



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**Τμήμα: Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
& Μηχανικών Υπολογιστών**

**Τομέας: Συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας
και τεχνολογίας υλικών**

Καθηγητής: Φίλιππος Κωνσταντίνου

Επικοινωνία Νάνο-Δορυφόρων με Laser



**Κουτσούκης Μάριος
Μπάλτσας Άλφρεντ**

Αθήνα 2001

Στην προσπάθειά μας αυτή βρήκαμε την θερμή συμπαράσταση του επιβλέποντα καθηγητή Φίλιππα Κωνσταντίνου και θέλουμε να τον ευχαριστήσουμε πολύ γι' αυτό. Παρομοίως ευχαριστούμε τον καθηγητή Α. Σεραφετινίδη για την βοήθειά του πάνω στον τομέα των Lasers. Επίσης θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον Ηλία Κατιμερτζόγλου για την πολύπλευρη βοήθειά του και την ομάδα που εργάστηκε στη μελέτη των νάνο-δορυφόρων για την πολύτιμη συνεργασία.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
Κεφάλαιο 1^ο Σκοπός της εργασίας	4
Κεφάλαιο 2^ο Εισαγωγή	6
Κεφάλαιο 3^ο Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Laser	9
3.1 Ιδιότητες Ακτινοβολίας Laser	10
3.2 Εφαρμογές των Laser	11
3.3 Γιατί επικοινωνία με Laser και όχι RF	13
3.4 Μια περίληψη εφαρμογών επικοινωνίας με Laser	14
3.4.1 Laser για επικοινωνία στο διάστημα	15
3.4.2 Οι περιορισμοί στην επιλογή τεχνολογίας Laser	17
3.5 Τεχνολογία φωρατών (Detector Technology)	18
3.5.1 Φωρατές επικοινωνίας (Communication Detectors)	19
3.5.2 Φωρατές ανίχνευσης σήματος (Acquisition detectors)	20
3.5.3 Φωρατές παρακολούθησης (Tracking detectors)	20
3.5.4 Υβριδικοί φωρατές (Hybrid Detectors)	20
Κεφάλαιο 4^ο Μεθοδολογίες σχεδίαση συστήματος	21
4.1 Ανίχνευση (Acquisition)	21
4.1.1 Τεχνικές σάρωσης	24
4.1.2 Προτεινόμενη τεχνική σάρωσης	25
4.1.3 Εξέταση τρόπων σάρωσης	27
4.1.4 Τύποι ανιχνευτών	28
4.1.5 Τύπος Σήματος Ανίχνευσης	29
4.1.6 Τύποι Δεκτών	30
4.2 Στόχευση και Ευθυγράμμιση (Pointing and Tracking)	33
4.2.1 Τεχνικές στόχευσης (Pointing Techniques)	34
4.2.2 Τεχνικές Ευθυγράμμισης (Tracking techniques)	35
4.3 Τεχνικές επικοινωνίας	37
4.3.1 Άμεση φώραση (Direct detection)	37

4.3.2	Σύμφωνη φώραση (Coherent detection)	41
4.3.3	Τεχνικές κωδικοποίησης	44
4.4	Εξίσωση οπτικής επικοινωνίας	45
Κεφάλαιο 5^ο	Τύποι Δεκτών	49
5.1	Δέκτης επικοινωνίας	49
5.1.1	Θόρυβος Περιβάλλοντος (Background Noise)	50
5.1.2	Θορύβου Σκότους	57
5.1.3	Θόρυβος προενισχυτή	58
5.1.4	Θόρυβος βολής	59
5.1.5	Συνολικός θόρυβος στο σύστημα άμεσης φώρασης	59
5.2	Δέκτης ανίχνευσης (The Acquisition Receiver)	60
5.2.1	Θόρυβος στον δέκτη ανίχνευσης παλμών	62
5.2.1.1	Θόρυβος περιβάλλοντος (Background Noise)	63
5.2.1.2	Θόρυβος σκότους	63
5.2.1.3	Θόρυβος προενισχυτή	63
5.2.1.4	Θόρυβος Βολής	64
5.2.2	Απαιτούμενο σήμα για τους παλμούς ανίχνευσης	64
5.3	Δέκτης ευθυγράμμισης (The tracking Receiver)	65
Κεφάλαιο 6^ο	Σχεδίαση του Συστήματος	68
6.1	Πομπός	70
6.1.1	Πηγή πληροφορίας	71
6.1.2	Κύκλωμα οδήγησης	72
6.1.3	Εξάρτημα Laser	73
6.1.4	Ρυθμιστής ανοίγματος δέσμης (Beam Spreader)	77
6.2	Δέκτης	79
6.2.1	Λαμβανόμενη ισχύς	81
6.2.2	Φακός εστίασης	82
6.2.3	Φωτοδίοδος	84
6.2.4	Ενισχυτής	86
6.2.5	Φίλτρο	89
6.2.6	Συγκριτής	92
6.3	Ανάλυση μάζας και ισχύος (Mass and Power Budget)	95
6.4	Εναλλακτική λύση	95

6.4.1	Σχεδίαση του συστήματος ανίχνευσης	97
6.4.2	Σύστημα Οδηγού δέσμης (beam steering system)	99
6.4.3	Υπολογισμός της γωνίας κατεύθυνσης(Point ahead angle)	100
6.4.4	Επίδραση των ταλαντώσεων στο σύστημα ανίχνευσης	101
6.5	Πείραμα	104
6.5.1	Πομπός	105
6.5.2	Δέκτης	105
6.5.3	Μετρήσεις	106
Κεφάλαιο 7^ο	Ανάλυση ζεύξης	107
7.1	Απαιτήσεις	107
7.2	Το περιβάλλον	108
7.3	Επιλογές συστήματος	109
7.4	Σχεδιασμός σύνδεσης επικοινωνίας	109
7.4.1	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και διαμόρφωση	110
7.4.2	Ρυθμός σφαλμάτων και κωδικοποίηση	110
7.4.3	Απόσταση	110
7.4.4	Παράμετροι του δέκτη	111
7.4.4.1	Θόρυβος περιβάλλοντος	111
7.4.4.2	Θόρυβος σκότους	112
7.4.4.3	Θόρυβος προ-ενισχυτή	112
7.4.4.4	Θόρυβος Βολής	113
7.4.4.5	Συνολική Ισχύς Θορύβου	113
7.4.4.6	Εκπεμπόμενη Ισχύς	114
Κεφάλαιο 8^ο	Συμπεράσματα	115
Παράρτημα		116
Βιβλιογραφία		200

Κεφάλαιο 1^ο

Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η σχεδίαση ενός συστήματος επικοινωνίας δύο νάνο-δορυφόρων με Laser (Laser Inter-Satellite Link). Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι σημαντικότερες παράμετροι του συστήματος. Πρώτα απ' όλα πρέπει να πούμε ότι το σύστημα αυτό κατασκευάζεται με σκοπό την επικοινωνία δύο νάνο-δορυφόρων με την ονομασία MUSTANG (Multi University Space Technology & Advanced Nanosatellite Group) για την κατασκευή των οποίων συνεργάζονται το Ε.Μ.Π. και το πανεπιστήμιο του Southampton. Οι δορυφόροι αυτοί θα βρίσκονται σε LEO τροχιά (Σχήμα 1.1) έτσι ώστε να παρέχουν μια επικοινωνία μη πραγματικού χρόνου (Store and Forward non real time communication). Όλες οι μεγάλες εταιρίες και οργανισμοί όπως η ESA, η NASA και πολλές άλλες, έχουν ήδη αρχίσει να εξερευνούν, τα τελευταία 10 χρόνια, αυτόν τον νέο τομέα επικοινωνίας. Το μεγαλύτερο σύστημα το οποίο έχει κατασκευαστεί είναι το Iridium, με 66 δορυφόρους σε αστερισμό, επικοινωνώντας μεταξύ τους χρησιμοποιώντας Laser ISL's (Laser Inter-Satellite Link). Επίσης η ESA (European Space Agency), με την εκτόξευση του SPOT-IV, άρχισε να εξερευνεί αυτόν τον νέο τομέα της επικοινωνίας με Laser (Laser Communication).



Σχήμα 1.1: Η τροχιά που θα ακολουθούν οι δύο νάνο-δορυφόροι

Η εργασία αυτή θα χωριστεί σε δύο μέρη, το θεωρητικό και το πρακτικό. Δηλαδή στην αρχή θα εξεταστούν όλες οι παράμετροι που αφορούν την επικοινωνία με Laser (Laser Inter-Satellite Link) έτσι ώστε με την γνώση που θα αποκτήσουμε να μπορεί να κατασκευαστεί ένα τέτοιο σύστημα στο εργαστήριο. Ο ρυθμός μετάδοσης

που έχει επιλεγεί είναι 1Mbps, αρκετά μεγάλος αφού η επικοινωνία γίνεται με Laser και η ισχύς που θα καταναλωθεί θα είναι μικρή.

Στο πρώτο μέρος θα γίνει μια θεωρητική ανάλυση του συστήματος. Θα γίνει μια λεπτομερής συζήτηση όσον αφορά τις παραμέτρους της ανίχνευσης, στόχευσης και ευθυγράμμισης των δορυφόρων (Acquisition, Pointing and Tracking) αλλά και του κεντρικού σημείου της ανάλυσης που είναι η επικοινωνία των δορυφόρων (ISL). Επίσης οι σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν θα δώσουν χρήσιμες πληροφορίες και θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση του θέματος.

Το δεύτερο μέρος ασχολείται με την σχεδίαση του πομπού και του δέκτη έτσι ώστε να είναι δυνατόν η επικοινωνία μεταξύ τους σύμφωνα με της προδιαγραφές που μας δίνονται ή που επιλέξαμε. Τα βασικότερα σημεία του πρακτικού μέρους της εργασίας αυτής είναι η επιλογή των στοιχείων που θα χρειαστούν για την κατασκευή του πομπού και του δέκτη. Όσον αφορά τον πομπό, η επιλογή του Laser και του κυκλώματος οδήγησης πρέπει να είναι κατάλληλη έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη απόδοση. Το δεύτερο βήμα είναι η σχεδίαση του δέκτη που είναι το πιο σημαντικό τμήμα του συστήματος γιατί παρουσιάζει και τα περισσότερα προβλήματα. Τα προβλήματα αυτά έχουν να κάνουν με τα κυκλώματα που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, το θόρυβο που εισάγουν στο σύστημα και τη σειρά με την οποία πρέπει να τοποθετηθούν έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη απόδοση του συστήματος. Το τελευταίο βήμα είναι να προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε τα προβλήματα τα οποία θα παρουσιαστούν και αν είναι δυνατόν να βρούμε λύσεις κατάλληλες για την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Στο τέλος θα αναφερθούν μερικά συμπεράσματα που θα έχουν να κάνουν με το θεωρητικό και το πρακτικό μέρος, τις διαφορές που θα παρατηρηθούν και την εξήγησή τους.

Πρόθεσή μας είναι, η εργασία αυτή να δώσει μερικές πληροφορίες για την επικοινωνία δορυφόρων με Laser (Laser Inter-Satellite Link) και να φανερώσει τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι δορυφόροι στο διάστημα όταν χρησιμοποιούν συστήματα οπτικής επικοινωνίας (Optical Communication System).

Κεφάλαιο 2^ο

Εισαγωγή

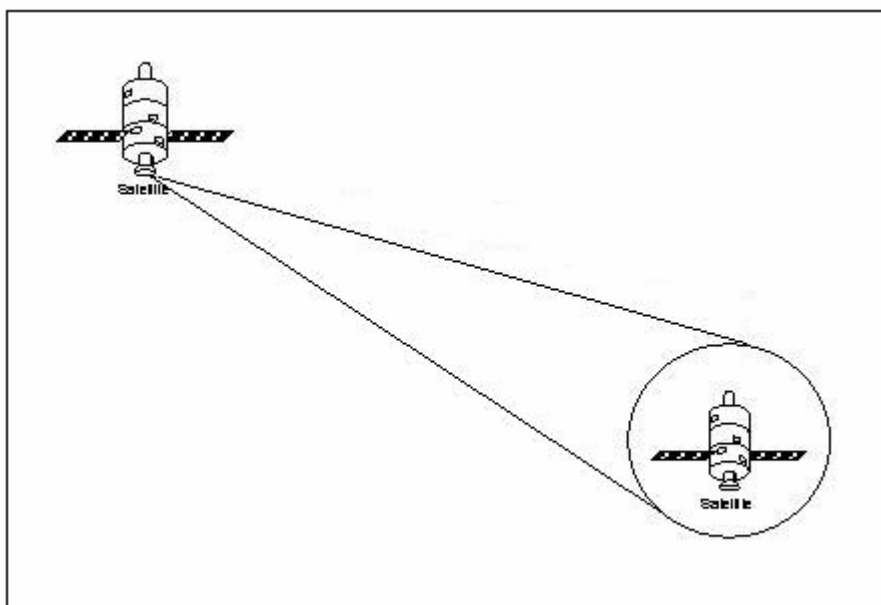
Η εργασία αυτή ασχολείται με την πρόσφατα ανεπτυγμένη περιοχή η οποία είναι η χρήση Laser για επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων, δηλαδή η μεταφορά δεδομένων μεταξύ δύο ή περισσότερων δορυφόρων. Το Ε.Μ.Π. σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Southampton έχει αποφασίσει να κατασκευάσει και να θέσει σε τροχιά ένα σύστημα δύο νάνο-δορυφόρων (με μάζα κάτω των 10 kg) με την ονομασία MUSTANG. Σκοπός αυτής της έρευνας είναι η εγκατάσταση επικοινωνίας μεταξύ αυτών των δορυφόρων οι οποίοι θα βρίσκονται σε LEO τροχιά. Η χρησιμοποίηση Laser για την επικοινωνία των δορυφόρων έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των χρόνων καθυστέρησης έτσι ώστε να επιτευχθεί μια πιο ακριβής επικοινωνία.

Τα τελευταία 10 χρόνια, η χρησιμοποίηση επικοινωνίας Laser στο διάστημα (Free-Space Laser Communication) έχει αυξηθεί ραγδαία. Οι επικοινωνίες με Laser χρησιμοποιούνται σε όλες τις τροχιές, όπως στις GEO-GEO, GEO-LEO και στην περίπτωση που αφορά και την έρευνα αυτή LEO-LEO. Η επικοινωνία των δορυφόρων μπορεί να γίνει είτε στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency), είτε στις οπτικές συχνότητες (Laser). Οι αιτίες χρησιμοποίησης Laser και όχι RF συχνοτήτων είναι οι παρακάτω :

- Μικρότερο μέγεθος και μικρότερο βάρος των υλικών
- Λιγότερη ισχύς εκπομπής
- Μεγαλύτερη ασφάλεια διασύνδεσης
- Υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης (data rate)
- Μικρότερο άνοιγμα δέσμης

Έκτος από τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε, στην επικοινωνία δορυφόρων με Laser υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η ακρίβεια με την οποία ένας δορυφόρος μπορεί να βρει τον άλλον έτσι ώστε να γίνει δυνατή η επικοινωνία. Αυτά αναφέρεται σαν πηγές θορύβου ανίχνευσης στόχευσης και ευθυγράμμισης (Acquisition, Pointing and Tracking source of errors). Επειδή ο δορυφόρος θα κινείται σε ένα δύσκολο περιβάλλον, όπως είναι το διάστημα, θα υπάρχει ένας

αριθμός από ταλαντώσεις που θα αναγκάζουν τον δορυφόρο να συμπεριφέρεται με έναν περίπλοκο τρόπο. Επίσης, λόγω του μικρού ανοίγματος της δέσμης, η ανίχνευση του ενός δορυφόρου από τον άλλον θα είναι δύσκολη και χρονοβόρα. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η επικοινωνία δορυφόρων με οπτική επαφή.



Σχήμα 2.1: Επικοινωνία δορυφόρων με οπτική επαφή

Η εργασία αυτή θα χωριστεί σε δύο κύρια μέρη, το θεωρητικό και το πρακτικό. Το θεωρητικό μέρος θα είναι μια γενική προσέγγιση όλων των παραμέτρων που αφορούν τη σχεδίαση της επικοινωνίας των δορυφόρων με Laser (Laser Inter-Satellite Link), όπως είναι η ανάλυση των δεκτών ανίχνευσης και ευθυγράμμισης (acquisition, pointing and tracking). Επίσης θα εξεταστούν μερικοί άλλοι παράμετροι, που αφορούν της διάφορες πηγές θορύβου, όπως ο θόρυβος βάθους (background noise), ο εσωτερικός θόρυβος (internal noise) κλπ. Το δεύτερο μέρος της εργασίας θα ασχοληθεί με την πρακτική υλοποίηση του συστήματος. Θα γίνει μια λεπτομερής ανάλυση του πομπού και του δέκτη με σκοπό την κατασκευή ενός συστήματος επικοινωνίας οπτικής επαφής που να μπορεί να μεταφέρει πληροφορία με ρυθμό 1Mbps σε συνθήκες γήινου περιβάλλοντος. Το σύστημα αυτό θα είναι παρόμοιο με αυτό που θα μεταφέρουν οι δύο νάνο-δορυφόροι όταν σταλούν στο διάστημα. Με την προσέγγιση αυτή θα μπορέσουμε να καταλάβουμε καλύτερα την τελική μορφή που θα έχει ο πομποδέκτης επικοινωνίας των δορυφόρων αφού η κύρια διαφορά που θα έχουν τα δύο συστήματα θα είναι οι θερμοκρασίες στις οποίες θα λειτουργούν.

Η εργασία θα χωριστεί σε οχτώ κεφάλαια. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα της εργασίας αυτής που είναι η επικοινωνία δορυφόρων με Laser (Laser ISL, Inter-Satellite Link). Επίσης δίνονται γενικές πληροφορίες για το θέμα αυτό αλλά παρακάτω το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην περίπτωση των νάνο-δορυφόρων. Στο επόμενο κεφάλαιο (3^ο Κεφάλαιο) θα γίνει μια γενική αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας των Laser. Επίσης θα αναφερθούν διάφοροι τομείς της τεχνολογίας στους οποίους τα Laser έχουν εκτεταμένη εφαρμογή επικεντρώνοντας την προσοχή στον τομέα της επικοινωνίας στο διάστημα. Συνεχίζοντας, στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζονται με λεπτομέρειες οι σημαντικότεροι παράμετροι της εργασίας και δίνεται μια μεθοδολογία σχεδίασης του συστήματος. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση των διαφόρων δεκτών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν (επικοινωνίας, ανίχνευσης, στόχευσης και παρακολούθησης, communication, acquisition, pointing and tracking) καθώς επίσης αναφέρονται και αναλύονται οι διάφορες μορφές θορύβου. Στο επόμενο κεφάλαιο (6^ο Κεφάλαιο) θα εξεταστεί η σχεδίαση που έχει αποφασιστεί για αυτό το σύστημα. Θα γίνει μια λεπτομερής ανάλυση για κάθε στοιχείο του πομπού και του δέκτη, εστιάζοντας περισσότερο στο δέκτη στον οποίο εμφανίζονται τα περισσότερα προβλήματα προσπαθώντας να αναπαράγουμε το εκπεμπόμενο σήμα. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται και μια εναλλακτική λύση του προβλήματος. Στο έβδομο κεφάλαιο θα γίνει μια ανάλυση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές συνθήκες στις οποίες θα βρίσκονται οι νάνο-δορυφόροι. Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο θα αναφερθούν τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση που προηγήθηκε.

Κεφάλαιο 3^ο

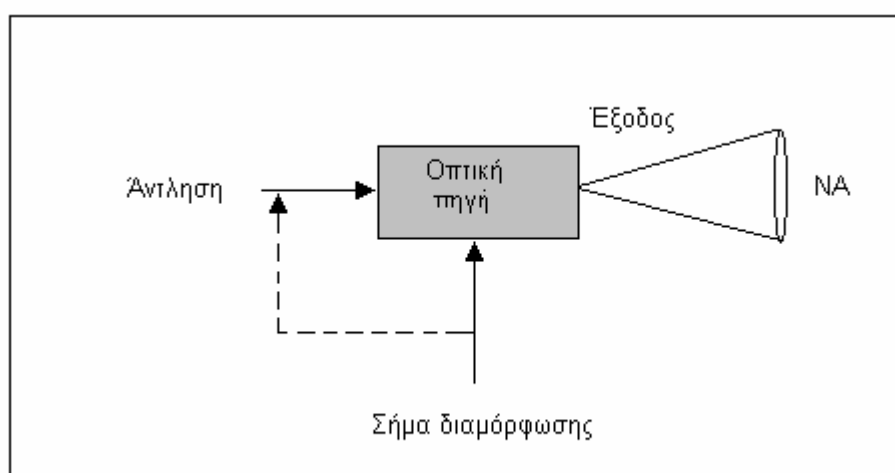
Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Laser

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια γενική παρουσίαση των βασικών αρχών λειτουργίας των Lasers. Θα αναφερθούμε στις ιδιότητες λειτουργίας τους καθώς και στις εφαρμογές τους, επικεντρώνοντας την προσοχή τη χρησιμοποίησή τους στις δορυφορικές επικοινωνίες. Επίσης θα γίνει μια γενική αναφορά στους φωρατές που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες, η τεχνολογία των οποίων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τεχνολογία των Lasers.

Η λέξη Laser είναι ακρωνύμιο του “light amplification by stimulated emission of radiation”. Η λέξη αυτή χρησιμοποιείται κοινά όχι μόνο για συχνότητες στην ορατή περιοχή αλλά και για κάθε συχνότητα που εμπίπτει στο μακρινό η κοντινό υπέρυθρο, στο υπεριώδες, και ακόμη στην περιοχή των ακτίνων X.

Για να δημιουργηθεί ακτινοβολία Laser, πρέπει να ικανοποιηθούν ορισμένες βασικές συνθήκες. Πρέπει να υπάρχει ένα ενεργό μέσο που να μπορεί να δώσει εκπομπή ακτινοβολίας στο “οπτικό” μέρος, πρέπει επίσης να υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας μίας κατάστασης, που είναι γνωστή σαν αναστροφή πληθυσμών, μέσα από μία διέγερση που αναφέρεται σαν άντληση. Τέλος για να δημιουργηθούν συνθήκες για ταλάντωση Laser πρέπει να υπάρχει κάποιο οπτικό αντηχείο.

Το παρακάτω σχήμα υποδεικνύει το είδος της διάταξης που επιδιώκουμε να χρησιμοποιούμε σε ένα οπτικό δίκτυο.



Σχήμα 3.1: Εξιδανικευμένη οπτική πηγή (Σεραφετινίδης, 1980)

Η ενεργειακή είσοδος, που ονομάζεται ενέργεια “άντλησης” (pump), παρέχεται με μορφή είτε οπτικής εισόδου είτε ηλεκτρικού ρεύματος εισόδου, και στην έξοδο εμφανίζεται οπτική ενέργεια. Τα δεδομένα της πληροφορίας αποτυπώνονται πάνω στο φωτεινό σήμα, διαμορφώνοντας το πλάτος του, τη συχνότητα του, τη φάση ή την πόλωση του. Εάν πρόκειται να αποτυπωθούν δυαδικά δεδομένα με on-off διαμόρφωση, τότε αυτό μπορεί να γίνει μεταβάλλοντας απλά την άντληση μεταξύ δύο τιμών που εξασφαλίζουν ότι το φως είναι ανοιχτό ή κλειστό (on ή off).

Το μέγεθος και η μορφή των Laser ποικίλει. Μπορεί να είναι μικρά σαν τα εκπαιδευτικά Laser He-Ne, ή να αποτελούν συστήματα πολύ μεγάλων διαστάσεων όπως το Laser Shiva. Η ισχύς ποικίλει επίσης. Μπορεί να είναι οποιασδήποτε τάξης από m-Watts έως T-Watts. Θα μπορούσαμε να κατατάξουμε τα διάφορα Laser σε κατηγορίες σύμφωνα με το είδος του ενεργού υλικού τους, την περιοχή εκπομπής τους ή την ισχύ τους. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι αυτός που βασίζεται στον τρόπο διέγερσης του ενεργού υλικού τους, και αυτόν θα ακολουθήσουμε στα επόμενα:

Laser οπτικής άντλησης

Laser ηλεκτρικής εκκένωσης

Χημικά Laser

Laser δέσμης ηλεκτρονίων

Laser διηγερμένων διμερών

Laser φωτολυτικής άντλησης

3.1 Ιδιότητες Ακτινοβολίας Laser

-Μονοχρωματικότητα

Αυτή η ιδιότητα οφείλεται σε δυο περιστάσεις :

- (i) Μόνο μια συχνότητα του Η.Μ. κύματος μπορεί να ενισχυθεί.
- (ii) Αφού το σύστημα των δυο κατόπτρων σχηματίζει μια κοιλότητα συντονισμού, ταλάντωση μπορεί να συμβεί μονό στις συχνότητες συντονισμού αυτής της κοιλότητας

-Κατευθυντικότητα

Αυτή η ιδιότητα είναι άμεσο επακόλουθο του γεγονότος ότι το ενεργό υλικό τίθεται σε μια κοιλότητα συντονισμού.

-Λαμπρότητα

Ορίζουμε τη λαμπρότητα μιας δεδομένης πηγής H.M. κυμάτων σαν την ισχύ που εκπέμπει ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα στερεάς γωνίας.

-Συμφωνία

Για κάθε H.M. κύμα μπορούμε να εισαγάγουμε δύο έννοιες συμφωνίας, δηλαδή τη χωρική και τη χρονική συμφωνία.

-Πόλωση

Το φως των κλασσικών πηγών είναι συνήθως μη πολωμένο ή μερικά πολωμένο. Αντίθετα πολλά laser παράγουν πολωμένο φως είτε λόγω της φύσης είτε λόγω γεωμετρίας του ενεργού τους υλικού, είτε επειδή έχουν προστεθεί οπτικά πολωτικά στοιχεία στο οπτικό αντηχείο τους, όπως πρίσματα, πλακίδια Brewster, φράγματα ανάκλασης (gratings), πολωτές υψηλής ισχύος κλπ.

3.2 Εφαρμογές των Laser

Οι εφαρμογές των laser στην επιστήμη και την τεχνολογία σήμερα, είναι παρά πολλές που στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής είναι δύσκολα να περιγραφούν ή και να απαριθμηθούν. Θα αναφέρουμε μόνο τις πιο βασικές εφαρμογές των laser.

Εφαρμογές στην Φυσική και στην Χημεία

Η ανακάλυψη του Laser και η ανάπτυξή του οφείλεται βασικά στις γνώσεις που προσφέρει η Φυσική και η Χημεία. Ήταν επομένως φυσικό να επωφεληθούν πρώτες αυτές από την χρήση του Laser. Στην Φυσική το laser άνοιξε νέους ορίζοντες έρευνας και ανέπτυξε σε πολύ μεγάλο βαθμό πεδία έρευνας που προϋπήρχαν της ανακάλυψης του. Στους νέους ορίζοντες εύκολα μπορεί να κατατάξει κανείς την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας Laser και ύλης, ενώ στην δεύτερη κατηγορία τα αντικείμενα της μη γραμμικής οπτικής.

Μια άλλη περιοχή της Φυσικής που ευνοήθηκε ιδιαίτερα από την ανακάλυψη του Laser είναι η φασματοσκοπία.

Φυσική και Χημεία ευνοήθηκαν από την δυνατότητα των Laser να παράγουν παλμούς πολύ μικρής χρονικής διάρκειας. Αυτό γιατί έτσι έγινε δυνατή η χρονική

μελέτη και ανάλυση της εξέλιξης διάφορων φαινομένων μέχρι και τάξης κάτω του psec.

Τέλος η πιο ενδιαφέρουσα εφαρμογή των Laser στην Χημεία είναι αυτή στη Φωτοχημεία.

Εφαρμογές στην Βιολογία και Ιατρική

Τα Laser χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε βιολογικές και ιατρικές εφαρμογές. Στις εφαρμογές αυτές το Laser χρησιμοποιείται είτε σαν διαγνωστικό εργαλείο είτε σαν χειρουργικό εργαλείο είτε τέλος για να δημιουργήσει μια αντιστρεπτή μεταβολή των βίο-μορίων.

Στην βιολογία το Laser χρησιμοποιείται περισσότερο σαν διαγνωστικό εργαλείο. Οι τεχνικές Laser που χρησιμοποιούνται εδώ περισσότερο είναι: φθορισμός του DNA που προκαλείται από παλμούς πολύ μικρής διάρκειας, μελέτη βίο-μορίων και ροδοψίνη με σκέδαση Raman.

Η πιο γνώστη εφαρμογή των Laser στην ιατρική είναι η χρήση τους στην οφθαλμολογική χειρουργική και ειδικότερα στην περίπτωση της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδούς από τον χοριοειδή χιτώνα.

Χρήση Laser γίνεται και στην δερματολογία είτε για καυτηριάσεις στην επιφάνια του δέρματος είτε για να αφαιρεθούν ανεπιθύμητα τατουάζ.

Εφαρμογές στις Οπτικές Επικοινωνίες

Η δυνατότητα χρησιμοποίησης δέσμης Laser σε τηλεπικοινωνίες μέσω της ατμόσφαιρας, δημιούργησε αρχικά μεγάλο ενθουσιασμό, καθώς τα Laser έχουν να προσφέρουν δυο σημαντικά πλεονεκτήματα:

(i) Το πρώτο προκύπτει από την ύπαρξη ταλαντώσεων μεγάλου εύρους ζώνης, καθώς η ποσότητα πληροφοριών που μπορεί να μεταδοθεί με ένα δεδομένο κυματικό φορέα είναι ανάλογη προς το εύρος ζώνης του. Μεταβαίνοντας από την περιοχή των μικροκυμάτων στην οπτική περιοχή ή συχνότητα του φέροντος αυξάνεται περίπου κατά 10^4 , επιτρέποντας έτσι τη δυνατότητα ταλαντώσεων μεγαλύτερου εύρους ζώνης συχνοτήτων.

