμβολών στις ομοδιαυλικές κυψέλες από τους πλευρικούς λοβούς, χειροτερεύοντας εν τέλει την επίδοση του συστήματος. Για την αποφυγή των παρεμβολών οι πλευρικοί λοβοί πρέπει να καταστέλλονται.

Όσον αφορά τις κεραίες των επίγειων τερματικών, αυτές ενδέχεται να έχουν σταθερό ή ηλεκτρονικά στρεφόμενο διάγραμμα ακτινοβολίας. Επειδή τόσο η οριζόντια όσο και η κατακόρυφη θέση της πλατφόρμας δεν είναι απόλυτα σταθερές, παρατηρείται μια χρονική διακύμανση της γωνίας με την οποία ο σταθμός εδάφους βλέπει το HAP. Αν η γωνιακή αυτή μεταβολή είναι μεγαλύτερη από το εύρος δέσμης της κεραίας, τότε ενδείκνυται κεραία με ηλεκτρονικά στρεφόμενο διάγραμμα.

• **Ισχύεις**

Μια σημαντική διάκριση μεταξύ των διαφορετικών ειδών HAPs είναι η διαθέσιμη ισχύς τους. Τα αεροπλάνα που κινούνται με συμβατικές πηγές καυσίμων μπορούν τυπικά να εκπέμπουν ισχύ 20 kW, ενώ τα αεροσκάφη ηλιακής ενέργειας μόνο 1 kW. Συνεπακόλουθα τα τελευταία παρουσιάζουν περιορισμένη RF ισχύ κάτω ζεύξης, οπότε απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός της σκόπτευσης των κεραιών και κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Επιπλέον, στην περίπτωση της χρήσης ηλιακών κυψελών, ένα μεγάλο κομμάτι της ενέργειας που συγκεντρώνεται, αναλίσκεται στην επαναφόρτιση των μπαταριών (fuel cells) καθώς το HAP αντιμετωπίζει μεγάλες περιόδους σκότους κάθε νύχτα. Η κατάσταση επιδεινώνεται όσο προχωρούμε σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη λόγω της γωνίας με την οποία βλέπει ο ήλιος την πλατφόρμα και φυσικά το χειμώνα που η διάρκεια της ημέρας είναι μικρή. Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τη διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους, των εποχών και της ώρας μέσα στην ημέρα.



Σχήμα 3.11: Η μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ένα HAP σε ύψος 17 km

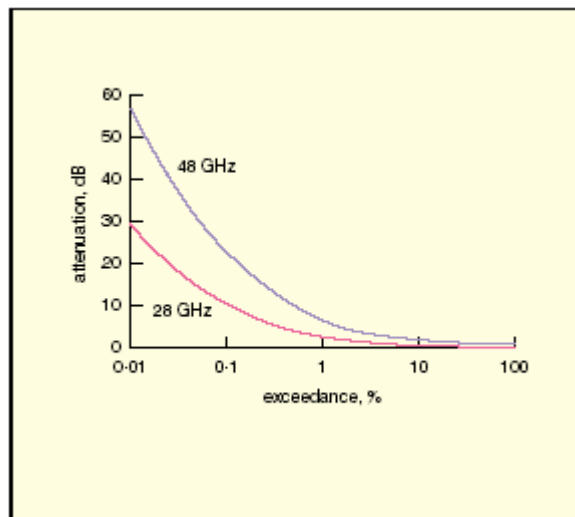
• Διαπομπές

Τέλος, ένα σημαντικό θέμα στην αρχιτεκτονική του συστήματος είναι η υποστήριξη διαπομπών. Παρόλο που οι χρήστες ενός δικτύου BWA είναι συνήθως σταθεροί, διαπομπές μπορεί να συμβούν εξαιτίας της μετατόπισης, εκτροπής, στροφής ή κλίσης της πλατφόρμας, σε αντίθεση με τις συμβατικές κυψελωτές διατάξεις κινητής τηλεφωνίας όπου οι διαπομπές προκαλούνται αποκλειστικά από την κίνηση των χρηστών. Η συχνότητα των διαπομπών εξαρτάται από το μέγεθος των κυψελών στο έδαφος, τη σταθερότητα του HAP αλλά και τη σταθερότητα σκόπευσης της κεραίας του και δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια, αναμένεται όμως να μην είναι μεγάλη συγκρινόμενη με ένα κλασικό κινητό σενάριο. Βέβαια οι πολύ μικρές ανεκτές καθυστερήσεις στις μελλοντικές multimedia εφαρμογές (όπως το βίντεο) θα επιβάλλουν αυστηρότερους περιορισμούς στη διαδικασία των διαπομπών.

3.2.5 Ατμοσφαιρικές απώλειες

• Εξασθένηση

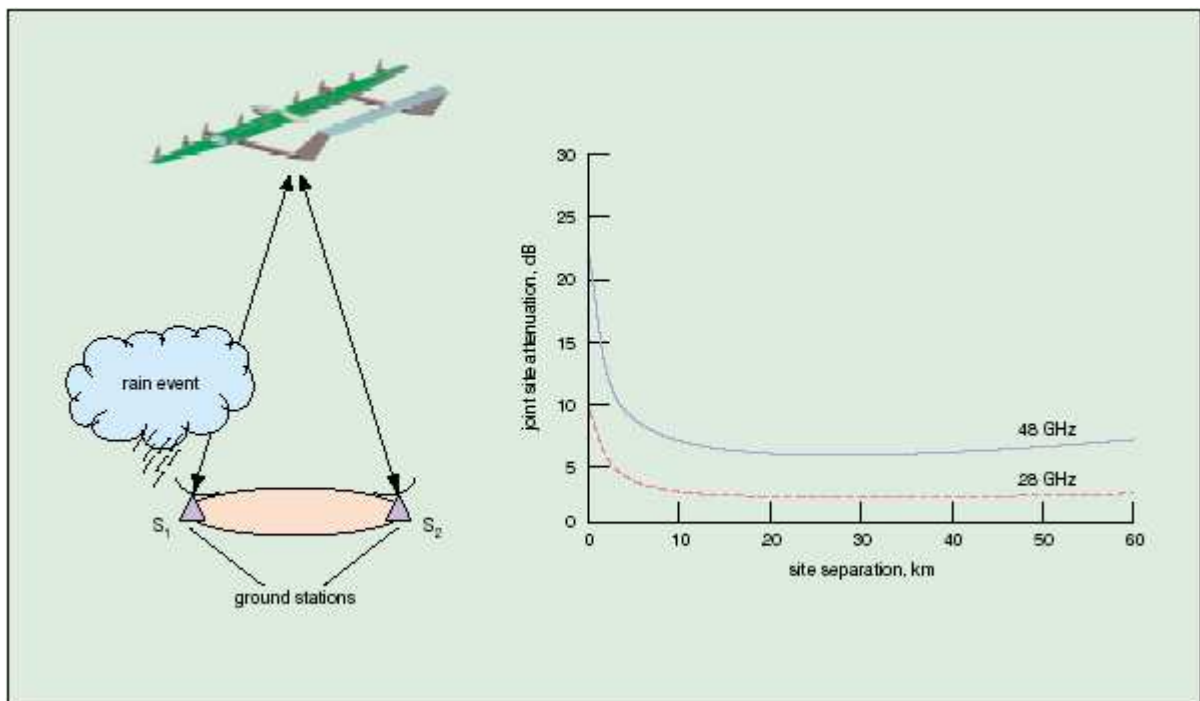
Σε συχνότητες χαμηλότερες των 10 GHz οι ατμοσφαιρικές απώλειες μπορούν κατά ένα μεγάλο ποσοστό να αγνοηθούν, αφού είναι μικρές σε σχέση με τις απώλειες ελευθέρου χώρου. Ωστόσο στις συχνότητες πάνω από 20 GHz όπου θα λειτουργήσουν τα HAPs, η απορρόφηση και σκέδαση των ραδιοκυμάτων από το οξυγόνο, τους υδρατμούς, τα σύννεφα και τη βροχή είναι σημαντική. Ειδικότερα η βροχή προκαλεί βίαιη εξασθένηση, όπως φαίνεται από το στατιστικό διάγραμμα που ακολουθεί και που αναφέρεται σε μια ζεύξη στην κλιματική ζώνη της Μεσογείου (region K), μεταξύ ενός σημείου στο επίπεδο της θαλάσσιας επιφάνειας και ενός HAP 30 km μακριά σε ύψος 17 km. Η υπέρβαση (exceedance) εκφράζει το ποσοστό της διάρκειας του χρόνου που η βροχή εξασθενεί το σήμα περισσότερο από μια δεδομένη τιμή και είναι το μέγεθος απ' όπου μπορεί να υπολογιστεί η διαθεσιμότητα της ζεύξης. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι οι απώλειες λόγω βροχής λαμβάνουν χώρα μόνο στα πρώτα λίγα χιλιόμετρα από την επιφάνεια της γης, γιατί το φαινόμενο των βροχοπτώσεων περιορίζεται στην περιοχή κάτω από την ισόθερμη των 0° C που συνήθως δεν ξεπερνά τα 5 km.



Σχήμα 3.12: Ατμοσφαιρική απόσβεση για συχνότητες 28 GHz και 48 GHz

• Διαφορική Λήψη

Μια τεχνική αποφυγής των υψηλών ατμοσφαιρικών αποσβέσεων στην προς τα κάτω ζεύξη είναι η διαφορική λήψη χώρου. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ταυτόχρονη λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω δυο διαφορετικών οδεύσεων. Συγκεκριμένα αν ένα σημείο S_1 υποφέρει από έντονη βροχόπτωση, είναι απίθανο σε ένα άλλο σημείο S_2 λίγα χιλιόμετρα μακριά η βροχή να είναι το ίδιο σφοδρή. Τότε είναι αποτελεσματικό να ληφθούν τα σήματα εκπομπής του HAP στο σημείο S_2 και από εκεί να καταλήξουν στο S_1 μέσω επίγειας μικροκυματικής ζεύξης. Τα συστήματα διαφορικής λήψης χώρου τίθενται εκτός λειτουργίας σπανιότερα από τα συστήματα απλής λήψης, καθότι για να συμβεί αυτό πρέπει η υπέρβαση του περιθωρίου διαλείψεων να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα και στις δυο εναλλακτικές διαδρομές.



Σχήμα 3.13: Διαφορική λήψη χώρου

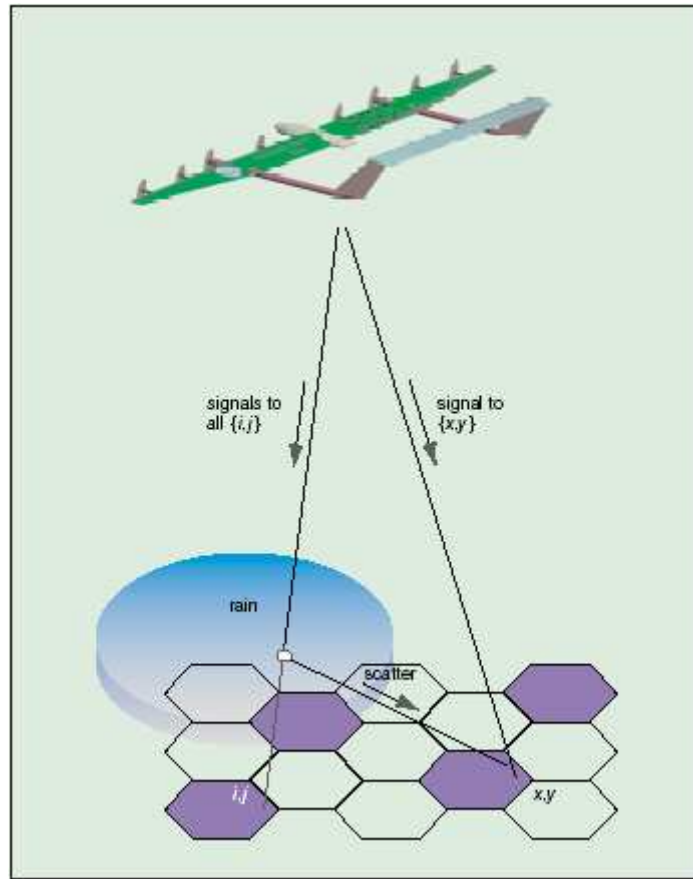
Άλλες ενδεχόμενες μορφές διαφορικής λήψης είναι η διαφορική λήψη χρόνου και η διαφορική λήψη συχνότητας. Η πρώτη περιλαμβάνει πολλαπλές εκπομπές του ίδιου σήματος καθυστερημένες κατά μερικά λεπτά, που συγκεντρώνονται στα τερματικά των χρηστών και ανασυνθέτουν την αρχική πληροφορία. Η δεύτερη μπορεί να εφαρμοστεί όταν είναι διαθέσιμες δυο συχνότητες λειτουργίας, για παράδειγμα 2

GHz και 48 GHz, οπότε κατά τη διάρκεια της βροχής η κίνηση που δεν επιδέχεται χρονικές καθυστερήσεις μεταδίδεται στα 2 GHz ενώ οι υπόλοιπες εκπομπές γίνονται στα 48 GHz.

• **Σκέδαση**

Οι σταγόνες της βροχής, το χιόνι, οι παγοκρύσταλλοι και τα σταγονίδια νερού που αιωρούνται στα σύννεφα, εκτός από την απορρόφηση ακτινοβολίας, μπορούν να προκαλέσουν ακόμα τον υποβιβασμό μιας ζεύξης σκεδάζοντας ακτινοβολία από μια κυψέλη σε μια άλλη ομοδιαυλική. Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στο σχήμα 3.14. Σε δεδομένο σημείο (x,y) η συνολική παρεμβολή εξαιτίας της βροχής αποτελείται από το άθροισμα όλων των σκεδαζόμενων ομοδιαυλικών σημάτων από τα σημεία (i,j) προς το αρχικό σημείο. Σημαντικό ρόλο παίζει το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας του τερματικού, καθώς η ανεπιθύμητη σκεδαζόμενη ισχύς λαμβάνεται ως επί το πλείστον από τους πλευρικούς λοβούς. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην αναζήτηση στρατηγικών για τη μετρίαση των δυσμενών επιπτώσεων της σκέδασης λόγω βροχής. Μια πιθανή αύξηση της εκπεμπόμενης RF ισχύος θα ήταν αποτελεσματική μόνο για την ελάττωση της απόσβεσης, χωρίς να βελτιώσει την παρεμβολή.

Ορθότερη στην περίπτωση αυτή είναι μια αύξηση του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των γειτονικών ομοδιαυλικών κυψελών που επηρεάζονται από το φαινόμενο της βροχής. Η προσαρμογή του συντελεστή επαναχρησιμοποίησης μπορεί να γίνεται δυναμικά στην εκάστοτε περιοχή που υποφέρει από βροχόπτωση, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές να λειτουργούν σχήματα επαναχρησιμοποίησης κατάλληλα για συνθήκες καθαρού ουρανού.



Σχήμα 3.14: Σκέδαση λόγω βροχής

3.3 Συχνότητες και λειτουργικά χαρακτηριστικά

3.3.1 Ανάθεση συχνοτήτων

Η ITU και οι ανά τον κόσμο εγχώριες τηλεπικοινωνιακές αρχές μετά από εξέταση της τεχνολογίας των HAPs, την κατέταξαν στις υψηλής πυκνότητας σταθερές υπηρεσίες HDFS (high density fixed service), διευκρινίζοντας ότι κάνει χρήση σταθμών τοποθετημένων στη στρατόσφαιρα. Η υπηρεσία που παρέχεται από ένα HAP είναι πράγματι υψηλής πυκνότητας, λόγω του εξαιρετικά μεγάλου αριθμού τηλεπικοινωνιακών κυκλωμάτων που δύναται να εγκατασταθούν σε μια σχετικά μικρή αστική περιοχή. Ως σταθερή χαρακτηρίζεται εξαιτίας του γεγονότος ότι η πρόσβαση στους περισσότερους τερματικούς χρήστες γίνεται μέσω σταθερής κεραίας, αλλά και

επειδή το σύστημα δεν ικανοποιεί τον ορισμό των διαστημικών υπηρεσιών και επομένως πρέπει να θεωρηθεί επίγειο.

Σύμφωνα με τις αποφάσεις και τους κανονισμούς της ITU-R τα HAPs μπορούν να λειτουργούν στις παρακάτω ζώνες συχνοτήτων.

- 1885 – 1980 MHz, 2010 – 2025 MHz και 2110 – 2170 MHz στις περιοχές 1 και 3. Η ανάθεση των ζωνών αυτών δεν είναι αποκλειστική ούτε έχει προτεραιότητα έναντι σε άλλες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες.

- 1885 – 1980 MHz και 2110 – 2160 MHz στην περιοχή 2. Ομοίως η ανάθεση αυτή δεν είναι αποκλειστική ούτε με προτεραιότητα.

- 27.50 – 28.35 GHz για την προς τα κάτω ζεύξη (downlink) στο Μπουτάν, την Ινδονησία, την Ισλαμική Δημοκρατία του Ιράν, την Ιαπωνία, τις Μαλδίβες, τη Μογγολία, το Μυανμάρ, το Πακιστάν, τη Δημοκρατία της Κορέας, τη Σρι Λάνκα, την Ταϊλάνδη και το Βιετνάμ. Η λειτουργία των HAPs στις παραπάνω συχνότητες οφείλει να μην παρενοχλεί άλλες σταθερές υπηρεσίες (fixed service) ούτε και να διεκδικεί προστασία παρεμβολών από αυτές.

- 31.0 – 31.3 GHz για την προς τα άνω ζεύξη (uplink) στο Μπουτάν, την Ινδονησία, την Ισλαμική Δημοκρατία του Ιράν, την Ιαπωνία, τις Μαλδίβες, τη Μογγολία, το Μυανμάρ, το Πακιστάν, τη Δημοκρατία της Κορέας, τη Σρι Λάνκα, την Ταϊλάνδη και το Βιετνάμ. Και εδώ πρέπει να περιορίζονται οι παρεμβολές προς άλλα συστήματα σταθερών υπηρεσιών, ενώ δεν προβλέπεται αντίστοιχη προστασία για τα HAPs.

- 47.2 – 47.5 GHz για την προς τα κάτω ζεύξη (downlink) σε όλον τον κόσμο εκτός από τις χώρες όπου υπάρχει η ανάθεση 31.0 – 31.3 GHz.

- 47.9 – 48.2 GHz για την προς τα άνω ζεύξη (uplink) σε όλον τον κόσμο εκτός από τις χώρες όπου υπάρχει η ανάθεση 31.0 – 31.3 GHz.