(ii) Το δεύτερο προκύπτει από το μικρό μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Καθώς το τυπικό μήκος κύματος του laser είναι περίπου 10^4 φορές μικρότερο από το τυπικό μήκος κύματος των μικροκυμάτων, φαίνεται από την πιο κάτω εξίσωση

(Σεραφετινίδης, 1990) ότι για το ίδιο μέγεθος διαφράγματος D , το άνοιγμα δέσμης είναι 10^4 φορές μικρότερο για τα οπτικά κύματα σε σύγκριση με τα μικροκύματα..

$$D_M = \frac{\lambda_M}{\lambda_L} D_L \approx 10^5 D_L \quad (3.1)$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος, D είναι η διάμετρος της κεραίας και οι δείκτες L και M αναφέρονται στο Laser και στα μικροκύματα αντίστοιχα. Από τη σχέση (3.1) φαίνεται ότι για να έχει ο μικροκυματικός πομπός το ίδιο άνοιγμα δέσμης όπως ο πομπός Laser πρέπει η διάμετρος της μικροκυματικής κεραίας να είναι 100.000 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο της δέσμης Laser.

Η χρήση των Laser για ασύρματες οπτικές τηλεπικοινωνίες, έχει αναπτυχθεί μόνο για δύο ειδικές περιπτώσεις:

1. διαστημικές τηλεπικοινωνίες μεταξύ δυο δορυφόρων ή μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού που είναι τοποθετημένος σε περιοχή με ιδιαίτερα ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες. Τα laser που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση αυτή είναι το Laser Nd:YAG(με ρυθμό μετάδοσης μέχρι 10^9 bit/s) ή το Laser CO₂(με ρυθμό μετάδοσης μέχρι 3×10^8 bit/s).
2. Επικοινωνίες μεταξύ σημείων με οπτική επαφή, για μικρές αποστάσεις π.χ. μεταφορά δεδομένων σε ένα κτίριο. Στην περίπτωση αυτή προτιμούνται τα laser των ημιαγωγών.

3.3 Γιατί επικοινωνία με Laser και όχι RF

Το σύστημα επικοινωνίας με Laser προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με το σύστημα που χρησιμοποιεί συχνότητες RF.

Η μεγάλη κατευθυντικότητα της δέσμης των Laser σε σύγκριση με τις πυγές μικροκυμάτων, είναι ένας πρώτος βασικός λόγος. Για να πετύχουμε την ίδια κατευθυντικότητα, δηλαδή, το ίδιο άνοιγμα δέσμης με αυτού του Laser πρέπει να φτιάξουμε κεραίες μικροκυμάτων με διάμετρο περίπου 100000 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο της δέσμης του Laser. Έτσι, παίρνουμε ίδιο άνοιγμα δέσμης από Laser διαμέτρου 1 cm και από πηγή μικροκυμάτων με κεραία διαμέτρου 1000m.

Ένας άλλος λόγος, είναι η πολύ μεγάλη χωρητικότητα μιας δέσμης Laser σε πλήθος πληροφοριών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι τα Laser Nd Glass με εύρος ζώνης (band width) περίπου 30GHz, είναι θεωρικά δυνατό, να μεταδώσουν

ταυτόχρονα 5 εκατομμύρια έγχρωμα κανάλια τηλεόρασης. Ο αριθμός αυτός (αν συγκριθεί με τα τέσσερα ή πέντε το πολύ προγράμματα τηλεόρασης που μπορούν να μεταδοθούν ταυτόχρονα από κλασσικό σύστημα μικροκυμάτων σταθμού τηλεόρασης που έχει εύρος ζώνης 20 MHz) είναι τεράστιος.

Το σύστημα συγκρίσεως αποκαλύπτει αυτά τα πλεονεκτήματα της επικοινωνίας με Laser σε σχέση με το RF:

- Μικρότερο μέγεθος
- Μικρότερο βάρος, συνήθως σημαντικό
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος
- Λιγότερη πολυπλοκότητα κατασκευής

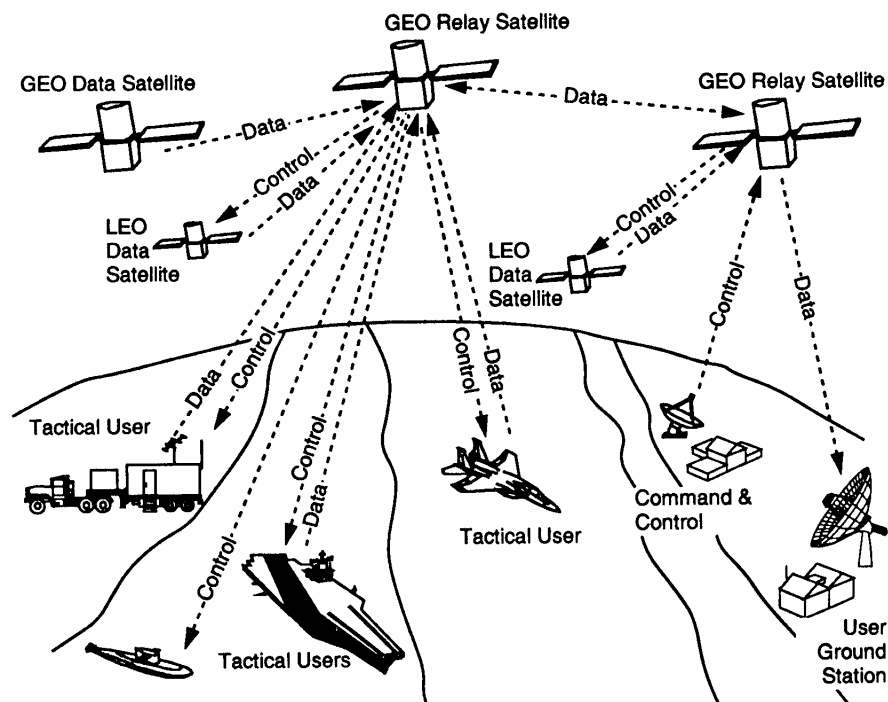
Αν και το μεγάλο εύρος ζώνης και η κατευθυντικότητα δέσμης Laser των συστημάτων επικοινωνίας με Laser αποτελούν δύο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν δυστυχώς και μερικά μειονεκτήματα. Το μεγάλο εύρος ζώνης π.χ. της δέσμης Laser πολύ δύσκολα μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επίσης η χρησιμότητα επικοινωνιακών συστημάτων με Laser περιορίζεται από άλλους παράγοντες όπως φωρατές και δυσκολίες τοποθέτησης της πληροφορίας πάνω σε δέσμες Laser. Αν δε το επικοινωνιακό σύστημα με Laser χρησιμοποιεί σαν μέσο διάδοσης την ατμόσφαιρα τότε η απόδοση του συστήματος προφανώς θα επηρεαστεί από ατμοσφαιρικές διαταραχές, βροχή, ομίχλη, κλπ. Χαρακτηριστικά αναφέρονται, ότι οι απώλειες λόγω βροχής ανέρχονται σε 3-8 db /km, λόγω ομίχλης 3-10 db/km, λόγω χιονιού 3-20 db/km.

Η επικοινωνία με Laser τότε δεν αντικαθιστά ολοκληρωτικά το RF σύστημα για επικοινωνία από το διάστημα προς την γη και αντίστροφα.. Αυτό συμβαίνει γιατί τα σήματα Laser δεν μπορούν εύκολα να διέρχονται από τα σύννεφα. (Lambert & Casey, 1995)

3.4 Μια περίληψη εφαρμογών επικοινωνίας με Laser

Εδώ υπάρχει ένας αριθμός εφαρμογών για τα οποία η επικοινωνία με Laser είναι καλά προσαρμοσμένη. Η ποικιλία των εφαρμογών στο διάστημα για επικοινωνία με Laser παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα . Αυτό περιλαμβάνει τα πιο κάτω :

- Επικοινωνία δορυφόρου με δορυφόρο
- Επικοινωνία δορυφόρου με αεροπλάνο
- Επικοινωνία δορυφόρου με σταθμό βάσης
- Επικοινωνία δορυφόρου με υποβρύχιο



Σχήμα 3.2: Εφαρμογές επικοινωνίας με Laser (Lambert & Casey, 1995)

3.4.1 Laser για επικοινωνία στο διάστημα

Τα τελευταία χρόνια, τα Laser έχουν γνωρίσει μεγάλη εφαρμογή στην επικοινωνία στο διάστημα, όπου η έλλειψη ατμόσφαιρας λύνει πολλά προβλήματα. Το Laser μπορεί να δώσει την λύση και σε ένα από τα βασικά προβλήματα της διαστημικής τεχνολογίας, δηλαδή τη διακοπή επαφής με το διαστημικό όχημα κατά τη στιγμή της εισόδου στη γήινη ατμόσφαιρα. Εκεί λόγω της μεγάλης τριβής, αναπτύσσεται θερμοκρασία και το μπροστινό μέρος του οχήματος ερυθροπυρώνεται, με συνέπεια τον εξιονισμό του ατμοσφαιρικού αέρα μπροστά από αυτό. Έτσι σήματα ραδιοσυχνοτήτων δεν μπορούν να διαπεράσουν το στρώμα αυτό της ατμόσφαιρας και διακόπτεται κάθε επαφή μεταξύ οχήματος και επίγειου κέντρου.

Ένα Laser για να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή πληροφορίας στην επικοινωνία στο διάστημα, πρέπει να εμφανίζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- i) Υψηλή ισχύς εξόδου
- ii) Συνεχή παροχή ισχύος
- iii) Στερεότητα και ανθεκτικότητα

- iv) Ικανότητα λειτουργίας σε μεγάλες θερμοκρασίες
- v) Ευστάθεια και υψηλή συχνότητα
- vi) Καλή συμφωνία στο χώρο
- vii) Μεγάλη μονοχρωματικότητα δηλαδή καλή συμφωνία στο χρόνο
- viii) Επιδεκτικότητα διαμόρφωσης
- ix) Ευκολία διέγερσης

Υπάρχουν αρκετών ειδών Laser που παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όσον αφορά τις επικοινωνίες. Π.χ το Laser ημιαγωγού αρσενιδίου του γαλλίου, έχει τα πλεονεκτήματα της εύκολης διαμόρφωσης και του μεγάλου χρόνου ζωής. Έχει όμως τα μειονεκτήματα της μη καλής συμφωνίας στο χώρο και στο χρόνο και επιπλέον απαιτεί σύστημα ψύξεως στη θερμοκρασία του υγρού αζώτου.

Τα Laser στερεού παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της μεγάλης και συνεχής ισχύος, δεν μπορούν όμως να διαμορφωθούν εσωτερικά.

Τέλος τα Laser που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες προοπτικές για την επικοινωνία, είναι αυτά των αερίων. Είναι συνεχούς ακτινοβολίας, παρουσιάζουν μεγάλη συμφωνία, μπορούν να υποστούν εσωτερική διαμόρφωση κ.λ.π.

Υπάρχουν μερικά είδη Laser που μπορεί να χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται μερικά είδη Laser που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό του συστήματος επικοινωνίας με Laser.

Τύπος Laser	Τύπος συστήματος	Υλικά
Στερεάς κατάστασης	Q-switched	Nd: YAG,Nd: YLF,Nd: YAP
	Cavity-dumped	Nd: YAG,Nd: YLF,Nd: YAP
	Mode-locked	Nd: YAG,Nd: YLF,Nd: YAP
	CW	Nd: YAG,Nd: YLF,Nd: YAP
Ημιαγωγός	Pulsed	GaAlAs,InGaAs,InGaAsP
	Quasi-CW	GaAlAs,InGaAs,InGaAsP
	CW	GaAlAs,InGaAs,InGaAsP

Πίνακας 3.1: Πρακτικοί τύποι Laser για επικοινωνία στο διάστημα (Lambert & Casey, 1995)

Πολλά από τα Laser επικοινωνίας δουλεύουν σήμερα από 0,8 μέχρι 1- μm . Μερικά αλλά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία των οπτικών ινών δουλεύουν σε 1.3 και 1.5 μm . Η διαθέσιμη βασική τεχνολογία έχει εξελιχτεί πολύ γρήγορα τα

τελευταία χρόνια, έτσι ώστε αυτή η λίστα μπορεί ακόμη να επεκτείνεται με καινούργιες συσκευές Laser που είναι σε ανάπτυξη.

Στα πρώτα χρόνια της επικοινωνίας με Laser, το Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) που λειτουργεί σε 10 μm είχε χρησιμοποιηθεί επειδή έχει σταθερά χαρακτηριστικά, και επειδή έχει μικρότερη ευαισθησία στις ατμοσφαιρικές συνθήκες σε σχέση με της συσκευές Laser με μικρότερο μήκος κύματος. Η διαμόρφωση της δέσμης γίνεται κατά συχνότητα, με ένα ενεργό κρύσταλλο που τοποθετείται μέσα στο οπτικό αντηχείο. Σήμερα, τα Laser CO_2 θεωρούνται πολύ σπάνια για χρησιμοποίηση σε εφαρμογές επικοινωνίας με Laser, και ιδικά σε συστήματα που λειτουργούν στο διάστημα. Τα αέρια Laser όπως το CO_2 έχουν θεωρηθεί σαν πολύ ογκώδεις και αναξιόπιστα για μεγάλη απόσταση σε επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων

Τα πιο γνωστά Laser που αναφέρονται σε ημιαγωγούς για εφαρμογές επικοινωνίας στο διάστημα είναι τα neodymium yttrium garnet (Nd: YAG) Laser. Στη λήψη χρησιμοποιείται φωτοδίοδος, συνήθως πυριτίου τύπου PIN. Αυτά τα Laser δουλεύουν στα 1,064 μm μήκος κύματος και έχει διπλασιαστεί χρησιμοποιώντας μη γραμμικό κρύσταλλο στα 532nm. Τέτοια συστήματα έχουν ήδη δοκιμαστεί με επιτυχία για αποστάσεις μέχρι και 25 km. Τα Laser ημιαγωγών βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις οπτικές επικοινωνίες με τη διαφορά όμως ότι είναι σημαντικά ακριβότερα από τα Laser αερίου. Παρουσιάζουν όμως τα πλεονεκτήματα των πολύ μικρών διαστάσεων, της μεγάλης μηχανικής σταθερότητας, της μεγάλης απόδοσης (40%) και μπορούν να διαμορφωθούν σε πολύ υψηλές συχνότητες.

3.4.2 Οι περιορισμοί στην επιλογή τεχνολογίας Laser

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογιών Laser για επικοινωνία στο διάστημα από τις οποίες μπορούμε να επιλέξουμε την καταλληλότερη για την περίπτωση που εξετάζουμε. Ευτυχώς, όχι όλα τα Laser είναι δημιουργημένα το ίδιο. Για αυτό το λόγο, για να αποφασίσουμε για την καλύτερη πηγή Laser την οποία θα χρησιμοποιήσουμε στο σύστημά μας, πρέπει να λάβουμε υπόψη την ισχύ εξόδου του Laser, το κέρδος μακρινού πεδίου, το φασματικό εύρος, το μήκος κύματος, τον όγκο και το βάρος του συστήματος, την επίδραση περιβάλλον, τις πηγές θορύβου, το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και την τεχνική διαμόρφωσης.

Αν και αυτό φαίνεται να είναι μια απλή εξίσωση με πολλούς άγνωστους, τα κριτήρια αυτά μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας μερικούς απλούς κανόνες που αποκτάμε με την εμπειρία.

Όλοι οι περιορισμοί για επικοινωνία με Laser δίνονται στον Πίνακα 3.2.

<i>Laser Type</i>	<i>Material</i>	<i>Wavelength(nm)</i>	<i>Modulation Type*</i>	<i>Data Rate</i>	<i>Peak Power</i>	<i>Coherent System</i>	<i>Direct-Detection System</i>
Solid state Pulsed	Nd:YAG	1064	Intracavity	< 10 MBPS	Very high 10-100 W	No	Yes
	Nd:YLF ND:YAP	1047 or 1053 1080	PPM, PIM				
			EO or AO External cavity PDBM, PPBM, PQM	< 10 MBPS	Very high 10-100 W	No	Yes
Solid state Modelocked	Nd:YAG	1064	EO or AO	Up to 1GBPS	High 10's of W	No	Yes
	Nd:YLF ND:YAP	1047 or 10953 1080	External cavity PDBM, PPBM, PQM				
Solid state CW	Nd:YAG	1064	EO or AO	> GBPS	1-5 Watts	Yes	Yes
	Nd:YLF ND:YAP	1047 or 1053 080	External ASK, PSK and analog				
Semiconductor Pulsed	CaAlAs	780-890	Direct drive ASK, PSK, bi-phase, PPM	1-2 GBPS	200 mW	Yes	Yes
	InGaAs	890-980	Direct drive ASK, PSK, bi-phase, PPM	1-2 GBPS	1 W MOPA**	Yes	Yes
Semiconductor CW	CaAlAs	780-890	Direct drive ASK, PSK, FSK, bi-phase, PPM and analog	1-2 GBPS	200 mW	Yes	Yes
	InGaAs	890-980	Direct drive ASK, PSK, FSK, bi-phase, PPM, and analog	1-2 GBPS	1 W MOPA**	Yes	Yes
	InGaAsP	1300 and 1500	Direct drive ASK, PSK, FSK and analog	Multi- GBPS	< 50 mW	Yes	Yes

*ASK = Amplitude shift keying, PSK = phase shift keying, FSK = frequency shift keying, PPM = pulse position modulation, PIM = pulse internal modulation, PDBM = pulse delay binary modulation, PPBM = pulse polarization binary modulation, PQM = pulse quaternary modulation, EO = electro-optic, AO = acousto-optic.

**MOPAs not currently available for all wavelengths in range.

Πίνακας 3.2 : Χαρακτηριστικά των Laser για επικοινωνία στο διάστημα
(Lambert & Casey, 1995)

3.5 Τεχνολογία φωρατών (Detector Technology)

Η τεχνολογία των φωρατών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τεχνολογία των Laser στις οπτικές επικοινωνίες. Χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του σήματος Laser έτσι ώστε να γίνει δυνατή μια οπτική επικοινωνία. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φωρατών οι οποίοι χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.3. Για συστήματα οπτικής επικοινωνίας, η τεχνολογία φωρατών μπορεί να

ταξινομηθεί σε τρεις ξεχωριστές κατηγορίες. Η πιο σημαντική εφαρμογή των φωρατών είναι η χρησιμοποίησή τους για επικοινωνία. Μια άλλη εφαρμογή τους είναι η ανίχνευση (acquisition) των δεσμών Laser. Επίσης, οι φωρατές χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της προσπίπτουσας οπτικής ενέργειας από τον πομπό.

Εφαρμογή	Τύπος Ανιχνευτή	Υλικά
Communication	APD	Silicon, InGaAs, InGaAsp
	PIN	Silicon, InGaAs, InGaAsp
	CCD	Silicon
	PMT	Solid State silicon photocathode
Tracking	CCD	Silicon
	CID	Silicon
	QAPD	Silicon
	APIN	Silicon, InGaAs
	APD quadrants	Silicon, InGaAs, InGaAsp
Acquisition	CCD	Silicon
	CID	Silicon
	QAPD	Silicon
	QPIN	Silicon, InGaAs
	APD quadrants	Silicon, InGaAs, InGaAsp

**Πίνακας 3.3: Τύποι φωρατών για επικοινωνία στο διάστημα
(Lambert & Casey, 1995)**

3.5.1 Φωρατές επικοινωνίας (Communication Detectors)

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι φωρατών που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες άμεσης φώρασης είναι οι φωτοдиодοι χιονοστιβάδας (avalanche photodiode, APD). Οι APD φωτοдиодοι προσφέρουν ένα κέρδος της τάξης των 50 με 200, απαραίτητο για την καλή λειτουργία του δέκτη. Επίσης προσφέρουν χαμηλό θόρυβο, μεγάλο εύρος ζώνης και ανάλογα με το μήκος κύματος, καλό κβαντικό συντελεστή. Οι πιο συνηθισμένες φωτοдиодοι APD κατασκευάζονται από πυρίτιο (silicon) και λειτουργούν ικανοποιητικά σε μήκος κύματος 1μm με κυμαινόμενους κβαντικούς συντελεστές. Εκτός από το πυρίτιο, οι APD φωτοдиодοι κατασκευάζονται και από InGaAs και InGaAsP. Οι συσκευές αυτές παρουσιάζουν μεγάλο κβαντικό συντελεστή σε μήκη κύματος γύρω από το 1 μm και συνήθως χρησιμοποιούνται στα 1.3 και 1.5 μm.

Όπως οι φωτοдиодοι πυριτίου APD χρησιμοποιούνται στην άμεση φώραση, έτσι και οι φωτοдиодοι πυριτίου p-intrinsic (PIN) χρησιμοποιούνται σαν φωρατές στα συστήματα σύμφωνης φώρασης. Οι PIN φωτοдиодοι παρουσιάζουν όλα τα

χαρακτηριστικά των φωτοδιόδων APD εκτός από το κέρδος χιονοστιβάδας. Το φαινόμενο της χιονοστιβάδας δεν παρουσιάζεται στις PIN φωτοδιόδους. Έτσι οι φωτοδιόδοι PIN έχουν μοναδιαίο κέρδος. Σε μεγαλύτερα μήκη κύματος οι PIN φωτοδιόδοι κατασκευάζονται από InGaAs και InGaAsP εξαιτίας του μεγάλου κβαντικού συντελεστή που παρουσιάζουν.

Επίσης χρησιμοποιούνται και άλλοι τύποι φωρατών, όπως είναι οι PMT και CCD φωρατές.

3.5.2 Φωρατές ανίχνευσης σήματος (Acquisition detectors)

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η επικοινωνία είναι μόνο ένα μέρος του συστήματος επικοινωνίας με Laser. Η ανίχνευση (acquisition) του σήματος Laser στο δέκτη είναι επίσης σημαντικό. Χωρίς την διαδικασία ανίχνευσης (acquisition), η επικοινωνία θα είναι αδύνατη. Οι φωρατές που προσφέρουν αποτελεσματική ανίχνευση του σήματος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι ολοκληρωμένοι φωρατές (integrating detectors) που αντιπροσωπεύονται από τους CCD και CID φωρατές. Καθεμία από τις παραπάνω συσκευές αποτελείται από έναν μεγάλο πίνακα φωρατών (pixels). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι πίνακες φωρατών $N \times N$. Τέτοιοι είναι οι φωρατές APD και PIN οι οποίοι διατάσσονται σε σχηματισμό $N \times N$. Οι πιο χρησιμοποιούμενοι είναι οι πιο απλοί, 2×2 πίνακες, οι οποίοι ονομάζονται τεταρτημοριακοί φωρατές (quadrant detectors).

Οι λειτουργία των φωρατών αυτών βασίζεται στην σάρωση μιας μεγάλης περιοχής αβεβαιότητας.

3.5.3 Φωρατές παρακολούθησης (Tracking detectors)

Η παρακολούθηση της δέσμης είναι το τρίτο κομμάτι της επικοινωνίας με Laser. Οι φωρατές παρακολούθησης (tracking detectors) είναι παρόμοιοι με τους φωρατές ανίχνευσης (acquisition detectors). Οι φωρατές ανίχνευσης που αναφέρθηκαν νωρίτερα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως φωρατές παρακολούθησης (tracking detectors). Συνήθως οι φωρατές αυτοί είναι τεταρτημοριακοί φωρατές (quadrant detectors).

3.5.4 Υβριδικοί φωρατές (Hybrid Detectors)

Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται φωρατές που συνδυάζουν και τις τρεις παραπάνω λειτουργίες και αναφέρονται ως υβριδικοί φωρατές (hybrid detectors).

Κεφάλαιο 4^ο

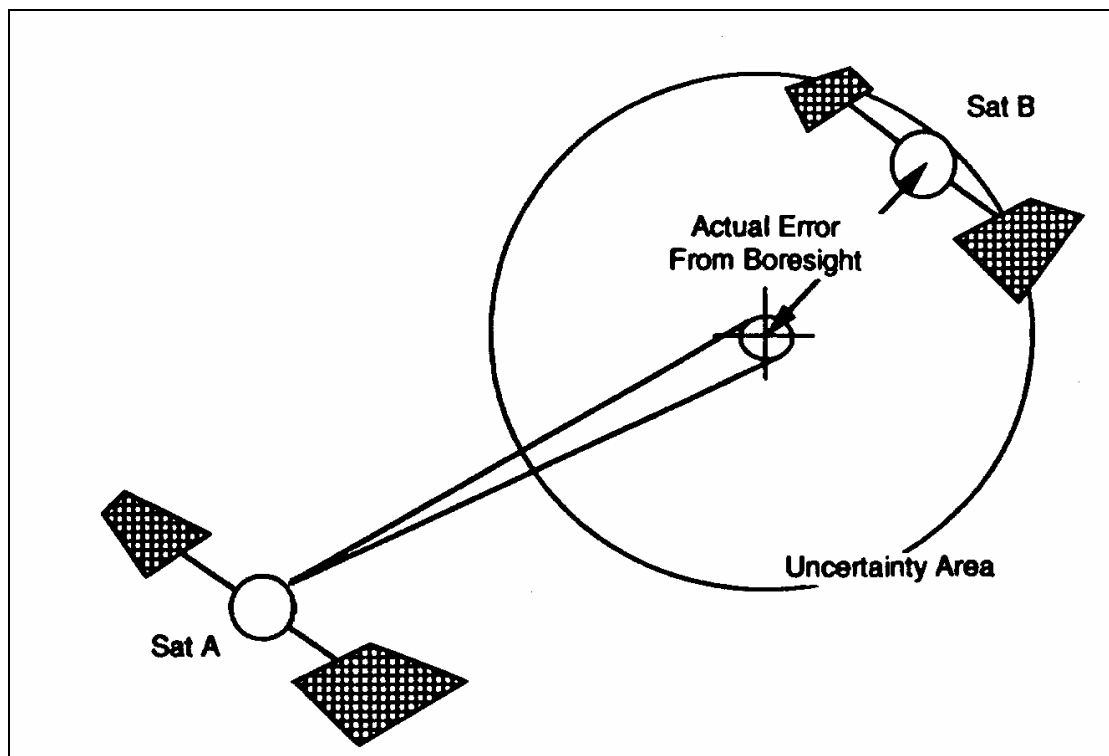
Μεθοδολογία Σχεδίασης Συστήματος

Το κεφάλαιο αυτό είναι πάρα πολύ σημαντικό γιατί ασχολείται με όλες τις παραμέτρους της επικοινωνίας των δορυφόρων με Laser (Laser ISL). Εδώ θα αναφερθούν όλοι οι δυνατοί τρόποι σχεδίασης του συστήματος όσον αφορά την ανίχνευση, στόχευση και παρακολούθηση (acquisition, pointing and tracking). Στην αρχή εξετάζεται η τεχνική ανίχνευσης (acquisition technique) δηλαδή πως θα καθοριστεί η αβέβαιη περιοχή (uncertain area). Η κεντρική ιδέα της ανίχνευσης (acquisition) είναι η ακόλουθη. Ο δορυφόρος δέκτης θα προσπαθήσει να “βρει” τη δέσμη που έχει σταλεί από το δορυφόρο πομπό. Αυτό γίνεται με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η λαμβανομένη ισχύς και να επιτευχθεί ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο δορυφόρων (pointing). Από τη στιγμή που η επικοινωνία μεταξύ των δύο δορυφόρων έχει εγκατασταθεί το επόμενο βήμα είναι συντήρηση της επικοινωνίας αυτής όσο χρόνο τη χρειαζόμαστε. Αυτό μπορεί να το πετύχουμε με τη διαδικασία της παρακολούθησης (tracking procedure). Η παρακολούθηση της δέσμης του Laser είναι ένα πολύ δύσκολο και σημαντικό σημείο της σχεδίασης γιατί ο δορυφόρος στο διάστημα είναι πολύ ευάλωτος από διάφορες ταλαντώσεις και η σταθερότητά του δεν παραμένει η ίδια κατά τη διάρκεια του χρόνου. Παρακάτω θα εξηγηθούν μερικές μέθοδοι παρακολούθησης (tracking) της δέσμης. Από τη στιγμή που η σύνδεση έχει εγκατασταθεί, αυτό που παραμένει είναι η συνέχιση της επικοινωνίας των δορυφόρων μέσω ενός διαύλου επικοινωνίας. Επίσης, εδώ θα εξεταστούν οι μέθοδοι διαμόρφωσης και οι τεχνικές κωδικοποίησης που μπορεί να χρησιμοποιηθούν.

4.1 Ανίχνευση (Acquisition)

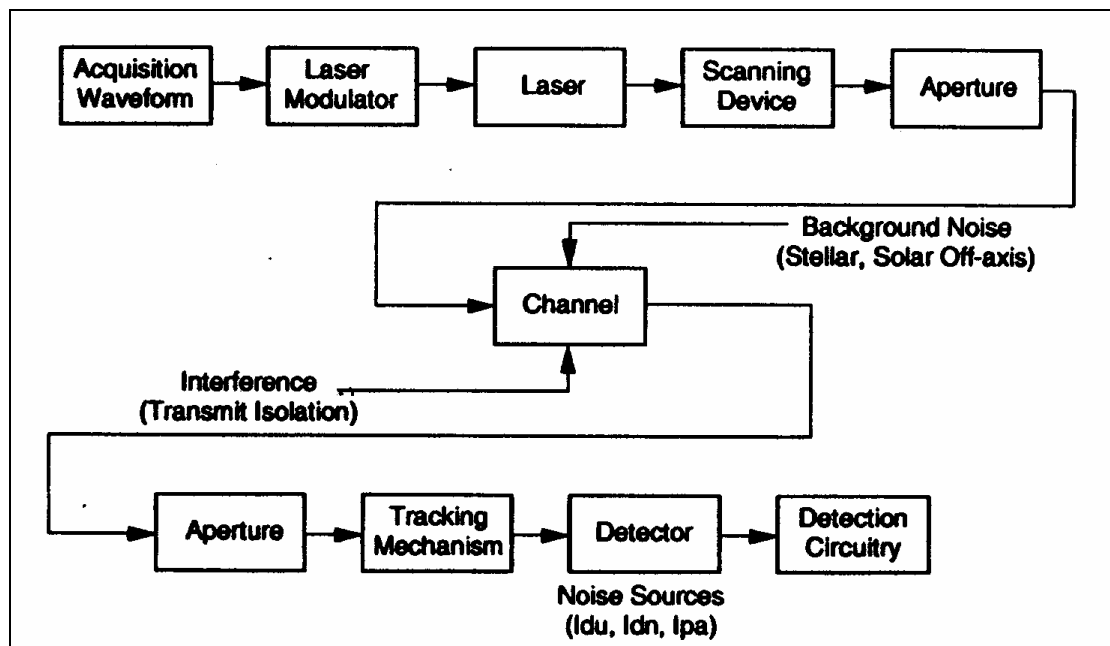
Η πιο σημαντική παράμετρος στη σχεδίαση ενός συστήματος ανίχνευσης (acquisition) της δέσμης Laser είναι η οριοθέτηση της περιοχής αβεβαιότητας στην οποία μπορεί να βρίσκεται ο δορυφόρος πομπός. Ο καθορισμός της περιοχής αβεβαιότητας είναι μια στατιστική διαδικασία και γίνεται με τον καθορισμό μιας

στερεάς γωνίας η οποία θα καλύπτει τον δορυφόρο πομπό. Η γωνία αυτή θα περιέχει ένα αρχικό σφάλμα (απόσταση του δορυφόρου δέκτη από το σημείο που έχουμε μέγιστη ισχύ, actual error from bore sight). Εξαιτίας αυτού του σφάλματος, η περιοχή αβεβαιότητας στην οποία θα βρίσκεται ο δορυφόρος πομπός θα είναι πολύ μεγαλύτερη από το άνοιγμα της δέσμης η οποία μπορεί να ανιχνευτεί. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο παρακάτω σχήμα (Lambert & Casey, 1995) όπου η περιοχή αβεβαιότητας είναι αρκετά μεγαλύτερη από το άνοιγμα της δέσμης. Οι δορυφόροι οι οποίοι εξετάζονται σε αυτή την εργασία έχουν μικρές διαστάσεις και βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους σε σχέση με τους δορυφόρους που βρίσκονται σε GEO τροχιά. Γι αυτό το λόγο, παρακάτω γίνονται μερικές προτάσεις για να βρεθεί μια εναλλακτική και πιο απλή λύση στο πρόβλημα της ανίχνευσης (acquisition).



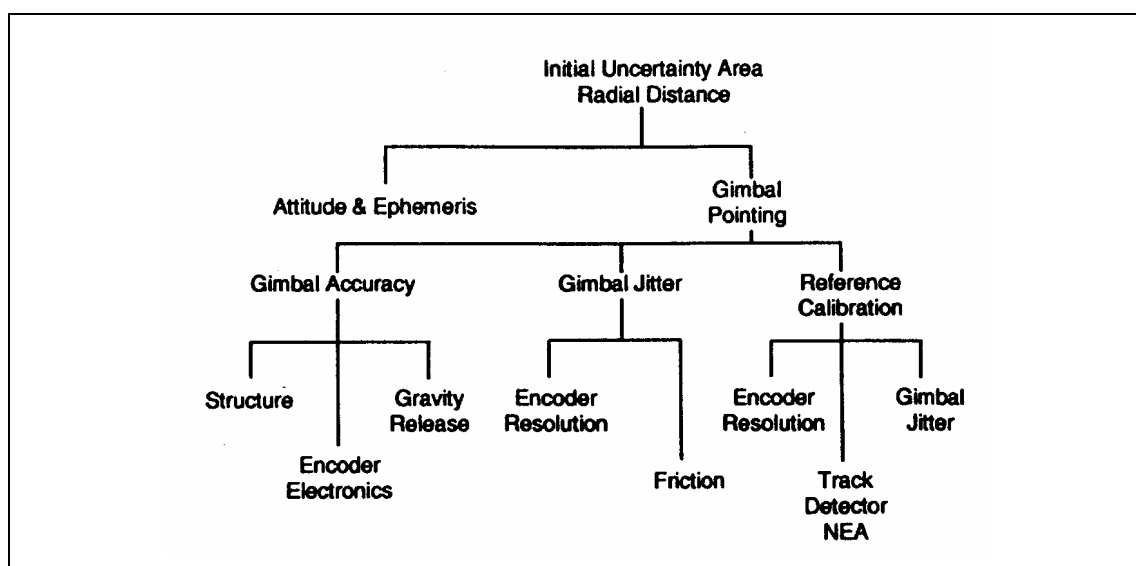
Σχήμα 4.1: Περιοχή αβεβαιότητας (Lambert & Casey, 1995)

Το μοντέλο του συστήματος ανίχνευσης (acquisition) φαίνεται στο Σχήμα 4.2 όπου παρατηρούμε τα κύρια στάδια του συστήματος. Για να πραγματοποιηθεί η ανίχνευση, ο δέκτης πρέπει να αναγνωρίσει το εκπεμπόμενο σήμα το οποίο έχει αλλοιωθεί από το θόρυβο περιβάλλοντος (background noise) που προέρχεται από διάφορα ουράνια σώματα και κυρίως από τον Ήλιο.



Σχήμα 4.2: Μοντέλο συστήματος ανίχνευσης (Lambert & Casey, 1995)

Ο θόρυβος αυτός είναι αποτέλεσμα συνδυασμού διαφόρων (navigation) παραμέτρων και μπορεί να εκφραστεί σαν αβεβαιότητα στο αζιμούθιο (azimuth) και στην ανύψωση (elevation) (Lambert & Casey, 1995). Τα σφάλματα που προκύπτουν από τον θόρυβο αυτό εκφράζονται σαν σφάλματα στους άξονες “x” και “y”. Καθένα από τα σφάλματα αυτά παρουσιάζουν τυχαία συμπεριφορά. Μερικά προέρχονται από θερμική παραμόρφωση και θεωρούνται στατιστικά σφάλματα (Σχήμα 4.3). Σε υψηλότερες συχνότητες παρουσιάζονται σφάλματα με περισσότερο τυχαία μορφή.



Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικό διάγραμμα ανίχνευσης (Lambert & Casey, 1995)

Τα σφάλματα στο αζιμούθιο και στην ανύψωση θεωρούνται Gaussian και η τελική πιθανότητα αβεβαιότητας παίρνει τη μορφή Rician και δίνεται σε μαθηματική μορφή από τον Παππούλη (1965):

$$P_{area} = \int_0^r \frac{z}{\sigma^2} e^{-(z^2+n)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{zn}{\sigma^2}\right) dz \quad (4.1)$$

όπου I_0 είναι τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης και δίνεται από τον τύπο:

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \cos \theta} d\theta = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{2^{2n} (n!)^2} \quad (4.2)$$

4.1.1 Τεχνικές σάρωσης

Το επόμενο βήμα είναι η ανάλυση των τεχνικών σάρωσης. Όλα τα σενάρια ανίχνευσης έχουν ένα κοινό σημείο, η δέσμη Laser πρέπει να καλύπτει μια περιοχή αβεβαιότητας (στερεά γωνία) και ο δέκτης προσπαθεί να ανιχνεύσει τη δέσμη αυτή. Υπάρχει ένας αριθμός από σενάρια όπου ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε κατάσταση σάρωσης (scan), όπου χρησιμοποιείται μια στενή δέσμη Laser η οποία σαρώνει όλη την περιοχή αβεβαιότητας (uncertainty area) σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ή σε κατάσταση παρατήρησης (stare), όπου το άνοιγμα της δέσμης είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να καλύπτει όλη την περιοχή αβεβαιότητας (uncertainty area). Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω μεθόδους καταλήγουμε σε τέσσερις δυνατές περιπτώσεις:

1. *Παρατήρηση / Παρατήρηση (Stare / Stare)*: Στην περίπτωση αυτή ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται στην κατάσταση παρατήρησης. Το άνοιγμα της δέσμης είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να καλύπτει (να φωτίζει) όλη την περιοχή αβεβαιότητας. Επίσης, το πεδίο παρατήρησης (field of view) του δέκτη είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να καλύπτει την περιοχή. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για πολύ μικρές αποστάσεις άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση μας. Η πιθανότητα ανίχνευσης δίνεται από τον τύπο:

$$P_{acq} = P_{det} + P_{area} \quad (4.3)$$

2. *Παρατήρηση / Σάρωση* (Stare / Scan): Αυτή είναι η περισσότερη χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Ο ένας δορυφόρος βρίσκεται σε κατάσταση παρατήρησης και ο άλλος χρησιμοποιώντας μια στενή δέσμη Laser σαρώνει όλη την περιοχή αβεβαιότητας. Χρησιμοποιώντας στενή δέσμη Laser, υπάρχει αρκετή ισχύς έτσι ώστε να ενεργοποιηθεί ο ανιχνευτής του δέκτη. Η πιθανότητα ανίχνευσης είναι αρκετά μεγάλη αλλά χρειάζεται αρκετός χρόνος για τη σάρωση και δεν μπορεί να γίνει ακαριαία. Ο χρόνος ανίχνευσης δίνεται από τον τύπο:

$$T_{acq\ stare/scan} = \left[\frac{\theta_{unc}^2}{\theta_{beam}^2} \right] \cdot T_{dwell} \cdot N_t \quad (4.4)$$

όπου θ_{unc} είναι η διάμετρος της περιοχής αβεβαιότητας, θ_{beam} είναι το 1/e του ανοίγματος της εκπεμπόμενης δέσμης Laser, T_{dwell} είναι η διάρκεια χρόνου που η δέσμη παραμένει σε κάθε θέση και N_t είναι ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων της σάρωσης.

Επίσης υπάρχουν και δύο άλλες περιπτώσεις (Scan/Scan και Scan/Stare) οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στην πράξη (Lambert & Casey, 1995).

4.1.2 Προτεινόμενη τεχνική σάρωσης

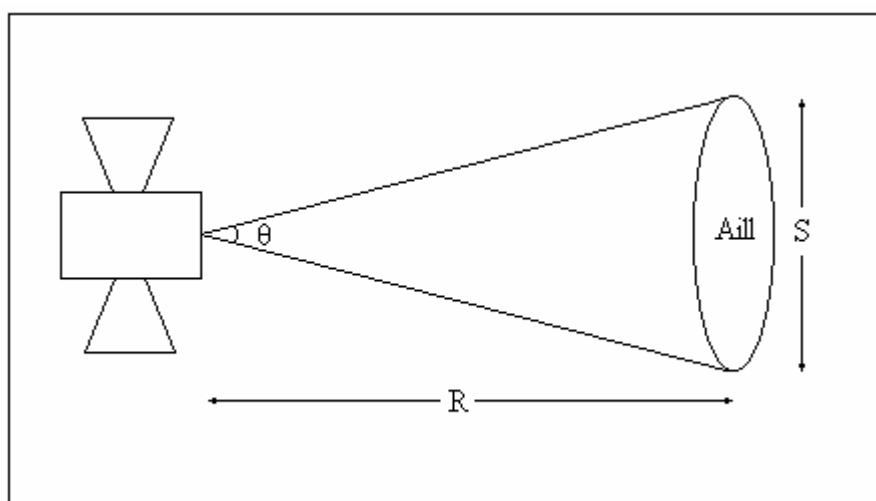
Στην περίπτωσή μας η καλύτερη μέθοδος είναι η παρατήρηση / παρατήρηση (stare / stare) γιατί η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων είναι πολύ μικρή (100 m). Αυτό σημαίνει ότι μεγαλώνοντας το άνοιγμα της δέσμης μπορούμε να καλύψουμε μεγαλύτερη περιοχή. Στην περίπτωση των μικρών αποστάσεων, αυτή η μέθοδος έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Έτσι, με τη μέθοδο αυτή, μπορούν να αποφευχθούν πολύπλοκα συστήματα και διάφοροι τρόποι σάρωσης (§ 4.1.3) που αυξάνουν το κόστος κατασκευής αυτών των συστημάτων. Στην περίπτωση που υπάρχουν πάνω από δύο δορυφόροι οι οποίοι πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον. Έτσι, αν το άνοιγμα της δέσμης είναι αρκετά

μεγάλο έτσι ώστε να καλύπτει μεγαλύτερη περιοχή, ο δορυφόρος μπορεί να εκπέμψει πληροφορία προς όλους τους άλλους δορυφόρους που βρίσκονται μέσα στην καλυπτόμενη από τη δέσμη στερεά γωνία. Με αυτόν τον τρόπο ο δορυφόρος δεν χρειάζεται επιπλέον ισχύ έτσι ώστε να επικοινωνήσει με περισσότερους από έναν δορυφόρο. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι οι υπολογισμοί για την παραπάνω περίπτωση πρέπει να είναι πολύ προσεκτικοί, γιατί η εκπεμπόμενη ισχύς που πρέπει να φθάνει στον δέκτη πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή έτσι ώστε να είναι ανιχνεύσιμη. Βεβαίως, αυτό εξαρτάται και από τον τύπο του ανιχνευτή που θα χρησιμοποιηθεί.

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας (Σχήμα 4.4), την οποία μπορεί να καλύψει μια δέσμη Laser με ένα συγκεκριμένο άνοιγμα, χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

$$S = R\theta \quad (4.5)$$

όπου S είναι η διάμετρος σε μέτρα, R είναι η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων και θ είναι το άνοιγμα της δέσμης σε ακτίνια (radians). Η επιφάνεια κάλυψης A_{ill} μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο $A_{ill} = \pi r^2$ όπου $r = S/2$ είναι η ακτίνα του κύκλου με διάμετρο S . Η επιφάνεια αυτή, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, είναι η επιφάνεια στην οποία εξαπλώνεται το σήμα. Αν η ισχύς του σήματος είναι αρκετά υψηλή σε όλα τα σημεία της επιφάνειας έτσι ώστε το σήμα να είναι ανιχνεύσιμο τότε η επικοινωνία είναι δυνατή.

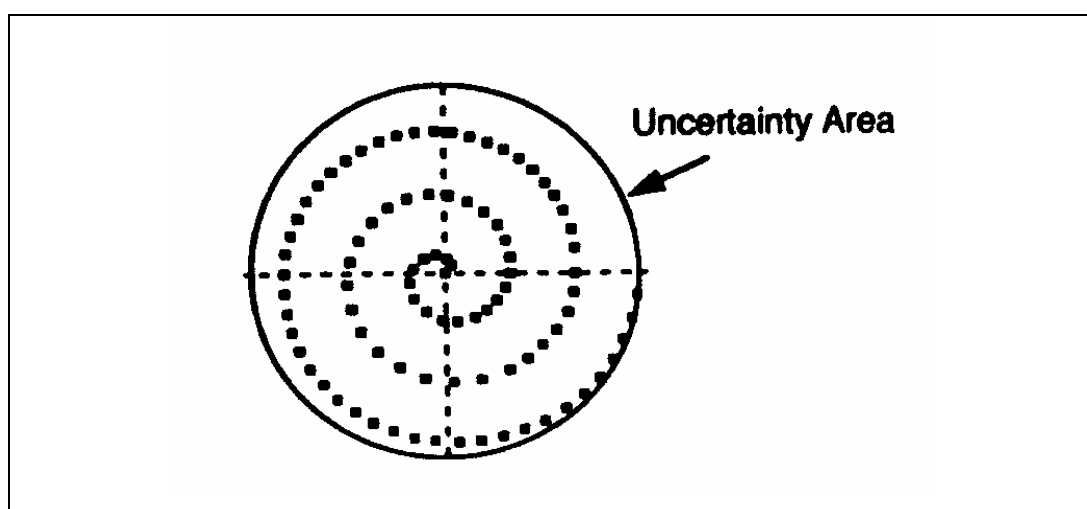


Σχήμα 4.4: Άνοιγμα δέσμης και επιφάνεια κάλυψης σε απόσταση R

4.1.3 Εξέταση τρόπων σάρωσης

Το επόμενο βήμα είναι η περιγραφή των τρόπων σάρωσης όταν δεν χρησιμοποιείται η μέθοδος παρατήρησης. Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι σάρωσης που χρησιμοποιούνται στην πράξη στα συστήματα επικοινωνίας με Laser είναι η σπειροειδής (ελικοειδής, spiral) σάρωση, η raster σάρωση και υποπεριπτώσεις αυτών.

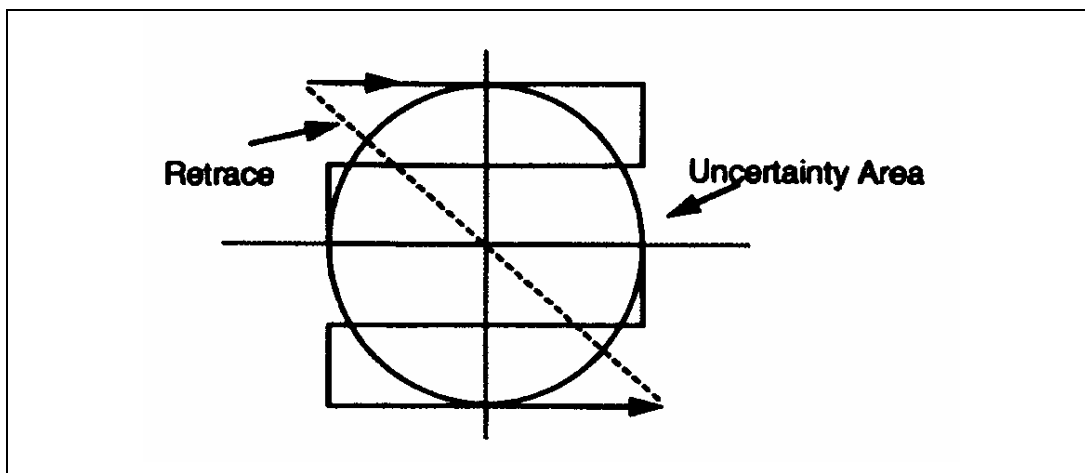
- *Συνεχής σπειροειδής σάρωση* (Continuous Spiral Scan): Η συνεχής σπειροειδής σάρωση είναι η πιο αποδοτική μέθοδος σάρωσης όσον αφορά τον χρόνο ανίχνευσης. Στη μέθοδο αυτή, η σάρωση αρχίζει από το κέντρο της περιοχής αβεβαιότητας και συνεχίζει σε σπειροειδή μορφή να απομακρύνεται από το κέντρο (όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5 (Lambert & Casey, 1995)) έως ότου γίνει η ανίχνευση του σήματος. Το πλάτος της σπείρας είναι μια συνάρτηση του ανοίγματος της δέσμης, της ποσότητας επικάλυψης που επιθυμούμε και του μεγέθους της περιοχής αβεβαιότητας. Ο χρόνος ανίχνευσης μπορεί να είναι μεγάλος αλλά αυτό αυξάνει την πιθανότητα ανίχνευσης.



Σχήμα 4.5: Σπειροειδής Σάρωση (Lambert & Casey, 1995)

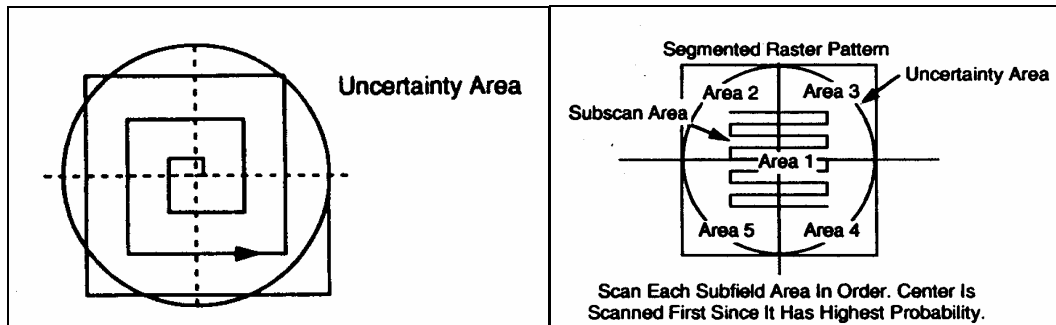
- *Raster σάρωση* (Raster Scan): Ο τρόπος λειτουργίας της raster σάρωσης φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Η τεχνική αυτή χρειάζεται περισσότερο χρόνο για την ανίχνευση του σήματος από την προηγούμενη περίπτωση επειδή σαρώνονται περιοχές οι οποίες βρίσκονται έξω από την περιοχή αβεβαιότητας. Η σάρωση αρχίζει από έναν άξονα καλύπτοντας όλη την

περιοχή πεδίου ορισμού του και συνεχίζει αυξάνοντας την τιμή του άλλου άξονα μετά το τέλος κάθε γραμμής.



Σχήμα 4.6: Raster Σάρωση (Lambert & Casey, 1995)

Υπάρχουν επίσης και μερικές άλλες μορφές σάρωσης όπως η βηματική σπειροειδής σάρωση (step spiral scan), τμηματική σάρωση (segment scan) και η πολλαπλή σάρωση (multiple scan) αλλά χρησιμοποιούνται για ειδικές περιπτώσεις.



Σχήμα 4.7: Βηματική και Τμηματική Σάρωση (Lambert & Casey, 1995)

4.1.4 Τύποι ανιχνευτών

Το επόμενο βήμα στην ανάλυση της τεχνικής ανίχνευσης (acquisition technique) είναι να ρίξουμε μια ματιά στους τύπους των ανιχνευτών οι οποίοι παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο 3^ο Κεφάλαιο. Εδώ γίνεται μια γενική αναφορά για ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται γενικά στους δορυφόρους. Ο ανιχνευτής που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εργασία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Στης περισσότερες περιπτώσεις οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στην τεχνική

ανίχνευσης είναι οι ανιχνευτές QAPD και QPIN. Γενικά, η περιοχή αβεβαιότητας είναι χαρτογραφημένη στον ανιχνευτή. Πληροφορίες από κάθε τεταρτημόριο του ανιχνευτή χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να οδηγηθεί η δέσμη στη σωστή κατεύθυνση. Οι περισσότεροι ανιχνευτές που είναι χωρισμένοι σε τεταρτημόρια έχουν μικρές διαστάσεις ανάλογα με το στίγμα τη δέσμης Laser που πέφτει πάνω τους. Η πληροφορία που συγκεντρώνει κάθε τεταρτημόριο δεν είναι γραμμική. Τι κάθε τεταρτημόριο δίνει την πληροφορία για την ποσότητα της οπτικής ισχύος που πέφτει πάνω του.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός τρόπος που χρησιμοποιείται στην τεχνική της ανίχνευσης είναι η χρησιμοποίηση μεγάλων διατάξεων από pixels. Ο ανιχνευτής CCD, CID και οι πίνακες ανιχνευτών χρησιμοποιούνται συνήθως σαν τέτοιες διατάξεις. Οι πίνακες ανιχνευτών, ειδικά οι μορφές $N \times N$, παρουσιάζουν μερικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης λόγω των μεγάλων κενών μεταξύ των pixels. Το στίγμα (spot) της δέσμης μερικές φορές πέφτει σε αυτά τα κενά με αποτέλεσμα να μη μπορεί να ανιχνευτεί το σήμα. Λόγο αυτού του προβλήματος οι πίνακες ανιχνευτών δεν χρησιμοποιούνται συχνά στην πράξη για ανίχνευση σήματος (Lambert & Casey, 1995) .

4.1.5 Τύπος Σήματος Ανίχνευσης

Το τελευταίο κομμάτι στην ανάλυση των τεχνικών ανίχνευσης είναι ο τύπος των σημάτων που χρησιμοποιούνται καθώς και ο τύπος των δεκτών. Υπάρχουν τρία είδη κυματομορφών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση, παλμοί, τόνοι και dc κυματομορφή. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι κυματομορφές ανίχνευσης είναι ίδιες με τις κυματομορφές παρακολούθησης (tracking) και επικοινωνίας. Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται οι παλμοί. Χρησιμοποιώντας παλμούς Laser σε μια συγκεκριμένη συχνότητα μπορεί να καλυφθεί όλη η επιφάνεια σάρωσης με ξεχωριστούς παλμούς, συγκεκριμένης διάρκειας. Οι επιφάνεια σάρωσης πρέπει να έχει τις κατάλληλες διαστάσεις έτσι ώστε σε κάθε στίγμα σάρωσης να αντιστοιχεί το λιγότερο ένας παλμός. Ένα πλεονέκτημα της παλμικής κυματομορφής είναι η υψηλή ισχύς η οποία είναι διαθέσιμη. Έχοντας περισσότερη ισχύ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο άνοιγμα δέσμης για την κάλυψη μεγαλύτερων περιοχών με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου σάρωσης.

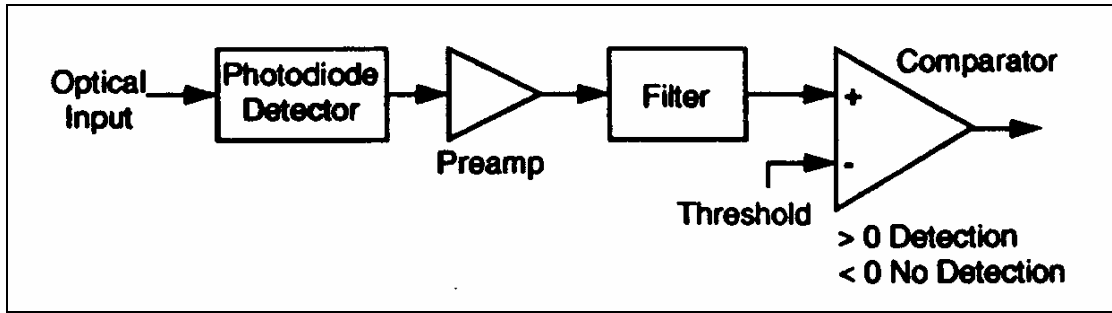
Μια άλλη κυματομορφή που χρησιμοποιείται, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, είναι οι τόνοι. Συγκρινόμενοι με τους παλμούς, οι τόνοι είναι μια συνεχής κυματομορφή (continuous wave, CW) και μπορεί να έχουν ημιτονοειδή ή ορθογώνια μορφή μιας συγκεκριμένης συχνότητας. Το πλεονέκτημα των τόνων είναι ότι δεν χρειάζεται μια συνεχής ροή παλμών για να ανιχνευθεί από τον δέκτη το αφικνούμενο σήμα αλλά μόνο μια συνεχής κυματομορφή (CW). Αυτού του είδους οι κυματομορφές χρησιμοποιούνται όταν είναι διαθέσιμες συνεχής κυματομορφές και μπορεί να επιτευχθεί γραμμική διαμόρφωση χαμηλού ρυθμού. Ένα μειονέκτημα είναι ότι η σάρωση καθυστερεί για να επιτρέψει στο δέκτη να δεχθεί αρκετούς κύκλους τόνων. Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι κυματομορφές τόνου έχουν ίδια ή καλύτερη συμπεριφορά από τις παλμικές κυματομορφές αλλά είναι πιο δύσκολο να υλοποιηθούν.

Ο τελευταίος τύπος κυματομορφής που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των δεσμών Laser είναι η dc κυματομορφή. Αρκετά συστήματα χρησιμοποιούν τέτοιου είδους δέκτες, όπως CCD ή CID ανιχνευτές. Είναι αρκετά εύκολοι στην υλοποίηση αλλά ο χρόνος ανίχνευσης είναι πολύ μεγάλος.

4.1.6 Τύποι Δεκτών

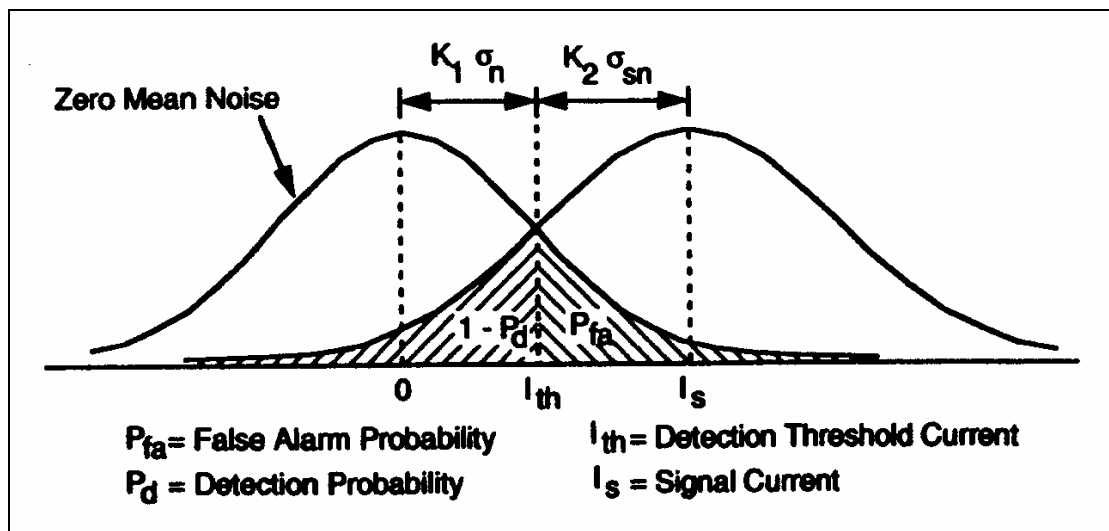
Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός δεκτών που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των δεσμών Laser και εξαρτώνται από τον τύπο των μεταδιδόμενων σημάτων. Οι παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν είναι κυρίως ο τύπος της κυματομορφής που χρησιμοποιείται (π.χ. μια παλμική κυματομορφή χρειάζεται δέκτη παλμών), ο χρόνος ανίχνευσης και ο αριθμός των εσφαλμένων ανιχνεύσεων που πρέπει να κρατηθεί στο ελάχιστο. Εδώ θα αναφερθούμε στους δέκτες παλμών και στους δέκτες τόνων.

- *Δέκτης Παλμών* (Pulse Receiver): Ο δέκτης παλμών είναι ο πιο απλός δέκτης ανίχνευσης δεσμών Laser. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζονται οι βασικές διατάξεις ενός τέτοιου δέκτη.



Σχήμα 4.8: Δέκτης Παλμών (Lambert & Casey, 1995)

Τέτοιου είδους δέκτες χρησιμοποιούν την άμεση φώραση και το απαιτούμενο σήμα ακολουθεί στατική Gaussian. Στο Σχήμα 4.9 φαίνονται δύο κατανομές Gauss, η μια μόνο με θόρυβο και η άλλη με θόρυβο συν σήμα.