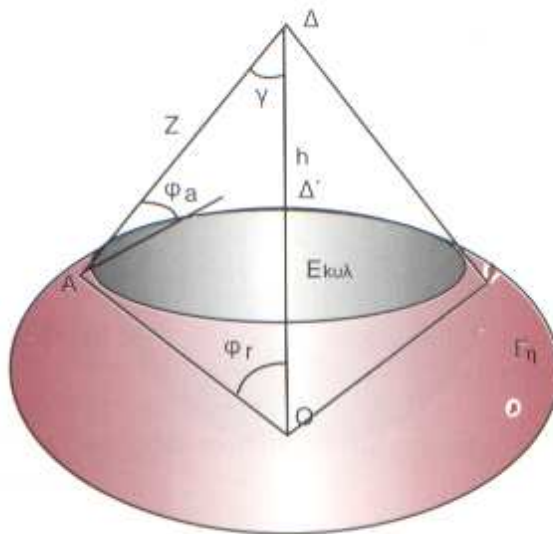
3.3.2 Περιοχές κάλυψης

Η επιφάνεια κάλυψης μιας στρατοσφαιρικής πλατφόρμας ορίζεται ως ο γεωμετρικός τόπος των σημείων πάνω στη γη απ' όπου η πλατφόρμα "φαίνεται" υπό γωνία ανύψωσης μεγαλύτερη μιας προκαθορισμένης τιμής ϕ_α . Εφαρμόζοντας το νόμο των ημιτόνων στο τρίγωνο ΟΑΔ του σχήματος 3.15, προκύπτει η σχέση που συνδέει τη γωνία ανύψωσης ϕ_α με την επίκεντρη γωνία κάλυψης ϕ_r . Με R συμβολίζουμε την ακτίνα της Γης που ισούται με 6378 km και με h το υψόμετρο που ίπταται το HAP (21 km ή 25 km). Η ακτίνα d της επιφάνειας κάλυψης υπολογίζεται έπειτα ως μήκος τόξου από τη σχέση $d = R \cdot \phi_r$ όταν η γωνία ϕ_r είναι εκφρασμένη σε ακτίνια ή $d = R \cdot \phi_r \cdot (\pi / 180)$ όταν η γωνία ϕ_r είναι εκφρασμένη σε μοίρες.

$$\gamma + \phi_r + (90^\circ + \phi_\alpha) = 180^\circ \Rightarrow \gamma = 90^\circ - \phi_\alpha - \phi_r \quad (3.1)$$

$$\frac{R}{\sin \gamma} = \frac{R+h}{\sin(90^\circ + \phi_\alpha)} \Rightarrow \phi_r = \arccos\left(\frac{R \cos \alpha}{R+h}\right) - \phi_\alpha \quad (3.2)$$

$$d = R \phi_r \left(\frac{\pi}{180}\right) \Rightarrow d = R \left[\arccos\left(\frac{R \cos \alpha}{R+h}\right) - \phi_\alpha \right] \frac{\pi}{180} \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.15: Επιφάνεια κάλυψης ενός HAP

Η συνολική περιοχή κάλυψης ενός HAP διαιρείται σύμφωνα με την ITU σε τρεις ζώνες. Η ύπαρξη των ζωνών αυτών εξασφαλίζει την παροχή ενιαίων και ομοιόμορφων ευρυζωνικών υπηρεσιών στην ευρεία περιοχή που κείται κάτω από την πλατφόρμα.

- Ζώνη αστικής κάλυψης UAC (Urban Area Coverage):** Οι γωνίες ανύψωσης των επίγειων σταθμών ως προς την πλατφόρμα κυμαίνονται μεταξύ 30° και 90° . Με εφαρμογή της σχέσης (3.3) προκύπτει ότι η περιοχή κάλυψης εκτείνεται έως τα 36 ή 43 km από ένα σημείο ακριβώς κάτω από την πλατφόρμα, για ύψος πτήσης 21 και 25 km αντίστοιχα. Οι χρήστες της αστικής ζώνης μπορούν να έχουν φορητές τερματικές συσκευές με εύρος δέσμης περίπου 11° ή κεραιές κέρδους 26 dBi και διαστάσεων 10 cm επί 10 cm. Τα τερματικά αυτά χρειάζονται κατά προσέγγιση 0.15 watt εκπεμπόμενης RF ισχύος. Οι κεραιές στον εναέριο σταθμό πρέπει να έχουν κέρδος 30 dBi (1 watt RF ισχύος ανά κανάλι).

- Ζώνη ημιαστικής κάλυψης SAC (Suburban Area Coverage):** Οι γωνίες ανύψωσης των επίγειων σταθμών είναι μεταξύ 15° και 30° . Η περιοχή κάλυψης στην περίπτωση αυτή εκτείνεται από τα όρια της ζώνης UAC έως τα 76.5 ή 90.5 km, για υψόμετρο λειτουργίας 21 και 25 km αντιστοίχως. Στα τερματικά απαραίτητη είναι η χρήση κατευθυντικών κεραιών υψηλότερου κέρδους (41 dBi) με ισχύ εκπομπής 0.2 watt. Οι ίδιες κεραιές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στις ζώνες UAC για σταθερή εγκατάσταση σε οροφές κτιρίων. Η εναέρια πλατφόρμα έχει όπως και πριν κεραιές

κέρδους 30 dBi.

➤ Ζώνη αγροτικής κάλυψης RAC (Rural Area Coverage): Οι γωνίες ανύψωσης κυμαίνονται από 5° ως 15° και η περιοχή κάλυψης υπολογίζεται ότι φτάνει από τα όρια της ζώνης SAC ως τα 203 ή 234 km, ανάλογα αν το HAP βρίσκεται στα 21 ή 25 km από την επιφάνεια της θάλασσας. Η αγροτική ζώνη αναμένεται να αφιερωθεί στην υψηλής ταχύτητας, σημείου προς σημείο πρόσβαση και στην ευρεία κάλυψη περιοχών κάνοντας χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων, μεταξύ 800 MHz και 5 GHz, καθώς η εξασθένηση που προκαλείται από τη βροχή και άλλα ατμοσφαιρικά φαινόμενα στα 47 / 48 GHz είναι πολύ μεγάλη.

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των τριών ζωνών της περιοχής κάλυψης ενός HAP.

Πίνακας 3.1: Ζώνες κάλυψης

Περιοχή κάλυψης	Γωνία ανύψωσης (°)	Ακτίνα στο έδαφος (km)	
		Πλατφόρμα στα 21 km	Πλατφόρμα στα 25 km
UAC	90 – 30	0 – 36	0 – 43
SAC	30 – 15	36 – 76.5	43 – 90.5
RAC	15 – 5	76.5 – 203	90.5 – 234

Οι παραπάνω περιοχές κάλυψης επιτυγχάνονται με τη χρήση στοιχειοκεραιών που έχουν προσθήκη πολωτή για την εξασφάλιση της κατάλληλης απομόνωσης διασταύρωσης πόλωσης ΧΡΙ (cross – polarization isolation). Οι στοιχειοκεραίες αυτές εκπέμπουν 700 δέσμες σε κάθε μια από τις UAC και SAC ζώνες, ενώ παρέχουν επιλεκτική κάλυψη της ζώνης RAC με 700 το πολύ δέσμες. Η διαμορφούμενη κυβελωτή δομή έχει συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνότητας 7.

3.3.3 Διαμόρφωση και κωδικοποίηση

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η φασματική επίδοση κατά τη λειτουργία ενός συστήματος στρατοσφαιρικών υπηρεσιών, εφαρμόζεται ένα σχήμα δυναμικής κατανομής πολλαπλής πρόσβασης DAMA (dynamic assignment multiple access) που επιτρέπει στους χρήστες να μοιράζονται αποδοτικά το διατιθέμενο φάσμα. Πάνω στην πλατφόρμα υπάρχουν διακόπτες ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς ATM (asynchronous transfer mode switches) και ATM πολυπλέκτες που πολυπλέκουν

στατιστικά την κίνηση των χρηστών. Τόσο η πάνω όσο και η κάτω ζεύξη χρησιμοποιούν QPSK διαμόρφωση και κωδικοποίηση πρόσθιας διόρθωσης λαθών FEC (forward error correction) ρυθμού 0.6. (Reed Solomon + ρυθμού 2/3 συνελικτικός κώδικας με μήκος 9). Κωδικοποίηση επίσης χρησιμοποιείται για να μετριασθούν οι ριπές λαθών. Χάρη στην αποδοτική κατανομή του εύρους ζώνης και τις μικρές απαιτήσεις των περισσότερων μορφών ευρυζωνικής κίνησης, 110.560 περίπου χρήστες αναμένεται να επιτυγχάνουν μια μέγιστη προς τα άνω ταχύτητα 2.048 Mbps και προς τα κάτω ταχύτητα 11.24 Mbps έχοντας στη διάθεσή τους μόλις 2 ζώνες συχνοτήτων των 100 MHz. Υποθέτοντας ότι κατά μέσο όρο ένα 10% των συνδρομητών είναι ενεργό, φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι ένα δίκτυο από HAP (HAPN, High Altitude Platform Network) μπορεί να υποστηρίξει πληθυσμό ενός εκατομμυρίου χρηστών έχοντας 2 x 100 MHz διαθέσιμο εύρος. Αν το εύρος των διαύλων αυξηθεί σε 300 MHz ανά κατεύθυνση, ο αντίστοιχος αριθμός των συνδρομητών ενός και μόνο δικτύου αγγίζει τα 5.000.000.

Το σύστημα περιλαμβάνει ακόμα πολλούς σταθμούς – πύλες στο έδαφος (gateway ground stations) οι οποίοι κάνουν χρήση υψηλής ταχύτητας, σύγχρονης, πολυπλεγμένης διαίρεσης χρόνου TDM (time division multiplexed) ανά ζεύξη για κίνηση τροφοδοσίας που αλληλοσυνδέει το δίκτυο HAPN (HAP Network) με το δημόσιο τηλεφωνικό μεταγωγικό δίκτυο PSTN (Public Switched Telephone Network) και το Internet. Οι ζεύξεις που αφορούν την τροφοδοσία έχουν ταχύτητα μέχρι 0.72 Gbps για μια κατανομή συχνοτήτων 300/300 MHz. Η διαμόρφωση στην περίπτωση αυτή είναι 64-QAM και η κωδικοποίηση FEC ρυθμού 0.71, ώστε να βελτιστοποιείται το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπρόσθετες σημεία προς σημείο ζεύξεις μεγάλης ταχύτητας ενδεχομένως να παρασχεθούν σε συλλογικούς χρήστες και προμηθευτές υπηρεσιών.

3.3.4 Χαρακτηριστικά εναέριας πλατφόρμας

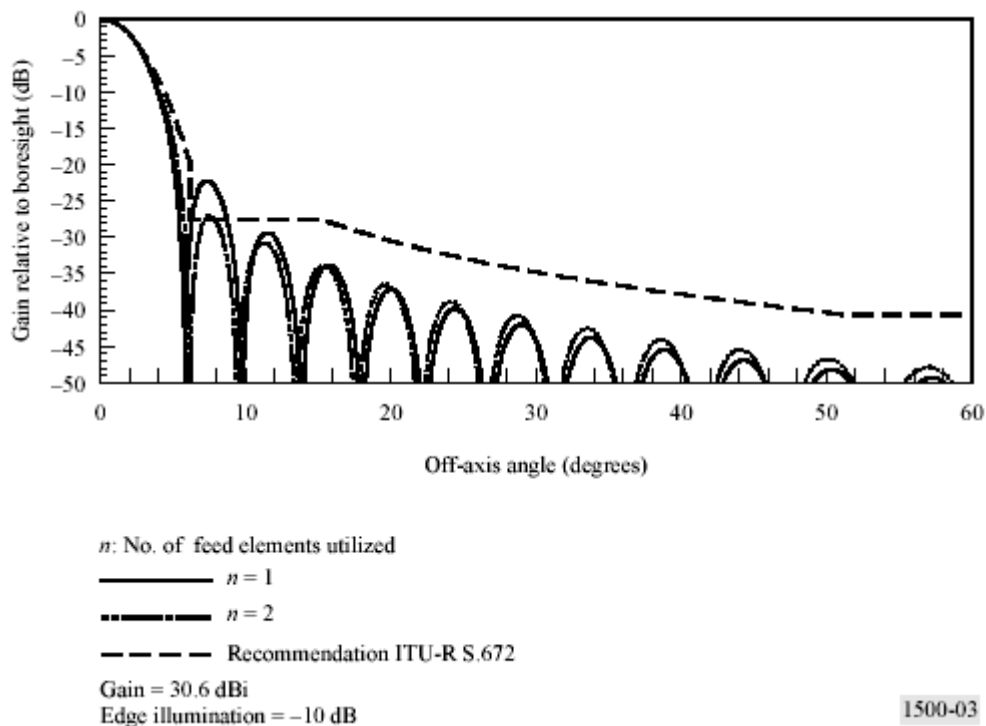
Οι επικοινωνίες με τα τερματικά των χρηστών χρησιμοποιούν TDM 4-PSK διαμόρφωση και εύρος ζώνης 11 MHz στην κατερχόμενη ζεύξη και 2.2 MHz στην ανερχόμενη ζεύξη. Οι επικοινωνίες με σταθμούς – πύλες χρησιμοποιούν υψηλού επιπέδου 64-QAM διαμόρφωση με εύρος 88 MHz (11 MHz ανά φέρον). Και στις δυο περιπτώσεις υποθέτουμε δυνατότητα χρήσης συχνοτήτων 2 x 100 MHz. Αν ωστόσο είχαμε στη διάθεσή μας φάσμα 2 x 300 MHz, θα ήταν δυνατό τα τερματικά να επικοινωνήσουν με το HAP με ένα εύρος 33 MHz για την προς τα κάτω ζεύξη.

Τυπικά χαρακτηριστικά για την εκπομπή και τις κεραιές του εναέριου σταθμού δίνονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Παράμετροι εκπομπής πλατφόρμας

Επικοινωνία προς	Ισχύς εκπομπής (dBW)	Μέγιστο κέρδος κεραιάς (dBi)
UAC	1.3	30
SAC	1.3	30
RAC	3.5	41
Gateway (UAC)	0	35
Gateway (SAC)	9.7	38

Το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών της πλατφόρμας, όπως ορίζεται στο Recommendation ITU-R S.672, φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.16: Σύγκριση ανάμεσα στο διάγραμμα ακτινοβολίας κεραιάς εναέριου σταθμού HAP (Recommendation ITU-R S.672) και θεωρητικού διαγράμματος κεραιάς κυκλικού ανοίγματος φωτιζόμενης από ανυψωμένη παραβολική συνάρτηση με βάση -10 dB

3.3.5 Χαρακτηριστικά επίγειων σταθμών

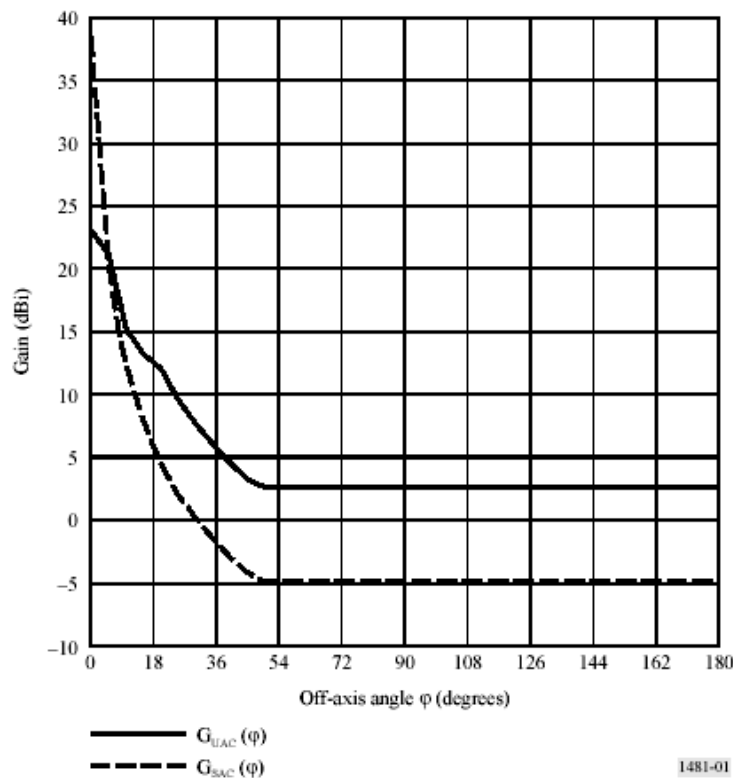
Οι αντίστοιχες παράμετροι για όλους τους επίγειους σταθμούς δίνονται

στον πίνακα 3.3. Στην προς τα άνω κατεύθυνση τα τερματικά των χρηστών κάνουν χρήση demand assigned multicarrier TDMA με QPSK διαμόρφωση, ενώ οι πύλες υιοθετούν παρόμοιες τεχνικές με αυτές της πλατφόρμας.

Πίνακας 3.3: Παράμετροι εκπομπής επίγειων σταθμών

Επικοινωνία προς	Ισχύς εκπομπής (dBW)	Μέγιστο κέρδος κεραίας (dBi)
UAC	- 8.2	23
SAC	- 7	38
RAC	- 1.5	38
Gateway (UAC)	1.7	46
Gateway (SAC)	13.4	46

Σύμφωνα με το Recommendation ITU-R F.699, το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών εκπομπής των επίγειων σταθμών για τις ζώνες UAC και SAC σε ένα δίκτυο HAPN μπορεί να περιγραφεί από το ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.17: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας εκπομπής επίγειου σταθμού HAP (Recommendation ITU-R F.699)

3.3.6 Παράμετροι εκπομπής συστήματος

Το σχέδιο λειτουργίας των συχνοτήτων σε ένα σύστημα σταθμών HAP εξαρτάται από τις ιδιαίτερες ανάγκες και απαιτήσεις κάθε περιοχής εξυπηρέτησης. Ανάλογα με τα στοιχεία αυτά διαμορφώνεται το διατιθέμενο εύρος ζώνης στην πλατφόρμα και τα επίγεια τερματικά της.

Ένα απομονωμένο σύστημα σταθμών HAP, στην ευρύτερη περιοχή του οποίου δε βρίσκονται άλλα τέτοια συστήματα, ενδέχεται να εκμεταλλεύεται όλο το εύρος ζώνης των 2 x 300 MHz αν ο αριθμός των συνδρομητών το απαιτεί.

Ένα καταλληλότερο σενάριο παροχής στρατοσφαιρικών υπηρεσιών σε μια μεγάλη περιοχή είναι η ανύψωση πολλών HAP σε ισόπλευρο σχηματισμό. Οι πλατφόρμες λειτουργούν αναχρησιμοποιώντας τρεις φορές τις συχνότητες, δηλαδή καταλαμβάνοντας 2 x 100 MHz η καθεμία.

Φυσικά, διαφορετικά σενάρια αρμόζουν σε διαφορετικά περιβάλλοντα και δεδομένα ζήτησης των χρηστών.

Ως παράδειγμα θεωρούμε τη χρήση δυο ζωνών συχνοτήτων των 100 MHz από μια πλατφόρμα. Υποθέτοντας 2 Mbps ρυθμό καταιγιστικής πληροφορίας από τα επίγεια τερματικά, ύπαρξη κωδικοποίησης και άλλων πάγιων επιβαρύνσεων και λειτουργία σχήματος επαναχρησιμοποίησης με συντελεστή 7, τα 100 MHz διαιρούνται σε 7 σχισμές των 11 MHz και μια ζώνη guardband των 23 MHz. Κάθε σχισμή μπορεί να υποστηρίξει έναν χρήστη με πλήρη καταιγιστικό ρυθμό στην κατερχόμενη ζεύξη και με ένα πέμπτο του καταιγιστικού ρυθμού σε ανερχόμενη ζεύξη με συντελεστή διαυλοποίησης 5. Η τεχνική της διαυλοποίησης μειώνει το λόγο της καταιγιστικής ισχύος προς τη μέση ισχύ των τερματικών, μειώνοντας έτσι το κόστος των τελευταίων. Αν όλες οι πλατφόρμες λειτουργούν για τον ίδιο παροχέα υπηρεσιών, οι guardband ζώνες δεν είναι απαραίτητες.

Κάθε μια από τις σχισμές των 11 MHz μπορεί να εξυπηρετήσει έως 10 χρήστες υψηλών ταχυτήτων, αριθμός βέβαια που εξαρτάται από τη μέση δραστηριότητα ενός τυπικού χρήστη. Οι παρεχόμενοι μέσοι ρυθμοί δεδομένων είναι μεγαλύτεροι από 1 Mbps, ενώ καταιγιστικά φτάνουν τα 10 Mbps στην κάτω ζεύξη και τα 2 Mbps στην άνω ζεύξη. Η αποδοτική κατανομή χρόνου μεταξύ των χρηστών διασφαλίζεται από ένα σχήμα γρήγορης ζήτησης ανάθεσης πολλαπλής πρόσβασης (fast demand assignment multiple access scheme) που δυναμικά

επανακατανέμει τους διαύλους χρηστών κάθε 20 msec.

Ένα σύνολο από 700 κυψέλες υπάρχει στο εσωτερικό των ζωνών UAC, SAC και RAC. Κατά συνέπεια στη ζώνη UAC η πυκνότητα ισχύος από τα τερματικά των χρηστών είναι -8.2dB(W/2MHz) , πολλαπλασιαζόμενη επί 100 επαναχρησιμοποιήσεις συχνοτήτων και τροποποιούμενη σύμφωνα με το διάγραμμα ακτινοβολίας των πλευρικών λοβών των τερματικών. Στη ζώνη SAC η παραπάνω ποσότητα είναι -7.0dB(W/2MHz) επί 100 και στη ζώνη RAC το πολύ -1.55dB(W/2MHz) επί 100.

Για την υποστήριξη της κίνησης των χρηστών που συγκεντρώνεται στις ζώνες UAC και SAC είναι αναγκαία η ύπαρξη 20 σταθμών – πυλών (gateway stations). Οι παραπάνω πύλες λειτουργούν με 64-QAM διαμόρφωση σε εύρος ζώνης 88 MHz (100 MHz μείον 12 MHz) και έχουν πυκνότητα ισχύος -8dB(W/2MHz) στις αστικές περιοχές και 4dB(W/2MHz) στις ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Αν εξαιρέσουμε την κωδικοποίηση FEC, την πλαισίωση και άλλες πάγιες επιβαρύνσεις, η διαμόρφωση 64-QAM μπορεί να παρέχει χωρητικότητα φάσματος 4bps/Hz ή 352 Mbps ανά πύλη. Έτσι 20 πύλες σε κάθε ζώνη οδηγούν σε απόδοση πυλών 14.8 Gbps, ήτοι 60% της κίνησης που είναι δυνατό να υποστηρίξει το σύστημα.

Οι εκπομπές από την πλατφόρμα κάνουν χρήση όλου του διαθέσιμου εύρους ζώνης στηριζόμενες σε σχήματα διαμερισμού χρόνου και συχνότητας και παράγουν κατά μέσο όρο πυκνότητα ισχύος 20.6dB(W/11MHz) . Πιο συγκεκριμένα η πυκνότητα ισχύος για ζεύξεις χρηστών είναι 0dB(W/11MHz) στις ζώνες UAC και SAC και 2.2dB(W/11MHz) στη ζώνη RAC. Για ζεύξεις προς τις πύλες η πυκνότητα ισχύος υπολογίζεται 0dB(W/11MHz) στη ζώνη UAC και 9.7dB(W/11MHz) στη ζώνη SAC. Η συνολική RF ισχύς της πλατφόρμας είναι περίπου 10 kW.

3.3.7 Παράδειγμα προϋπολογισμού ζεύξης

Στη συνέχεια παρατίθεται ένα παράδειγμα υπολογισμού του λεγόμενου link budget μιας αντιπροσωπευτικής ζεύξης. Τα κέρδη της κεραίας της πλατφόρμας για τους τερματικούς χρήστες αναφέρονται στα άκρα των κυψελών, όντας 3 dB κάτω από τη μέγιστη τιμή τους. Ο απαιτούμενος λόγος $E_b/(N_0 + I_0)$ στηρίζεται στην QPSK

διαμόρφωση με συνελκτικό κώδικα ρυθμού 2/3 και $k=7$ που εξασφαλίζει ρυθμό λανθασμένων bit BER (bit error rate) χαμηλότερο από 10^{-7} . Οι ρυθμοί πληροφορίας των χρηστών λαμβάνουν υπόψη επιβαρύνσεις από τα πλαίσια και τις επικεφαλίδες ATM. Οι τιμές για την εξασθένηση λόγω βροχής βασίζονται σε στατιστικά δεδομένα της κλιματικής ζώνης Κ με διαθεσιμότητα πάνω από 99.5%. Τέλος, ο λόγος κέρδους προς θερμοκρασία θορύβου στο δέκτη G/T υπολογίζεται με θερμοκρασία θορύβου 900 K για τα τερματικά και τις πύλες και 500 K για την πλατφόρμα.

Πίνακας 3.4: Ζεύξεις τερματικών

	UAC	UAC	SAC	SAC	RAC	RAC
	TDM down	FDMA up	TDM down	FDMA up	TDM down	FDMA up
Frequency (GHz)	47.0	48.0	47.0	48.0	47.0	48.0
Bandwidth (MHz)	11.0	2.0	11.0	2.0	11.0	2.0
Tx power (dBW)	1.3	-8.2	1.3	-7.0	3.5	-1.5
Antenna gain (dBi)	27.0	23.0	27.0	38.0	38.0	38.0
Hybrid (H)/waveguide (W) loss (dB)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
e.i.r.p. (dBW)	27.8	14.3	27.8	30.6	41.0	36.1
Slant range (km)	42.0	42.0	81.1	81.1	240.9	240.9
Free space loss (dB)	158.3	158.5	164.1	164.3	173.5	173.7
Atmospheric loss (dB)	2.3	2.8	5.2	5.8	6.3	7.7
Rain attenuation (dB)	11.2	11.2	14.8	14.9	20.2	22.4
pfd on the ground (dB(W/(m ² · MHz))	-99.6	-	-111.8	-	-114.5	-
Receiver G/T (dB(K ⁻¹))	-6.5	0.0	8.5	0.0	8.5	11.1
Polarisation loss (dB)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Boltzmann constant (dB(W/K))	-228.6	-228.6	-228.6	-228.6	-228.6	-228.6
Bit rate (dB(Hz))	70.0	63.1	70.0	63.1	70.0	63.1
$E_b/(N_0 + I_0)$ ($I = 0$) (dB)	7.5	6.8	10.3	10.6	7.6	8.3
Required $E_b/(N_0 + I_0)$ (dB)	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1
Margin (dB)	1.4	0.7	4.2	4.5	1.5	2.2

Για τις ζεύξεις με σταθμούς – πύλες απαιτείται προσαρμοζόμενος έλεγχος ισχύος για την καταπολέμηση της εξασθένησης από τη βροχή. Έτσι οι ενισχυτές ισχύος των gateways έχουν δυνατότητα αύξησης της ισχύος τους έως 4 dB για τις ζεύξεις που υποφέρουν από βροχόπτωση, προκαλώντας ένα κέρδος ελέγχου ισχύος

4 dB. Οι ρυθμοί που επιτυγχάνονται είναι 44 Mbps ανά φέρον. Ο απαιτούμενος λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή $E_b/(N_0 + I_0)$ στηρίζεται στην 64-QAM διαμόρφωση με συνελκτικό κώδικα ρυθμού 4/5 και k=9 συνδυασμένο με υψηλού ρυθμού εξωτερικό κώδικα Reed Solomon ώστε να επιτευχθεί ρυθμός λανθασμένων bit BER το πολύ 10^{-10} .

Πίνακας 3.5: Ζεύξεις πυλών (gateways)

	UAC	UAC	SAC	SAC
	TDM down (per carrier)	TDM up (per carrier)	TDM down (per carrier)	FDMA up (per carrier)
Frequency (GHz)	47.0	48.0	47.0	48.0
Bandwidth (MHz)	11.0	11.0	11.0	11.0
Tx power (dBW)	0.0	1.7	9.7	13.4
Antenna gain (dBi)	35.0	46.0	38.0	46.0
H/W loss (dB)	8.5	8.5	8.5	8.5
e.i.r.p. (dBW)	26.5	39.3	39.2	50.9
Slant range (km)	42.0	42.0	81.1	81.1
Free space loss (dB)	158.3	158.5	164.1	164.3
Atmospheric loss (dB)	2.3	2.8	5.2	5.8
Rain attenuation (dB)	11.2	11.2	14.8	14.9
Power control gain (dB)	4.0	4.0	4.0	4.0
pdf on the ground (dB(W/m ² · MHz))	-96.8	-	-96.4	-
Receiver G/T (dB(K ⁻¹))	16.5	5.5	16.5	8.5
Polarization loss (dB)	0.5	0.5	0.5	0.5
Boltzmann constant (dB(W/K))	-228.6	-228.6	-228.6	-228.6
Bit rate (dB(Hz))	76.4	76.4	76.4	76.4
$E_b/(N_0 + I_0)$ ($I = 0$) (dB)	26.8	27.9	27.3	30.1
Required $E_b/(N_0 + I_0)$ (dB)	20.3	20.3	20.3	20.3
Margin (dB)	6.5	7.6	7.0	9.8

3.4 Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 3

- [1] 2001 G.M.DJUKNIC, J.FREIDENFELDS, Y.OKUNEV, "Establishing Wireless Communications Services via High-Altitude Aeronautical Platforms: A Concept Whose Time Has Come?", IEEE Communications Magazine, pp. 128-135, September 1997
- [2] J.THORNTON, D.GRACE, C.SPILLARD, T.KONEFAL and T.C.TOZER, "Broadband communications from a high-altitude platform: the European Helinet programme", Electronics & Communication Engineering Journal, pp. 138-144, June 2001
- [3] T.C.TOZER and D.GRACE, "High-altitude platforms for wireless communications", Electronics & Communication Engineering Journal, pp. 127-137, June 2001
- [4] T.C.TOZER & D.GRACE, "HeliNet – The European Solar-Powered HAP Project"
- [5] T.C.TOZER & D.GRACE, "Broadband Service Delivery from High Altitude Platforms"
- [6] D.GRACE, T.C.TOZER, N.E.DALY, "Communications from High Altitude Platforms – A European Perspective", 2nd Stratospheric Platforms System Workshop, Japan, September 2000
- [7] D.GRACE, T.C.TOZER, N.E.DALY, "Communications from high altitude platforms – a complementary or disruptive technology?", IEE Colloquium "New Access Network Technologies", October 2000
- [8] T.C.TOZER, D.GRACE, J.THOMPSON, P.BAYNHAM, "UAVs and HAPs – Potential Convergence for Military Communications", IEE Colloquium on "Military Satellite Communications", June 2000
- [9] D.GRACE, N.E.DALY, T.C.TOZER, A.G.BURR, "LMDS from High Altitude Aeronautical Platforms", IEEE GLOBECOM '99, Brazil, December 1999
- [10] ITU-D STUDY GROUP 2, "High Altitude Platform Station: an opportunity to close the information gap", Document 2/202(Rev.1), April 2001
- [11] OFCOM Office federal de la communication, "HAPS – High Altitude Platform Stations"
- [12] AeroVironment, SkyTower www.aerovironment.com
- [13] Angel Technologies www.angelhalo.com
- [14] Advanced Technologies Group www.airship.com
- [15] Yokosuka Radio Communications Research Center, Communications Research Laboratory, Wireless Innovation Systems Group www2.crl.go.jp/mt/b181/index-e.html

- [16] Research & Technology Centre for the European Space Agency ESA
www.estec.esa.nl/halewww/www/hale.htm
- [17] Sky Station International www.skystation.com
- [18] Telecommunications Advancement Organization of Japan TAO
www.yrp.tao.go.jp/ENG/Default.htm
- [19] SkyLARC Technologies www.skylarc.com
- [20] University of York, Communications Research Group
www.elec.york.ac.uk/comms/haps.html
- [21] Unmanned AV's www.army-technology.com
- [22] ITU Resolution 221 (WRC 2000) "Use of high altitude platform stations providing IMT-2000 in the bands 1885-1980 MHz, 2010-2025 MHz and 2110-2170 MHz in Regions 1 and 3 and 1885-1980 MHz and 2110-2160 MHz in Region 2"
- [23] ITU Resolution 122 (WRC 1997, Rev.WRC 2000) "Use of the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz by high altitude platform stations (HAPS) in the fixed service and by other services and the potential use of bands in the range 18-32 GHz by HAPS in the fixed service"
- [24] Radio Regulations, Edition 2001, Volume 1, Chapter II, Article 5, Section IV – Table of Frequency Allocations, 5.388A, 5.537A, 5.543A, 5.552A
- [25] Recommendation ITU-R F.1500 "Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz"
- [26] Recommendation ITU-R SF.1481-1 "Frequency sharing between systems in the fixed service using high-altitude platform stations and satellite systems in the geostationary orbit in the fixed-satellite service in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz"
- [27] Recommendation ITU-R F.1570 "Impact of uplink transmission in the fixed service using high altitude platform stations on the Earth exploration-satellite service (passive) in the 31.3-31.8 GHz band"
- [28] Δορυφορικές Επικοινωνίες, Χ.Καψάλης – Π.Κωπτής

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογές και υπηρεσίες

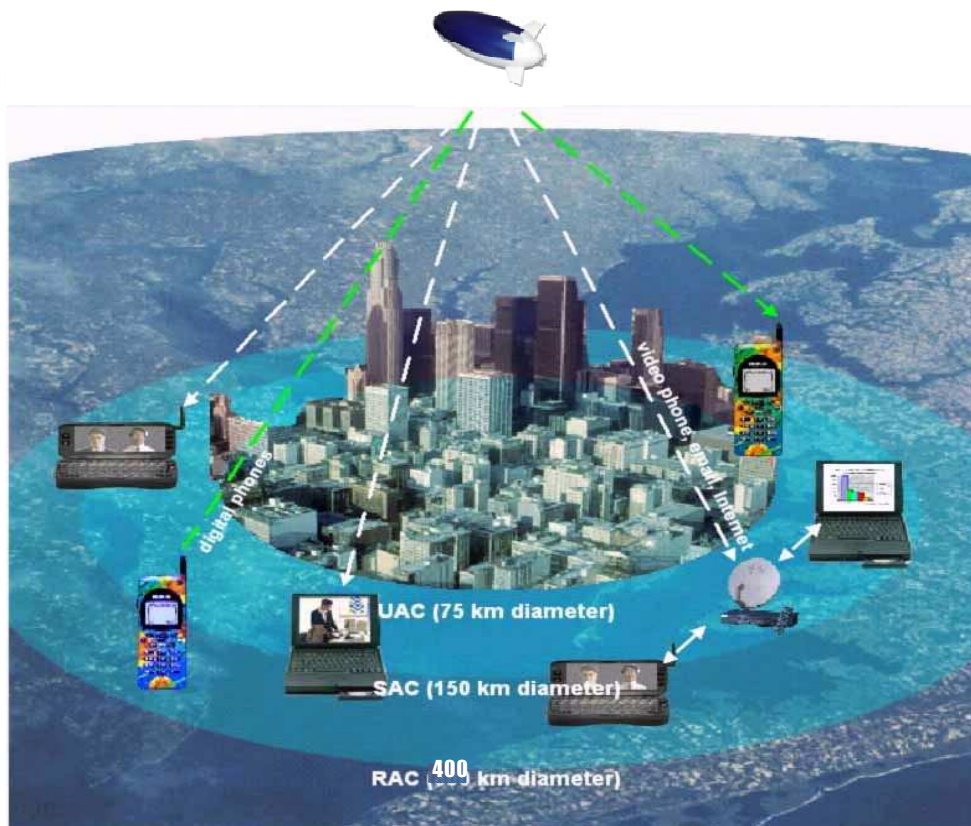
4.1 Εισαγωγή

Η καινούργια ιδέα της τεχνολογίας των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων έχει προταθεί ως μια εναλλακτική λύση που θα μπορούσε να συμπληρώσει τις προοπτικές και δυνατότητες που παρέχονται από τα υπάρχοντα δορυφορικά συστήματα. Πρόκειται για πλατφόρμες χαμηλού κόστους, με δυνατότητα εύκολης μετακίνησης, με δυνατότητα προσγείωσης και προσωρινής διακοπής της λειτουργίας τους όταν απαιτείται επιδιόρθωση ή αναβάθμιση των λειτουργικών τμημάτων της, με δυνατότητα εύκολης ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές στις οποίες παρουσιάζεται ένα έκτακτο περιστατικό και επιπρόσθετα με την ικανότητα παρακολούθησης υψηλής ανάλυσης τόσο χωρικής όσο και χρονικής.

4.1.1 Επικοινωνίες ευρείας ζώνης

Η τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία με την οποία είναι σχεδιασμένα τα HAPs είναι ικανή να παρέχει πλήρως αμφίδρομα ψηφιακά κανάλια από τα 14.4 kbps ως τα 155 Mbps. Σε αυτές τις ταχύτητες οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες έχουν τη δυνατότητα να συνδυάζουν πολλές υπηρεσίες και να τις διανέμουν σε multimedia τερματικά χειρός, τερματικά WLL (wireless local loop) και σταθερά ασύρματα δίκτυα.

Στους ρυθμούς των 14.4 kbps προσφέρονται υπηρεσίες ψηφιακής τηλεφωνίας, fax και ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail). Δυνατή είναι η παροχή ζεύξεων υποστήριξης (backhaul links) από μια πλατφόρμα σε χιλιάδες νανο - σταθμούς βάσης που βασίζονται στην τεχνολογία Bluetooth και λειτουργούν ως κεντρικά σημεία του τηλεφωνικού συστήματος DECT (Digital Enhanced Cordless Terminal).



Σχήμα 4.1: Υψηλής ταχύτητας ασύρματη επικοινωνία και πρόσβαση στο internet μέσω ενός HAP

Από τα 64 έως τα 384 kbps παρέχονται υπηρεσίες βιντεο - τηλεφωνίας πλήρους κίνησης μεταξύ συνδρομητών που βρίσκονται στην ίδια περιοχή κάλυψης. Τούτο επιτυγχάνεται είτε μέσω μιας συσκευής στρατοσφαιρικής πρόσβασης, είτε μέσω μιας τηλεφωνικής υπηρεσίας τρίτης γενιάς (UMTS ή WCDMA), είτε με τη βοήθεια ενός PC ή PDA (personal digital assistant) που κάνει χρήση Bluetooth.

Η υψηλής ταχύτητας δικτυακή πλοήγηση (web surfing), η δικτυακή τηλεόραση και οι μεταφορές μεγάλων αρχείων είναι κάποιες από τις υπηρεσίες που υποστηρίζονται στα 128 kbps με 45 Mbps. Οι χρήστες μπορούν να απολαμβάνουν συνδέσεις υψηλών ταχυτήτων για πρόσβαση στο Internet και σε βάσεις δεδομένων όπως ο Παγκόσμιος Ιστός WWW (World Wide Web).

Εφικτή είναι ακόμα η εγκατάσταση διαύλων OC-3 LAN, MAN και WAN σε ρυθμούς που φτάνουν τα 155 Mbps. Η ταχεία, πραγματικού χρόνου, υπό ζήτηση

ανάθεση δεσμών FRODBA (fast realtime on demand beam allocation) επιτρέπει τη δημιουργία ευρυζωνικών ασύρματων δικτύων WLAN (wireless LAN) ή Wi-Fi (wireless fidelity). Η εναέρια πλατφόρμα μπορεί να συνδέσει απομακρυσμένα LANs (Local Area Networks) σε ένα intranet άμεσα μέσω LAN γεφυρών και δρομολογητών.

Άλλες σημαντικές υπηρεσίες είναι η εκπομπή προς το ευρύ κοινό (broadcasting) ψηφιακής ή αλληλοδραστικής (interactive) τηλεόρασης, το βίντεο υπό αίτηση VOD (video on demand), η τηλεδιάσκεψη και μια πληθώρα multimedia εφαρμογών που συνδυάζουν συμπιεσμένη φωνή, εικόνα, δεδομένα και βίντεο. Το βασικότερο πλεονέκτημα σε όλες τις εφαρμογές αποτελεί η δυναμική παροχή εύρους ζώνης όποτε και όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο (bandwidth on demand).

Οι ευρυζωνικές υπηρεσίες που παρέχονται από τη στρατόσφαιρα απευθύνονται τόσο στις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις SME (small and medium enterprises) όσο και σε οικιακούς χρήστες. Με τα HAPs δίνεται η δυνατότητα στις εταιρείες που χρησιμοποιούν LANs ή intranets να επεκτείνουν τα δίκτυά τους ως τα σπίτια των υπαλλήλων, τα περιφερειακά γραφεία, τους προμηθευτές και τους πελάτες τους. Οι καταναλωτές μπορούν να αποκτήσουν άμεση και οικονομική πρόσβαση στο Internet, σε ψυχαγωγικές υπηρεσίες και υπηρεσίες ηλεκτρονικού εμπορίου. Στους συνδρομητές αναμένεται να συγκαταλέγονται και άλλοι φορείς, όπως νοσοκομεία και εκπαιδευτικά ιδρύματα που κάνουν χρήση εφαρμογών τηλε-ιατρικής και τηλε-εκπαίδευσης αντίστοιχα.