Σχήμα 4.9: Κατανομές Gauss (Lambert & Casey, 1995)

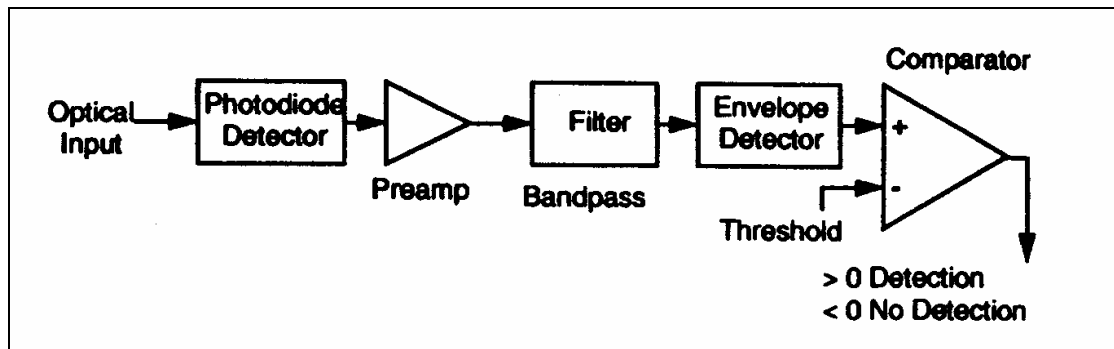
Η πιθανότητα ανίχνευσης δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{det}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{sn}^2}} \int_{\mu_{th}}^{\infty} e^{-[(x-\mu_s)^2/2\sigma_{sn}^2]} dx \quad (4.6)$$

όπου σ_{sn}^2 είναι το σήμα συν τη διακύμανση του θορύβου, μ_s είναι το απαιτούμενο επίπεδο σήματος απαραίτητο για να επιτευχθεί η πιθανότητα P_{det} και μ_{th} είναι το κατώφλι του δέκτη. Η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού δίνεται από τη σχέση:

$$P_{fa} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \int_{\mu_{th}}^{\infty} e^{-[x^2/2\sigma_n^2]} dx \quad (4.7)$$

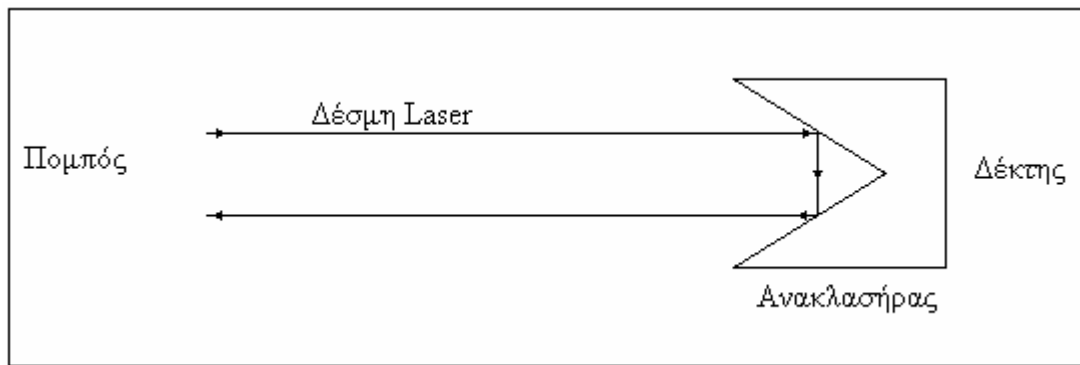
- *Δέκτης Τόνων* (Tone Receiver): Ο δεύτερος τύπος δεκτών που εξετάζουμε είναι ο δέκτης τόνων. Η λειτουργία του είναι παρόμοια με την άμεση φώραση. Χρησιμοποιείται συνήθως για μετάδοση συνεχώς κυματομορφών (CW). Υπάρχουν δύο τρόποι υλοποίησης τέτοιου είδους δεκτών, είτε χρησιμοποιώντας PLL, είτε χρησιμοποιώντας διαμορφωτή περιβάλλουσας (envelop detector) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10



Σχήμα 4.10: Δέκτης Τόνων με διαμορφωτή περιβάλλουσας (envelop detector)

(Lambert & Casey, 1995)

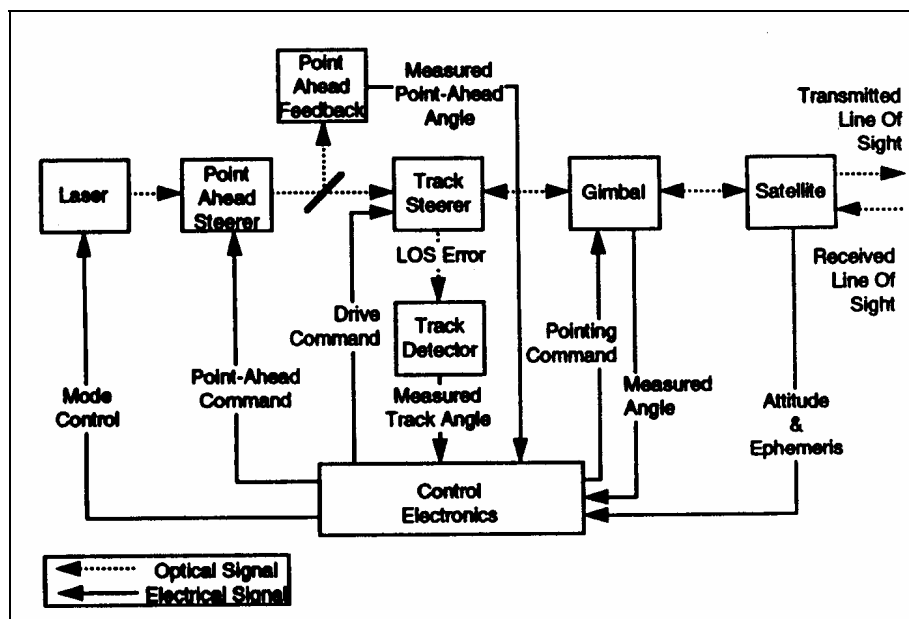
Ένα πρόβλημα που συναντάμε συχνά στους δορυφόρους έχει να κάνει με τη κατεύθυνση προς την οποία πρέπει να στείλει την απάντηση ο δορυφόρος δέκτης όταν δέχεται πληροφορίες από τον δορυφόρο πομπό. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιούν οι δορυφόροι για τη λύση αυτού του προβλήματος είναι το σύστημα στόχευσης (pointing ahead) όταν δεν χρησιμοποιούν την μέθοδο παρατήρηση / παρατήρηση (stare/stare). Αυτό σημαίνει ότι και οι δύο δορυφόροι έχουν ένα σύστημα πλοήγησης (GPS ή κάποιο άλλο σύστημα καθορισμού θέσης) και εκπέμποντας παλμούς από τον πομπό, ο δέκτης του άλλου δορυφόρου, ξέροντας την τροχιά του πομπού, μπορεί να υπολογίσει την κατεύθυνση προς την οποία πρέπει να στείλει την απάντηση. Μια άλλη λύση είναι ο δορυφόρος πομπός να στέλνει τη θέση του σε μορφή παλμών στον άλλο δορυφόρο. Με αυτόν τον τρόπο ο δορυφόρος δέκτης θα ξέρει προς τα πού θα πρέπει να στείλει την απάντηση. Ένας άλλος τρόπος άμεσης απάντησης του δεύτερου δορυφόρου, που συνήθως το συναντάμε σε μικρές απόστασης, είναι η χρησιμοποίηση ενός γωνιακού ανακλαστήρα (corner cube reflector) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόστασης μεταξύ των δύο νάνο-δορυφόρων στην αποστολή MUSTANG. Ο υπολογισμός της απόστασης γίνεται μετρώντας το χρόνο που κάνει ένας παλμός Laser να διανύσει την απόσταση αυτή.



Σχήμα 4.11: Χρησιμοποίηση ανακλαστήρα για άμεση επικοινωνία

4.2 Στόχευση και Ευθυγράμμιση (Pointing and Tracking)

Το επόμενο βήμα της σχεδίασης του συστήματος είναι η ανάλυση και μελέτη των μηχανισμών στόχευσης και ευθυγράμμισης (pointing and tracking mechanisms) έτσι ώστε να γίνει δυνατή η επικοινωνία μεταξύ των δύο δορυφόρων. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, ο δορυφόρος δέκτης πρέπει να ανιχνεύσει την εκπεμπόμενη δέσμη Laser από τον δορυφόρο πομπό. Το δεύτερο βήμα είναι η επίτευξη μιας συνεχούς ευθυγράμμισης (pointing and tracking) μεταξύ των δύο δορυφόρων παρά τα διάφορα προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν, όπως οι ταλαντώσεις και οι μετακινήσεις για τη διόρθωση θέσης. Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα του μηχανισμού στόχευσης και ευθυγράμμισης (pointing and tracking). Υπάρχουν δύο πηγές θορύβου, εσωτερικές και εξωτερικές.



Σχήμα 4.12: Σχεδιάγραμμα μηχανισμού στόχευσης και ευθυγράμμισης (pointing and tracking mechanism) (Lambert & Casey, 1995)

4.2.1 Τεχνικές στόχευσης (Pointing Techniques)

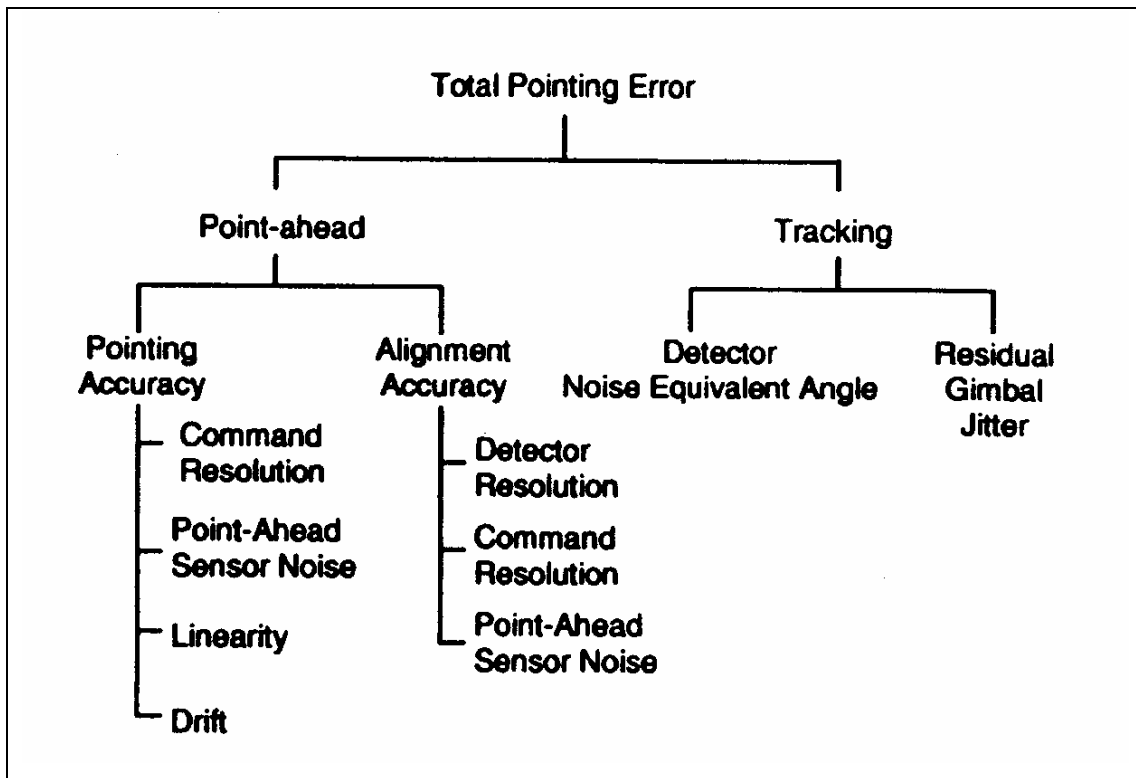
Μία παράμετρος που συμβάλει στο συνολικό θόρυβο και δημιουργείται εσωτερικά στον δέκτη είναι η ισοδύναμη γωνία θορύβου (noise equivalent angle, NEA). Η παράμετρος αυτή ορίζεται σαν μια γωνιακή διαταραχή (angular jitter) στο σύστημα ευθυγράμμισης (tracking system) του δέκτη το οποίο προκύπτει από τη διαδικασία ανίχνευσης. Η διαταραχή αυτή αναπαριστάνεται και ως η ρίζα αθροίσματος διαφορών μέσου (root mean square) τυπικής απόκλισης και δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{rms} = \frac{1}{SF\sqrt{SNR}} \quad (4.8)$$

όπου SF (slope factor) ορίζεται σαν η συνάρτηση μεταφοράς από την αρχή των συντεταγμένων και μετατρέπει τη μετατόπιση γωνίας σε γραμμική τάση. Ο σηματοθορυβικός λόγος SNR δίνεται από τον τύπο:

$$SNR = \frac{[P_r R_d]^2}{N_0 B} \quad (4.9)$$

όπου N_0 είναι ο λαμβανόμενος θόρυβος σε A^2/Hz , B είναι το εύρος ζώνης του βρόχου ευθυγράμμισης σε Hz , P_r είναι η απαιτούμενη οπτική ισχύς σήματος σε $Watt$ και R_d είναι η ευαισθησία ανίχνευσης (detector responsivity). Μια άλλη πηγή εσωτερικού θορύβου είναι οι υπόλοιπες διαταραχές λόγω των στηριγμάτων που χρησιμοποιούνται για την κίνηση του συστήματος (residual gimbal jitter). Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται όλοι οι παράγοντες που συμβάλλουν στο συνολικό θόρυβο του συστήματος ευθυγράμμισης (pointing system).



Σχήμα 4.13: Συνολικός θόρυβος στο σύστημα ευθυγράμμισης (Lambert & Casey, 1995)

Οι εξωτερικές διαταραχές στο σύστημα ευθυγράμμισης του δέκτη προέρχονται από έναν μεγάλο αριθμό πηγών θορύβου και μερικές από αυτές φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Sources	Frequency Range
Solar panel driver	0.1-1.0 Hz
Momentum Wheels	20-1000 Hz
Gimbal jitter (residual)	5-15 Hz
Sensor scan mirror	20-40 Hz
Thrusters	Step response

Πίνακας 4.1: Εξωτερικές πηγές διαταραχής (Lambert & Casey, 1995)

4.2.2 Τεχνικές Ευθυγράμμισης (Tracking techniques)

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός του μηχανισμού ευθυγράμμισης. Πρέπει να σημειώσουμε ότι ο καλύτερος τρόπος για την κατασκευή του συστήματος είναι η χρησιμοποίηση της ίδιας πηγής Laser για την ανίχνευση, ευθυγράμμιση και επικοινωνία (acquisition, tracking and communication). Γι αυτό το λόγο, για τις τεχνικές ευθυγράμμισης ακολουθούμε την ίδια διαδικασία όπως παραπάνω, στις τεχνικές ανίχνευσης. Οι τεχνικές ευθυγράμμισης που χρησιμοποιούνται είναι :

- DC tracking

- Pulse tracking
- Square-law tracking
- Tone tracking
- Coherent tracking

Από όλες αυτές τις τεχνικές εδώ θα ασχοληθούμε με την ευθυγράμμιση με παλμούς και με τόνους (pulse and tone tracking).

Η ευθυγράμμιση χρησιμοποιώντας παλμικές κυματομορφές είναι μια πολύ συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται στο διάστημα. Σε ένα σύστημα ευθυγράμμισης με παλμούς το κατώφλι του δέκτη ανιχνεύει κάθε παλμό και χρησιμοποιεί αυτή την πληροφορία για τον υπολογισμό ενός μεγάλου εύρους ζώνης σφάλματος ευθυγράμμισης. Για τον υπολογισμό της rms τιμής του σφάλματος ευθυγράμμισης χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

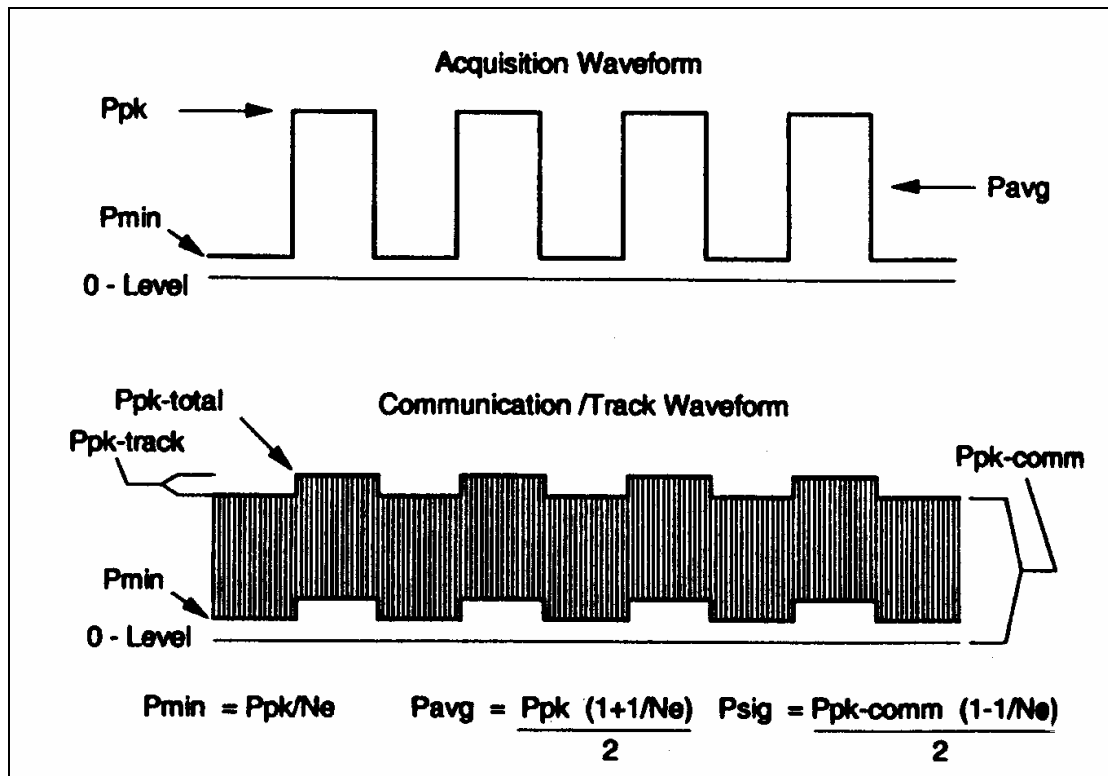
$$\sigma_{rms} = \frac{1}{SF\sqrt{SNR}} \times \sqrt{\frac{f_c}{f_R}} \quad (4.10)$$

όπου f_c είναι το εύρος ζώνης του βρόχου ελέγχου ευθυγράμμισης (tracking control loop bandwidth) και f_R είναι ο ρυθμός εισερχομένων παλμών.

Η ευθυγράμμιση χρησιμοποιώντας κυματομορφές τόνων χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές με ημι-συνεχές διαμορφωμένα σήματα (quasi-CW modulation signals). Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα που χρησιμοποιείται είναι διαφορετική από αυτή που έχει το σήμα επικοινωνίας για να μην υπάρχουν παρεμβολές. Φιλτράροντας το σήμα και οι δύο συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν πάνω στον ίδιο πομποδέκτη. Το εύρος ζώνης δέκτη ευθυγράμμισης δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από τη συχνότητα τόνων, η οποία τυπικά είναι μερικά kHz. Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται μια τυπική κυματομορφή τόνων σε συνδυασμό με μια κυματομορφή σήματος επικοινωνίας. Για τον υπολογισμό του rms σφάλματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω τύπος:

$$\sigma_{rms} = \frac{1}{SF\sqrt{SNR}} \times \sqrt{\frac{f_c}{f_t}} \quad (4.11)$$

όπου f_t είναι η συχνότητα τόνου.



Σχήμα 4.14: Τυπική κυματομορφή τόνων (Lambert & Casey, 1995)

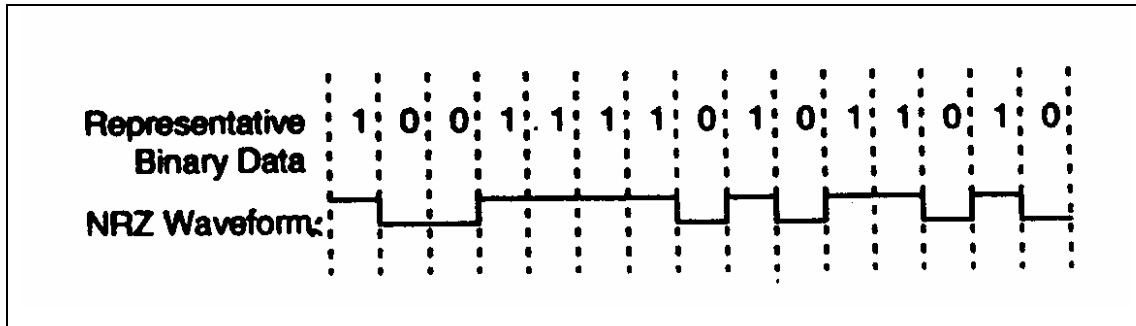
4.3 Τεχνικές επικοινωνίας

Από τη στιγμή που η σύνδεση μεταξύ των δύο δορυφόρων έχει εγκατασταθεί, το τελευταίο βήμα είναι ο προσδιορισμός της μεθόδου επικοινωνίας που θα χρησιμοποιηθεί. Εδώ θα εξετάσουμε τις μεθόδους διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που συναντάμε συχνά στο διάστημα. Επίσης γίνεται μια γενική αναφορά στους τύπους των δεκτών που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση. Πρώτα απ' όλα πρέπει να πούμε ότι υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι διαμόρφωσης, η άμεση φώραση (direct detection) και η σύμφωνη φώραση (coherent detection). Στην εργασία αυτή η μελέτη θα βασιστεί στην άμεση φώραση.

4.3.1 Άμεση φώραση (Direct detection)

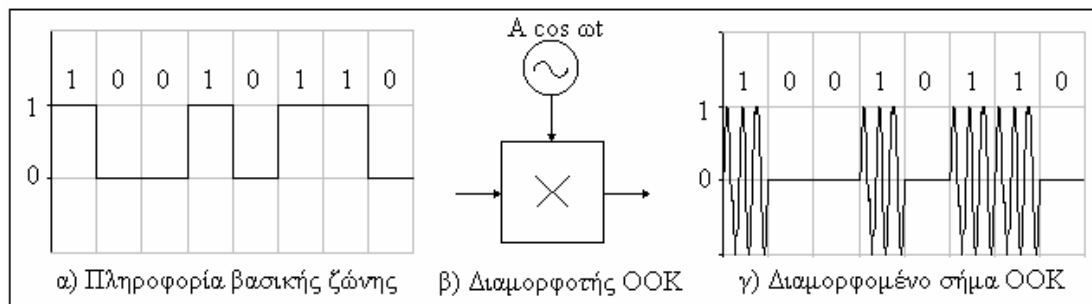
Η σχεδίαση συστημάτων άμεσης φώρασης είναι η πιο απλή και ο περισσότερο χρησιμοποιούμενη στην πράξη μέθοδος. Βασίζεται στο δυαδικό σύστημα επικοινωνίας όπου η μια κατάσταση αναγνωρίζεται ως δυαδικό “ένα” και η άλλη κατάσταση ως δυαδικό “μηδέν”. Οι δύο πιο σημαντικές μορφές διαμόρφωσης στην άμεση φώραση είναι η OOK (On-Off Keying) και η PPM (Pulse Position

Modulation). Η διαμόρφωση OOK είναι μια περίπτωση της κυματομορφής NRZ (Non Return to Zero). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.15 το δυαδικό “ένα” αναγνωρίζεται από τη παρουσία σήματος κατά τη διάρκεια ενός bit. Επίσης το δυαδικό “μηδέν” αναγνωρίζεται από την απουσία σήματος κατά τη διάρκεια ενός bit.



Σχήμα 4.15: Κυματομορφή NRZ (Lambert & Casey, 1995)

Στη διαμόρφωση OOK το δυαδικό ένα είναι ένας παλμός Laser (ανοιχτό Laser) και το δυαδικό μηδέν παρουσιάζεται όταν το Laser είναι κλειστό. Στο Σχήμα 4.16 γίνεται μια παρουσίαση της διαμόρφωσης OOK.



Σχήμα 4.16: Διαμόρφωση OOK

Η πιθανότητα που καθορίζει το BER (Bit Error Rate) στη διαμόρφωση OOK δίνεται από τον τύπο:

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{z}{2}} \right) \quad (4.12)$$

όπου η συνάρτηση σφάλματος είναι :

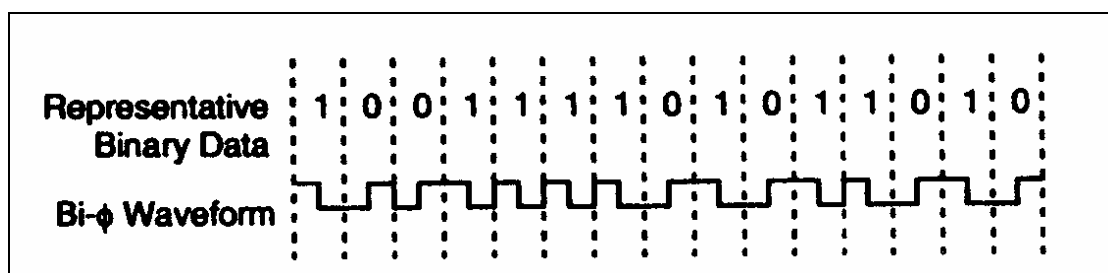
$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4.13)$$

και το z μπορεί να οριστεί σαν ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR):

$$z = \frac{\left[P_{pk} R_d \left(1 - \frac{1}{N_e} \right) \right]}{4 N_0 B} \quad (4.14)$$

όπου P_{pk} είναι η μέγιστη ένταση οπτικής ισχύος, R_d είναι η ευαισθησία ανίχνευσης σε A/Hz (detector responsivity), N_e (extinction ratio of the source), N_0 είναι η πυκνότητα ισχύος θορύβου σε A^2/Hz και B είναι το εύρος ζώνης σε Hz.

Μια άλλη περίπτωση που βασίζεται στη διαμόρφωση OOK είναι η χρήση της κωδικοποίησης Manchester. Η κωδικοποίηση αυτή είναι βασισμένη στο γεγονός ότι αν οι δορυφόροι χρησιμοποιούν τη μέθοδο σάρωση / παρατήρηση (scan/stare) (μικρό άνοιγμα δέσμης), η επικοινωνία μεταξύ τους θα χαθεί αν μεταδοθεί μια σειρά από “μηδενικά”. Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιώντας την κωδικοποίηση Manchester, το δυαδικό “1” παριστάνεται μεταδίδοντας έναν θετικό παλμό στο πρώτο μισό της διάρκειας συμβόλου ακολουθούμενο από έναν αρνητικό παλμό στο δεύτερο μισό της διάρκειας συμβόλου. Για το δυαδικό “0” οι παλμοί αυτοί μεταδίδονται με την αντίθετη σειρά. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει dc συνιστώσα κατά τη μετάδοση των bit. Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι ακόμα και όταν μεταδίδεται μια μεγάλη σειρά από “μηδενικά” η επικοινωνία δεν χάνεται αφού μεταδίδονται ακμές που δηλώνουν την παρουσία συμβόλου. Στο Σχήμα 4.17 φαίνεται μια κυματομορφή κωδικοποιημένη κατά Manchester.

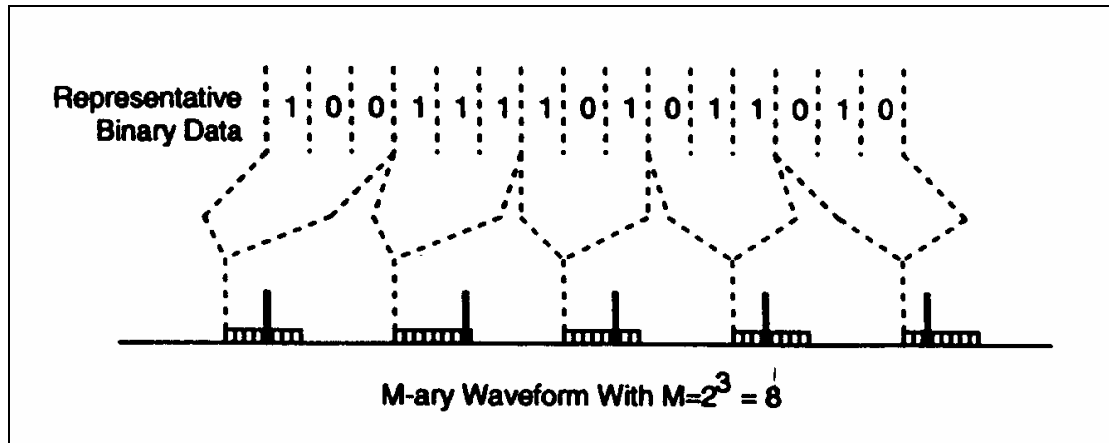


Σχήμα 4.17: Κυματομορφή Manchester (Lambert & Casey, 1995)

Στη διαμόρφωση PPM υπάρχει ένας αριθμός από κυματομορφές που βασίζονται στη λεγόμενη M-ary διαμόρφωση. Στη διαμόρφωση αυτή κάθε υψηλό επίπεδο σήματος (signal's high level) χρησιμοποιείται για τον συμβολισμό δύο ή περισσότερων bit της δυαδικής πληροφορίας. Αριθμητικά αυτό δίνεται από τον τύπο:

$$K=2^m \quad (4.15)$$

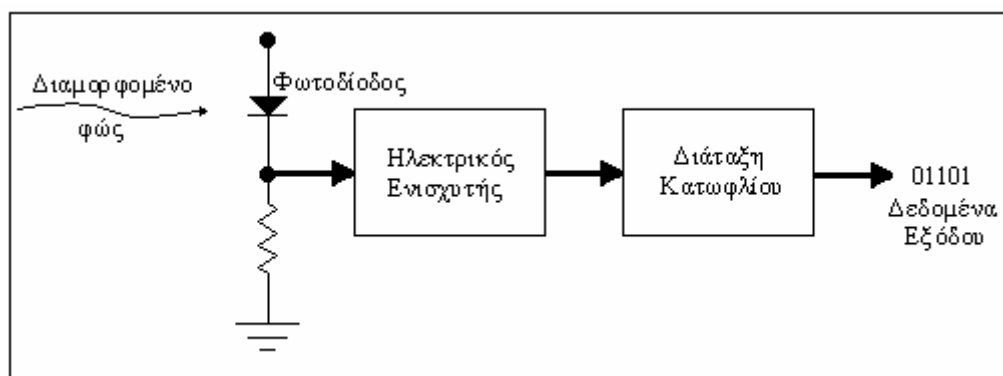
όπου k είναι ο αριθμός των bits ανά παλμό και m είναι ο αριθμός των σχισμών όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.18.