4.1.2 Κινητές επικοινωνίες

Εξίσου σημαντική είναι η προοπτική της λειτουργίας κινητών κυψελωτών υπηρεσιών 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς που βασίζονται σε στρατοσφαιρικές μεταδόσεις. Ήδη το πρότυπο της ITU για τις 3^{ης} γενιάς κινητές υπηρεσίες (IMT-2000) έχει εξουσιοδοτήσει τη χρήση των HAPs ως σταθμών βάσης. Στις αραιοκατοικημένες περιοχές μια πλατφόρμα με κεραία μεγάλου εύρους δέσμης μπορεί να εξυπηρετήσει μια ευρεία γεωγραφική έκταση. Εναλλακτικά πολλές μικρότερες κυψέλες που σχηματίζονται από κατευθυντικές κεραίες μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες σε περιορισμένες περιοχές με αυξημένη πυκνότητα κινητών χρηστών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται τόσο η ελαχιστοποίηση των επίγειων εγκαταστάσεων όσο και η σχεδόν χωρίς εμπόδια διαδρομή του σήματος λόγω του μεγάλου ύψους των σταθμών βάσης.

Χάρη στις φυσικές τους διαστάσεις τα HAPs έχουν την ικανότητα να κουβαλούν διατάξεις στοιχειοκεραιών που φτάνουν τα 15 m επί 15 m, παρέχοντας πολυάριθμες σημειακές δέσμες στην επιφάνεια κάλυψης. Η συμβατική δομή κυματοδηγού που είναι ογκώδης και βαριά ενδέχεται να αντικατασταθεί από μια δομή τροφοδοσίας μέσω οπτικών ινών. Η ίνα DM/RF (directly modulated) χρησιμοποιεί το σήμα RF για να διαμορφώσει την έξοδο μιας διόδου laser, στη συνέχεια το σήμα RF μετατρέπεται σε αναλογικό οπτικό σήμα και μεταδίδεται μέσω μονορρυθμικής ίνας. Περισσότερα από ένα σήματα μπορούν να μεταδοθούν μέσα από μια ίνα με τεχνικές DWDM.

Στα τρίτης γενιάς κινητά συστήματα πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης χρόνου TDMA (time division multiple access) τα HAPs βελτιώνουν την ενδοκυψελική παρεμβολή. Στα αντίστοιχα συστήματα διαίρεσης κώδικα CDMA (code division multiple access) όπως το DS-CDMA ή το MC-CDMA η ποιότητα της ζεύξης βελτιώνεται περαιτέρω από διαδικασίες ήπιων διαπομπών ανάμεσα σε πλατφόρμες και επίγειους σταθμούς βάσης. Έτσι ελαττώνεται η ενδοκυψελική παρεμβολή και η παρεμβολή από γειτονικές κυψέλες, με αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.

4.1.3 Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση αποτελεί μια τεχνική συλλογής, από απόσταση, πληροφοριών για τους πόρους της γήινης επιφάνειας. Βασίζεται στην ανάλυση εικόνων που έχουν ληφθεί σε διάφορα μήκη κύματος από όργανα εναέριων παρατηρήσεων σε αεροπλάνα ή δορυφόρους. Ο τρόπος με τον οποίο ένα σημείο στην επιφάνεια της γης ανακλά ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το ποσοστό υγρασίας, την παρουσία ή απουσία βλάστησης, τις ιδιότητες των επιφανειακών πετρωμάτων και άλλα χαρακτηριστικά του δεδομένου σημείου. Η τηλεπισκόπηση συνίσταται στην καταγραφή αυτών των εκπνευμένων ή ανακλώμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και στην εν συνεχεία ανάλυσή τους με σκοπό τον προσδιορισμό της επίγειας μορφολογίας.

Τα HAPs έχουν τη δυνατότητα συλλογής πληροφοριών από ενσωματωμένους αισθητήρες, ενώ ενδέχεται να υποστηρίζουν την επεξεργασία των περιβαλλοντικών δεδομένων στον αέρα. Συγκεκριμένα το οπτικό ωφέλιμο φορτίο της πλατφόρμας εφαρμόζει ευφείς αλγορίθμους επεξεργασίας στις εικόνες που συλλέγονται. Οι

αλγόριθμοι αυτοί περιλαμβάνουν καταγραφή των εικόνων, αύξηση της ανάλυσης, αποκατάσταση της θολότητας, κατάτμηση και συμπίεση, και εν τέλει αποδοτική χρήση της προς τα κάτω ζεύξης για τη μεταφορά των δεδομένων στους επίγειους δέκτες.

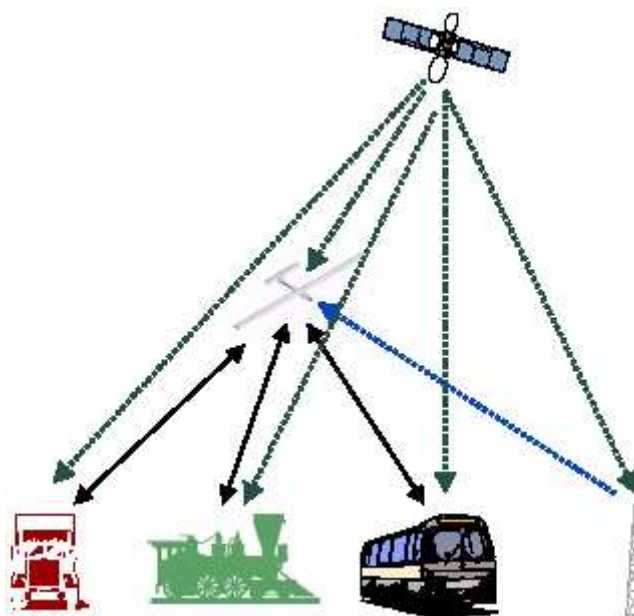
Η παρακολούθηση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος σε περιοχές ξηράς και θάλασσας αλλά και στην ίδια τη στρατόσφαιρα από τα HAPs επιτρέπει την εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων και προβλέψεων που αφορούν τις παγκόσμιες κλιματολογικές αλλαγές. Από την άλλη μεριά η συνεχής παρακολούθηση μιας συγκεκριμένης περιοχής συμβάλλει στον εκσυγχρονισμό τομέων όπως η γεωργία, η δασοπονία και η αλιεία, παρέχοντας σε αυτούς εξελιγμένες εφαρμογές. Εφικτή είναι η διαχείριση μεγάλων γεωργικών εκτάσεων, δασών, υδάτινων πόρων και παράκτιων ζωνών, η απογραφή δασών και υδροτόπων, η παρακολούθηση των καλλιεργούμενων προϊόντων, ο ποιοτικός έλεγχος των νερών, η θαλάσσια χαρτογράφηση και ο εντοπισμός ζωνών πλούσιων σε αλιευτικά αποθέματα. Ακόμα τα HAPs χρησιμεύουν για την ανίχνευση και παρακολούθηση φαινομένων όπως οι σεισμικές δονήσεις, οι πυρκαγιές, οι πλημμύρες, η ηφαιστειακή δραστηριότητα, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η μόλυνση των θαλασσών. Στα μεγάλα αστικά κέντρα εξίσου σημαντική είναι η συλλογή πληροφοριών για την τροχαία κίνηση και τις μεταφορές.

4.1.4 Παροχή υπηρεσιών σε επείγουσες καταστάσεις

Σε περιπτώσεις έκτακτων καταστάσεων όπου προκύπτουν αυξημένες τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις, οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες αποτελούν ιδανική λύση εξαιτίας της ικανότητάς τους να μετακινούνται και να επανατίθενται γρήγορα σε λειτουργία πάνω από δεδομένα σημεία ζήτησης. Έτσι τα HAPs μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες εντοπισμένων ζωνών με τεράστια πυκνότητα ενεργών χρηστών, όταν αυτές εμφανιστούν και για όσο διάστημα διαρκέσουν, όπως συμβαίνει σε σημαντικές αθλητικές διοργανώσεις, ποδοσφαιρικούς αγώνες, συναυλίες ή κυκλοφοριακές συμφορήσεις. Περιοχές που έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές, σεισμούς, πλημμύρες και καταιγίδες είναι δυνατό να εξυπηρετούνται άμεσα από τη στρατόσφαιρα, καθώς η επίγεια υποδομή που χρειάζεται να εγκατασταθεί είναι ελάχιστη. Οι επείγουσες εφαρμογές επεκτείνονται στην παροχή υπηρεσιών προς πυροσβεστικά και αστυνομικά οχήματα, ασθενοφόρα και διασωστικά συνεργεία. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται ζωτική βοήθεια και ανακούφιση σε σημεία έκτακτης ανάγκης, από ένα σύστημα ανθεκτικό σε σεισμικές δονήσεις, τυφώνες, θύελλες και ανεμοστρόβιλους.

4.1.5 Εντοπισμός και πλοήγηση

Ένας ακόμα σημαντικός στόχος των HAPs είναι η χρήση τους για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό διαφόρων μέσων μεταφοράς, δημόσιων συγκοινωνιών, φορτηγών και τρένων. Ο εντοπισμός πραγματοποιείται συνδυάζοντας πληροφορίες από το παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης GPS και τεχνικές που αφορούν τη μελέτη της κατεύθυνσης άφιξης των κυμάτων από τα εν λόγω οχήματα στην εναέρια πλατφόρμα. Εν συνεχεία επιτρέπεται η εκπομπή σημάτων πλοήγησης που ελέγχουν και διευκολύνουν την πορεία των συγκοινωνιακών μέσων.



Σχήμα 4.2: Χρήση ενός HAP και ενός δορυφόρου για εντοπισμό και πλοήγηση

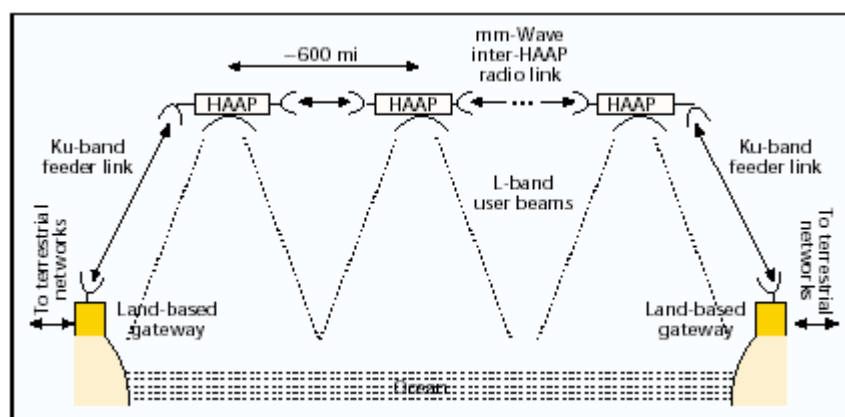
4.1.6 Αναμετάδοση δορυφορικών σημάτων

Πολλές δορυφορικές υπηρεσίες, όπως η εκπομπή τηλεόρασης προς το ευρύ κοινό, απαιτούν τεράστιες επίγειες κεραιές στενού εύρους δέσμης και προσανατολισμένες με ακρίβεια στο δορυφόρο, ώστε αφενός να αποφεύγονται οι παρεμβολές από γειτονικούς δορυφόρους και αφετέρου η ισχύς λήψης του σήματος να είναι μέσα στα αποδεκτά όρια. Τα HAPs εξαιτίας του ύψους όπου πετούν έχουν τη δυνατότητα να “βλέπουν” αρκετούς δορυφόρους, ακόμα και αυτούς που βρίσκονται πάνω από ωκεανούς ή ερήμους, και να λαμβάνουν τα δορυφορικά σήματα χωρίς το

θόρυβο που προκαλείται από τα διάφορα επίγεια συστήματα. Για το σκοπό αυτό κάνουν χρήση κεραιών υψηλού κέρδους, ενώ κατόπιν ενισχύουν και επανεκπέμπουν τα σήματα απ' ευθείας προς φορητές συσκευές δορυφορικής τηλεόρασης που έχουν κεραιές πολύ μικρών διαστάσεων. Η παραπάνω τακτική μπορεί ακόμα να φανεί χρήσιμη στην περίπτωση βλάβης ενός επίγειου δορυφορικού σταθμού, οπότε το HAP αναλαμβάνει προσωρινή δράση υποστήριξης στο δορυφορικό δίκτυο.

4.1.7 Ναυτιλιακά συστήματα επικοινωνιών

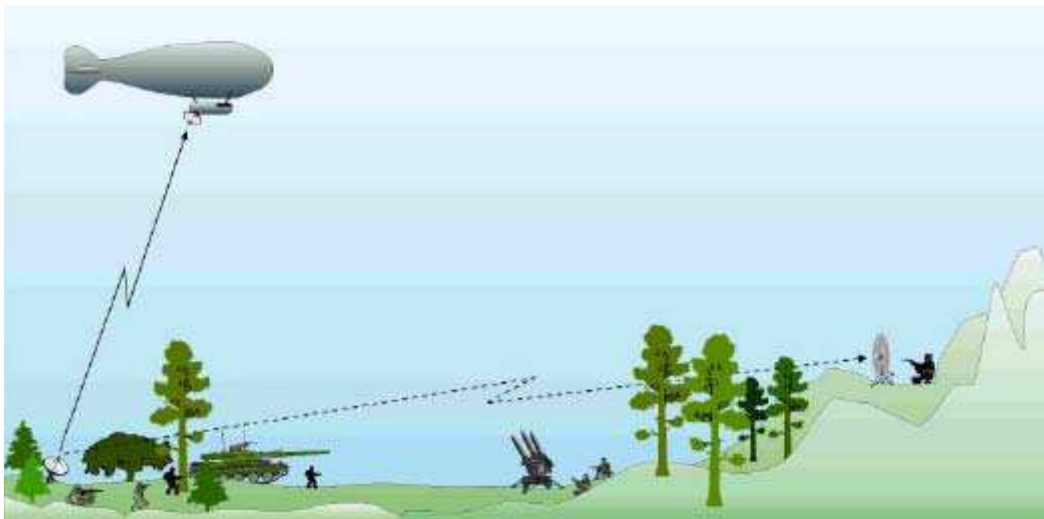
Η παροχή υψηλής ποιότητας τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών φωνής και δεδομένων σε πλωτά μέσα που διασχίζουν τους ωκεανούς είναι άλλη μια ενδεχόμενη εφαρμογή των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων. Στους μεγάλους θαλάσσιους δρόμους, όπως κατά μήκος του βόρειου Ατλαντικού, από τη δυτική ως τη νότια Αφρική, από την Αφρική ως τη Ασία και την Αυστραλία, από την Ασία ως τη βόρεια Αμερική, είναι δυνατό να τοποθετηθούν αλυσίδες από HAPs που θα λειτουργούν ως κόμβοι αναμετάδοσης ανάμεσα σε πλοία και παράκτιους σταθμούς σε κάθε πλευρά της υπερωκεάνιας ζεύξης. Το ναυτιλιακό αυτό σύστημα επικοινωνιών, που προϋποθέτει ζεύξεις μεταξύ των εναέριων σταθμών, μπορεί να παρέχει πολυκαναλικές, αξιόπιστες και οικονομικές υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και βίντεο, πρόσβαση στο διαδίκτυο και εκπομπές προς το ευρύ κοινό (broadcasting). Στο σχήμα 4.3 οι πλατφόρμες παρουσιάζονται ως στάσιμες, ωστόσο το ίδιο σύστημα θα μπορούσε εναλλακτικά να υλοποιηθεί με HAPs που κινούνται με σχετικά μικρές ταχύτητες κατά μήκος καθορισμένων τροχιών πάνω από τη θάλασσα και καταλήγουν κοντά σε επίγειους σταθμούς – πύλες.



Σχήμα 4.3: Σύστημα αναμετάδοσης ναυτιλιακών επικοινωνιών με τη βοήθεια σταθμών HAAP (High Altitude Aeronautical Platforms)

4.1.8 Στρατιωτική χρήση

Επειδή τα HAPs αποτελούν ένα σύστημα που μπορεί να “στηθεί” γρήγορα και δεν προϋποθέτουν την ύπαρξη επίγεια υποδομής, είναι προφανής η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους για επικοινωνίες σε πεδία μαχών. Συγκεκριμένα οι πλατφόρμες δρουν ως κόμβοι ή εναέριοι σταθμοί βάσης των υπάρχοντων ασύρματων στρατιωτικών δικτύων. Εναλλακτικά μπορούν να δράσουν ως δορυφορικοί αναμεταδότες, περίπτωση κατά την οποία καλούνται να μεταφέρουν δορυφορικό ωφέλιμο φορτίο και να επικοινωνήσουν με συμβατικά δορυφορικά τερματικά. Η εγκατάσταση αμφίδρομων ζεύξεων υψηλής χωρητικότητας είναι πολύτιμη για την υποστήριξη στρατηγικών και τακτικών, όταν για παράδειγμα δυο μεραρχίες διατάσσονται σε παράπλευρο αμυντικό σχηματισμό. Οι ζεύξεις αυτές είναι γνωστές ως TDLs (tactical data links) και παρουσιάζουν το πλεονέκτημα εξαιρετικά μικρής πιθανότητας υποκλοπής LPI (low probability of interception), διότι η ισχύς εκπομπής από τα επίγεια τερματικά είναι μικρή και η συχνότητα λειτουργίας μεγάλη σε σχέση με τα αντίστοιχα δορυφορικά συστήματα.



Σχήμα 4.4: Παροχή επικοινωνίας από ένα HAP σε πεδίο μάχης

4.2 Τηλεπικοινωνιακή αγορά

Τα HAPs σήμερα γνωρίζουν ταχεία ανάπτυξη, μέσα από έναν αριθμό προγραμμάτων σε όλο τον κόσμο που ασχολούνται με τη μελέτη και υλοποίησή τους. Καθένα από τα προγράμματα αυτά εφαρμόζει τη δική του προσέγγιση στη γενική ιδέα της τεχνολογίας και αρχιτεκτονικής του συστήματος.

Η αμερικάνικη εταιρεία Sky Station International έχει σχεδιάσει το αερόπλοιο Sky Station. Περίπου 250 τέτοια αερόπλοια που θα χρησιμοποιούνται ως τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες αναμένεται να τεθούν σε λειτουργία πάνω από διάφορες χώρες, αν και ο ακριβής αριθμός τους θα εξαρτηθεί από τη ζήτηση. Οι πλατφόρμες είναι επικαλυμμένες με ηλιακές κυψέλες, οι οποίες παρέχουν ενέργεια στους ηλεκτρικούς κινητήρες. Έχουν βάρος 30 τόνους, διαστάσεις 220 m επί 50 m και πετούν σε υψόμετρο 20 με 22 km χρησιμοποιώντας το σύστημα GPS (Global Positioning System) προκειμένου να παραμένουν σε σταθερή θέση. Το ωφέλιμο φορτίο που κουβαλούν ανέρχεται στα 1000 kg. Κάθε πλατφόρμα λειτουργεί ανεξάρτητα και θα είναι αρχικά συζευγμένη με τους επίγειους σταθμούς και τα υπάρχοντα δημόσια δίκτυα. Σε επόμενο στάδιο θα εγκατασταθούν ραδιοζεύξεις μεταξύ των HAPs. Οι προβλεπόμενοι ρυθμοί δεδομένων για σταθερές υπηρεσίες είναι 2 Mbps στην άνω ζεύξη και 10 Mbps στην κάτω ζεύξη. Οι αντίστοιχοι ρυθμοί για κινητές υπηρεσίες είναι 9.6 έως 16 kbps για φωνή και 384 kbps για δεδομένα.



Σχήμα 4.5: Η πλατφόρμα Sky Station

Η βρετανική εταιρεία Advanced Technology Group (ATG) έχει σχεδιάσει το αερόπλοιο StratSat. Το StratSat στηρίζεται στη σύγχρονη τεχνολογία των υλικών

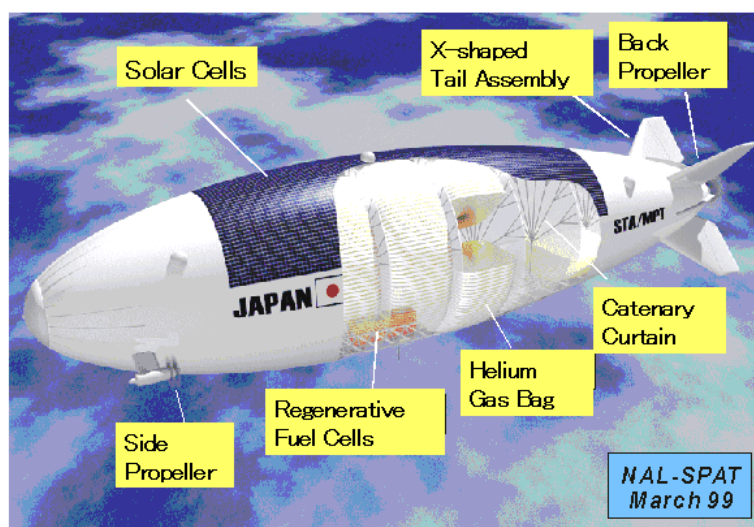
κατασκευής και τις παλιές αρχές της αεροπλοΐας για να προσφέρει μια οικονομική και ασφαλή λύση γεωστατικών τηλεπικοινωνιακών φορτίων πάνω από μεγάλες συγκεντρώσεις πελατών. Εξυπηρετώντας πολιτικούς αλλά και στρατιωτικούς σκοπούς, η εν λόγω πλατφόρμα μήκους 200 m, πλάτους 48 m και ύψους 48 m, έχει τη δυνατότητα να παραμείνει στον αέρα για 5 χρόνια με κόστος πολύ μικρότερο από οποιοδήποτε άλλο μέσο. Το φτηνό κόστος εκτόξευσης σε σύγκριση με εκείνο των δορυφόρων θα επιτρέψει τη μείωση της χρέωσης των κλήσεων από ένα κινητό τηλέφωνο κατά μια τάξη μεγέθους. Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούν τη μοναδική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας του αερόπλοιου. Είναι τοποθετημένες στο επάνω τέταρτο του περιβλήματός του και καλύπτουν περίπου τα τρία τέταρτα του μήκους του. Προκειμένου να λαμβάνουν τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία όλο το αεροσκάφος περιστρέφεται κατάλληλα. Η πλατφόρμα προωθείται και κατευθύνεται από έναν αντι – περιστρεφόμενο κωνικό αεροκινητήρα (Contra – Rotating Coned Rotor) που βρίσκεται στο πίσω τμήμα του εξωτερικού περιβλήματος και αποτελεί μέρος ενός σύνθετου προωστικού συστήματος. Η μονάδα αυτή παρέχει διαμήκη ώθηση για την υπερνίκηση των επικρατούντων στρατοσφαιρικών ανέμων και εγκάρσια δύναμη για την επίτευξη ελιγμών, ώστε το HAP να παραμένει σταθερό στη στρατόσφαιρα (20 km) μέσα σε μια κυβική περιοχή πλευράς 1 km.



Σχήμα 4.6: Η πλατφόρμα StratSat

Μια άλλη τηλεπικοινωνιακή πλατφόρμα έχει σχεδιαστεί από την ομάδα ασυρμάτων καινοτομιών Wireless Innovation Systems Group του ερευνητικού κέντρου Yokosuka Radio Communications Research Center της Ιαπωνίας. Το αερόπλοιο έχει ένα σχεδόν άκαμπτο κέλυφος ελλειψοειδούς σχήματος και συνολικό μήκος 200 m. Απαρτίζεται από ένα περίβλημα πεπιεσμένου αέρα για να διατηρεί

σταθερό περίγραμμα και εσωτερικούς σάκους γεμάτους ελαφρύ αέριο ήλιο. Δυο μικρά μπαλόνια αέρα εγκατεστημένα μέσ στο κέλυφος εξασφαλίζουν τη σταθερότητα της στάσης του σκάφους. Για να επιτευχθεί ισορροπία φορτίου, υπάρχουν διαφράγματα στην καρίνα συνδεδεμένα με το εξωτερικό περίβλημα. Προωστικοί έλικες είναι τοποθετημένοι στην πρύμνη και την πλώρη, ενώ φτερά υπάρχουν στο πίσω μέρος της ουράς. Με τη βοήθεια ενός υποσυστήματος ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας από ηλιακές κυψέλες (solar cells) και επαναφορτιζόμενα ηλεκτρικά στοιχεία καύσιμης ύλης (fuel cells) είναι δυνατή η παροχή ηλεκτρισμού για την πρόωση του σκάφους σε εικοσιτετράωρη βάση. Οι αναμενόμενοι ρυθμοί μετάδοσης φτάνουν τα 25Mbps για τους κοινούς τερματικούς χρήστες, που μέσα στα γεωγραφικά όρια της Ιαπωνίας θα εξυπηρετούνται από 100 περίπου πλατφόρμες. Παράλληλα το σύστημα θα χρησιμεύει για την παρατήρηση του γήινου περιβάλλοντος ώστε να προλαμβάνονται μικρές και μεγάλες καταστροφές (ηφαιστειακή δραστηριότητα, φωτιά, ατμοσφαιρική ρύπανση, κυκλοφοριακή συμφόρηση, κλπ).



Σχήμα 4.7: Η ιαπωνική στρατοσφαιρική πλατφόρμα

Το Airborne Relay Communications System (ARC) είναι το όνομα του αερόπλοιου που σχεδιάστηκε από την αμερικάνικη εταιρεία Platforms Wireless International. Το σύστημα αυτό προορίζεται να λειτουργήσει σε μικρότερα υψόμετρα, 3 έως 10.5 km. Τέτοιου είδους σκάφη, περισσότερο γνωστά σαν αερόστατα, είχαν αρχικά σχεδιαστεί ως αμυντικές εναέριες πλατφόρμες για την τοποθέτηση ραντάρ. Εμπνευσμένη από τα πηδαλιουχούμενα αερόπλοια που παρακολουθούν τα σύνορα Ηνωμένων Πολιτειών – Μεξικού, η Platforms Wireless International αναπτύσσει ένα σύστημα που θα παρέχει σταθερές και κινητές ασύρματες επικοινωνίες ευρείας ζώνης σε περιοχές διαμέτρου 55 με 225 km και θα εξυπηρετεί 1.500.000 συνδρομητές. Το

ARC είναι ένα μπαλόνι ηλίου (He) μήκους 46 m, ικανό να μεταφέρει φορτίο 700 kg. Δυο βοηθητικά μπαλόνια εξασφαλίζουν αδιάλειπτη επικοινωνιακή κάλυψη στην περίπτωση αντίξων καιρικών συνθηκών (άνεμοι με ταχύτητα μεγαλύτερη από 145 km/h) ή κατά τη μηνιαία επαναφορά του πρώτου στο έδαφος για έλεγχο και συντήρηση. Σε αντίθεση με τις πλατφόρμες που περιγράψαμε νωρίτερα, η ARC δεν κάνει χρήση ηλιακών κυψελών. Ρεύμα παρέχεται στο φορτίο μέσω ενός καλωδίου πάχους 2.5 cm, ενώ υπάρχουν και ζεύξεις οπτικών ινών που ενώνουν τους εναέριους σταθμούς βάσης με το υπόλοιπο δίκτυο. Απαραίτητη είναι η οριοθέτηση μιας απαγορευμένης ζώνης πτήσης γύρω από το μπαλόνι, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος πρόσκρουσης άλλων αεροσκαφών σε αυτό ή το καλώδιό του.



Σχήμα 4.8: Η πλατφόρμα ARC

Η αμερικάνικη εταιρεία Angel Technologies Corporation σχεδιάζει την παροχή ευρείας ζώνης τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από ένα επανδρωμένο αεροσκάφος. Η ιδέα αυτή, παρότι τώρα ξεκινά να προωθείται στην αγορά, δεν είναι καινούργια. Από το 1966 ως το 1972 στο Βιετνάμ είχε γίνει χρήση αεροπλάνων για την εκπομπή τηλεόρασης προς το ευρύ κοινό. Τρία αεροσκάφη HALO (High Altitude Long Operation) εγκεκριμένα από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration) προβλέπεται να αποτελούν το κεντρικό σημείο (hub) του δικτύου, πλοηγούμενα σε τρεις μερικώς επικαλυπτόμενες οκτάωρες βάρδιες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα, 365 μέρες το χρόνο. Οι συνδρομητές θα μπορούν να έχουν πρόσβαση υπό αίτηση στις υπηρεσίες του δικτύου, ανταλλάσσοντας βίντεο, εικόνες υψηλής ευκρίνειας και μεγάλα αρχεία δεδομένων, με ρυθμούς 1 έως 5 Mbps. Πληροφορία που δεν απευθύνεται σε συνδρομητές ή που πρέπει να καταλήξει εκτός των ορίων της περιοχής κάλυψης, θα δρομολογείται από ειδικές πύλες (HALO

Gateways) στα δημόσια δίκτυα. Το αεροπλάνο HALO – Proteus της Angel Technologies είναι σχεδιασμένο για να παραμένει σταθερό σε υψόμετρο 16 με 19 km, σε έναν όγκο αέρα σχήματος παραμορφωμένου τόρου με τυπική διάμετρο όχι πάνω από 8 ναυτικά μίλια. Έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει ένα μεγάλο φορτίο κρεμασμένο από το κάτω μέρος της ατράκτου (ορατό στη φωτογραφία). Το φορτίο αυτό περιέχει τις κεραίες και συνορεύει με την άτρακτο μέσω ενός πυλώνα απ' όπου περνά ρεύμα και ψυκτικό υγρό. Σε περίπτωση ισχυρού ανέμου το αεροσκάφος περιστρέφεται προκειμένου να διατηρήσει τη θέση του. Η σκόπευση των κεραιών μεταβάλλεται επίσης, ώστε να παραμείνει σταθερή και η περιοχή κάλυψης. Δοκιμαστικές πτήσεις του HALO – Proteus τον Αύγουστο του 1998 έδειξαν ότι μπορεί να επιτύχει εγκατάσταση ασύρματης ευρυζωνικής ζεύξης στα 52 Mbps.



Σχήμα 4.9: Το αεροσκάφος HALO – Proteus

Με την οικονομική υποστήριξη της NASA, η εταιρεία AeroVironment έχει κατασκευάσει ένα μη επανδρωμένο, ηλιακό – ηλεκτρικό αεροπλάνο μήκους 247 ft που ονομάζεται Helios και έχει τη δυνατότητα συνεχούς πτήσης 6 μηνών σε ύψος 60.000 ft. (Η AeroVironment είχε αρχικά υλοποιήσει το Pathfinder Plus, του οποίου το Helios αποτελεί εξέλιξη). Η απαραίτητη ενέργεια συγκεντρώνεται από 62.000 ηλιακές κυψέλες που βρίσκονται κατά μήκος του φτερού του αεροπλάνου και χρησιμοποιείται για να λειτουργούν 14 μικροί κινητήρες που με τη σειρά τους κινούν 14 έλικες. Το Helios αναμένεται να παρέχει τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες από τη στρατόσφαιρα, δρώντας ως ένας πύργος ύψους 12 μιλίων, εξ ου και πήρε το όνομα SkyTower. Η AeroVironment ίδρυσε επισήμως την εταιρεία SkyTower, Inc. τον Οκτώβριο του 2000 αναζητώντας ευκαιρίες να προωθήσει εμπορικά την τεχνολογία των HAPs σε συνδυασμό με τα αεροσκάφη της. Τα στρατοσφαιρικά δίκτυα της SkyTower αποτελούνται από εναέρια φορτία που επικοινωνούν με τερματικούς χρήστες και πύλες (gateway stations) στο έδαφος. Οι επίγειες πύλες λειτουργούν ως διεπαφή μεταξύ του αεροσκάφους και των υπάρχοντων δικτύων Internet και PSTN (Public Switched Telephone Network). Έτσι όταν ένα σήμα περνά από τους χρήστες στην

πλατφόρμα και από εκεί στην κεραία της επίγειας πύλης, ένας δρομολογητής αποφασίζει αν τα δεδομένα πρέπει να κατευθυνθούν στο Internet, στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο ή σε κάποιο ιδιωτικό δίκτυο δεδομένων. Τα αλληλεπιδραστικά (interactive) αυτά συστήματα σχεδιάζονται με σκοπό να μεγιστοποιήσουν τη συνολική απόδοση του δικτύου. Πράγματι για σταθερή ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση η απόδοση προγραμματίζεται να είναι 10 με 20 Gbps ανά πλατφόρμα με τυπικές ταχύτητες μετάδοσης χρηστών 1.5 Mbps.



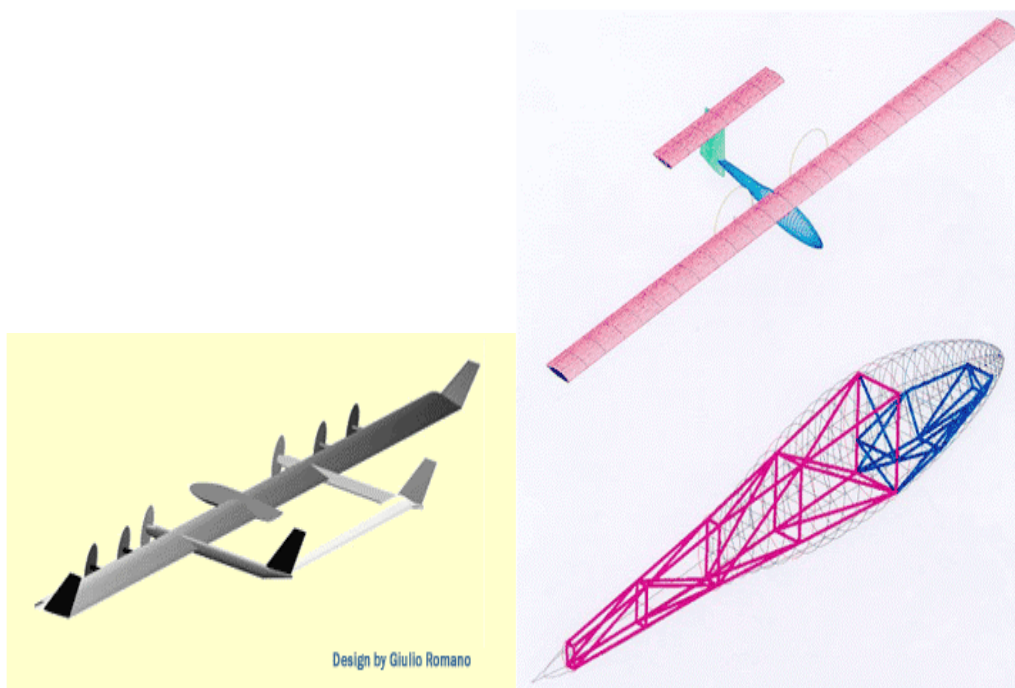
Σχήμα 4.10: Το αεροσκάφος SkyTower

Το Πολυτεχνείο του Τορίνο (Politecnico di Torino) στην Ιταλία σε συνεργασία με τους παρακάτω οργανισμούς, ιδρύματα και εταιρείες:

- Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Ελβετία
- Fastcom S.A., Ελβετία
- Universitat Politècnica de Catalunya, Ισπανία
- Budapest University of Technology and Economics, Ουγγαρία
- Carlo Gavazzi Space S.p.a., Ιταλία
- Institut Jozef Stefan, Σλοβενία
- University of York, Μεγάλη Βρετανία
- EnigmaTEC, Μεγάλη Βρετανία
- Construcciones Aeronáuticas S.A., Ισπανία

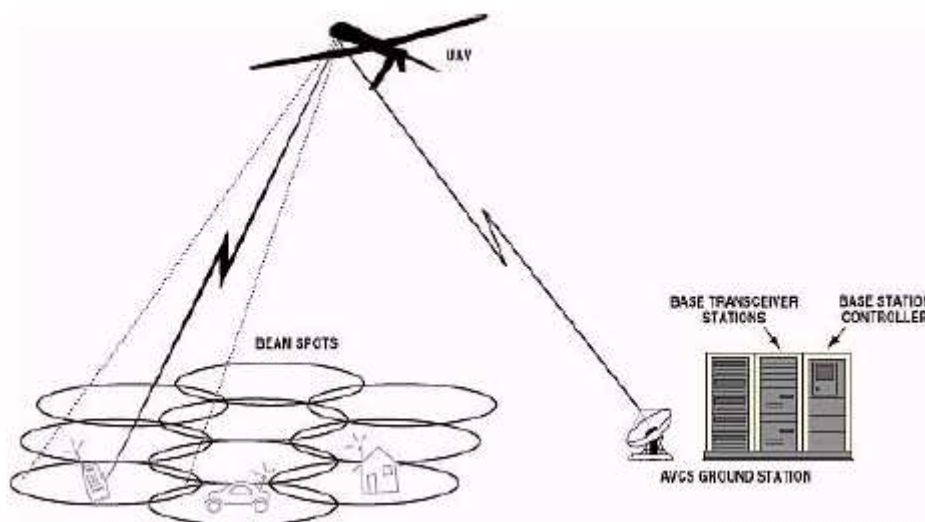
και με επιχορήγηση από την ιταλική διαστημική υπηρεσία ASI (Italian Space Agency)

ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2000 το πρόγραμμα HeliNet. Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού σχεδιάστηκε το στρατοσφαιρικό αεροσκάφος Heliplat (HELios PLATform) που πετά χωρίς πλήρωμα με τη βοήθεια προωστικού συστήματος ηλιακών κυψελών και παραμένει στον αέρα στα 17 με 20 km για μεγάλες χρονικές περιόδους (τεχνολογία HAVE, High Altitude Very Long Endurance). Το ωφέλιμο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει φτάνει τα 100 kg και η προσφερόμενη ισχύς είναι μερικές εκατοντάδες watt. Η ερευνητική δραστηριότητα του προγράμματος είναι επικεντρωμένη στη μελέτη τριών πιθανών εφαρμογών: (α) επικοινωνίες ευρείας ζώνης, (β) περιβαλλοντική παρακολούθηση, (γ) εντοπισμός θέσης και πλοήγηση. Η πλατφόρμα θα λειτουργεί ως σταθμός βάσης προσωπικών επικοινωνιών (GSM ή UMTS) με δυνατότητα να παρέχει εύκολα τηλεφωνικές υπηρεσίες ακόμα και σε περιοχές με μικρή πυκνότητα συνδρομητών, κάνοντας χρήση κυψελών μεγάλης διαμέτρου. Εφικτή θα είναι η παροχή υπηρεσιών LMDS (Local Multipoint Distribution Services), internet, τηλεδιάσκεψης, τηλεόρασης, ομιλίας και δεδομένων. Παράλληλα το δίκτυο αναμένεται να αυξάνει τοπικά τη χωρητικότητά του σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών ή άλλης ανάγκης αναδιατάσσοντας τις πλατφόρμες, αλλά και να εξασφαλίζει αξιόπιστη επικοινωνία με πλοία που εκτελούν υπερατλαντικά ταξίδια τοποθετώντας πλατφόρμες πάνω από τους πιο σημαντικούς θαλάσσιους δρόμους. Σε αρχικό στάδιο εξετάζεται το ενδεχόμενο τα αεροπλάνα να είναι επανδρωμένα, λόγω της όχι ακόμα αρκετά ώριμης τεχνολογίας των UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), που δυσκολεύει την υλοποίηση του συστήματος.



Σχήμα 4.11: Το αεροσκάφος Heliplat

Τέλος, η κατασκευαστική εταιρεία εναέριων μη επανδρωμένων οχημάτων General Atomics που έχει τη βάση της στο San Diego των Ηνωμένων Πολιτειών αναπτύσσει το επικοινωνιακό σύστημα AVCS (Aerial Vehicle Communications System).