Σχήμα 4.18: Διαμόρφωση PPM (Lambert & Casey, 1995)

Υπάρχουν επίσης και μερικές άλλες μορφές διαμόρφωσης βασισμένες στη διαμόρφωση PPM όπως η διαμόρφωση PBM (Pulse Binary Modulation), η διαμόρφωση PDBM (Pulse Delay Binary Modulation), η διαμόρφωση PPBM (Pulse Polarization Binary Modulation) και η διαμόρφωση PIM (Pulse Interval Modulation). Με τις διαμορφώσεις αυτές δεν θα ασχοληθούμε σε αυτή την εργασία. Η άμεση φώραση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση των αναλογικών σημάτων.

Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται η μορφή του δέκτη άμεσης-φώρασης (direct-detection). Ένας φωτοφωρατής χρησιμεύει για να μετατρέπει τη ροή των προσπιπτόντων φωτονίων σε ρεύμα ηλεκτρονίων, το ρεύμα ενισχύεται και γίνεται ο προσδιορισμός του κατά πόσο το ρεύμα αυτό είναι κυρίως πιο πάνω ή πιο κάτω από ένα ορισμένο κατώφλι.



Σχήμα 4.19: Δέκτης άμεσης φώρασης (Green, 1993)

4.3.2 Σύμφωνη φώραση (Coherent detection)

Στα συστήματα σύμφωνης φώρασης το προσπίπτων σήμα αθροίζεται με το σήμα ενός τοπικού ταλαντωτή (local oscillator, LO) στο δέκτη. Στα συστήματα οπτικής επικοινωνίας το άθροισμα γίνεται στον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής στα συστήματα σύμφωνης φώρασης είναι μια PIN φωτοδίοδος και το κέρδος του δέκτη εξασφαλίζεται από το πλάτος της κυματομορφής του τοπικού ταλαντωτή.

Η διαδικασία αθροίσματος των σημάτων περιγράφεται από τις σχέσεις (4.16) και (4.17) για ομόδυνη και ετερόδυνη φώραση αντίστοιχα:

$$i_{dho}(t) = 2R_d \sqrt{P_c P_{lo}} \quad (4.16)$$

$$i_{dhe}(t) = 2R_d \sqrt{P_c P_{lo}} \cos[\delta(t)] \quad (4.17)$$

όπου P_c και P_{lo} είναι το σύμφωνο σήμα και η ισχύς του τοπικού ταλαντωτή αντίστοιχα και R_d είναι η ευαισθησία του δέκτη (detector responsivity). Παρακάτω περιγράφονται αυτές οι μορφές διαμόρφωσης:

- *Ετερόδυνη Φώραση* (Heterodyne Detection): Διάφορες μορφές ετερόδυνης φώρασης είναι γνωστές για τις οποίες έχουν υπολογιστεί οι πιθανότητες σφαλμάτων (Bit Error Probabilities, BEP). Στη διαμόρφωση ASK (Amplitude Shift Keying) το πλάτος του σήματος είναι μια συνάρτηση του χρόνου. Κάθε bit πληροφορίας αντιπροσωπεύεται από την παρουσία ή την απουσία της οπτικής κυματομορφής. Όταν χρησιμοποιούμε ετερόδυνη αποδιαμόρφωση, η πιθανότητα σφαλμάτων (BEP) για τη διαμόρφωση ASK δίνεται από τον τύπο:

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{z}{2}}\right) \quad (4.18)$$

όπου z είναι ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) και $\operatorname{erfc}(x)$ είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος.

Στα συστήματα FSK (Frequency Shift Keying), δύο διαφορετικές συχνότητες εκπέμπονται και το σήμα λαμβάνεται από δύο δέκτες συντονισμένους στις δύο αυτές συχνότητες. Η πιθανότητα λάθους (BEP) συστήματα FSK δίνεται από τον τύπο:

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{z}}{2}\right) \quad (4.19)$$

Στα συστήματα PSK (Phase Shift Keying), εκπέμπονται δύο διαφορετικά σήματα, που έχουν διαφορά φάσης. Ο δέκτης αναγνωρίζει την δυαδική κατάσταση συγκρίνοντας τις δύο φάσεις με μια φάση αναφοράς. Η πιθανότητα λάθους (BEP) δίνεται από τον τύπο:

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{z}{2}} \right) \quad (4.20)$$

Παρόμοια με τη διαμόρφωση PSK, είναι διαφορική PSK (DPSK). Στη διαμόρφωση DPSK η πληροφορία μεταδίδεται όταν αλλάζει η φάση. Η πιθανότητα λάθους (BEP) για την DPSK δίνεται από τον τύπο:

$$P_E = \frac{1}{2} e^{-(x^2/2)} \quad (4.21)$$

- *Ομόδυνη φώραση* (Homodyne Detection): Στην ομόδυνη φώραση για κυματομορφές ASK και PSK, το απαιτούμενο εύρος ζώνης μπορεί να μειωθεί στο μισό σε σύγκριση με τα ετερόδυνα συστήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση κατά 3-dB του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) στην ομόδυνη φώραση.

Η πιθανότητα λάθους στην ομόδυνη ASK είναι:

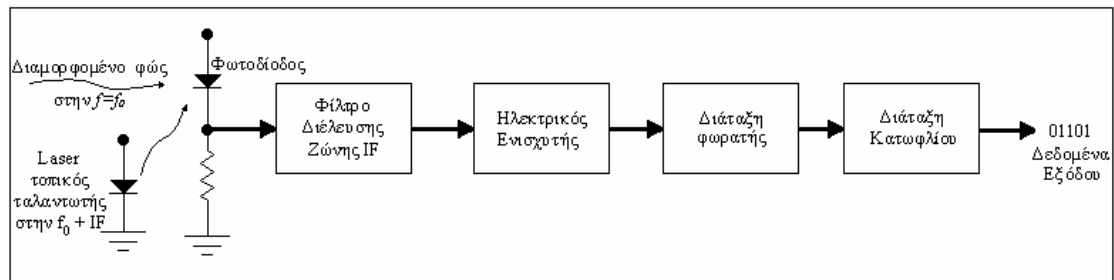
$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{z}}{2} \right) \quad (4.22)$$

η οποία είναι ισοδύναμη με την ετερόδυνη FSK. Η πιθανότητα λάθους για την ομόδυνη PSK είναι:

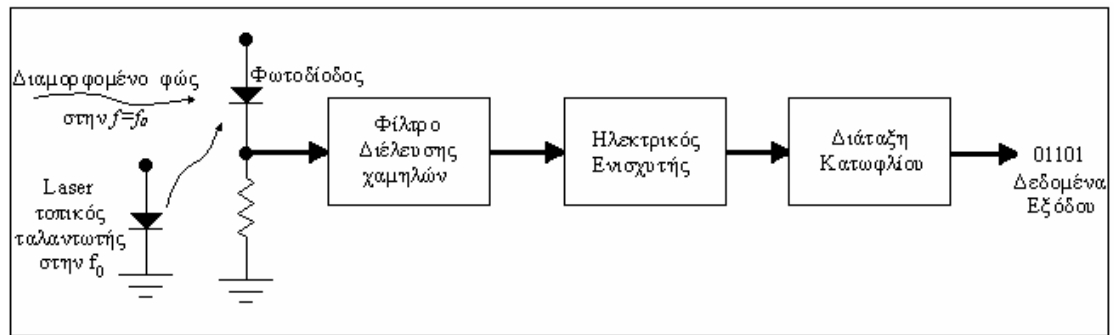
$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{z}) \quad (4.23)$$

Οι δύο μορφές *σύμφωνου δέκτη* (coherent receiver) φαίνονται στα Σχήματα 4.20 και 4.21. Όπως φαίνεται στα σχήματα αυτά, μία κατά το δυνατόν μονοχρωματική πηγή CW φωτός αποτελεί τον τοπικό ταλαντωτή. Το φως αυτής της πηγής πέφτει στο φωτοφωρατή μαζί με το κατά πολύ ασθενέστερο αφικνούμενο οπτικό σήμα που φέρει την πληροφορία, και λόγω της μη γραμμικότητας του φωτοφωρατή, αναπτύσσεται ένα ισχυρό διακρότημα σήματος εξόδου στη διαφορά των δύο συχνοτήτων. Αυτή η *ενδιάμεση συχνότητα* (IF: intermediate frequency) έχει επιλεγεί έτσι ώστε να βρίσκεται στο κέντρο της ζώνης ενός σταθερά συντονισμένου φίλτρου IF. Η ενίσχυση του ασθενούς σήματος IF γίνεται ηλεκτρικά. Μετά, όταν το

σήμα γίνει αρκετά ισχυρό, γίνεται μια κατάλληλη αποδιαμόρφωση και η σύγκριση προς ένα κατώφλι για την τελική απόφαση ανάδειξης των “1” και “0”.



Σχήμα 4.20: Ετερόδυνος δέκτης (Green, 1993)



Σχήμα 4.21: Ομόδυνος δέκτης (Green, 1993)

Η διαφορά μεταξύ του ετερόδυνου οπτικού δέκτη του Σχήματος 4.20 και του ομόδυνου τύπου του Σχήματος 4.21 είναι ότι στον τελευταίο η IF είναι ακριβώς μηδέν. Δηλαδή, ότι η οπτική συχνότητα του αφικνούμενου σήματος φορέα της πληροφορίας και εκείνη του τοπικού ταλαντωτή είναι οι ίδιες. Αν και αυτή η ταύτιση συχνοτήτων είναι δύσκολο να επιτευχθεί, συχνά αξίζει τον κόπο, γιατί τότε απαιτείται μικρότερη λαμβανόμενη ισχύς σήματος για ένα δεδομένο BER (bit error rate) από ό,τι με τον ετερόδυνο σύμφωνο δέκτη.

Και οι δύο τύποι σύμφωνων δεκτών απαιτούν μικρότερο λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) για ένα δεδομένο ρυθμό σφαλμάτων bit (BER) από ότι ο δέκτης άμεσης φώρασης. Εντούτοις, είναι ο τελευταίος αυτός τύπος μόνον που έχει πραγματοποιηθεί συστηματικά στα πρακτικά χρησιμοποιούμενα οπτικά συστήματα, λόγω της απλότητάς του.

4.3.3 Τεχνικές κωδικοποίησης

Το τελευταίο κομμάτι της σχεδίασης του συστήματος, είναι οι τεχνικές κωδικοποίησης. Ο ρόλος της κωδικοποίησης είναι να εισάγει μερικά επιπρόσθετα bits στον δέκτη με σκοπό τη διόρθωση περισσοτέρων σφαλμάτων στη μετάδοση. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη ενέργεια του σήματος. Η μείωση αυτή της ενέργειας του σήματος είναι γνωστή σαν κέρδος κωδικοποίησης (coding gain), και δίνεται από τον παρακάτω τύπο (για κωδικοποιήσεις $1/2$):

$$\Gamma_{code} = 10 \log_{10} \left[\frac{P_{req}(uncoded)}{P_{req}(coded)} \right] \quad (4.24)$$

Υπάρχουν οχτώ κώδικες οι οποίοι χρησιμοποιούνται συχνά στην επικοινωνία με Laser και αναφέρονται στον Πίνακα 4.2. Οι κώδικες αυτοί υλοποιούνται εύκολα σε hardware και οι περισσότεροι από αυτούς είναι διαθέσιμοι σε chip.

Μέθοδοι κωδικοποίησης για επικοινωνίες με Laser	
Golay	Viterbi-soft decision
Extended Golay	Viterbi-hard decision
Reed Solomon	Concatenated (RS-Viterbi-soft)
Concatenated (RS-Golay)	Concatenated (RS-Viterbi-hard)

Πίνακας 4.2 (Lambert & Casey, 1995)

Στον Πίνακα 4.3 συγκρίνονται οι οχτώ αυτοί κώδικες για δύο πιθανότητες σφαλμάτων (BEP), 10^{-6} και 10^{-5} και δίνεται το κέρδος κωδικοποίησης και η πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου (symbol error probability).

Coding Gains for Representative Rate One-Half Codes				
Code	$P_{be} = 10^{-6}$		$P_{be} = 10^{-5}$	
	P_s	Γ_{code} (dB)	P_s	Γ_{code} (dB)
Golay	.004389	1.45	.001388	1.69
Extended Golay	.0052	1.36	.00165	1.57
Viterbi (hard decision)	.014	2.17	.0059	2.40
Viterbi (soft decision)	.040	3.33	.023	3.61
Reed Solomon	.012	1.64	.01122	2.91
RS/Viterbi (hard decision)	.0739	3.99	.0683	4.61
RS/Viterbi (soft decision)	.115	4.89	.109	5.71
RS/Golay	.029	2.26	.019	2.74

Πίνακας 4.3 (Lambert & Casey, 1995)

4.4 Εξίσωση οπτικής επικοινωνίας

Το τελευταίο μέρος της σχεδίασης του συστήματος επικοινωνίας με Laser ασχολείται με την ανάλυση της εξίσωσης οπτικής επικοινωνίας. Σκοπός μας είναι ο υπολογισμός του Link Margin (LM) μεταξύ της λαμβανόμενης ισχύος (P_r) και της απαιτούμενης ισχύος (P_{req}) του σήματος. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτήν στις RF επικοινωνίες. Έτσι, το Link Margin υπολογίζεται από τον λόγο της λαμβανόμενης προς την απαιτούμενη ισχύ και εκφράζεται συνήθως σε dB:

$$Link_Margin = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_{req}} \right) \quad (4.25)$$

Μια τυπική τιμή του LM στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι 3 dB. Εδώ, η λαμβανόμενη ισχύς είναι άγνωστη, ενώ η απαιτούμενη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από το λόγο E_b/N_0 , δηλαδή από της απαιτήσεις του πελάτη. Για τον υπολογισμό της λαμβανόμενης ισχύος χρησιμοποιούμε την γνωστή εξίσωση στις τηλεπικοινωνίες:

$$P_r = P_t G_t L_t L_{FSL} G_r L_r \quad (4.26)$$

όπου

P_r : η λαμβανόμενη ισχύς

P_t : η εκπεμπόμενη ισχύς

G_t : το ενεργό κέρδος της κεραίας του πομπού

L_t : οι απώλειες πομπού

L_{FSL} : οι απώλειες ελεύθερου χώρου

G_r : το κέρδος της κεραίας του δέκτη

L_r : οι απώλειες του δέκτη

Παρακάτω θα ακολουθήσει μια γενική ανάλυση των παραμέτρων αυτών. Πρώτη είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, η οποία εξαρτάται από τον τύπο του Laser που χρησιμοποιούμε. Όπως θα αναφερθεί και σε επόμενο κεφάλαιο το Laser που έχει αποφασιστεί να χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή έχει ισχύ εξόδου 1mW και εκπέμπει στα 670nm.

Η μετάδοση της δέσμης Laser από τα οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στον πομπό εξαρτάται από δύο παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος έχει να κάνει με τη σχεδίαση του πομπού. Οι επιφάνειες των φακών, των φίλτρων και άλλων οπτικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται συνεισφέρουν στις απώλειες του πομπού L_t . Κάθε οπτική επιφάνεια συμβάλει κατά έναν πολλαπλασιαστικό

παράγοντα στις απώλειες αυτές. Πρέπει να σημειώσουμε ότι αυτές οι απώλειες εξαρτώνται και από το μήκος κύματος του Laser. Η δεύτερη παράμετρος που συμβάλει στις απώλειες του πομπού είναι η ποιότητα της δέσμης Laser δηλαδή η ποιότητα του μετώπου του κύματος και εξαρτάται από κατασκευαστικούς παράγοντες.

Το κέρδος πομπού G_t μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$G_t = \frac{16}{\theta_{div}^2} \quad (4.27)$$

όπου θ_{div}^2 είναι η γωνία ανοίγματος της δέσμης και στην περίπτωση αυτή ισούται με:

$$\theta_{div}^2 = \frac{4\lambda}{\pi a} \quad (4.28)$$

Υπάρχουν δύο περιπτώσεις που πρέπει να μελετήσουμε, αν η δέσμη είναι on-axis ή off-axis. Για την πρώτη περίπτωση η εξίσωση (4.27) γίνεται:

$$G_t = \frac{32}{\theta_{div}^2} \quad (4.29)$$

και στη δεύτερη περίπτωση το κέρδος πομπού γίνεται:

$$G_t(\theta_{off}) \approx \frac{4\pi A}{\lambda^2} e^{-8\left(\frac{\theta_{off}}{\theta_{div}}\right)^2} \quad (4.30)$$

όπου θ_{off} είναι η γωνία off-axis, θ_{div}^2 ισούται με το $1/e^2$ της διαμέτρου της δέσμης και το A δίνεται από τον τύπο:

$$A = \frac{4\pi a}{\lambda} \quad (4.31)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις βασίζονται στο γνωστό κριτήριο Rayleigh το οποίο είναι:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (4.32)$$

όπου θ είναι η γωνία σε rad, λ είναι το μήκος κύματος και D είναι η διάμετρος του διαφράγματος.

Η επόμενη παράμετρος είναι οι απώλειες ελεύθερου χώρου (L_{FSL}) οι οποίες υπολογίζονται από τον γνωστό τύπο:

$$L_{FSL} = \left[\frac{\lambda}{4\pi R} \right]^2 \quad (4.33)$$

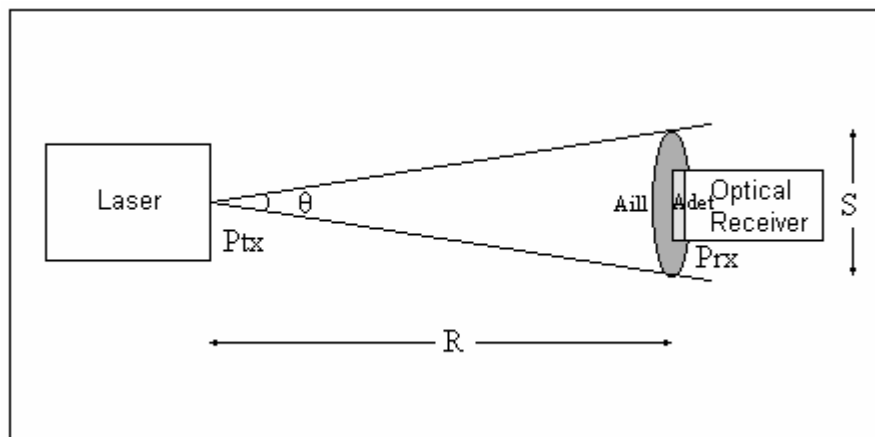
όπου R είναι η απόσταση μεταξύ των δυο δορυφόρων και λ είναι το μήκος κύματος.

Το κέρδος της κεραίας του δέκτη G_r εξαρτάται από τη διάμετρο της κεραίας και από το μήκος κύματος μετάδοσης του Laser. Το κέρδος αυτό δίνεται από τον τύπο:

$$G_r = \left[\frac{\pi D}{\lambda} \right]^2 \quad (4.34)$$

Οι απώλειες του δέκτη L_r είναι ανάλογες με τις απώλειες του πομπού L_t και εξαρτώνται από τους ίδιους παράγοντες. Όλες οι παραπάνω πληροφορίες δίνονται για τον υπολογισμό της λαμβανόμενης ισχύος P_r .

Στην περίπτωση που εξετάζουμε, η επικοινωνία μεταξύ των δορυφόρων θα γίνεται με Laser. Μια πρακτική λύση, για να βρούμε μια σχέση για τον υπολογισμό του Link Budget στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται κεραίες στον πομπό και τον δέκτη, είναι να υποθέσουμε ότι όλη η ποσότητα οπτικής ισχύος που εκπέμπεται δεν χάνεται αλλά διαχέεται σε όλη τη φωτιζόμενη επιφάνεια A_{ill} . Η λαμβανόμενη ισχύς θα είναι ανάλογη της επιφάνειας του ανιχνευτή A_{det} όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.22. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι λόγω της απουσίας της ατμόσφαιρας τα φωτόνια που εκπέμπονται από το Laser δεν χάνονται στο διάστημα αλλά φτάνουν στο δέκτη φωτίζοντας μια επιφάνεια A_{ill} όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα.



Σχήμα 4.22: Μοντέλο επικοινωνίας με Laser

Η λαμβανόμενη ισχύς, σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$P_{rx} = P_{tx} \cdot \frac{A_{det}}{A_{ill}} \cdot \eta \quad (4.35)$$

όπου:

P_{rx} : η λαμβανόμενη ισχύς

P_{tx} : η εκπεμπόμενη ισχύς

A_{det} : η επιφάνεια του ανιχνευτή

A_{ill} : η φωτιζόμενη επιφάνεια

η : η αποδοτικότητα των οπτικών οργάνων που χρησιμοποιούνται ως κεραίες και συνήθως είναι 95%.

Κεφάλαιο 5^ο

Είδη Δεκτών

Αυτό το κεφαλαίο έχει σαν σκοπό να εξηγήσει από θεωρητική άποψη όλους τους τύπους των δεκτών. Στη σχεδίαση του συστήματος που θα ακολουθήσει στο επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούμε σε ένα μόνο τύπο δέκτη για την επικοινωνία των νάνο-δορυφόρων. Επομένως όλες οι πληροφορίες που δίνονται παρακάτω είναι χρήσιμες για οποιονδήποτε προσπαθεί να αναλύσει θεωρικά της πηγες θορύβου. Πρακτικά η λύση αυτού του προβλήματος έχει εντελώς διαφορετική προσέγγιση. Το βασικό αντικείμενο είναι να καθορίσουμε το σηματοθορυβικό λόγο (SNR) στο ζητούμενο σήμα. Οι πιο γνωστοί τύποι δεκτών όπως ήδη έχει αναφερθεί είναι οι Quadrant Avalanche Photodiode (QAPD) και PIN. Η βασική ιδέα είναι να χρησιμοποιήσουμε έναν τέτοιου τύπου δέκτη για να λάβουμε το σήμα για επικοινωνία, ανίχνευση και ευθυγράμμιση (communication, acquisition and tracking). Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν δυο είδη φώρασης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, η Άμεση Φώραση και η Σύμφωνη Φώραση. Όπως είχαμε αναφέρει πιο πριν η άμεση φώραση είναι η φώραση η οποία θα χρησιμοποιήσουμε. Για αυτό το λόγο, σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε μόνο με την άμεση φώραση.

5.1 Δέκτης Επικοινωνίας

Ο πρώτος δέκτης έχει σαν σκοπό την επικοινωνία. Ο σηματοθορυβικός λόγος δίνεται από τον τύπο:

$$SNR = \frac{(P_s R_d)^2}{N_0 B} \quad (5.1)$$

όπου P_s είναι η απαιτούμενη ισχύς σήματος σε Watts, R_d είναι η ευαισθησία ανίχνευσης του δέκτη σε A/W, N_0 είναι η πυκνότητα φάσματος ισχύος θορύβου σε A^2/Hz και B είναι το εύρος ζώνης του δεκτή σε Hz. Πρέπει να σημειώσουμε ότι η ευαισθησία ανίχνευσης του δέκτη (R_d) δείχνει το ποσοστό της οπτικής ισχύος που μετατρέπεται σε ρεύμα από τον φωρατή και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R_d = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (5.2)$$

όπου η είναι ο κβαντικό συντελεστής, q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, λ είναι το μήκος κύματος, c είναι η ταχύτητα του φωτός και h είναι η σταθερά του Planck. Αναφέρουμε ότι η τιμή του R_d για υπέρυθρες δέσμες (infrared) είναι περίπου 0.5 A/W, αλλά αυτό αλλάζει ανάλογα με το μήκος κύματος. Επίσης μια συνηθισμένη τιμή για το SNR, για οπτική επικοινωνία, πρέπει να είναι 6-10dB για να έχουμε κατάλληλο σήμα. Σκοπός των όσων αναφέραμε πιο πάνω είναι ο υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος του σήματος στον δέκτη έτσι ώστε να βρούμε το Link Margin από τον τύπο (4.25). Το SNR μπορεί να βρεθεί από το BER της μεθόδου διαμόρφωσης που χρησιμοποιούμε, το εύρος ζώνης και η ευαισθησία ανίχνευσης είναι γνωστά, έτσι η μόνη παράμετρος που πρέπει να υπολογίσουμε είναι η στατιστική του θορύβου. Η πιθανότητα σφάλματος στην διαμόρφωση OOK, βασισμένη στο SNR, δίνεται από το βιβλίο των Glover και Grand (1998):

$$P_E = 0.5 \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\text{SNR}}{2}}\right) \quad (5.3)$$

Παρακάτω εξετάζουμε όλες τις πηγές θορύβου που επιδρούν στον δέκτη επικοινωνίας.

5.1.1 Θόρυβος Περιβάλλοντος (Background Noise)

Θόρυβο περιβάλλοντος ονομάζεται η επίδραση από την ακτινοβολία των κοσμικών πυγών. Η ισχύς θορύβου περιβάλλοντος δίνεται από την έκφραση:

$$\sigma_B^2 = 2qFI_bB \quad (5.4)$$

όπου q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, B είναι το εύρος ζώνης του δεκτή και F είναι η συνιστώσα θορύβου της διαδικασίας ανίχνευσης και δίνεται από τον τύπο:

$$F = M \cdot k_{eff} \cdot (1 - k_{eff}) \cdot (2 - 1/M) \quad (5.5)$$

όπου k_{eff} είναι ο συντελεστής ιονισμού της φωτοδιόδου και M είναι το κέρδος χιονοστιβάδας του φωρατή. Στην γενική περίπτωση όπου χρησιμοποιείται p-intrinsic (PIN) φωτοδίοδος, το M γίνεται ιδανικά 1.

Ο όρος I_b στην σχέση 5.4 είναι ο μέσος όρος λαμβανομένου ρεύματος περιβάλλοντος και δίνεται από τον τύπο:

$$I_b = P_b R_d \quad (5.6)$$

όπου P_b είναι η λαμβανόμενη ισχύς περιβάλλοντος και R_d είναι η ευαισθησία του ανιχνευτή οπός πριν. Η τιμή του P_b μπορεί να περιλαμβάνει πολλούς συντελεστές που προέρχονται από την ακτινοβολία αστρικών και ουράνιων σωμάτων. Αυτό μπορεί επίσης να αποτελείται από τη σκέδαση του φωτός στο φακό ή το τηλεσκόπιο του δέκτη.

Τώρα η P_b μπορεί να δοθεί από τον παρακάτω τύπο:

$$P_b = H_b \cdot \Omega_{fov} \cdot L_{rec} \cdot B_{filter} \quad (5.7)$$

για στόχους ακτινοβολίας η γωνία των οποίων είναι μεγαλύτερη από το οπτικό πεδίο του ανιχνευτή του δεκτή και σαν :

$$P_b = N_b \cdot L_{rec} A_{rec} \cdot B_{filter} \quad (5.8)$$

όπου η πυγή του θορύβου περιβάλλοντος μπορεί να θεωρηθεί σαν σημειακή πηγή και καλύπτεται από το οπτικό πεδίο του δέκτη.

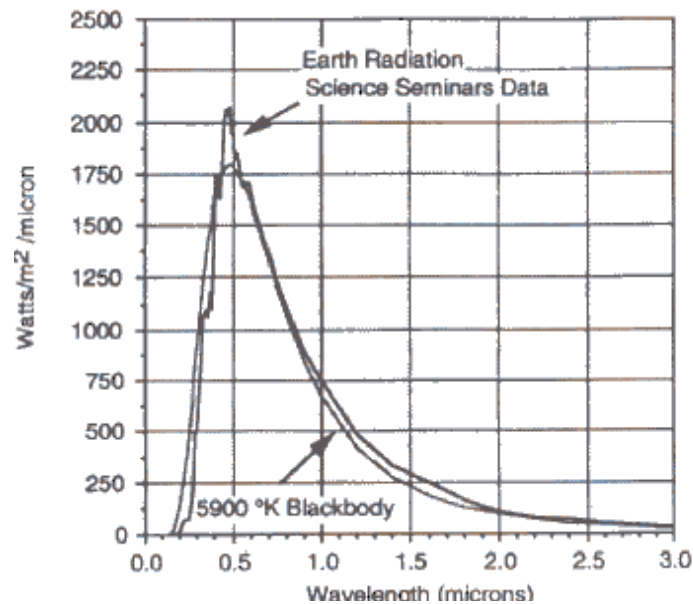
Οι όροι H_b και N_b στις σχέσεις 5.7 και 5.8 είναι η ακτινοβολία και ακτινοβολούμενη πυκνότητα ισχύος περιβάλλοντος (background radiance and irradiance energy densities) πηγών μεγάλης γωνίας και σημειακών πηγών, αντίστοιχα. Ο όρος H_b είναι εκφρασμένο σε $W/m^2/sr/A$ και N_b είναι εκφρασμένο σε $W/m^2/A$. Όπως μπορούμε να δούμε, η τιμή της P_b είναι συνάρτηση της στερεάς γωνίας του δέκτη Ω_{fov} , (για πηγή ακτινοβολίας), της ενεργού επιφάνειας του δεκτή, A_{rec} , των απωλειών μετάδοσης του οπτικού δέκτη, L_{rec} , και του εύρους ζώνης του ζωνοπερατού φίλτρου του δέκτη, B_{filter} . Η στερεά γωνία μπορεί να προσδιορισθεί από την προσέγγιση για μικρή γωνία από τον τύπο :

$$\Omega_{fov} \approx \frac{\pi}{4} \cdot (\mathcal{G}_{rec})^2 \quad (5.9)$$

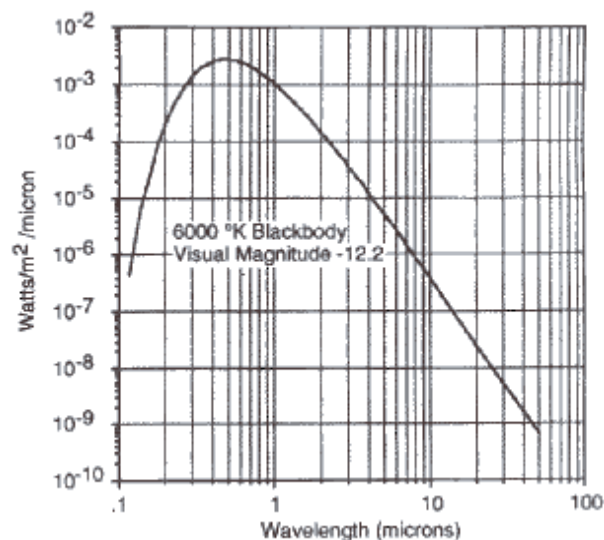
οπού $\mathcal{G}_{rec}$ είναι η διάμετρος του οπτικού πεδίου του ανιχνευτή στον δέκτη, και η επιφάνεια του δέκτη μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της διαμέτρου του φακού, D_{aper} , και της διαμέτρου σκότους, D_{obs} , σαν:

$$A_{rec} = \left[1 - \left(\frac{D_{obs}}{D_{aper}} \right)^2 \right] \cdot D_{aper}^2 \quad (5.10)$$

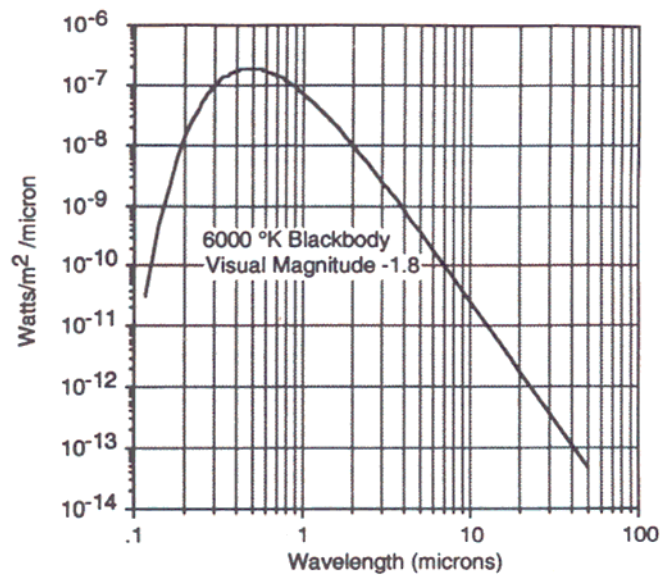
Τα σχήματα 5.1 μέχρι 5.11 (Lambert & Casey, 1995) δείχνουν τις τιμές του H_b και N_b χρησιμοποιώντας την ακτινοβολία μελανού σώματος και ουράνιων σωμάτων. Ο πίνακας 5.1 (Lambert & Casey, 1995) δείχνει τις τιμές των H_b και N_b για ειδικές αστρικές πηγές σε διάφορα μήκη κύματος που ενδιαφέρουν τα συστήματα επικοινωνίας με Laser.