Σχήμα 4.12: Το επικοινωνιακό σύστημα της General Atomics

Η πρόσφατη διόγκωση της δραστηριότητας γύρω από την τεχνολογία των HAPs και ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των προγραμμάτων ανά τον κόσμο που ασχολούνται με αυτήν, αποτελούν ζωντανή απόδειξη τόσο για την τεράστια ανάγκη των ασυρμάτων υπηρεσιών στις μέρες μας όσο και για τις λαμπρές προοπτικές του νέου αυτού συστήματος.

4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Στο σημείο αυτό επιχειρούμε μια σύγκριση των στρατοσφαιρικών συστημάτων με τα δορυφορικά και τα επίγεια μικροκυματικά. Στόχος μας είναι να αναδείξουμε τα πλεονεκτήματα αλλά και να επισημάνουμε τα μειονεκτήματα της νέας αυτής τεχνολογίας έναντι στις ήδη υπάρχουσες.

4.3.1 HAPs και δορυφορικά συστήματα

■ Πλεονεκτήματα έναντι των δορυφόρων

Τα HAPs υπερτερούν των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων στους παρακάτω τομείς.

Ταχεία εγκατάσταση. Οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες μπορούν να εγκατασταθούν και να παρέχουν άμεσα υπηρεσίες. Αντίθετα οι δορυφόροι απαιτούν τη μεσολάβηση ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος, συνήθως κάποιων ετών, από την κατασκευή ως την εκτόξευση και τη λειτουργία τους επί τροχιάς.

Προσαυξητική ανάπτυξη. Μια μόνο πλατφόρμα είναι ικανή να παρέχει επικοινωνία σε δεδομένη περιοχή, ενώ το δίκτυο μπορεί σταδιακά να επεκτείνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάλυψης και χωρητικότητας. Στην περίπτωση δορυφόρων χαμηλής τροχιάς χρειάζεται να εκτοξευθούν πολλοί LEO δορυφόροι προτού το σύστημα τεθεί σε λειτουργία.

Συντήρηση, αναβάθμιση, επισκευή. Τα HAPs επαναφέρονται στη γη αρκετές φορές κατά τη διάρκεια της ζωής τους για έλεγχο, συντήρηση ή επισκευή. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους και παράλληλα γίνεται διαρκής αναβάθμιση του ωφέλιμου φορτίου. Στους δορυφόρους δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα.

Προσαρμοστικότητα υπηρεσιών. Η δυναμική ανάθεση πόρων και η αναπροσαρμογή των σχημάτων επαναχρησιμοποίησης συχνότητας σε πραγματικό χρόνο καθιστούν τα HAPs ιδανικά για εξυπηρέτηση περιοχών με εναλλασσόμενες απαιτήσεις κίνησης. Συγχρόνως αποτελούν ακόμα ένα συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών.

Αυξημένη χωρητικότητα. Οι στρατοσφαιρικές μεταδόσεις χρησιμοποιούν υψηλή επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων επιτυγχάνοντας εξαιρετικά μικρά μεγέθη κυψελών, συνεπώς και αυξημένη χωρητικότητα. Οι κυψέλες που σχηματίζονται από τους δορυφόρους στη γήινη επιφάνεια είναι αναγκαστικά πολύ μεγαλύτερες και η χωρητικότητα των ζεύξεων περιορισμένη. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε πως η διάμετρος των στρατοσφαιρικών κυψελών κυμαίνεται από 1 έως

10 km, για τους LEO δορυφόρους η αντίστοιχη τιμή είναι 50 km, ενώ η κυψέλη που σχηματίζεται από γεωστατικό δορυφόρο δεν μπορεί να έχει διάμετρο μικρότερη των 400 km.

Υψηλές ταχύτητες μετάδοσης. Τα HAPs υποστηρίζουν γρήγορους ρυθμούς μεταδόσεων που φτάνουν τα 155 Mbps. Οι γεωστατικοί δορυφόροι επιτυγχάνουν εξίσου μεγάλες ταχύτητες, όμως οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς λειτουργούν την προς τα κάτω ζεύξη στα 64 Mbps και την προς τα άνω ζεύξη μόλις στα 2 Mbps.

Χαμηλό κόστος. Παρά το γεγονός ότι το κόστος ενός δικτύου HAP δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια, αναμένεται να είναι χαμηλότερο από το κόστος οποιουδήποτε δορυφορικού συστήματος. Πράγματι τα HAPs δεν απαιτούν μηχανισμό εκτόξευσης, ούτε βαριά επίγεια υποδομή. Κάνουν χρήση μικρών, φθηνών τερματικών συσκευών ή ακόμα και του συμβατικού επίγειου εξοπλισμού. Ακόμα χρησιμοποιούν εναέριες κεραιές πολύ μικρότερων διαστάσεων από τα τεράστια παραβολικά κάτοπτρα που κουβαλούν οι δορυφορικοί αναμεταδότες.

Φιλικότητα προς το περιβάλλον. Τα HAPs εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια προκειμένου να κινούνται ή να αιωρούνται στη στρατόσφαιρα. Δεν εκτοξεύονται από τη γη όπως οι δορυφόροι και συνεπώς δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με καύσιμη ύλη.

Μικρές καθυστερήσεις. Εξαιτίας του μεγάλου ύψους τροχιάς των δορυφόρων, τα μεταδιδόμενα σήματα υπόκεινται σε καθυστερήσεις που φτάνουν τα 250 με 300 msec. Οι καθυστερήσεις αυτές είναι απαγορευτικές για ευρυζωνικές interactive εφαρμογές, όπου είναι κρίσιμη η έγκαιρη λήψη των σημάτων. Τα HAPs λειτουργούν πολύ πλησιέστερα στην επιφάνεια της γης με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αμελητέες καθυστερήσεις διάδοσης της τάξης των 0.35 msec.

Μικρές απώλειες διαδρομής. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου είναι ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης που διανύει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Επειδή τα δορυφορικά σήματα καλούνται να ταξιδέψουν πολλαπλάσια απόσταση σε σχέση με τα στρατοσφαιρικά, είναι επόμενο να υποφέρουν από τρομακτικά μεγαλύτερες αποσβέσεις. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι στα 2 GHz ο προϋπολογισμός ζεύξης (link budget) ενός HAP πλεονεκτεί κατά 34 dB από ένα LEO δορυφόρο και κατά 66 dB από έναν GEO.

Χαμηλές απαιτήσεις ισχύος. Οι μεγάλες απώλειες ελευθέρου χώρου στα δορυφορικά συστήματα καθιστούν απαραίτητη την εκπομπή σε υψηλές στάθμες ισχύος, προκειμένου οι δέκτες να λαμβάνουν ένα ανιχνεύσιμο σήμα. Τα HAPs έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με ασθενέστερα σήματα.

Απλές τροχιές. Στις περιπτώσεις δορυφόρων μικρού ή μεσαίου ύψους LEO ή MEO εισάγεται πρόσθετη πολυπλοκότητα στο σύστημα από τον καθορισμό και έλεγχο σύνθετων τροχιών κίνησης. Τα HAPs παραμένουν σχεδόν στατικά ή κινούνται σε μικρές τροχιές γύρω από δεδομένο σημείο, οπότε δεν απαιτούν επιπλέον προγραμματισμό.

Ασφάλεια μεταδόσεων. Τα HAPs εκπέμπουν και λαμβάνουν σήματα χαμηλής ισχύος σε υψηλές συχνότητες. Έτσι παρουσιάζουν εξαιρετικά μικρή πιθανότητα υποκλοπής LPI (low probability of interception) σε αντίθεση με τους δορυφόρους που αδυνατούν να εξασφαλίσουν την προστασία των σημάτων από ανεπιθύμητους ωτακουστές.

Μεγάλες γωνίες ανύψωσης. Εξαιτίας της γεωμετρίας και της αρχιτεκτονικής του συστήματος, οι γωνίες ανύψωσης των επίγειων τερματικών ως προς τις εναέριες πλατφόρμες λαμβάνουν μεγάλες τιμές που συχνά φτάνουν τις 90°. Οι γεωστατικοί δορυφόροι είναι ως επί το πλείστον ορατοί με πολύ μικρότερες γωνίες, επειδή η τροχιά τους περιορίζεται πάνω από τον ισημερινό.

■ ***Μειονεκτήματα έναντι των δορυφόρων***

Υπάρχουν φυσικά και σημεία στα οποία τα HAPs μειονεκτούν συγκρινόμενα με τη γνωστή πλέον και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία των δορυφόρων.

Μικρή διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής των HAPs εξαρτάται από το είδος του αεροσκάφους και τα χαρακτηριστικά κατασκευής, ωστόσο στην καλύτερη περίπτωση δεν ξεπερνά τα πέντε χρόνια. Συνεπώς είναι αναγκαία η σχετικά τακτική αντικατάστασή τους. Οι δορυφόροι μπορούν να ταξιδεύουν στο διάστημα για 15 περίπου χρόνια προτού καταστραφούν.

Μικρές περιοχές κάλυψης. Το ύψος των 35.784 km της γεωστατικής τροχιάς επιτρέπει στους δορυφόρους να καλύπτουν ευρείες περιοχές στη γήινη επιφάνεια. Για την εξυπηρέτηση μιας τέτοιας έκτασης από τη στρατόσφαιρα απαιτείται μεγάλος αριθμός πλατφόρμων.

Ενεργειακά προβλήματα. Ειδική μέριμνα πρέπει να ληφθεί για την παροχή ενέργειας στα HAPs σε παρατεταμένες περιόδους σκότους, πιθανώς αποθηκεύοντας εκ των προτέρων ηλιακή ενέργεια σε κατάλληλα στοιχεία. Στους δορυφόρους δεν υφίσταται ενεργειακό ζήτημα.

Κλίμα δυσπιστίας. Όπως κάθε νέα τεχνολογία στο ξεκίνημά της, έτσι και τα HAPs αντιμετωπίζουν ένα κλίμα δυσπιστίας και αμφισβήτησης από ένα μέρος της κοινής γνώμης. Ανησυχίες εκφράζονται ακόμα για την ασφάλεια πτήσης των αεροσκαφών και τους κινδύνους από μια ενδεχόμενη πτώση τους. Αξίζει βέβαια να σημειώσουμε πως στη δεκαετία του '60 η τεχνολογία των δορυφόρων πέρασε από το ίδιο στάδιο και χρειάστηκαν κάποια χρόνια λειτουργίας ώσπου να ωριμάσει και να κερδίσει την αποδοχή και την εμπιστοσύνη του κόσμου.

4.3.2 HAPs και επίγεια μικροκυματικά συστήματα

• Πλεονεκτήματα έναντι των επίγειων συστημάτων

Οι στρατοσφαιρικές επικοινωνίες υπερτερούν των επίγειων μικροκυματικών στους εξής τομείς.

Ταχεία εγκατάσταση. Τα στρατοσφαιρικά συστήματα μπορούν να τεθούν γρήγορα και άμεσα σε λειτουργία. Σε αντίθεση τα επίγεια μικροκυματικά απαιτούν διαδικασίες σχεδιασμού και χρονοβόρων αστικών έργων για την εγκατάσταση επίγειας υποδομής.

Προσαυξητική ανάπτυξη. Η παροχή υπηρεσιών είναι δυνατή από ένα και μόνο HAP, που εν συνεχεία μπορεί να επεκταθεί σε δίκτυο πολλών εναέριων σταθμών. Τα επίγεια δίκτυα ωστόσο προϋποθέτουν την ύπαρξη αρκετών σταθμών βάσης προκειμένου να καταστούν λειτουργικά ακόμα και για περιορισμένους χωρικά χρήστες.

Προσαρμοστικότητα υπηρεσιών. Η δυναμική ανάθεση πόρων που υποστηρίζεται από τα HAPs όχι όμως και από τα επίγεια μικροκυματικά συστήματα, καθιστά τα πρώτα περισσότερο ευέλικτα στις απαιτήσεις και τις ανάγκες που προκύπτουν.

Μεγάλο εύρος ζώνης. Στα HAPs έχουν ανατεθεί υψηλές συχνότητες λειτουργίας και μεγάλο εύρος ζώνης. Έτσι μπορούν να υποστηρίξουν εφαρμογές πολυμέσων, broadcast και multicast, πολύ πιο αποτελεσματικά από τα επίγεια συστήματα.

Χαμηλό κόστος. Η επίγεια μικροκυματική αρχιτεκτονική βασίζεται στη λειτουργία πολλών σταθμών βάσης και στην ύπαρξη μεγάλου αριθμού ζεύξεων υποστήριξης (backhaul links) προς τα σταθερά δίκτυα. Τα HAPs αποτελούν οικονομικότερη λύση, αφού χρησιμοποιούν πολύ περιορισμένο επίγειο εξοπλισμό.

Ασφάλεια της δημόσιας υγείας. Σημαντικές ανησυχίες εκφράζονται για τις επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου από την εκπομπή και διάδοση μικροκυμάτων κοντά στη γήινη επιφάνεια, όπως για παράδειγμα από σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας. Μια πλατφόρμα έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει πολλούς τέτοιους σταθμούς, χωρίς η ίδια να επιβαρύνει το περιβάλλον.

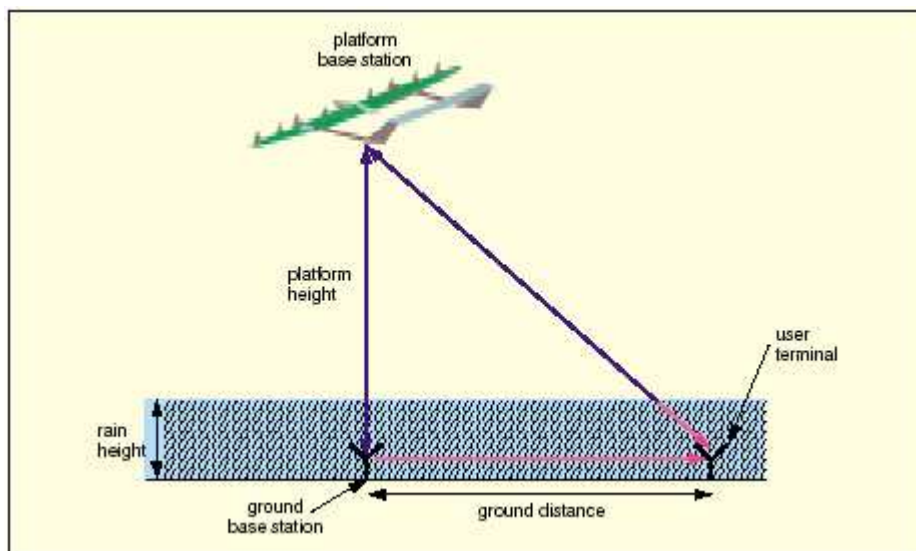
Μεγάλες γωνίες ανύψωσης. Οι τερματικές στρατοσφαιρικές συσκευές ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας τους (UAC, SAC, RAC) ενδέχεται να “βλέπουν” το HAP με το οποίο επικοινωνούν με μια μεγάλη γκάμα γωνιών. Στις αστικές περιοχές οι γωνίες ανύψωσης φτάνουν τις 90°, τιμή που είναι αδύνατο να επιτευχθεί από τις επίγειες μεταδόσεις.

Ευρεία κάλυψη. Η επιφάνεια κάλυψης ενός HAP εκτείνεται 200 περίπου km από το σημείο που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πλατφόρμα. Αντίθετα οι σταθμοί βάσης των μικροκυματικών συστημάτων έχουν εμβέλεια λίγων μόνο χιλιομέτρων.

Ανυπαρξία νεκρών ζωνών. Με τα στρατοσφαιρικά συστήματα είναι εφικτή η παροχή υπηρεσιών σε περιοχές που τα επίγεια συστήματα αδυνατούν να καλύψουν. Τέτοιες είναι οι θαλάσσιες περιοχές αλλά και κάποιες ορεινές ζώνες όπου η συμβατική ραδιοκάλυψη είναι περιορισμένη.

Διάδοση οπτικής επαφής LOS. Οι μεγάλες γωνίες ανύψωσης εξασφαλίζουν διάδοση οπτικής επαφής στα στρατοσφαιρικά κύματα, που διανύουν μια ως επί το πλείστον χωρίς εμπόδια διαδρομή από την πλατφόρμα ως τα επίγεια τερματικά. Η κατανομή των λαμβανόμενων σημάτων είναι Rice. Αν αμελήσουμε την επίδραση της βροχής, οι απώλειες ελευθέρου χώρου εξασθενούν τα σήματα ανάλογα προς το τετράγωνο της διανυόμενης απόστασης (ισοδύναμα 20 dB / decade). Από τη άλλη μεριά τα επίγεια μικροκυματικά συστήματα χαρακτηρίζονται από πολυδιαδρομική διάδοση και σκέδαση, ενώ επηρεάζονται δραματικά από τη μορφολογία του εδάφους και τις ανθρώπινες κατασκευές. Εδώ δεν υπάρχει απ' ευθείας ισχυρή συνιστώσα και τα σήματα λήψης ακολουθούν κατανομή Rayleigh. Η εξασθένηση είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόστασης (ισοδύναμα 40 dB / decade).

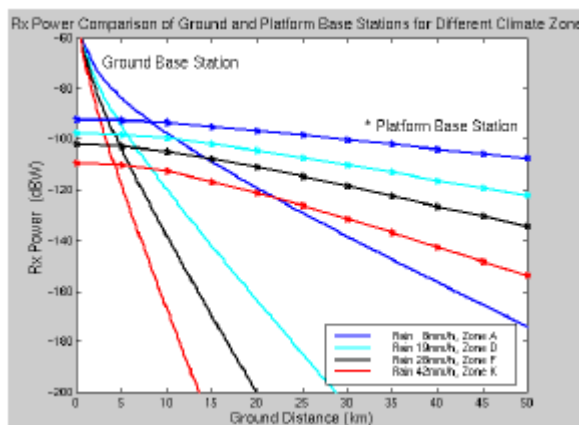
Συγκριτικά μικρότερη εξασθένηση λόγω βροχής. Η επίδραση της βροχής είναι σημαντικός παράγοντας τόσο για τα επίγεια όσο και για τα στρατοσφαιρικά συστήματα. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, το ύψος των βροχοπτώσεων περιορίζεται περίπου στα 3 km από την επιφάνεια της γης, με αποτέλεσμα η απόσταση μέσα στη βροχή που διανύει το σήμα να είναι σαφώς μικρότερη για τα HAPs. Έτσι η απόσβεση των σημάτων είναι ηπιότερη.



Σχήμα 4.13: Απόσταση που διανύει το σήμα μέσα στη βροχή σε ένα στρατοσφαιρικό και ένα επίγειο σύστημα

Ανάλογα με την κλιματική ζώνη στην οποία βρισκόμαστε και για δεδομένη οριζόντια απόσταση επίγειου πομπού και δέκτη, είναι άλλοτε προτιμότερη η

επικοινωνία με έναν επίγειο μικροκυματικό σταθμό βάσης και άλλοτε με ένα HAP. Από το σχήμα 4.14 συμπεραίνουμε ότι στα ξηρά κλίματα η λήψη από τη στρατόσφαιρα είναι αποδοτικότερη για αποστάσεις άνω των 8 km, ενώ σε υγρές ζώνες το HAP αρχίζει να υπερτερεί νωρίτερα, σχεδόν στα 5 km.



Σχήμα 4.14: Ισχύς λήψης από το τερματικό του σχήματος 4.13

• **Μειονεκτήματα έναντι των επίγειων συστημάτων**

Η τεχνολογία των HAPs εμφανίζεται μειονεκτική σε σχέση με τα επίγεια μικροκυματικά συστήματα στα παρακάτω σημεία.

Μικρή διάρκεια ζωής. Η επίγεια υποδομή των μικροκυματικών δικτύων έχει χρόνο ζωής περίπου 15 ετών, ενώ οι εναέριες πλατφόρμες πρέπει να αντικαθίστανται το πολύ κάθε 5 χρόνια.

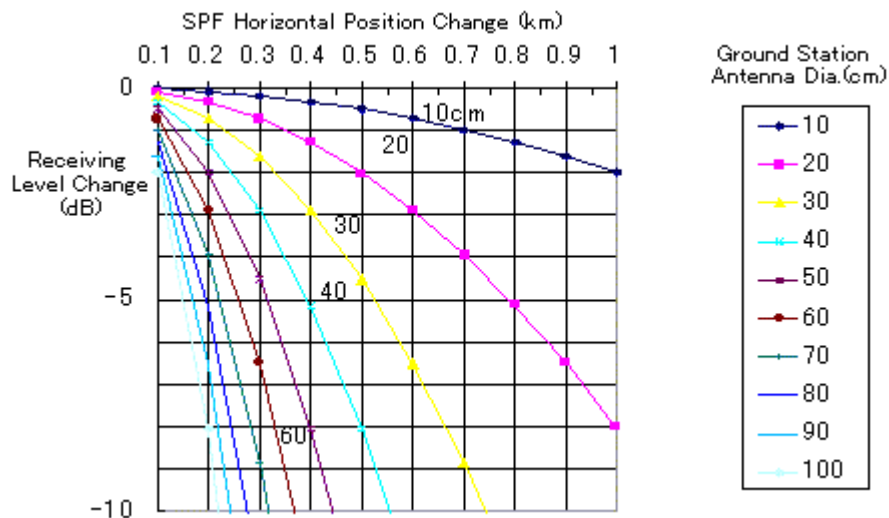
Ενεργειακά προβλήματα. Η παροχή ενέργειας στα επίγεια συστήματα πραγματοποιείται μέσω της υπάρχουσας υποδομής και δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Αντιθέτως η τροφοδοσία των HAPs αποτελεί ίσως το πιο δύσκολο κομμάτι στην υλοποίηση της νέας τεχνολογίας.

Μικρή χωρητικότητα. Αναφέραμε στη σύγκριση με τα δορυφορικά δίκτυα πως η χωρητικότητα των δικτύων HAP είναι αυξημένη. Ωστόσο τα επίγεια μικροκυματικά συστήματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και από τους δορυφόρους και από τα HAPs.

Προβλήματα κάλυψης εσωτερικών χώρων. Οι επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις επιτυγχάνουν ικανοποιητική κάλυψη εσωτερικών χώρων. Στον τομέα αυτό τα HAPs ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προβλήματα, που όμως είναι ακόμα υπό μελέτη.

Λειτουργική πολυπλοκότητα. Αυξημένη λειτουργική πολυπλοκότητα υπεισέρχεται από την ανάγκη σταθεροποίησης των πλατφόρμων σε συγκεκριμένες θέσεις στη στρατόσφαιρα, καθώς και από τις τακτές προσγειώσεις και απογειώσεις τους. Συνεπώς ο έλεγχος που απαιτείται σε σχέση με τα επίγεια συστήματα είναι μεγαλύτερος.

Προβλήματα στόχευσης. Οι κεραιές των επίγειων τερματικών είναι προσανατολισμένες στην πλατφόρμα ώστε να λαμβάνουν με το μέγιστο κέρδος. Προβλήματα στόχευσης ανακύπτουν από την αδυναμία απόλυτου ελέγχου θέσης του HAP. Το σχήμα 2.32 δείχνει την πτώση της ισχύος λήψης στη συχνότητα των 30 GHz καθώς η οριζόντια θέση της πλατφόρμας μεταβάλλεται, για διάφορες τιμές διαμέτρου των κεραιών. Τα συμβατικά επίγεια συστήματα δεν υποφέρουν από ανάλογη αβεβαιότητα σχετικά με τη θέση των σταθμών βάσης.



Σχήμα 4.15: Μεταβολή στην ισχύ λήψης που οφείλεται στην οριζόντια απόκλιση του HAP από την προκαθορισμένη θέση λειτουργίας του

4.4 Βιβλιογραφία κεφαλαίου 4

- [1] T.C.TOZER & D.GRACE, “Broadband Service Delivery from High Altitude Platforms”
- [2] D.GRACE, T.C.TOZER, N.E.DALY, “Communications from High Altitude Platforms – A European Perspective”, 2nd Stratospheric Platforms System Workshop, Japan, September 2000
- [3] D.GRACE, T.C.TOZER, N.E.DALY, “Communications from high altitude platforms – a complementary or disruptive technology?”, IEE Colloquium “New Access Network Technologies”, October 2000
- [4] T.C.TOZER, D.GRACE, J.THOMPSON, P.BAYNHAM, “UAVs and HAPs – Potential Convergence for Military Communications”, IEE Colloquium on “Military Satellite Communications”, June 2000
- [5] ITU-D STUDY GROUP 2, “High Altitude Platform Station: an opportunity to close the information gap”, Document 2/202(Rev.1), April 2001
- [6] OFCOM Office federal de la communication, “HAPS – High Altitude Platform Stations”
- [7] AeroVironment, SkyTower www.aerovironment.com
- [8] Angel Technologies www.angelhalo.com
- [9] Advanced Technologies Group www.airship.com
- [10] Yokosuka Radio Communications Research Center, Communications Research Laboratory, Wireless Innovation Systems Group www2.crl.go.jp/mt/b181/index-e.html
- [11] Research & Technology Centre for the European Space Agency ESA www.estec.esa.nl/halewww/www/hale.htm
- [12] Sky Station International www.skystation.com
- [13] Telecommunications Advancement Organization of Japan TAO www.yrp.tao.go.jp/ENG/Default.htm
- [14] SkyLARC Technologies www.skylarc.com

Μοντέλα σκίασης

5.1 Εισαγωγή

Για όλες εκείνες τις περιπτώσεις που πραγματοποιείται επικοινωνία που λαμβάνουν μέρος HAPS, απαιτείται ένα μοντέλο διάδοσης το οποίο να λαμβάνει υπόψη τη γωνία ανύψωσης των HAPS σε σχέση με τους επίγειους σταθμούς. Αυτό το μοντέλο διαδραματίζει ένα βασικό ρόλο στις μελέτες των κινητών υπηρεσιών που σχετίζονται με τα HAPS. Το μοντέλο διάδοσης που παρουσιάζεται παρακάτω είναι βασισμένο στη χρησιμοποίηση προσομοιώσεων για τυχαίας οικιστικής πυκνότητας περιβάλλον. Συγκεκριμένα, εξετάζεται ένα μοντέλο σκίασης σε σχέση με τη γωνία ανύψωσης σε διαφορετικούς τύπους οικιστικού περιβάλλοντος και ειδικότερα για εφαρμογές από 2-6 GHz.

Το μοντέλο που θα παρουσιαστεί παρακάτω λαμβάνει υπόψη τη κατανομή του ύψους των κτιρίων, το πλάτος των δρόμων, το αζιμούθιο κλπ, καθώς και τη θέση της κεραίας.

Αρχικά γίνεται μια προσέγγιση του μοντέλου διάδοσης και στο τέλος γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων από μέτρηση και αυτών που προκύπτουν από το μοντέλο που θα αναπτυχθεί.

5.2 Στατιστικό Μοντέλο Ανάπτυξης Κτιρίων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το μοντέλο διάδοσης που παρουσιάζεται παρακάτω είναι βασισμένο στη χρησιμοποίηση προσομοιώσεων για τυχαίας οικιστικής πυκνότητας περιβάλλον. Το πρότυπο ITU-R Rec P.1410 χρησιμοποιείται για τη διασπορά των κτιρίων. Η εφαρμογή αυτού του προτύπου πηγάζει από την απλότητά του και την καθολικότητά του. Το μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι η πόλη μπορεί να μοντελοποιηθεί χωρίς να απαιτούνται συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με το σχήμα των κτιρίων και την κατανομή τους.

Αυτό το στατιστικό πρότυπο απαιτεί μόνο τρεις εμπειρικές παραμέτρους οι οποίες περιγράφουν την οικιστική περιοχή. Ο συντελεστής α καθορίζει το ποσοστό κάλυψης των κτιρίων σε σχέση με τη συνολική έκταση, ο συντελεστής β το μέσο όρο των κτιρίων για κάθε περιοχή και ο συντελεστής γ καθορίζει την κατανομή του ύψους των κτιρίων. Ο συντελεστής α παίρνει τιμές από 0,1 έως 0,8 και ο β από 750 έως 100. Ο συντελεστής γ παραμετροποιεί την κατανομή Rayleigh όπου καταδεικνύει το πιο

συχνό ύψος κτιρίου. Ο συντελεστής πυκνότητας πιθανότητας για το ύψος των κτιρίων βασιζόμενο στη κατανομή Rayleigh είναι

$$p_r(h_b) = \frac{h_b}{\gamma^2} \exp\left(-\frac{h_b^2}{2\gamma^2}\right) \quad (5.1)$$

όπου ο p_r καταδεικνύει την πιθανότητα το ύψος των κτιρίων να είναι ίσο με τον h_b στη εξεταζόμενη περιοχή. Ο συντελεστής α μπορεί εύκολα να βρεθεί από τις κατόψεις των κτιρίων της περιοχής. Ο συντελεστής β έχει τη μικρότερη επίπτωση δεδομένου ότι ασκεί μικρή επίδραση στα τελικά αποτελέσματα προσομοίωσης που παρουσιάζονται παρακάτω. Το ύψος των κτιρίων λαμβάνεται τυχαία βασισμένο στη κατανομή Rayleigh. Κατά αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ρεαλιστική προσέγγιση όταν γίνεται ανάλυση σε κατάσταση σκίασης.

Τέσσερις διαφορετικοί είδη περιβάλλοντος επιλέγονται για τα σενάρια που παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1) Ημιαστική περιοχή
- 2) Αστική περιοχή
- 3) Πυκνά αστική περιοχή
- 4) Αστική περιοχή πολυόροφων κτιρίων

Environment	α [-]	β [-]	γ [m]
Suburban	0.1	750	8
Urban	0.3	500	15
Dense Urban	0.5	300	20
Urban High-Rise	0.5	300	50

Πίνακας 5.1 Παράμετροι του ITU-R P.1410 για διάφορες περιοχές

Ο πίνακας 5.1 συνοψίζει τις παραμέτρους του προτύπου ITU-R Rec. P. 1410 που χρησιμοποιούνται για τα διάφορα είδη περιοχών από την ημιαστική έως αστική περιοχή με πολυόροφα κτίρια.

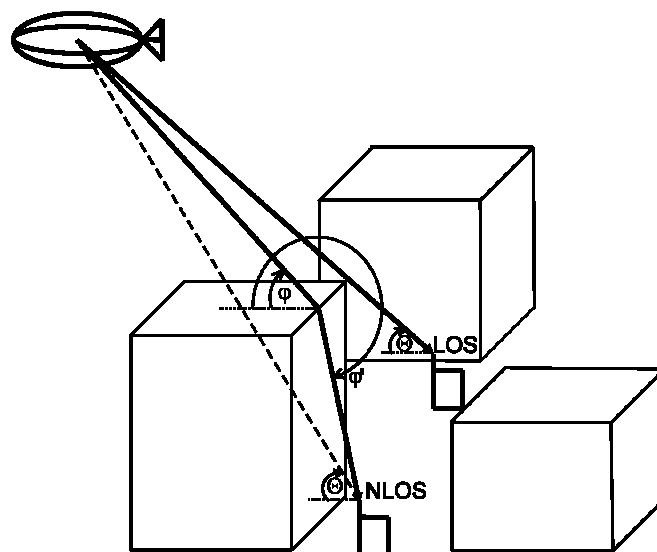
5.3 Μέθοδος Προσομοίωσης

Για τον υπολογισμό στο παρόν παράδειγμα θεωρούμε μια αστική περιοχή διαστάσεων 2 επί 2 χιλιόμετρα. Η ανάλυση που αφορά την ανάπτυξη των κτιρίων είναι ίση με ένα μέτρο. Η καλή ανάλυση, η μεγάλη έκταση της περιοχής και η έκταση της προσομοίωσης είναι τα στοιχεία που εξασφαλίζουν ότι τα αποτελέσματα θα είναι ικανοποιητικά και δεν θα εξαρτώνται από ένα τυχαίο ύψος κτιρίου.

Οι προσομοιώσεις διαιρούνται σε δύο περιπτώσεις. Πρώτα, η πιθανότητα οπτικής επαφής στους δρόμους, αναλύεται ως μια λειτουργία μιας γωνίας ανύψωσης για τους διάφορους τύπους οικιστικών περιοχών. Δεύτερον, η επιπρόσθετη απώλεια λόγω της επίδρασης της σκίασης αναλύεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία της διάθλασης.

Οι στέγες μοντελοποιούνται θεωρώντας διηλεκτρική σταθερά ίση με 4. Ο συντελεστής διάθλασης της στέγης πολλαπλασιάζεται και για οριζόντια και για κατακόρυφη πόλωση. Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η βασική γεωμετρία για περιπτώσεις οπτικής και μη επαφής.

Οι υπολογισμοί γίνονται για αζιμούθιο που κυμαίνεται από 0-360 με βήμα εννέα μοιρών. Αρχικά, αναπτύσσονται τα κτίρια με βάση το ITU-R Rec P.1410 πρότυπο. Κατόπιν, η θέση του HAP προσδιορίζεται από κάθε σημείο των οδών με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθεί εξομοίωση και ανάλυση πολλών διαφορετικών σεναρίων που αφορά διάφορα ύψη και γωνίες ανύψωσης. Η πιθανότητα οπτικής επαφής για συγκεκριμένο αζιμούθιο υπολογίζεται ως η μέση τιμή των δεδομένων που προκύπτουν για όλα τα αζιμούθια. Έτσι, τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από το αζιμούθιο. Οι προσομοιώσεις λαμβάνουν χώρα για γωνίες ανύψωσης από 1 έως 89 μοίρες.



Σχήμα 5.1 Βασική γεωμετρία για LOS και NLOS περιπτώσεις

5.4 Μοντέλο Διάδοσης

Τα αποτελέσματα μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος φαίνεται η πιθανότητα της οπτικής επαφής. Σε αυτή την περίπτωση οι απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των μέσων απωλειών. Στο δεύτερο κομμάτι, υπολογίζονται οι επιπρόσθετες απώλειες εξαιτίας της σκίασης και ορίζονται ως απώλειες όχι ελευθέρου χώρου (NLOS ζεύξεις).

Πρακτικά, οι γωνίες ανύψωσης που χρησιμοποιούνται σε κινητές επικοινωνίες με HAPS, ιδιαίτερα σε πόλεις, κυμαίνονται μεταξύ 60° και 90° μοιρών. Βέβαια δεν αποκλείονται χαμηλότερες γωνίες ανύψωσης, καθώς μπορεί να βρίσκουν εφαρμογή σε άλλους τομείς (παρεμβολές κλπ). Για παράδειγμα, η απόσταση μεταξύ του χρήστη και ενός σημείου της πλατφόρμας στο έδαφος (το σημείο κάθετα κάτω από το HAP) είναι περίπου 211 χιλιόμετρα για ένα ύψος 22 χλμ (συμπεριλαμβανομένης και της καμπυλότητας της γης) και περίπου 168 χλμ για ένα ύψος 17 χλμ, εάν η γωνία ανύψωσης είναι ίση με 5 βαθμούς.

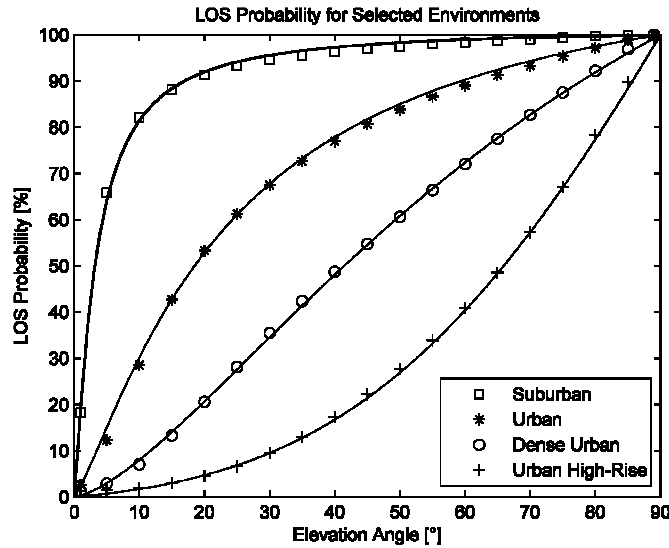
A. LOS Probability

Η πιθανότητα LOS (P_{LOS}) στους δρόμους ως απόρροια της γωνίας ανύψωσης για τις τέσσερις προαναφερθείσες περιοχές φαίνεται στο σχήμα 5.2.

Η P_{LOS} μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω εξίσωση

$$P_{LOS}(\theta) = \alpha - \frac{\alpha - b}{1 + \left(\frac{\theta - c}{d}\right)^e} \quad (5.2)$$

όπου P_{LOS} είναι η επί τοις εκατό πιθανότητα οπτικής επαφής, θ είναι η γωνία ανύψωσης σε μοίρες και a , b , c , d και e είναι οι εμπειρικές παράμετροι του πίνακα 5.2. Η P_{LOS} για γωνία $\theta=70^\circ$ για αστική περιοχή, πυκνά αστική περιοχή και αστική περιοχή πολυόροφων κτιρίων είναι 0.94, 0.83 και 0.57 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2 Πιθανότητα οπτικής επαφής στις οδούς σε σχέση με τη γωνία ανύψωσης για διάφορες περιοχές

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Suburban	101.6	0	0	3.25	1.241
Urban	120.0	0	0	24.30	1.229
Dense Urban	187.3	0	0	82.10	1.478
Urban High-Rise	352.0	-1.37	-53	173.80	4.670

Πίνακας 5.2 Παράμετροι για υπολογισμό της πιθανότητας οπτικής επαφής

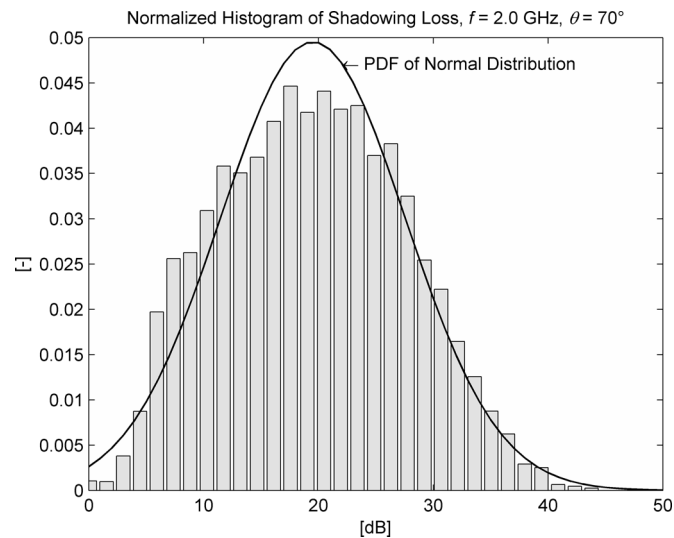
B. Επιπρόσθετες Απώλειες Σκίασης

Αυτό το κομμάτι καταδεικνύει την επίδραση των αποτελεσμάτων σκίασης σε ζεύξεις που δεν έχουν οπτική επαφή. Το μεγάλο κέρδος των HAPS σε σχέση με τους δορυφόρους είναι το σχετικά μικρό μήκος της ζεύξης μεταξύ του κινητού σταθμού και του HAPS που καθιστά εφικτές ζεύξεις μη έχουσες οπτική επαφή. Στο σχήμα 5.3 φαίνονται τα αποτελέσματα της εξομίωσης –ένα κανονικοποιημένο ιστόγραμμα για επιπρόσθετες απώλειες λόγω διάθλασης για συχνότητα 2,0 GHz, για κατακόρυφη πόλωση και για γωνία ανύψωσης 70°.