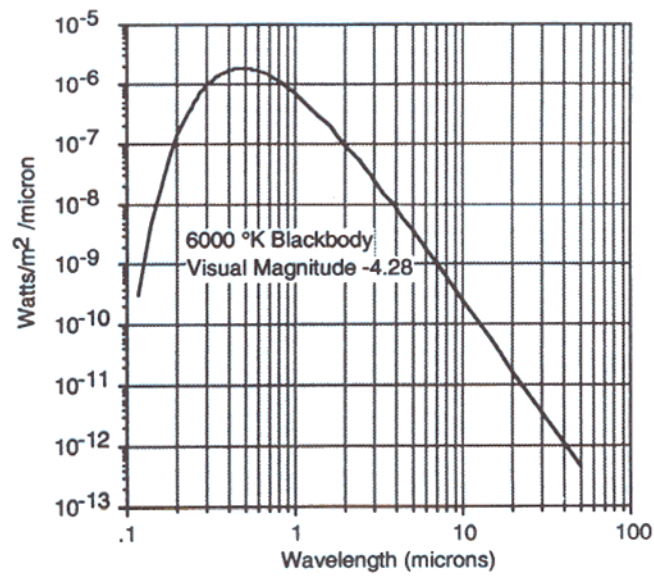
Σχήμα 5.1: Solar spectral irradiance above Earth's atmosphere



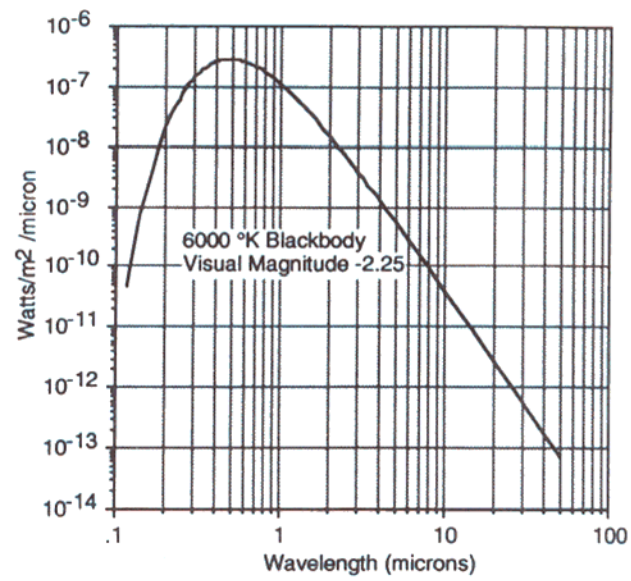
Σχήμα 5.2: Lunar spectral irradiance above Earth's atmosphere



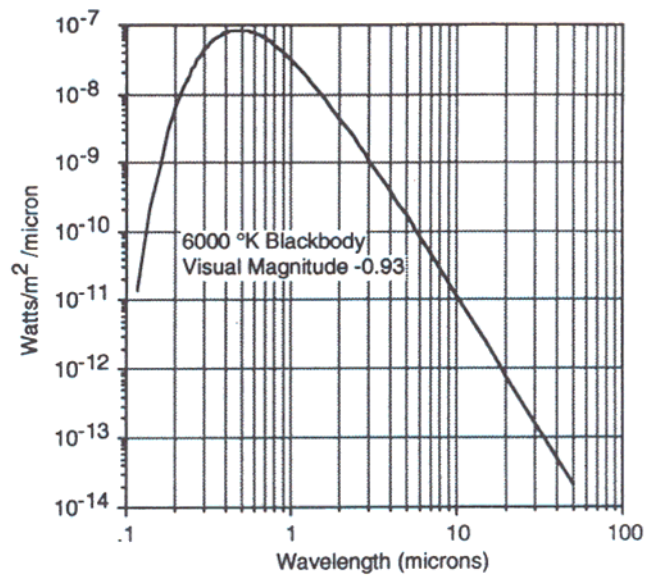
Σχήμα 5.3: Irradiance of Mercury



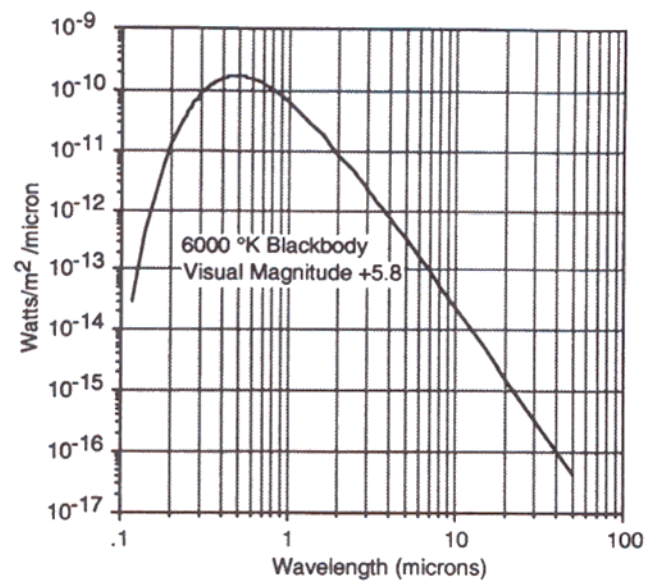
Σχήμα 5.4: Irradiance of Venus



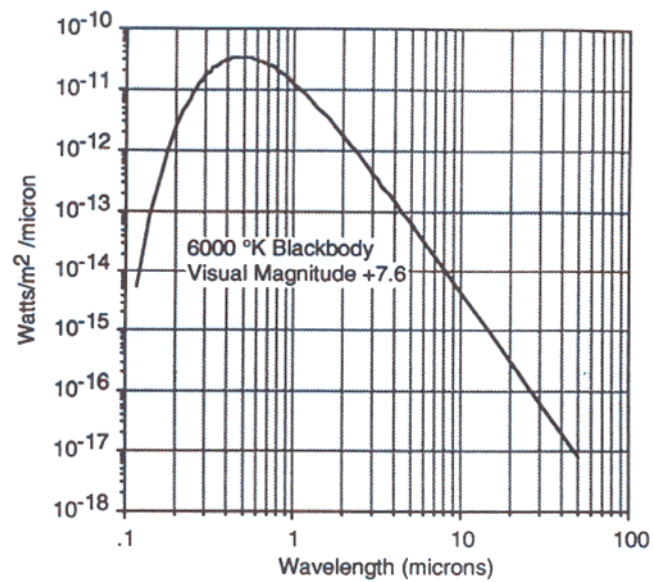
Σχήμα 5.5: Irradiance of Mars or Jupiter



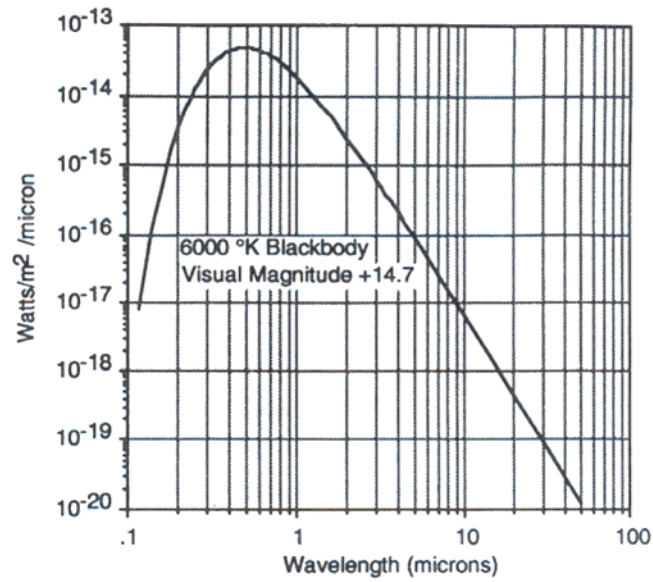
Σχήμα 5.6: Irradiance of Saturn



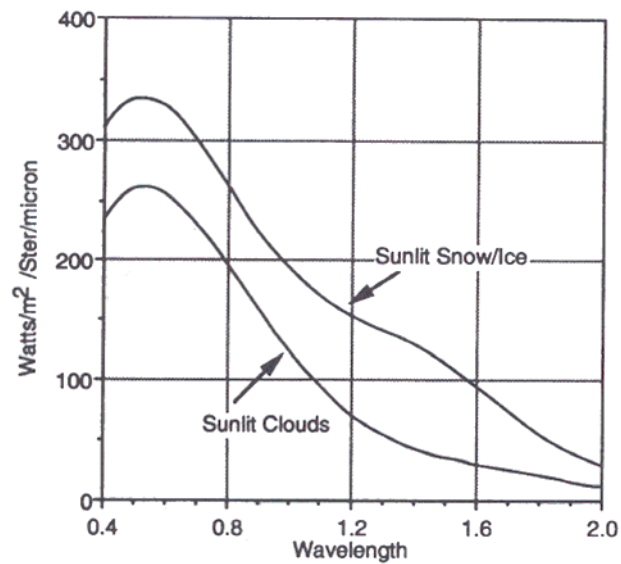
Σχήμα 5.7: Irradiance of Uranus



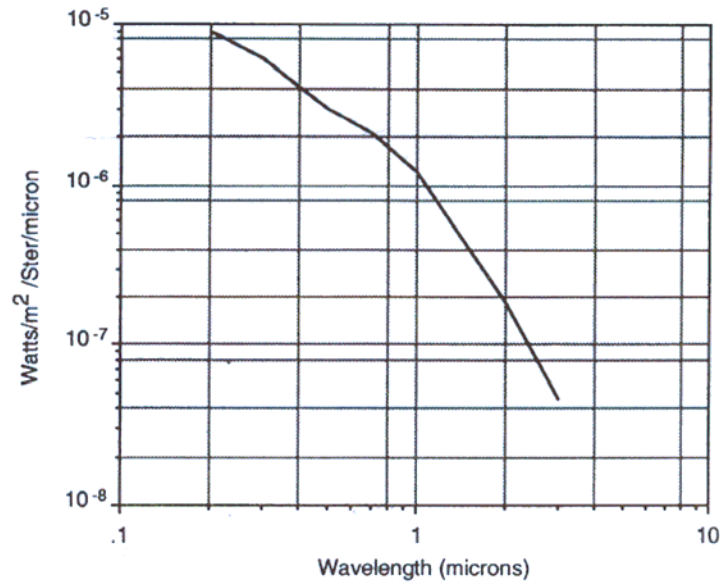
Σχήμα 5.8: Irradiance of Neptune



Σχήμα 5.9: Irradiance of Pluto



Σχήμα 5.10: Radiance of sunlit clouds and sunlit snow and ice



Σχήμα 5.11:Radiance of combined stellar background

Irradiance ($W / m^2 / \mu m$)						
Wavelength (μm)	Solar	Lunar	Mercury	Venus	Mars/Jupiter	Saturn
0.53	1842	.0027	1.8×10^{-7}	1.8×10^{-6}	2.8×10^{-7}	8.4×10^{-8}
0.85	940	.0015	9.5×10^{-8}	9.0×10^{-7}	1.5×10^{-7}	4.6×10^{-8}
1.06	748	.001	7.2×10^{-8}	7.1×10^{-7}	1.1×10^{-7}	3.2×10^{-8}
1.3	411	.00054	3.7×10^{-8}	3.6×10^{-7}	5.6×10^{-8}	1.7×10^{-8}
1.5	204	.00024	1.7×10^{-8}	1.6×10^{-7}	2.5×10^{-8}	7.5×10^{-9}
Radiance ($W / m^2 / Sr / \mu m$)						
Wavelength (μm)	Sunlit Clouds	Sunlit Snow and Ice		Starfield		
0.53	245	330		3.0×10^{-6}		
0.85	180	220		1.4×10^{-6}		
1.06	120	190		1.1×10^{-6}		
1.3	50	140		6.0×10^{-7}		
1.5	40	100		4.0×10^{-7}		

Πίνακας 5.1 Τιμές θορύβου περιβάλλοντος συνάρτηση μήκους κύματος

5.1.2 Θορύβου Σκότους

Το ρεύμα σκότους που δημιουργείται στον δέκτη όταν δεν υπάρχει σήμα είναι η αιτία για αυτό το θόρυβο. Το μέγεθος του ρεύματος σκότους του φωρατή, επίσης γνωστό και σαν θόρυβος σκότους είναι η ποσότητα του υπάρχοντα θορύβου όταν ο φωρατής είναι σε σκότος, στην διαδικασία φωτοανίχνευσης μπορεί να εκφραστεί σε rms A^2 από τον παρακάτω τύπο:

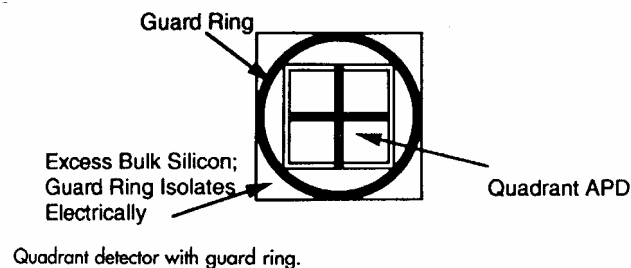
$$\sigma_D^2 = \frac{2qI}{M^2} + 2qFI_{dm} \quad (5.11)$$

$$i_d^2 = 2qFBI_{dm} + 2qBI_u \quad (5.12)$$

οπού F , q , και B είναι οπός πριν και I_{du} και I_{dm} είναι τα μη πολλαπλασιαστικά και πολλαπλασιαστικά dc ρεύμα θορύβου σκότους. Στην περίπτωση που έχουμε PIN φώτοανιχνευτή, ο dc θόρυβος είναι αποδιδόμενος μόνο στο μη πολλαπλασιαστικό ρεύμα. Σε αυτήν την περίπτωση (5.12), μετατρέπεται σε :

$$i_d = 2qBI_u \quad (5.13)$$

Ο θόρυβος σκότους είναι κανονικά εξαρτημένος από την θερμοκρασία λειτουργίας στην φωτοδίοδο. Ο θόρυβος αυξάνεται για υψηλές θερμοκρασίες και για μεγάλες φυσικές διαστάσεις. Έτσι, ο θόρυβος σκότους μπορεί να μειωθεί μειώνοντας την θερμοκρασία του ανιχνευτή και μειώνοντας το φυσικό μέγεθος του ανιχνευτή. Η μείωση της ενεργού περιοχής σκότους έχει εξερευνηθεί, αλλά για διαφορετική αιτία από τη μείωση του ενεργού θορύβου σκότους. Μειώνοντας το φυσικό μέγεθος κάνουμε την φωτοδίοδο λιγότερο ευαίσθητη στο να κόβει την ακτινοβολία των πηγών ιονισμού. Στις φυσικές και τεχνητές πυγές ακτινοβολίας, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια λυτή προστασία στις φωτοευαίσθητες συσκευές. Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε ένα δακτύλιο φρούρησης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.12: Quadrant detector with guard ring (Lambert & Casey, 1995)

5.1.3 Θόρυβος προενισχυτή

Ο τρίτος όρος θορύβου που συμβάλει στην διαδικασία ανίχνευσης περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του προενισχυτή που χρησιμοποιείται για να αυξήσει το μικρό επίπεδο σήματος που προσπίπτει στο εξωτερικό φακό του ανιχνευτή. Αυτή η προενίσχυση είναι απαραίτητη για να ενισχύσει το επίπεδο του σήματος έτσι ώστε να είναι δυνατόν να επεξεργαστεί. Ο θόρυβος του προενισχυτή που είναι γνωστός και σαν κλασικός θερμικός θόρυβος δίνεται από τον πιο κάτω τύπο:

$$i_{pa}^2 = \frac{4kTB}{R_f \cdot M^2} \quad (5.14)$$

οπού k είναι η σταθερά Boltzman σε $J/^{\circ}K$, T είναι η ενεργός θερμοκρασία θορύβου της αντίστασης ανάδρασης σε $^{\circ}K$, M είναι το κέρδος χιονοστιβάδας του ADP ανιχνευτή, και R_f είναι η τιμή σε ohms της αντίστασης ανάδρασης.

5.1.4 Θόρυβος βολής

Ο όρος θορύβου που προέρχεται από το θόρυβο βολής μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση :

$$i_{ss} = 2qFI_{avg}B \quad (5.15)$$

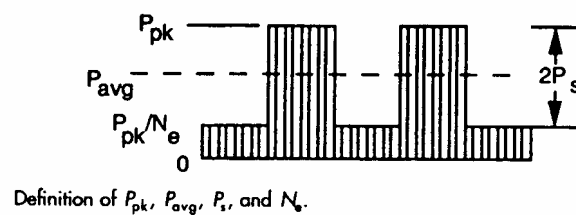
όπου q , F και B είναι όπως πριν και I_{avg} δίνεται από τον τύπο:

$$I_{avg} = P_{avg}R_d \quad (5.16)$$

όπου R_d είναι η ευαισθησία του φωρατή και P_{avg} είναι ο μέσος όρος ενέργειας του σήματος ανά περίοδο bit. Για σήματα με πεπερασμένο ρυθμό εξάλειψης ($N_e \ll \infty$) P_{avg} δίνεται από την σχέση:

$$P_{avg} = \frac{P_{pk}(1 + 1/N_e)}{2} \quad (5.17)$$

όπου P_{pk} είναι το μέγιστο λαμβανόμενο επίπεδο σήματος και μπορεί να προσδιορισθεί στο Σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13: Προσδιορισμός των P_{pk} , P_{avg} , P_s και N_e (Lambert & Casey, 1995)

5.1.5 Συνολικός θόρυβος στο σύστημα άμεσης φώρασης

Ο συνολικός θόρυβος είναι το τετραγωνικό άθροισμα όλων των πυκνοτήτων του θορύβου και δίνεται από τον τύπο:

$$N_o B = i_d^2 + i_{pa}^2 + i_b^2 + i_{ss}^2 \quad (5.18)$$

Τώρα που οι πηγές θορύβου έχουν προσδιοριστεί και να χαρακτηριστεί, ο σηματοθορυβικός λόγος μπορεί να εκφραστεί σε συνάρτησης της συνολικής ενέργειας του σήματος προς τη συνολική ενέργεια θορύβου. Το SNR από τη σχέση (5.1) μπορεί να εκφραστεί σαν:

$$SNR = \frac{(P_s R_d)^2}{N_o B} = \frac{I_s^2}{i_d^2 + i_{pa}^2 + i_b^2 + i_{ss}^2} \quad (5.19)$$

Συνδυάζοντας όλους τους παραπάνω τύπους μπορούμε να βρούμε μια τελική σχέση για το SNR που δίνεται από:

$$SNR = \frac{I_{pk}^2 (1 - \frac{1}{N_e})^2}{4[(i_d^2 + i_{pa}^2 + i_b^2) + qFB I_{pk} (1 + \frac{1}{N_e})^2]} \quad (5.20)$$

και λύνοντας ως προς το I_{pk} την παραπάνω σχέση και βάζοντας $SNR=z$ έχουμε

$$I_{pk} = \frac{2qFBz(1 + \frac{1}{N_e})}{(1 - \frac{1}{N_e})} + \sqrt{\left[\frac{2qFBz(1 + \frac{1}{N_e})}{(1 - \frac{1}{N_e})} \right]^2 + \frac{4(i_d^2 + i_{pa}^2 + i_b^2)}{(1 - \frac{1}{N_e})}} \times z \quad (5.21)$$

Έτσι η μέγιστη ισχύς μπορεί να βρεθεί [Lambert&Casey, 1995]:

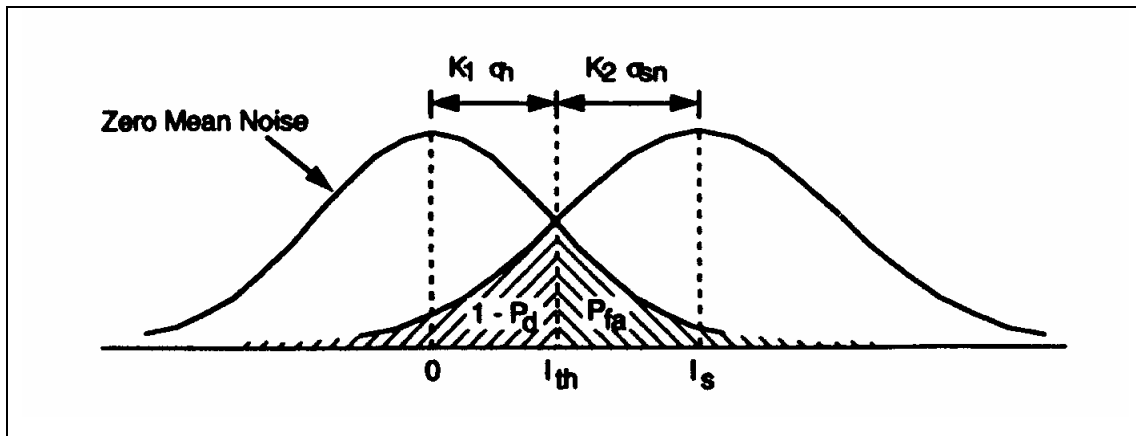
$$P_{pk} = \frac{I_{pk}}{R_d} \quad (5.22)$$

5.2 Δέκτης ανίχνευσης (The Acquisition Receiver)

Η διαδικασία ανίχνευσης ορίζεται από την ικανότητα αναζήτησης στην αρχικά απροσδιόριστη περιοχή, προσπαθώντας να ανιχνεύσει το σήμα το οποίο έχει εκπεμφθεί από τον άλλο δορυφόρο. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα επικοινωνίας με Laser. Εδώ θα αναλυθεί με λεπτομέρεια ο δέκτης ανίχνευσης παλμών χρησιμοποιώντας φωτοδιόδους χιονοστιβάδας QAPD (quadrant avalanche photodiode) και φωτοδιόδους QPIN (p-intrinsic photodiode).

Ο δέκτης ανίχνευσης παλμών είναι ο πιο απλός τρόπος ανίχνευσης της δέσμης Laser. Με την τεχνική αυτή, η λαμβανόμενη κυματομορφή συγκρίνεται με ένα προκαθορισμένο κατώφλι (threshold). Αν το σήμα στο λαμβανόμενο εύρος ζώνης υπερβαίνει το όριο του κατωφλίου, το σήμα ανιχνεύεται. Το κατώφλι καθορίζεται

από την απαιτούμενη πιθανότητα ανίχνευσης και τον ρυθμό λανθασμένων συναγερμών που θέλουμε.



Σχήμα 5.14: Διαδικασία ανίχνευσης Gaussian.

P_{fa} = πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού, I_{th} = ρεύμα ανίχνευσης κατωφλίου,

P_d = πιθανότητα ανίχνευσης, I_s = ρεύμα σήματος

(Lambert & Casey, 1995)

Η διαδικασία ανίχνευσης για θόρυβο τύπου Gauss φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Από την κλασική θεωρία ανίχνευσης το απαιτούμενο σήμα μπορεί να γραφεί:

$$I_{pk} = K_1 \sigma_n + K_2 \sigma_{sn} \quad (5.23)$$

όπου σ_n είναι η τιμή rms του θορύβου μόνο παρουσία θορύβου και σ_{sn} είναι η rms τιμή του θορύβου παρουσία σήματος και θορύβου. Για στατιστικό θόρυβο Gauss οι τιμές K_1 και K_2 καθορίζονται από τα σχέσεις:

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{K_2 \frac{-x^2}{2}} e^{\frac{-x^2}{2}} dx \quad (5.24)$$

$$P_{fa} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} K_1} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{-x^2}{2}} dx \quad (5.25)$$

όπου P_d και P_{fa} είναι οι πιθανότητες ανίχνευσης και πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού (false alarm) αντίστοιχα.

Τυπικές τιμές των K_1 και K_2 δίνονται στον Πίνακα 5.2 για διάφορες πιθανότητες ανίχνευσης και πιθανότητες εσφαλμένων συναγερμών.

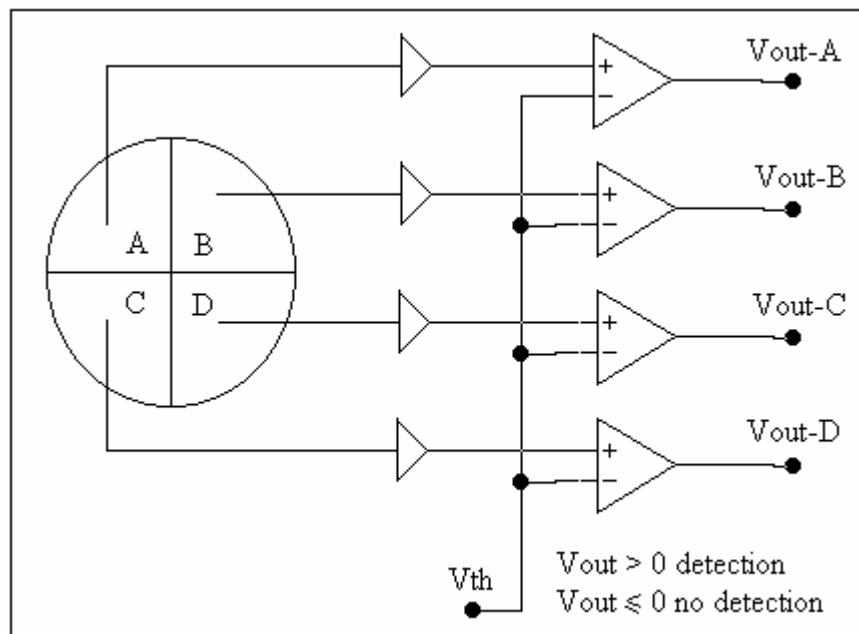
Values of K_1 and K_2 For P_{fa} and P_d

<i>False Alarm Probability (P_{fa})</i>	<i>K_1</i>	<i>Probability of Detection (P_d)</i>	<i>K_2</i>
10^{-2}	2.32635	0.999	3.09023
10^{-3}	3.09023	0.990	2.32635
10^{-4}	3.71902	0.900	1.34076
10^{-5}	4.26489	0.850	1.03643
10^{-6}	4.75342	0.800	0.84162
10^{-7}	5.19934	0.750	0.67449
10^{-8}	5.61200	0.700	0.52440
10^{-9}	5.99781	0.650	0.38532
10^{-10}	6.36134	0.600	0.25335

Πίνακας 5.2: Τιμές των K_1 και K_2 για P_{fa} και P_d (Lambert & Casey, 1995)

5.2.1 Θόρυβος στον δέκτη ανίχνευσης παλμών

Οι rms τιμές θορύβου έχουν δοθεί προηγουμένως και επαναλαμβάνονται εδώ για QPIN και QAPD. Παρατηρούμε ότι χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συγκριτές κατωφλίου για κάθε τεταρτημόριο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.15: Δέκτης ανίχνευσης (Lambert & Casey, 1995)

5.2.1.1 Θόρυβος περιβάλλοντος (Background Noise)

Για δέκτες QAPD, το ρεύμα θορύβου περιβάλλοντος (background noise) εκφράζεται ως:

$$i_b^2 = 2qFBR_dP_B \quad (5.26)$$

όπου q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, F είναι η συνιστώσα θορύβου της διαδικασίας ανίχνευσης που υπολογίζεται από τον τύπο: $F = Mk + (1-k)(2 - \frac{1}{M})$, M είναι το κέρδος χιονοστιβάδας της QAPD, R_d είναι η ευαισθησία του ανιχνευτή, B είναι το εύρος ζώνης και P_B δίνεται παρακάτω :

$$P_B = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{FOV}{4}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{aper}^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{D_{obsc}}{D_{aper}}\right)^2\right] \cdot L_{ptics} \cdot B_{filter} \quad (5.27)$$

Για QPIN ανιχνευτές, το ρεύμα θορύβου περιβάλλοντος δίνεται από τον τύπο:

$$i^2 = 2qBR_dP_B \quad (5.28)$$

όπου οι τιμές q , B , R_d , P_B δίνονται όπως παραπάνω.

5.2.1.2 Θόρυβος σκότους

Το ρεύμα θορύβου σκότους για ανιχνευτές QAPD δίνεται από τον τύπο:

$$i_d^2 = 2qBF\left(\frac{I_{dm}}{4}\right) + 2qB\left(\frac{I_{du}}{4}\right) \quad (5.29)$$

όπου q , F , και B δίνονται όπως παραπάνω και I_{du} και I_{dm} είναι τα συνολικά μη πολλαπλασιαστικά και πολλαπλασιαστικά ρεύματα σκότους, αντίστοιχα.