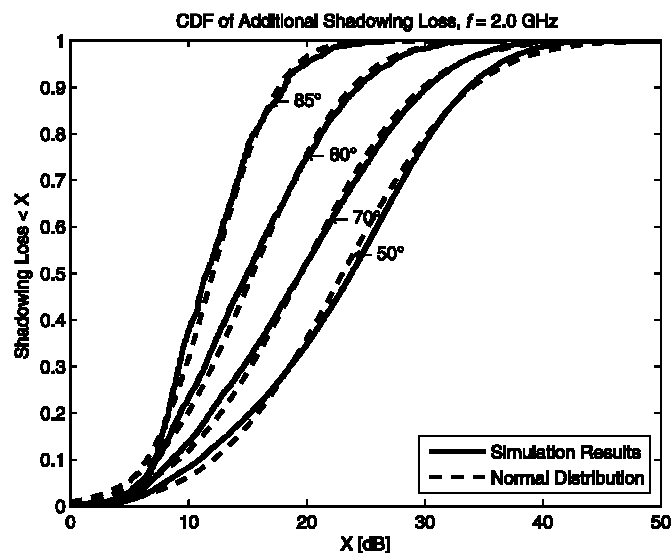
Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για κανονική κατανομή μπορεί να γραφεί ως:

$$p_n(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.3)$$

όπου p_n είναι η κανονικοποιημένη πιθανότητα, μ είναι η μέση τιμή σε dB και σ η απόκλιση σε dB. Για την περίπτωση του σχήματος 5.3 είναι $\mu=19,5$ dB και $\sigma=8,1$ dB.



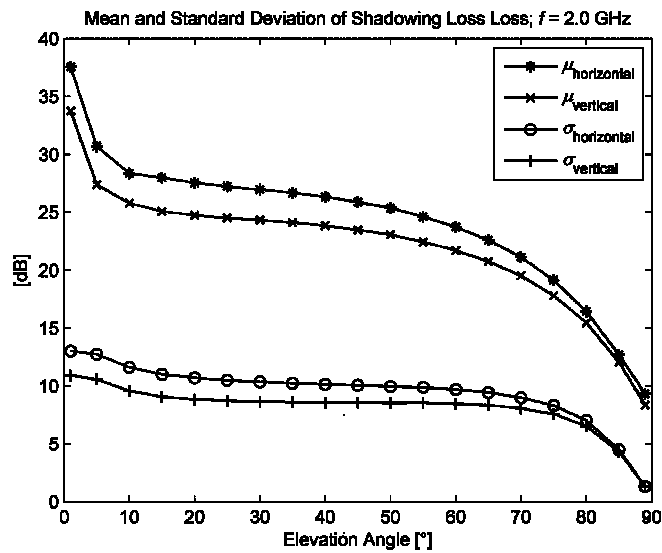
Σχήμα 5.3 Κανονικοποιημένο ιστόγραμμα και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας απωλειών σκίασης για 2.0 GHz για κατακόρυφη πόλωση σε μια πυκνή αστική περιοχή



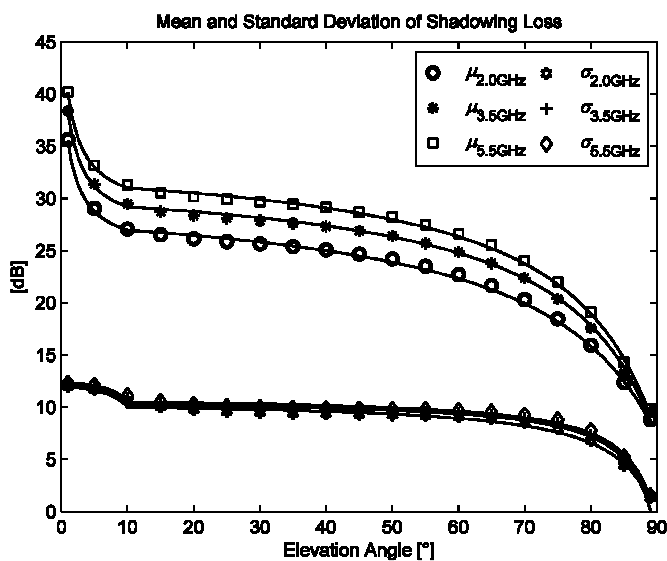
Σχήμα 5.4 Αθροιστική συνάρτηση κατανομής για απώλειες σκίασης και για κατακόρυφη πόλωση για διάφορες γωνίες ανύψωσης (συνεχής γραμμή-αποτελέσματα εξομίωσης, γραμμοσκιασμένη γραμμή –αθροιστική συνάρτηση κατανομής)

Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (Cumulative Distribution Function, CDF) αναπαρίσται στο σχήμα 5.4 για γωνίες ανύψωσης 85° , 80° , 70° και 50° . Οι γραμμοσκιασμένες γραμμές αναπαριστούν την αθροιστική συνάρτηση κατανομής.

Οι παράμετροι της κανονικής κατανομής για γωνίες ανύψωσης που κυμαίνονται από 1° έως 89° αναπαριστώνται στο σχήμα 5.5 και 5.6.



Σχήμα 5.5 Παράμετροι κανονικής κατανομής για απώλειες σκίασης για διάφορες γωνίες ανύψωσης για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση



Σχήμα 5.6 Παράμετροι κανονικής κατανομής για απώλειες σκίασης για διάφορες γωνίες ανύψωσης στους 2.0, 3.5 και 5.5 GHz

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στα σχήματα 5.3 έως 5.6 αφορούν μια πυκνοκατοικημένη περιοχή. Από το σχήμα 5.6 παρατηρείται ότι στις μεγαλύτερες συχνότητες εμφανίζονται μεγαλύτερες απώλειες σκίασης.

	Suburban	Urban	Dense Urban	Urban High-Rise
μ	19.8	19.5	19.5	19.5
σ	8.0	8.1	8.1	8.1

Πίνακας 5.3 Παράμετροι κανονικής κατανομής για διάφορες περιοχές (f=2 GHz, $\theta=70^\circ$).

Στον πίνακα 5.3 φαίνεται η κανονική κατανομή για γωνία ανύψωσης 70° και για συχνότητα ίση με 2 GHz. Παρατηρείται ότι μόνο στην ημιαστική περιοχή υπάρχουν ελαφρώς διαφορετικές παράμετροι και αυτές όμως είναι ασήμαντες.

Για τον υπολογισμό των μ και σ της κανονικής κατανομής χρησιμοποιείται η έκφραση

$$\mu, \sigma = \frac{g + \theta}{h + i\theta} \quad (5.4)$$

όπου θ είναι η γωνία ανύψωσης σε μοίρες και g,h, i είναι εμπειρικές παράμετροι. Οι υπολογισμοί φαίνονται στο σχήμα 5.6 ενώ οι εμπειρικές παράμετροι φαίνονται στους πίνακες 5.4, 5.5 και 5.6.

	$0^\circ < \theta < 10^\circ$			$10^\circ \leq \theta < 90^\circ$		
	g	h	i	g	h	i
μ	2.55	0.0594	0.0406	-94.20	-3.44	0.0318
σ	-12.96	-1.076	0.0780	-89.55	-8.87	0.0927

Πίνακας 5.4 Παράμετροι για εξίσωση 4, f=2.0 GHz, όλες οι περιοχές

	$0^\circ < \theta < 10^\circ$			$10^\circ \leq \theta < 90^\circ$		
	g	h	i	g	h	i
μ	2.70	0.059	0.0376	-92.90	-3.14	0.0302
σ	-12.24	-1.006	0.0788	-89.06	-8.63	0.0921

Πίνακας 5.5 Παράμετροι για εξίσωση 4, f=3.5 GHz, όλες οι περιοχές

	$0^\circ < \theta < 10^\circ$			$10^\circ \leq \theta < 90^\circ$		
	g	h	i	g	h	i
μ	2.636	0.0554	0.0352	-92.80	-2.955	0.0285
σ	-12.40	-0.998	0.0769	-89.54	-8.474	0.0900

Πίνακας 5.6 Παράμετροι για εξίσωση 4, f=5.5 GHz, όλες οι περιοχές

Γ. Μοντέλο σκίασης HAP

Τελικά, οι απώλειες σε μια αστική περιοχή μπορούν να εκφραστούν σε dB ως:

$$\begin{aligned} L &= L_{FSL} + \zeta_{LOS} && \text{LOS} \\ L &= L_{FSL} + L_S + \zeta_{NLOS} && \text{NLOS} \end{aligned} \quad (5.5)$$

όπου FSL είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου και είναι

$$L_{FSL} = 20 \log(d_{km}) + 20 \log(f_{GHz}) + 92.4 \quad (5.6)$$

όπου d_{km} είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη εκφρασμένη σε χιλιόμετρα, f_{GHz} η συχνότητα σε GHz, L_S εκφράζει μια τυχαία σκίαση σε dB ως αποτέλεσμα της γωνίας ανύψωσης. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την κανονική κατανομή όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 5.4 και από τις εμπειρικές παραμέτρους των πινάκων 5.4 έως 5.6.

Λόγω της αναγκαιότητας για όσο το δυνατό ρεαλιστικό μοντέλο εισάγονται οι τυχαίες συνιστώσες ζ_{LOS} και ζ_{NLOS} που και είναι εκφρασμένες σε dB. Διάφορες μελέτες έχουν αποδείξει ότι οι τιμές της τυπικής απόκλισης για οπτικής επαφής ζεύξεις κυμαίνονται από 3 έως 5 dB ενώ για ζεύξεις χωρίς οπτική επαφή κυμαίνονται από 8 έως 12 dB.

Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα για γωνία ανύψωσης 70° , για $f=2$ GHz και για απόσταση 20 Km⁰.

$$\begin{aligned} L_{LOS} &= 20 \log(d_{km}) + 20 \log(f_{GHz}) + 92.4 + \text{normrnd}(0,4) \Rightarrow \\ L_{LOS} &= 20 \log 20 + 20 \log 2 + 92.4 + \text{normrnd}(0,4) \Rightarrow \\ L_{LOS} &\cong 126 \text{dB} \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$L_{NLOS} = 20\log(d_{km}) + 20\log(f_{GHz}) + 92.4 + \text{normrnd}\left(\frac{-92.4 + \theta}{-3.44 + 0.0318\theta}, \frac{-89.55 + \theta}{-8.87 + 0.0927\theta}\right) + \text{normrnd}(0,10) \Rightarrow$$

$$L_{NLOS} = 20\log(20) + 20\log(2) + 92.4 + \text{normrnd}\left(\frac{-92.4 + 70}{-3.44 + 0.0318 * 70}, \frac{-89.55 + 70}{-8.87 + 0.0927 * 70}\right) + \text{normrnd}(0,10) \Rightarrow$$

$$L_{NLOS} \cong 145\text{dB} \quad (5.8)$$

όπου d_{km} είναι η απόσταση σε χιλιόμετρα, θ είναι η γωνία ανύψωσης σε μοίρες και η $\text{normrnd}(\mu, \sigma)$ δημιουργεί τυχαίες τιμές χρησιμοποιώντας την κανονική κατανομή και τις μεταβλητές μ και σ .

Από τους πίνακες 5.5 και 5.6, με γραμμική παρεμβολή υπολογίζονται οι παράμετροι μ και σ για τη συχνότητα των 4.0 GHz (πίνακας 5.7).

	g	h	i
μ	-92.875	-3.09	0.0297
σ	-89.18	-8.591	0.09075

Πίνακας 5.7 Παράμετροι για εξίσωση 4, $f=4.0$ GHz, όλες οι περιοχές

Επίσης, γίνεται υπολογισμός για γωνία ανύψωσης 70° , για $f=4$ GHz και για απόσταση 20 Km $^\circ$.

$$L_{LOS} = 20\log(d_{km}) + 20\log(f_{GHz}) + 92.4 + \text{normrnd}(0,4) \Rightarrow$$

$$L_{LOS} = 20\log 20 + 20\log 4 + 92.4 + \text{normrnd}(0,4) \Rightarrow$$

$$L_{LOS} \cong 132.2\text{dB}$$

$$L_{NLOS} = 20\log(d_{km}) + 20\log(f_{GHz}) + 92.4 + \text{normrnd}\left(\frac{-92.875 + \theta}{-3.09 + 0.0297\theta}, \frac{-89.18 + \theta}{-8.591 + 0.09075\theta}\right) + \text{normrnd}(0,10) \Rightarrow$$

$$L_{NLOS} = 20\log(20) + 20\log(4) + 92.4 + \text{normrnd}\left(\frac{-92.875 + 70}{-3.09 + 0.0297 * 70}, \frac{-89.18 + 70}{-8.591 + 0.09075 * 70}\right) + \text{normrnd}(0,10) \Rightarrow$$

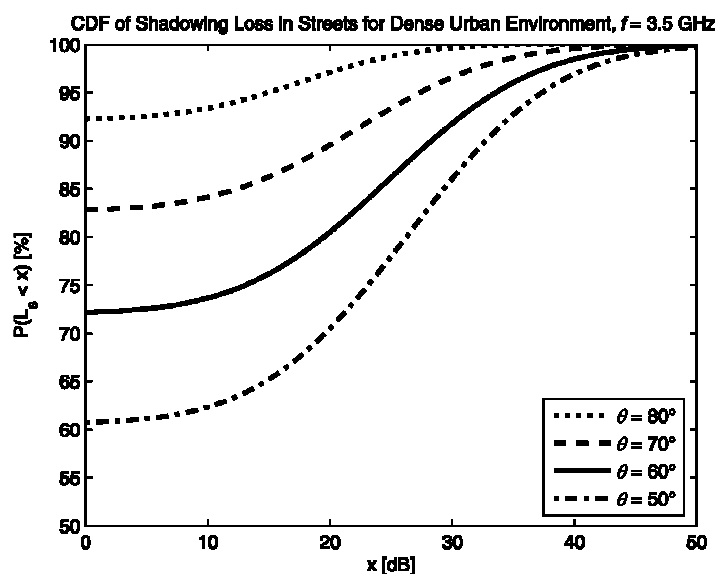
$$L_{NLOS} \cong 150.9\text{dB}$$

Παρατηρούμε μια αύξηση των απωλειών κατά 6 dB περίπου, όταν μεταβαίνουμε από την $f=2$ GHz στην $f=4$ GHz και στις LOS και στις NLOS ζεύξεις.

Μια άλλη επιλογή να εκφράσουμε το μοντέλο σκίασης είναι να χρησιμοποιήσουμε το CDF ως

$$P(L_S < x) = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] (100 - P_{LOS}) + P_{LOS} \quad (5.9)$$

όπου P είναι η επί τοις εκατό πιθανότητα, L_S και x εκφράζουν τις απώλειες σκίασης σε dB, μ είναι η μέση τιμή σε dB, σ είναι η απόκλιση σε dB που προκύπτει από την εξίσωση 5.4 και P_{LOS} είναι η πιθανότητα οπτικής επαφής σε δρόμο δοσμένο από την εξίσωση 5.2. Στο σχήμα 7 φαίνεται ένα CDF παράδειγμα στους 3.5 GHz και σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή και για γωνίες ανύψωσης 80° , 70° , 50° και 60° .



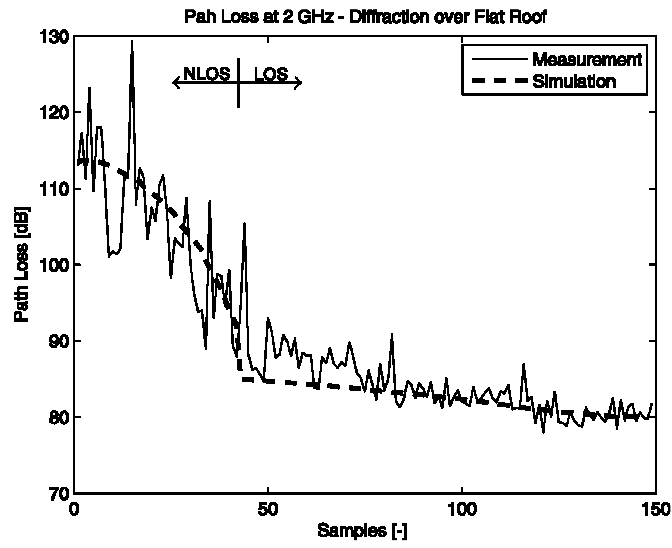
Σχήμα 5.7 CDF για μοντέλο σκίασης σε πυκνοκατοικημένη περιοχή, $f=3.5$ GHz

5.5 Επίλογος

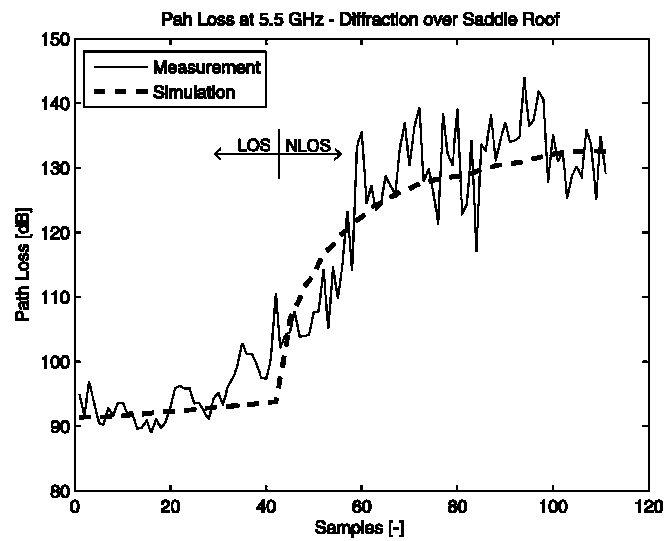
Αυτές οι μέθοδοι προσομοίωσης και ο υπολογισμός της επιπρόσθετης απώλειας σκίασης μπορεί να φαίνονται υπερασσιόδοξοι. Οι στέγες που υπάρχουν έχουν διαφορετικό σχήμα (κλιμακωτή, οριζόντια κλπ) ενώ το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη μικρότερη διαδρομή μεταξύ HAPS και κινητού σταθμού.

Από μελέτη που η ισχύς του σήματος εκπομπής ήταν 26 dBm, σε συχνότητες των 2.0, 3.5 και 5.5 GHz, η γεννήτρια ήταν τοποθετημένη στο πίσω μέρος του εναέριου μέσου, πετούσε πάνω από κατοικημένη περιοχή σε ύψος περίπου 150 μέτρων υλοποιώντας γωνίες ανύψωσης από 20° έως 90° φαίνεται ότι οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν το θεωρητικό μοντέλο.

Στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται οι μετρούμενες απώλειες καθώς και αυτές από την προσομοίωση.



Σχήμα 5.8 Απώλειες για $f=2.0$ GHz



Σχήμα 5.9 Απώλειες για $f=5.5$ GHz

5.6 Βιβλιογραφία κεφαλαίου 5

- [1] J. HOLIS, P. PECHAC, "Elevation Dependent Shadowing Model for Mobile Communications via High Altitude Platforms in Built-Up Areas", *IEEE Transactions on antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 4, April 2008
- [2] M. KONG, O. YORKINOV, S. SHIMAMOTO, "Evaluations of Urban Shadowing Characteristics for HAPS Communications"
- [3] J. HOLIS, P. PECHAC, "Penetration Loss Measurement and Modelling for HAP Mobile Systems in Urban Environment", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2008, Article ID 543290
- [4] C. Oestges and D. Vanhoenacker-Janvier, "Propagation Modeling and System Strategies in Mobile-satellite urban Scenarios," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 2, pp. 422–429, Mar. 2001.
- [5] T. SOFOS and P. CONSTANTINOU, "Propagation Model for Vegetation Effects in Terrestrial and Satellite Mobile Systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 7, pp. 1917–1920, Jul. 2004.
- [6] C. OESTGES, S. R. SAUNDERS, and D. VANHOENACKER-JANVIER, "Physical Statistical Modeling of the Land Mobile Satellite Channel Based on Ray Tracing," *Proc. Inst. Elect.Eng. Microw. Antennas Propag.*, vol. 146, pp. 45–49, Feb. 1999.
- [7] V. MILAS, , "Fixed Service using High Altitude Platform Stations", May 2006
- [8] R. G. KOUYOUMJIAN and P. H. PATHAK, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface," *Proc. IEEE*, vol. 62, pp. 1448–1461, Nov. 1974.
- [9] Y. ALBAGORY, "A Novel Beamforming Technique for Highways Coverage Using High Altitude Platforms", *Research Letters in Signal Processing*, Vol. 2007, Article ID 52745

[10] www.airshipclub.com