Παρομοίως για QPIN ανιχνευτές, η έκφραση για το ρεύμα θορύβου σκότους δίνεται από τον τύπο:

$$i_d^2 = 2qB\left(\frac{I_d}{4}\right) \quad (5.30)$$

όπου q και B δίνονται όπως παραπάνω και I_d αντιπροσωπεύει το συνολικό ρεύμα σκότους.

5.2.1.3 Θόρυβος προενισχυτή

Το ρεύμα θορύβου προενισχυτή για QAPD ανιχνευτές δίνεται από τον τύπο:

$$i_{pa}^2 = \frac{(NEI)^2 \cdot B}{M^2} \quad (5.31)$$

ενώ για ανιχνευτές QPIN από τον τύπο:

$$i_{pa}^2 = (NEI)^2 \cdot B \quad (5.32),$$

όπου NEI (Noise Equivalent Current) είναι το Ισοδύναμο Ρεύμα Θορύβου.

5.2.1.4 Θόρυβος Βολής

Η τελική συνιστώσα θορύβου είναι ο θόρυβος βολής και δίνεται από τη σχέση:

$$i_{ss}^2 = 2qFBR_d P_{pk} \quad (5.33)$$

όπου q, F, B και R_d δίνονται όπως παραπάνω και I_{pk} είναι το μέγιστο ρεύμα σήματος έξω από τον ανιχνευτή.

Παρομοίως για QPIN ανιχνευτές, ο θόρυβος βολής δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$i_{ss}^2 = 2qBR_d P_{pk} \quad (5.34)$$

όπου οι παράμετροι δίνονται όπως παραπάνω.

5.2.2 Απαιτούμενο σήμα για τους παλμούς ανίχνευσης

Με όλους τους όρους του θορύβου καθορισμένους, οι τιμές των σ_n και σ_{sn} μπορούν να γραφτούν :

$$\sigma_n^2 = i_b^2 + i_d^2 + i_{pa}^2 \quad (5.35)$$

$$\sigma_{sn}^2 = \sigma_n^2 + i_{ss}^2 \quad (5.36)$$

Χρησιμοποιώντας τις (5.35) και (5.36) η (5.23) μπορεί να γραφτεί:

$$I_{pk} = K_1 \sigma_n + K_2 \cdot \sqrt{(\sigma_n^2 + 2qFBI_{pk})} \quad (5.37)$$

Συγκρίνοντας τις δυο πλευρές και λύνοντας ως προς I_{pk} θα έχουμε:

$$I_{pk} = (K_1 \sigma_n + qFBK_2^2) + [(K_1 \sigma_n + qFBK_2^2)^2 + (K_2^2 - K_1^2) \cdot \sigma_n^2]^{1/2} \quad (5.38)$$

το οποίο αν διαιρεθεί με την απόκριση δίνει την απαιτούμενη ισχύ σήματος:

$$P_{pk} = \frac{I_{pk}}{R_d} \quad (5.39)$$

Παρομοίως η σχέση (5.38) μπορεί να γραφτεί για QPIN δέκτες όπως παρακάτω:

$$I_{pk} = (K_1 \sigma_n + qBK_2^2) + [(K_1 \sigma_n + qBK_2^2)^2 + (K_2^2 - K_1^2) \cdot \sigma_n^2]^{1/2} \quad (5.40)$$

5.3 Δέκτης ευθυγράμμισης (The tracking Receiver)

Ο τελευταίως τύπος δέκτη είναι ο δέκτης ευθυγράμμισης. Ο γενικός τύπος υπολογισμού της ισοδύναμης γωνίας θορύβου (Noise Equivalent Angle, NEA) είναι ο παρακάτω:

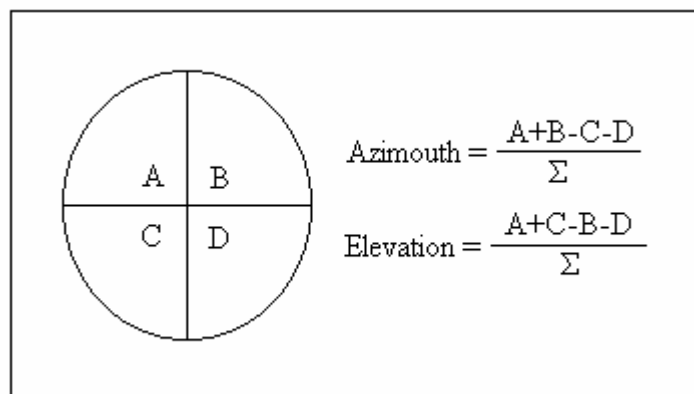
$$\sigma_{rms} = \frac{1}{SF\sqrt{SNR}} \quad (5.41)$$

όπου SF είναι ο παράγοντας κλίσης (slope factor) και δίνεται σε μονάδες 1/rad και SNR είναι ο σηματοθορυβικός λόγος.

Τα περισσότερα συστήματα επικοινωνίας με Laser χρησιμοποιούν δέκτες, η επιφάνεια των οποίων χωρίζεται σε 4 ίσες επιφάνειες, τεταρτημόρια. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται είναι η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (avalanche) QAPD και η φωτοδίοδος QPIN (p-intrinsic). Στην πιο απλή περίπτωση δέκτη ευθυγράμμισης, η επιφάνεια της φωτοδίοδου χωρίζεται σε τέσσερα τεταρτημόρια όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Τα σήματα αθροίζονται και αφαιρούνται έτσι ώστε να υπολογιστούν το αζιμούθιο και η ανύψωση (ή X και Y άξονες) των σημάτων ευθυγράμμισης. Το αζιμούθιο και η ανύψωση υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\frac{A+B-C-D}{A+B+C+D} = azimuth \ signal \quad (5.42)$$

$$\frac{A+C-B-D}{A+B+C+D} = elevation \ signal \quad (5.43)$$



Σχήμα 5.16: Δέκτης ευθυγράμμισης (Lambert & Casey, 1995)

Οι εξισώσεις (5.42) και (5.43) ισχύουν παρουσία μόνο σήματος, Όταν η ευθυγράμμιση γίνεται παρουσία θορύβου, οι σχέσεις (5.42) και (5.43) γίνονται:

$$AZ = \frac{A + n_a + B + n_b - C - n_c - D - n_d}{A + B + C + D + n_a + n_b + n_c + n_d} \quad (5.44)$$

$$EL = \frac{A + n_a + C + n_c - B - n_b - D - n_d}{A + B + C + D + n_a + n_b + n_c + n_d} \quad (5.45)$$

όπου A, B, C, και D είναι τα επίπεδα σήματος όπως πριν και n_a , n_b , n_c και n_d είναι τα επίπεδα θορύβου.

Ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$SNR = \frac{I_{pk}^2 (1 - \frac{1}{N_e})^2}{4 \cdot [i_{track}^2 + qFBI_{pk} (1 + \frac{1}{N_e})]} \quad (5.46)$$

όπου I_{pk} είναι το μέγιστο ρεύμα σήματος, N_e είναι the transmitter extinction ratio, F είναι ο συντελεστής θορύβου (noise factor) του ανιχνευτή και B είναι το εύρος ζώνης του βρόχου ανίχνευσης (track loop bandwidth). Το ρεύμα θορύβου i_{track}^2 στην παραπάνω σχέση είναι το άθροισμα των ρευμάτων του θορύβου περιβάλλοντος i_b^2 , θορύβου σκότους i_d^2 και θορύβου προενισχυτή i_{pa}^2 και δίνεται από τον τύπο:

$$i_{track}^2 = i_b^2 + i_d^2 + i_{pa}^2 \quad (5.47)$$

Για φωτοδιόδους QAPD τα ρεύματα αυτά δίνονται από τις σχέσεις:

$$i_b^2 = qFBR_d P_B \quad (5.48)$$

$$i_d^2 = qBI_{du} + 2qBFI_{dm} \quad (5.49)$$

$$i_{pa}^2 = \frac{4 \cdot (NEI)^2}{M^2} \quad (5.50)$$

όπου οι παράμετροι κάθε εξίσωσης έχουν εξηγηθεί νωρίτερα.

Για φωτοδιόδους QPIN οι (5.48), (5.49) και (5.50) γίνονται:

$$i_b^2 = qBR_d P_B \quad (5.51)$$

$$i_d^2 = qBI_{du} \quad (5.52)$$

$$i_{pa}^2 = 4 \cdot (NEI)^2 \quad (5.53)$$

Από την (5.46) και την (5.47) μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγιστο ρεύμα I_{pk} από τον τύπο:

$$I_{pk} = \frac{2qFBI_{pk}(1 + \frac{1}{N_e})}{(SF \cdot \sigma_{rms})^2 \cdot (1 - \frac{1}{N_e})^2} + \left\{ \left[\frac{2qFBI_{pk}(1 + \frac{1}{N_e})}{(SF \cdot \sigma_{rms})^2 \cdot (1 - \frac{1}{N_e})^2} \right]^2 - \frac{4 \cdot i_{track}^2}{(SF \cdot \sigma_{rms})^2 \cdot (1 - \frac{1}{N_e})^2} \right\}^{1/2} \quad (5.54)$$

Η μέγιστη απαιτούμενη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$P_{pk} = \frac{I_{pk}}{R_d} \quad (5.55)$$

Κεφάλαιο 6^ο

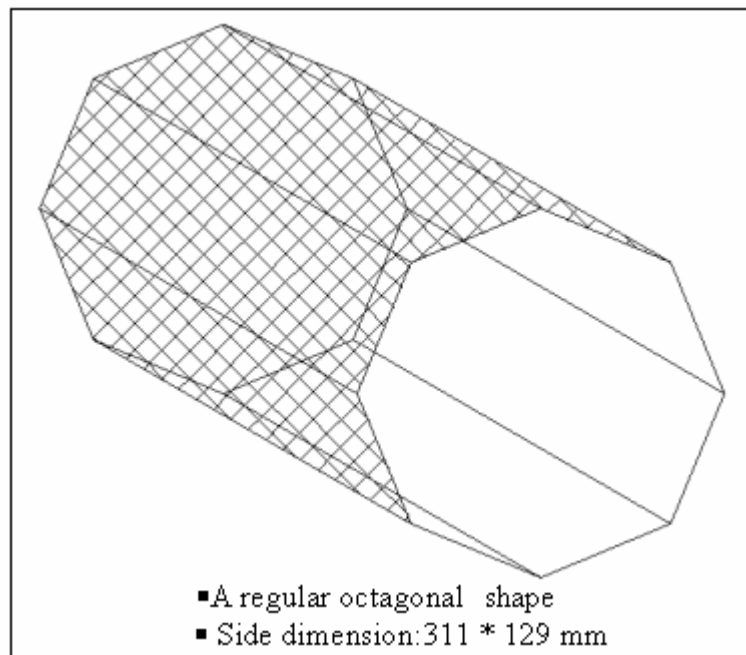
Σχεδίαση του Συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε αναλυτικά με όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιούμε κατά τη διάρκεια της σχεδίασης του συστήματος επικοινωνίας δορυφόρων με Laser (Laser Inter Satellite Link, Laser-ISL). Πρώτα απ' όλα πρέπει να αναφέρουμε τον τρόπο με τον οποίο οι δορυφόροι θα επικοινωνούν μεταξύ τους. Έτσι, στην περίπτωση που εξετάζουμε, η επικοινωνία γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο “παρατήρηση / παρατήρηση” (stare/stare) όπως έχει αναφερθεί και στο 4^ο κεφάλαιο. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να καλύψουμε όλη την περιοχή αβεβαιότητας ελέγχοντας το άνοιγμα της δέσμης Laser. Οι νάνο-δορυφόροι έχουν ένα σύστημα GPS με το οποίο μπορούν να υπολογίσουν τη θέση τους με μια ακρίβεια 15m^3 καθορίζοντας έτσι την περιοχή αβεβαιότητας. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ χρήσιμη εάν η απόσταση μεταξύ των δορυφόρων είναι μικρή όπως συμβαίνει και στην περίπτωση που εξετάζουμε (100m).

Παρακάτω θα εξεταστούν αναλυτικά τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του συστήματος επικοινωνίας με Laser. Συγκεκριμένα, η ανάλυση αυτή χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη. Στην αρχή γίνεται μια ανάλυση των κυκλωμάτων του πομπού ο οποίος αποτελείται από μια πηγή πληροφορίας, από ένα κύκλωμα οδήγησης του Laser, από το εξάρτημα του Laser και από έναν ρυθμιστή ανοίγματος της δέσμης Laser. Μετά εξετάζονται τα κυκλώματα του δέκτη ο οποίος αποτελείται από μια φωτοδίοδο, ακολουθούμενη από έναν ενισχυτή. Πριν τη φωτοδίοδο μπορεί να τοποθετηθεί ένας φακός ο οποίος θα λειτουργεί σαν κεραία για τη συλλογή περισσότερης ισχύος. Το επόμενο στάδιο του δέκτη είναι ένα ενεργό φίλτρο δεύτερης τάξης. Η έξοδος του φίλτρου συνδέεται με έναν συγκριτή ο οποίος λειτουργεί και σαν αποδιαμορφωτής. Στην έξοδο του συγκριτή θα παίρνουμε το εκπεμπόμενο σήμα.

Για την κατασκευή ενός συστήματος νάνο-δορυφόρων υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί όσον αφορά την επιλογή των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του. Οι περιορισμοί αυτοί έχουν να κάνουν κυρίως με τη μάζα και το μέγεθος κάθε εξαρτήματος. Γι αυτό το λόγο η επιλογή των κυκλωμάτων που

χρησιμοποιούνται κατά την σχεδίαση γίνεται με σκοπό το τελικό βάρος και μέγεθος του συστήματος να είναι μικρό. Πρέπει να σημειώσουμε ότι το συνολικό βάρος του νάνο-δορυφόρου δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 10kg και οι διαστάσεις του είναι αρκετά περιορισμένες. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται η δομή και οι διαστάσεις που θα έχει ο νάνο-δορυφόρος.



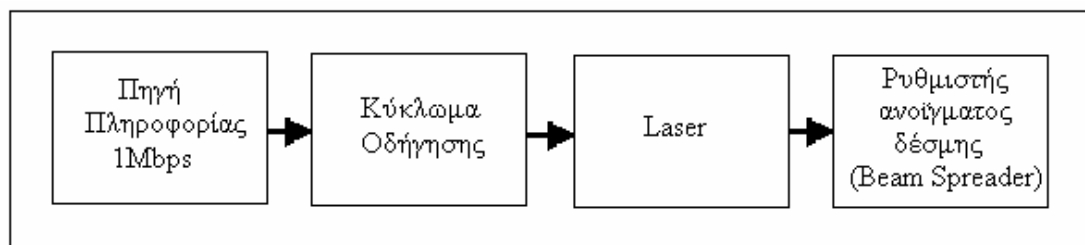
Σχήμα 6.1: Η δομή του MUSTANG

Μια άλλη παράμετρος που πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπ όψιν μας είναι η χαμηλή κατανάλωση ισχύος που πρέπει να έχουν τα κυκλώματα που θα χρησιμοποιηθούν. Μια πρώτη υπόθεση που έχει γίνει για τη μέγιστη κατανάλωση ισχύος είναι 15 Watt από τα οποία 5 Watt θα χρησιμοποιούνται για το επικοινωνιακό κομμάτι του νάνο-δορυφόρου. Για τον πομποδέκτη Laser η μέγιστη κατανάλωση ισχύος πρέπει να είναι 1 έως 1.5 Watt. Στους περιορισμούς αυτούς πρέπει να προσθέσουμε και το συνολικό κόστος κατασκευής του συστήματος το οποίο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Η χρησιμοποίηση πομποδέκτη Laser έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με έναν πομποδέκτη RF όσον αφορά το βάρος, το μέγεθος και την κατανάλωση ισχύος, ενώ το κόστος παραμένει σε χαμηλά επίπεδα όπως και στην περίπτωση RF. Επίσης το Laser έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χρησιμοποιεί αρκετά μεγάλο ρυθμό μετάδοσης. Ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας που έχει

αποφασιστεί να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία μεταξύ των νάνο-δορυφόρων είναι 1Mbps.

6.1 Πομπός

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα τα κυριότερα κυκλώματα από τα οποία αποτελείται ο πομπός (Σχήμα 6.2) είναι η πηγή πληροφορίας, το κύκλωμα οδήγησης, το εξάρτημα του Laser και ένα εξάρτημα με το οποίο μπορούμε να ρυθμίσουμε το άνοιγμα της δέσμης Laser.



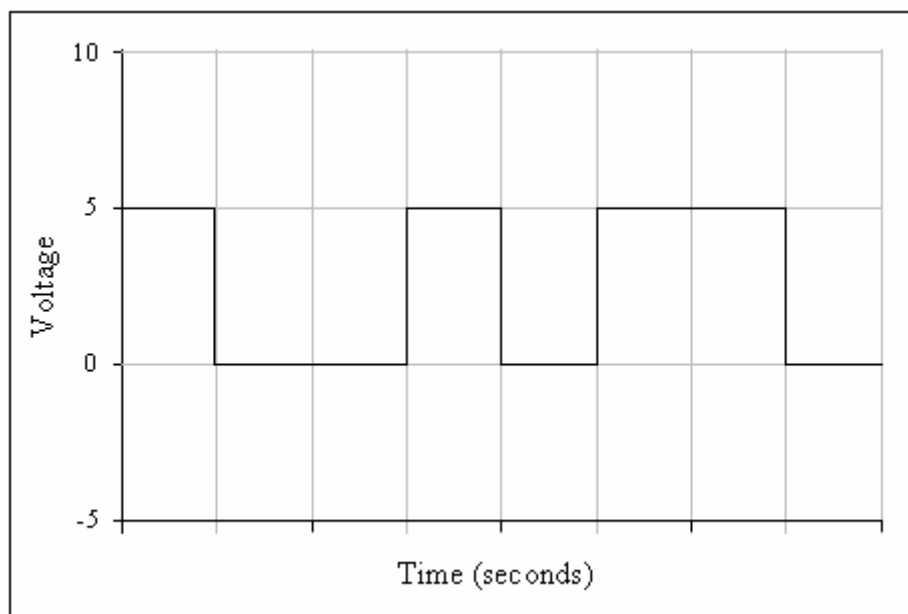
Σχήμα 6.2: Μπλοκ διάγραμμα για τα κυκλώματα του πομπού

Η πηγή πληροφορίας θα παρέχει στο κύκλωμα του δέκτη την πληροφορία που πρέπει να μεταδοθεί στο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης το οποίο έχει αποφασιστεί να είναι 1Mbps. Η διαμόρφωση που θα χρησιμοποιηθεί είναι OOK (On-Off Keying) και υλοποιείται πολύ απλά διεγείροντας ή όχι το Laser ανάλογα με το bit το οποίο πρέπει να μεταδοθεί. Μετά την πηγή πληροφορίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.2, θα βρίσκεται το κύκλωμα οδήγησης του Laser το οποίο θα προσαρμόζει την κυματομορφή εισόδου έτσι ώστε να είναι κατάλληλη για τη λειτουργία του Laser. Το κύκλωμα οδήγησης θα ακολουθείται από το εξάρτημα Laser το οποίο θα είναι ένα ημιαγωγίμο Laser (Modulated Laser Diode Module) της εταιρίας RS. Το μήκος κύματος λειτουργίας του θα είναι 670nm (βαθύ κόκκινο) και θα έχει μέγιστη ισχύ εξόδου 1mW. Το άνοιγμα δέσμης του θα είναι 5mrad αλλά αυτό μπορεί να αλλάξει από τον ρυθμιστή ανοίγματος δέσμης ο οποίος θα ανοίγει τη δέσμη έτσι ώστε να καλύπτει όλη την περιοχή αβεβαιότητας.

Παρακάτω ακολουθεί μια λεπτομερής εξέταση των εξαρτημάτων του πομπού Laser.

6.1.1 Πηγή πληροφορίας

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα η πηγή πληροφορίας θα παρέχει στον δέκτη την κυματομορφή εισόδου. Η πηγή δηλαδή θα μεταδίδει τετραγωνικούς παλμούς με ρυθμό 1Mbps. Αυτό σημαίνει ότι θα μεταδίδεται 1bit κάθε 1μsec. Ο ρυθμός αυτός μετάδοσης είναι αρκετά μεγάλος αλλά αυτό δεν μας προβληματίζει αφού για την μετάδοση θα χρησιμοποιηθεί Laser. Πρέπει να σημειώσουμε ότι για την επικοινωνία έχει αποφασιστεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της άμεσης φώρασης (direct detection) και η διαμόρφωση OOK (On-Off Keying). Ο λόγος που επιλέξαμε αυτή τη διαμόρφωση είναι ότι υλοποιείται πολύ απλά διεγείροντας ή όχι το Laser ανάλογα με το bit το οποίο πρέπει να μεταδοθεί. Πρέπει να προσέξουμε στην επιλογή των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε το βάρος τους να είναι μικρό και η τάση τροφοδοσίας να μην ξεπερνάει τα 8-10 Volt για να έχουμε χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Η πηγή πληροφορίας του πομπού Laser θα είναι η έξοδος κάποιου επικοινωνιακού εξαρτήματος του νάνο-δορυφόρου το οποίο θα στέλνει πληροφορίες στον άλλο νάνο-δορυφόρο. Στο εργαστήριο, η πηγή πληροφορίας μπορεί να είναι μια γεννήτρια παλμών. Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται η μορφή που μπορεί να έχει η κυματομορφή εισόδου του πομπού Laser.

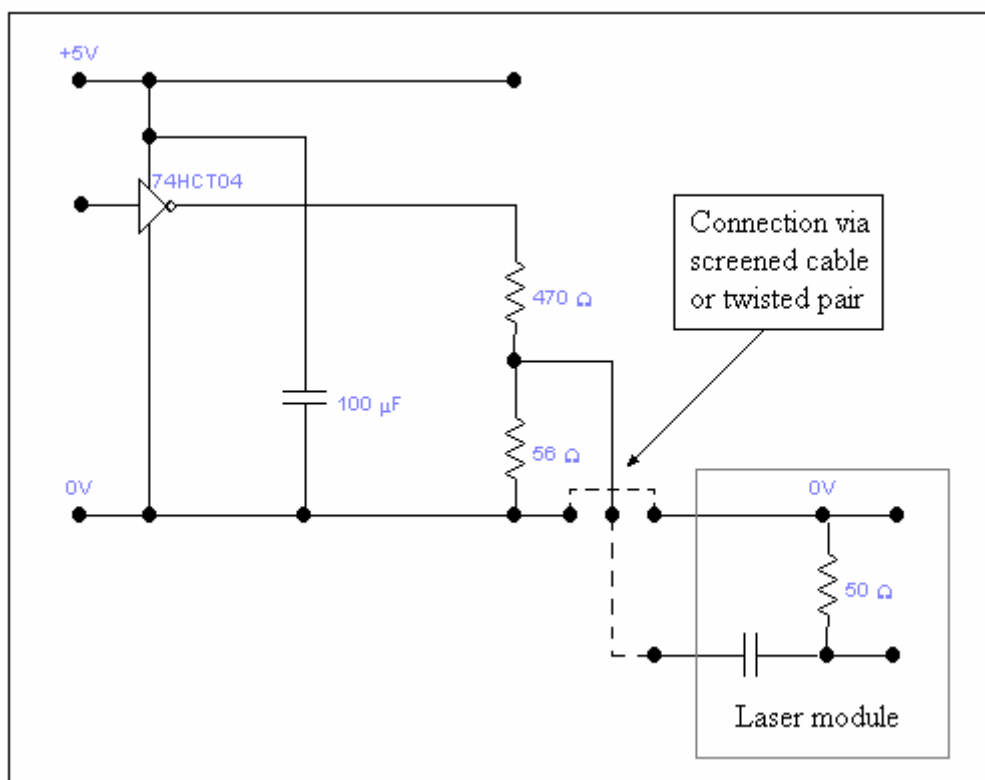


Σχήμα 6.3: Κυματομορφή εισόδου του πομπού Laser

6.1.2 Κύκλωμα οδήγησης

Το κύκλωμα οδήγησης του Laser δέχεται σαν είσοδο την κυματομορφή εισόδου και τη διαμορφώνει έτσι ώστε να είναι κατάλληλη για τη λειτουργία του Laser. Για τη σωστή λειτουργία του Laser, είναι απαραίτητο, η κυματομορφή εισόδου του κυκλώματος οδήγησης να μην υπερβαίνει τα +7V και να μην πηγαίνει κάτω από -1V σχετικά με την τάση αναφοράς 0V. Αν το σήμα εισόδου του Laser (σήμα εξόδου του κυκλώματος οδήγησης) υπερβαίνει τα 500 mV peak to peak, τότε παρουσιάζονται προβλήματα στη λειτουργία του Laser που έχουν να κάνουν με θερμικά φαινόμενα. Τα θερμικά αυτά φαινόμενα μπορεί να προκαλέσουν και την τελική καταστροφή του Laser.

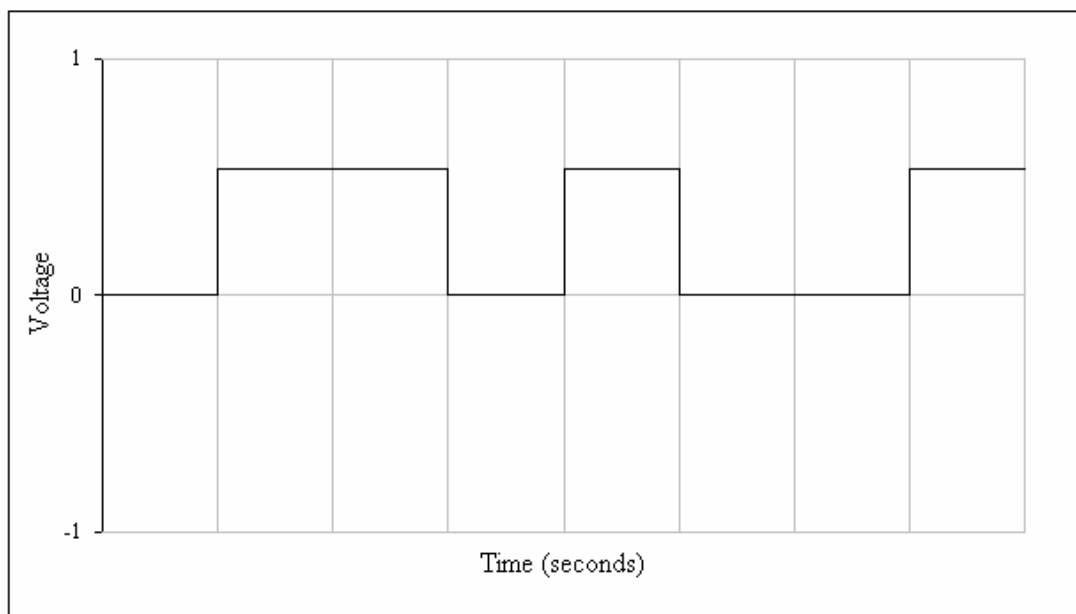
Το εύρος ζώνης σωστής λειτουργίας του Laser κυμαίνεται από 100Hz μέχρι 50MHz. Οι τιμές των συχνοτήτων αυτών βρίσκονται περίπου εκεί όπου το πλάτος του διαμορφωμένου σήματος Laser πέφτει κατά 3dB σχετικά με το πλάτος του σήματος που βρίσκεται στο κέντρο της περιοχής των συχνοτήτων. Παρόλα αυτά, η συνολική διακύμανση των συχνοτήτων εκτείνεται μέχρι τα 100MHz. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, η συχνότητα μετάδοσης είναι 1MHz η οποία βρίσκεται μέσα στα όρια σωστής λειτουργίας του Laser.



Σχήμα 6.4: Κύκλωμα οδήγησης

Η αντίσταση εισόδου του Laser είναι 50Ω . Ιδανικά, σε όλες τις συχνότητες, πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην είσοδο του Laser ένα ομοαξονικό καλώδιο με αντίσταση 50Ω οδηγούμενο από μια πηγή σήματος με αντίσταση εξόδου 50Ω . Σε συχνότητες όμως πάνω από 1MHz αυτό δεν είναι πάντα απαραίτητο. Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται το κύκλωμα οδήγησης με αντίσταση εξόδου 50Ω . Το κύκλωμα αυτό δίνει στη έξοδό του ένα σήμα εισόδου για το Laser 500mV peak to peak. Πρέπει να σημειώσουμε ότι όταν το σήμα εισόδου του Laser 0 και 500mV τότε η διαμόρφωση είναι γραμμική. Αν το σήμα βρίσκεται εκτός από αυτά τα όρια, τότε παρουσιάζεται ένα σφάλμα το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι $-7.7\mu\text{W/mV}$. Το μείων υποδηλώνει ότι αύξηση της τάσης διαμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του Laser.

Αν το σήμα εισόδου του κυκλώματος οδήγησης είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 6.3, τότε το σήμα εξόδου του θα είναι η κυματομορφή που φαίνεται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Κυματομορφή εξόδου κυκλώματος οδήγησης

6.1.3 Εξάρτημα Laser

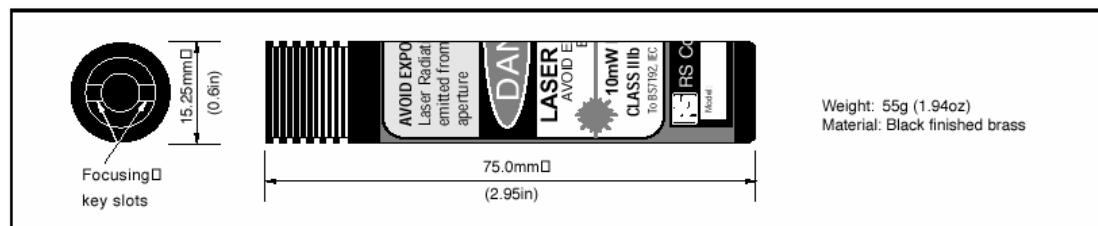
Το εξάρτημα Laser που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή είναι ένα ημιαγωγικό Laser (Modulated laser Beta TX series) της εταιρίας RS με μέγιστη ισχύ εξόδου 1mW το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Το μήκος κύματος λειτουργίας του

είναι 670nm, το άνοιγμα της δέσμης 5mrad και η θερμοκρασία λειτουργίας -10°C έως $+40^{\circ}\text{C}$. Η επιλογή αυτού του Laser έγινε έτσι ώστε να λειτουργεί σε γήινες συνθήκες. Το Laser που θα χρησιμοποιηθεί στις πραγματικές συνθήκες του διαστήματος θα είναι φτιαγμένο από ειδικά υλικά τα οποία θα αντέχουν σε αυτές τις



Σχήμα 6.6: Modulated Laser Diode Module

συνθήκες και το κόστος του θα είναι αρκετά μεγάλο. Το Laser αυτό δέχεται σαν είσοδο την κυματομορφή εξόδου του κυκλώματος οδήγησης (Σχήμα 6.5) και στη έξοδο εκπέμπει το οπτικό σήμα που θα μεταδοθεί. Στο Σχήμα 6.7 φαίνονται οι πραγματικές διαστάσεις του Laser.



Σχήμα 6.7: Διαστάσεις του Laser

Στους Πίνακες A1 και A2 του Παραρτήματος φαίνονται τα γενικά χαρακτηριστικά και τα οπτικά χαρακτηριστικά του Laser τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.

Τροφοδοσία και γείωση

Αυτό το εξάρτημα Laser λειτουργεί με τάση τροφοδοσίας -8 έως -12V . Λειτουργώντας στην ελάχιστη τάση (-8V), θα προκληθεί λιγότερη θερμότητα και η διάρκεια ζωής της συσκευής θα αυξηθεί. Η ισχύς που θα καταναλώνει το Laser στην τάση αυτή θα είναι 0.6W ($8\text{V} \times 75\text{mA} = 0.6\text{W}$) αρκετά μικρότερη από την ισχύ που θα καταναλώνει αν λειτουργούσε με τάση τροφοδοσίας -12V (1.32W). Γι αυτό το λόγο επιλέγουμε την ελάχιστη τάση τροφοδοσίας.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι σαν 0 Volt καλό είναι να πάρουμε τη γη. Αυτό γίνεται για να περιορίσουμε τον θόρυβο ο οποίος μπορεί να προκαλέσει βλάβη στη συσκευή του Laser.

Διάταξη απομάκρυνσης θερμότητας

Όταν το Laser λειτουργεί πάνω από την ελάχιστη τάση λειτουργίας (-8V) και η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι πάνω από 30° C, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια διάταξη που να απομακρύνει την θερμότητα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από -10° C έως +40° C. Αν η θερμοκρασία της συσκευής του Laser ξεπεράσει του 40° C, τότε μπορεί να προκληθεί σοβαρή βλάβη στη λειτουργία του Laser ή ακόμα και καταστραφεί. Όπως βλέπουμε η συσκευή Laser είναι κατάλληλη για να λειτουργεί σε συνθήκες γήινου περιβάλλοντος όπου θα γίνουν και τα πειράματα.

Για την απομάκρυνση της θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου. Στο Σχήμα 6.8 δίνεται μια γραφική παράσταση όπου φαίνεται η επιπλέον επιφάνεια στρώματος αλουμινίου (πάχους 2mm) που χρειάζεται για διάφορες τάσεις τροφοδοσίας και σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Παρακάτω δίνεται ένας τύπος για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης (°C/W) που προσφέρει η διάταξη απομάκρυνσης θερμότητας:

$$h \approx \frac{T_c - T_a}{I_{op} \times V_{op}} - (m + c) \quad (6.1)$$

όπου

m : η θερμική αντίσταση της συσκευής Laser (°C/W)

c : η θερμική αντίσταση των επαφών της συσκευής Laser με τη διάταξη απομάκρυνσης θερμότητας (°C/W)

T_c : η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της συσκευής Laser (°C)

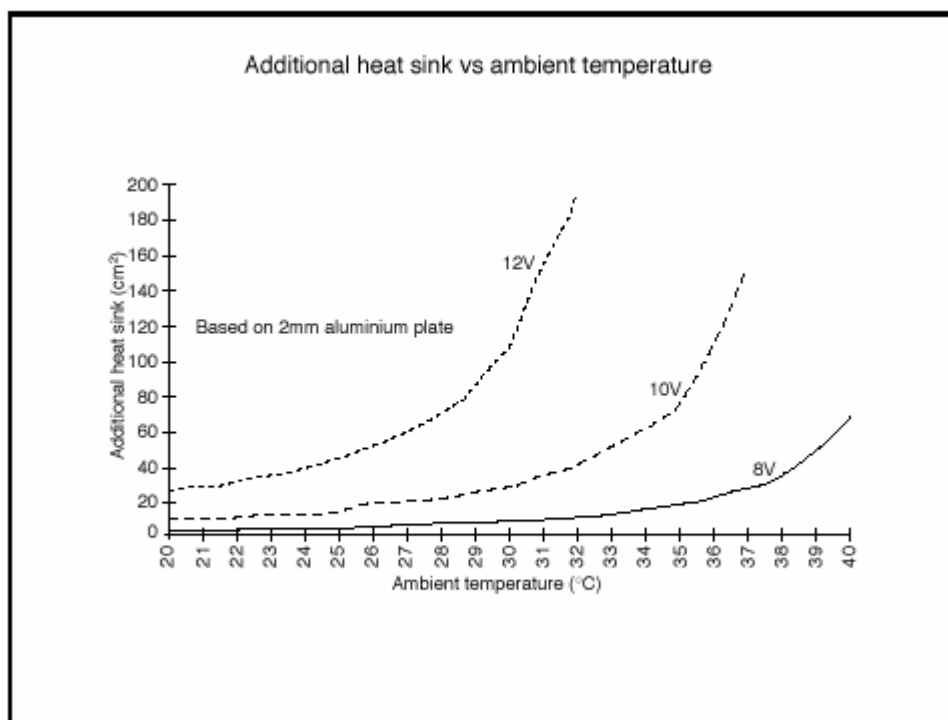
T_a : η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

V_{op} : Τάση τροφοδοσίας του Laser (V)

I_{op} : Ρεύμα λειτουργίας για τάση V_{op} (A)

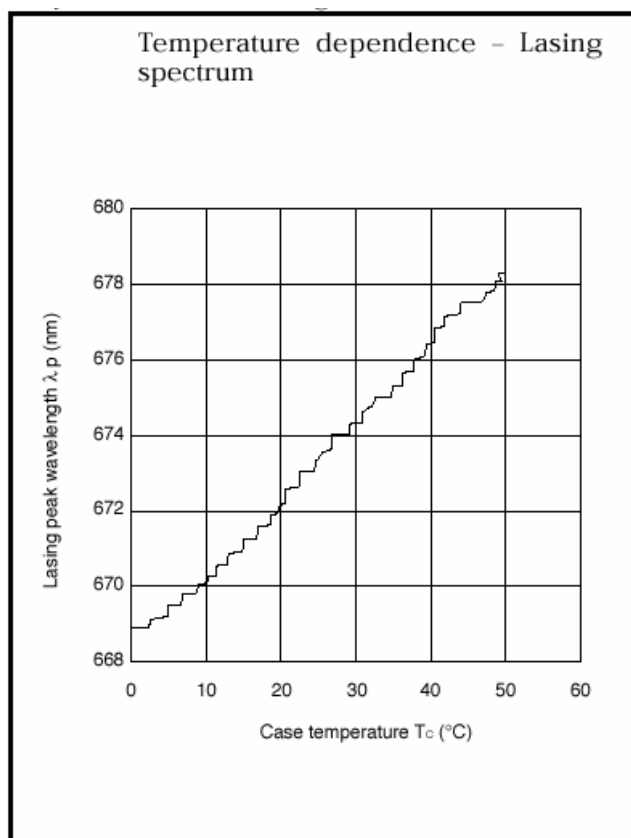
Η ποσότητα $(m+c)$ για το συγκεκριμένο Laser έχει μια τυπική τιμή 10°C/W ενώ η θερμοκρασία T_c είναι 50°C. Π.χ. για τάση τροφοδοσίας 10V και ρεύμα 93mA μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμική αντίσταση h από τον τύπο (6.1):

$$h \approx \frac{50 - 30}{0.093 \times 10} - 10 \approx 11.5^\circ C / W$$



Σχήμα 6.8: Πάχος επιφάνειας στρώματος αλουμινίου

Πρέπει να σημειώσουμε ότι το μήκος κύματος του Laser μεταβάλλεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9: Μήκος κύματος - Θερμοκρασία

Διάρκεια ζωής

Η διάρκεια ζωής της συσκευής Laser είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί το Laser. Όπου είναι δυνατόν, πρέπει να χρησιμοποιείται κάθε τρόπος για την ελαχιστοποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, όπως η λειτουργία στην ελάχιστη τάση τροφοδοσίας, η χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και η χρησιμοποίηση διατάξεων απομάκρυνσης θερμότητας. Όλα αυτά συμβάλλουν στην μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα A1 (Παράρτημα) η διάρκεια ζωής της συσκευής Laser που χρησιμοποιούμε είναι περίπου 80000 ώρες.

Πόλωση

Το οπτικό σήμα που εκπέμπεται από τη συσκευή Laser είναι γραμμικά πολωμένο και έχει ένα λόγο πόλωσης (polarization ratio) που εξαρτάται από την ισχύ εξόδου. Όπως φαίνεται και στον πίνακα με τα οπτικά χαρακτηριστικά του Laser (Πίνακας A2, Παράρτημα) ο λόγος αυτός είναι 80:1.

Προσοχή

Όλες οι συσκευές Laser παράγουν δέσμες έντονα μονοχρωματικού φωτός το οποίο μπορεί να είναι επικίνδυνο. Οι κίνδυνοι αυτοί εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως το μήκος κύματος, την ισχύς της δέσμης και τη διάρκεια εκπομπής. Το μάτι είναι το περισσότερο ευάλωτο όργανο γιατί εστιάζει τη δέσμη του Laser με αποτέλεσμα η πυκνότητα ισχύος να αυξάνεται αρκετές φορές. Αν η ισχύς της δέσμης είναι αρκετά μεγάλη τότε μπορεί να προκαλέσει ακόμα και εγκαύματα στο δέρμα. Τα Laser χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το μήκος κύματος και την ισχύ εξόδου. Το Laser που χρησιμοποιούμε ανήκει στην Κλάση II (Class II).

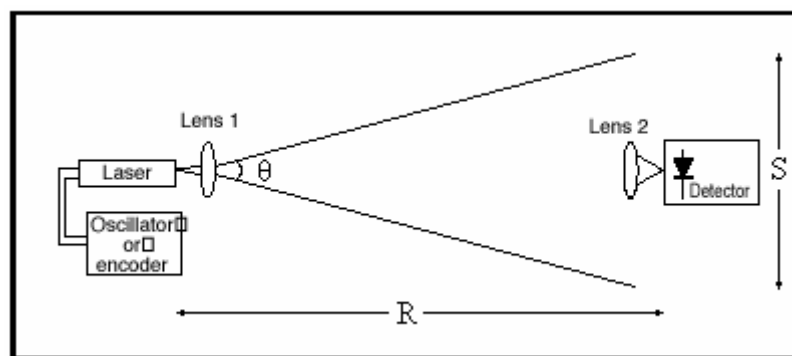
Τα Laser που ανήκουν στην Κλάση II εκπέμπουν ορατό φως και όταν δεν είναι απολύτως ασφαλής πρέπει να αποφεύγουμε να κοιτάμε κατευθείαν τη δέσμη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Καλό είναι να χρησιμοποιούμε ειδικά γυαλιά για την προστασία των ματιών. Δεν προκαλούνται εγκαύματα από την έκθεση στη δέσμη. Στο Σχήμα A1 του Παραρτήματος φαίνεται η ετικέτα του Laser που χρησιμοποιούμε.

6.1.4 Ρυθμιστής ανοίγματος δέσμης (Beam Spreader)

Το τελευταίο κομμάτι του πομπού είναι ο ρυθμιστής του ανοίγματος της δέσμης Laser. Αυτό είναι ένα πολύ κρίσιμο σημείο της σχεδίασης του συστήματος γιατί το άνοιγμα της δέσμης Laser είναι 5mrad και εμείς θέλουμε να καλύψουμε όλη την περιοχή αβεβαιότητας (μέθοδος παρατήρηση / παρατήρηση, stare/stare). Όπως

έχει αναφερθεί και νωρίτερα κάθε νάνο-δορυφόρος μπορεί να υπολογίσει τη θέση του με τη βοήθεια του συστήματος GPS με ακρίβεια 15m^3 . Πρέπει να σημειώσουμε ότι αν οι δορυφόροι χρησιμοποιούν διαφορικό GPS (DGPS) τότε η ακρίβεια υπολογισμού θέσης γίνεται 2 έως 5m^3 . Αυτή θα είναι και η περιοχή η οποία πρέπει να καλυφθεί ρυθμίζοντας κατάλληλα το άνοιγμα της δέσμης Laser.

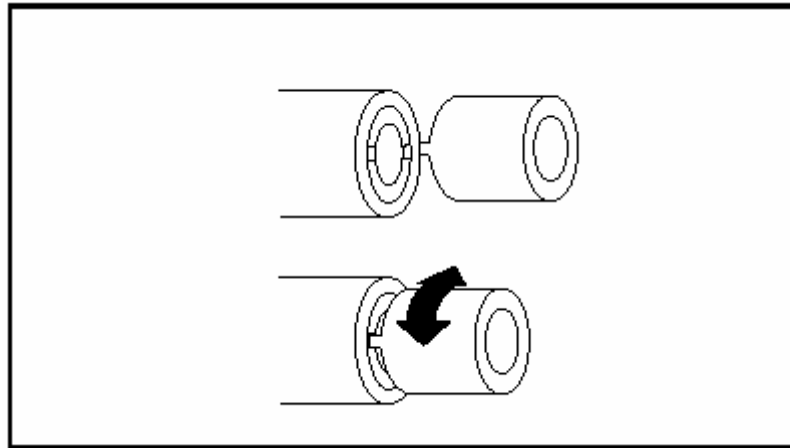
Για τη ρύθμιση του ανοίγματος της δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας φακός όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.10. Το άνοιγμα της δέσμης Laser είναι 5mrad και με τη βοήθεια του φακού μπορούμε να ανοίξουμε περισσότερο τη δέσμη έτσι ώστε να καλύψουμε την περιοχή που θέλουμε.



Σχήμα 6.10: Χρήση φακού για το άνοιγμα της δέσμης

Η επιλογή του φακού που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά. Στην αρχή πρέπει να γίνουν οι κατάλληλοι υπολογισμοί για τον ορισμό της περιοχής αβεβαιότητας και μετά να επιλεγεί ο κατάλληλος φακός. Ένας άλλος τρόπος είναι η χρησιμοποίηση ενός ρυθμιζόμενου φακού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.11. Περιστρέφοντας το σύστημα των φακών, όπως φαίνεται στο σχήμα, μπορούμε να ρυθμίσουμε το άνοιγμα της δέσμης.

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου ανοίγματος δέσμης που χρειάζεται για την κάλυψη της περιοχής αβεβαιότητας θεωρούμε ότι το σύστημα GPS μπορεί να υπολογίσει τη θέση του δορυφόρου με μια ακρίβεια 15m προς κάθε κατεύθυνση.



Σχήμα 6.11: Ρυθμιζόμενος φακός

Δηλαδή θεωρούμε σαν περιοχή αβεβαιότητας μια κυκλική επιφάνεια με ακτίνα 15m. Η επιφάνεια αυτού του κύκλου θα είναι $\pi \times r^2 = \pi \times (15)^2 \approx 707\text{m}^2$. Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου ανοίγματος δέσμης χρησιμοποιούμε τη σχέση (4.5) η οποία δίνεται και παρακάτω:

$$S = R\theta \quad (6.2)$$

όπου S ($2 \times 15 = 30\text{m}$) είναι η διάμετρος σε μέτρα, R (100m) είναι η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων και θ είναι το άνοιγμα της δέσμης σε ακτίνια (radians). Έτσι το

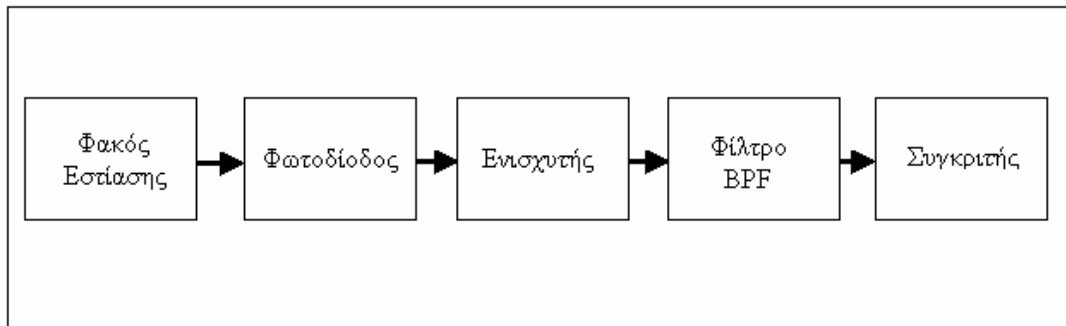
άνοιγμα της δέσμης θα είναι $\theta = \frac{30}{100} = 0.3\text{rad}$. Αν οι δορυφόροι χρησιμοποιούν

διαφορικό σύστημα GPS (DGPS) τότε η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας θα είναι 5m

($\pi \times r^2 = 78.54\text{ m}^2$) και το άνοιγμα της δέσμης θα είναι $\theta = \frac{10}{100} = 0.1\text{rad}$.

6.2 Δέκτης

Το επόμενο βήμα στη σχεδίαση του συστήματος είναι η σχεδίαση του δέκτη. Στο Σχήμα 6.12 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα για τα κυκλώματα του δέκτη ο οποίος αποτελείται από τον φακό εστίασης, τη φωτοδίοδο, έναν ενισχυτή, ένα ενεργό ζωνοπερατό φίλτρο και από τον συγκριτή.



Σχήμα 6.12: Μπλοκ διάγραμμα για το κύκλωμα του δέκτη

Το σήμα που λαμβάνει ο δέκτης είναι αρκετά εξασθενημένο και παραμορφωμένο λόγω του θορύβου που υπεισέρχεται σ' αυτό κατά τη μετάδοση. Η κύρια αιτία θορύβου στις επικοινωνίες με Laser στο διάστημα είναι ο θόρυβος περιβάλλοντος, ο οποίος προκαλείται από τον Ήλιο, από τη Γη και από τα άλλα ουράνια σώματα (Κεφάλαιο 5). Έτσι, ο δέκτης πρέπει να λαμβάνει το εκπεμπόμενο σήμα, να το ενισχύει, να αφαιρεί τον θόρυβο και να αναδημιουργεί το αρχικό σήμα.

Ο φακός εστίασης είναι η κεραία του δέκτη, λαμβάνει δηλαδή το προσπίπτον σήμα και το οδηγεί στη φωτοδίοδο. Μετά τον φακό εστίασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα οπτικό φίλτρο το οποίο θα φιλτράρει ένα μεγάλο μέρος του ανεπιθύμητου σήματος, έτσι ώστε το σήμα που θα φτάνει στη φωτοδίοδο να περιέχει χαμηλά επίπεδα θορύβου. Η φωτοδίοδος μετατρέπει το εισερχόμενο οπτικό σήμα σε ρεύμα. Μετά τη φωτοδίοδο βρίσκεται ο ενισχυτής, ο οποίος δέχεται σαν είσοδο το ρεύμα που παράγει η φωτοδίοδος το οποίο μετατρέπεται σε τάση και ενισχύεται έτσι ώστε να είναι δυνατόν η επεξεργασία του. Στο επόμενο βήμα ακολουθεί ένα ενεργό ζωνοπερατό φίλτρο γύρω από τη συχνότητα μετάδοσης (1MHz). Στο στάδιο αυτό γίνεται μια επιπλέον ενίσχυση του σήματος. Το τελευταίο στάδιο του κυκλώματος του δέκτη είναι ο συγκριτής ο οποίος λειτουργεί σαν αποδιαμορφωτής. Ο συγκριτής χρησιμοποιεί ένα προκαθορισμένο κατώφλι τάσης το οποίο χρησιμεύει στη δημιουργία του σήματος εξόδου. Έτσι, αν το επίπεδο του εισερχόμενου σήματος είναι μικρότερο από το επίπεδο του κατωφλίου, τότε η έξοδος του συγκριτή είναι 0V. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν το επίπεδο του εισερχόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από το επίπεδο του κατωφλίου, τότε η έξοδος του συγκριτή είναι 5V. Η έξοδος του συγκριτή θα είναι και η έξοδος του δέκτη.

Παρακάτω ακολουθεί μια λεπτομερής εξέταση των εξαρτημάτων του δέκτη Laser.

6.2.1 Λαμβανόμενη ισχύς

Στην παράγραφο αυτή θα ασχοληθούμε με τον υπολογισμό της λαμβανόμενης ισχύος από τον δέκτη. Για να είναι αυτό εφικτό, πρέπει να ξέρουμε την ακρίβεια με την οποία μπορούν οι νάνο-δορυφόροι να υπολογίσουν τη θέση τους. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, η ακρίβεια υπολογισμού θέσεις είναι 15m^3 για συστήματα GPS και 2 έως 5m^3 για συστήματα DGPS. Με αυτόν τον τρόπο καθορίζεται η περιοχή αβεβαιότητας η οποία θα είναι μια κυκλική επιφάνεια με ακτίνα 15m ή 5m ανάλογα με το σύστημα GPS (απλό ή διαφορικό) που χρησιμοποιείται. Έτσι, η επιφάνεια αυτή θα είναι πr^2 . Από τη σχέση 6.2 ($S = R\theta$, όπου $R=100\text{m}$) μπορούμε να υπολογίσουμε το άνοιγμα που πρέπει να έχει η δέσμη Laser έτσι ώστε να καλύπτει όλη την περιοχή αβεβαιότητας. Οι γωνίες αυτές έχουν υπολογιστεί στην παράγραφο 6.1.4 και είναι 0.3rad για GPS και 0.1rad για DGPS. Γνωρίζοντας ότι η εκπεμπόμενη ισχύς της δέσμης Laser είναι 1mW και ότι η επιφάνεια της φωτοδιόδου είναι 100mm^2 (Hermetically Sealed Large Area 100mm^2 Photodiode) μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ που φθάνει στην επιφάνεια της φωτοδιόδου (χωρίς τη χρησιμοποίηση εστιακού φακού) από τη σχέση 4.35 ($P_{rx} = P_{tx} \times \frac{A_{det}}{A_{ill}} \times \eta$). Στον Πίνακα 6.1 φαίνονται οι τιμές που έχουν βρεθεί για την λαμβανόμενη ισχύ για GPS και για DGPS. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για απόσταση 100m και για $\eta=100\%$ ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις είναι περίπου 95% λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις απώλειες σκέδασης.

	Άνοιγμα δέσμης (θ σε rad)	Ακτίνα ($r=S/2$ σε m)	Φωτιζόμενη επιφάνεια (A_{ill} σε m^2)	Λαμβανόμενη ισχύς (P_{rx} σε W)
GPS	0.3	15	707	0.14×10^{-9}
DGPS	0.1	5	78.54	1.27×10^{-9}

Πίνακας 6.1: Υπολογισμός της λαμβανόμενης ισχύος για απόσταση 100m

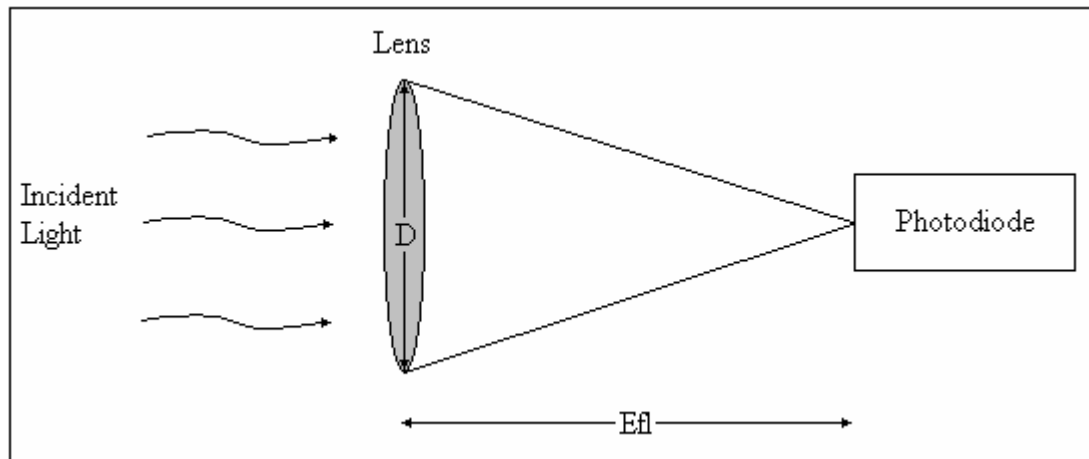
Πρέπει να σημειώσουμε ότι η μέθοδος αυτή επικοινωνίας με Laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μεγαλύτερες αποστάσεις. Στον Πίνακα 6.2 φαίνεται η λαμβανόμενη ισχύς για διάφορες αποστάσεις (100m έως 2km) και για διάφορες γωνίες ανοίγματος της δέσμης (5mrad έως 40mrad).

R (m)	θ (mrad)	r=S/2 (m)	Aill (m ²)	Prx (Watt)
100	5	0.25	0.2	$5 \cdot 10^{-7}$
	10	0.5	0.8	$1.25 \cdot 10^{-7}$
	15	0.75	1.8	$5.56 \cdot 10^{-8}$
	20	1	3.14	$3.18 \cdot 10^{-8}$
	40	2	12.6	$7.93 \cdot 10^{-9}$
200	5	0.5	0.8	$1.25 \cdot 10^{-7}$
	10	1	3.14	$3.18 \cdot 10^{-8}$
	15	1.5	7.1	$1.4 \cdot 10^{-8}$
	20	2	12.6	$7.94 \cdot 10^{-9}$
	40	4	50.3	$1.99 \cdot 10^{-9}$
500	5	1.25	4.9	$2 \cdot 10^{-8}$
	10	2.5	19.6	$5.1 \cdot 10^{-9}$
	15	3.75	44.2	$2.26 \cdot 10^{-9}$
	20	5	78.5	$1.27 \cdot 10^{-9}$
	40	10	314	$3.18 \cdot 10^{-10}$
1000	5	2.5	19.6	$5.1 \cdot 10^{-9}$
	10	5	78.5	$1.27 \cdot 10^{-9}$
	15	7.5	176.7	$5.7 \cdot 10^{-10}$
	20	10	314	$3.18 \cdot 10^{-10}$
	40	20	1257	$7.96 \cdot 10^{-11}$
2000	5	5	78.5	$1.27 \cdot 10^{-9}$
	10	10	314	$3.19 \cdot 10^{-10}$
	15	15	707	$1.41 \cdot 10^{-10}$
	20	20	1257	$7.96 \cdot 10^{-11}$
	40	40	5027	$1.99 \cdot 10^{-11}$

Πίνακας 6.2: Η λαμβανόμενη ισχύς για διαφορετικές τιμές των R και θ

6.2.2 Φακός εστίασης

Το πρώτο τμήμα του δέκτη είναι ο φακός εστίασης. Όπως βλέπουμε από τους Πίνακες 6.1 και 6.2, οι τιμές της λαμβανόμενης ισχύος (P_{rx}) είναι πολύ μικρές. Ένας απλός και αποτελεσματικός τρόπος για να αυξήσουμε την προσπίπτουσα ισχύ στη φωτοδίοδο είναι να προσθέσουμε έναν φακό εστίασης πριν από αυτήν. Αυτό σημαίνει ότι η προσπίπτουσα ισχύς στη φωτοδίοδο θα είναι περισσότερη αφού η επιφάνεια του φακού θα είναι μεγαλύτερη από αυτή της φωτοδίοδου. Αυτό μπορεί να γίνει όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.13: Ο φακός εστίασης πριν από τη φωτοδιόδο

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η εστιακή απόσταση (Effective focal length, Efl) του φακού, θα εξαρτάται από τον τύπο του Laser που θα χρησιμοποιηθεί. Η εστιακή απόσταση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$f = Efl / D \quad (6.3)$$

όπου f είναι ένας τυπικός αριθμός που συνήθως είναι περίπου 1.2, D είναι η διάμετρος του φακού και Efl (Effective focal length) είναι η απόσταση μεταξύ του φακού και της φωτοδιόδου. Αν χρησιμοποιήσουμε έναν φακό με διάμετρο 10cm τότε η απόσταση μεταξύ του φακού και της φωτοδιόδου θα είναι 12cm.

Η επιλογή του φακού, όσον αφορά τις διαστάσεις του και τη μάζα του, πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά για να μη δημιουργήσει πρόβλημα στη συνολική μάζα και τις διαστάσεις του νάνο-δορυφόρου. Γι αυτό το λόγο οι διαστάσεις και η μάζα του φακού πρέπει να είναι μέσα σε κάποια όρια.

Τελικά, αν γνωρίζουμε την διάμετρο του φακού, μπορούμε να υπολογίσουμε το κέρδος που προσθέτει ο φακός στους υπολογισμούς που κάναμε στον Πίνακα 6.1 για την λαμβανόμενη ισχύ. Έτσι, για διάμετρο $D=10\text{cm}=100\text{mm}$ μπορούμε να υπολογίσουμε την επιφάνεια του φακού από την παρακάτω σχέση:

$$A = \pi d^2/4 \quad (6.4)$$

Δηλαδή, η επιφάνεια του φακού θα είναι $A=\pi(100\text{mm})^2/4=7854\text{mm}^2$. Επίσης, γνωρίζοντας την επιφάνεια της φωτοδιόδου ($A_{\text{det}}=100\text{mm}^2$), μπορούμε να υπολογίσουμε το κέρδος που προσθέτει ο φακός:

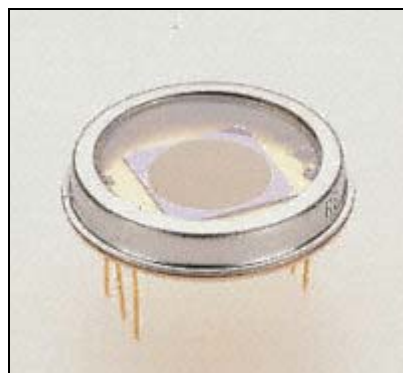
$$G = 20 \log \left(\frac{A}{A_{\text{det}}} \right) \text{ (dB)} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned}
 &= 20 \log \left(\frac{7854}{100} \right) = \\
 &= 20 \log (78.54) = \\
 &= 38\text{dB}
 \end{aligned}$$

Αυτό σημαίνει ότι η λαμβανόμενη ισχύς (P_{rx} , Πίνακας 6.1) θα ενισχυθεί κατά 38 dB ή κατά 6.31×10^3 φορές.

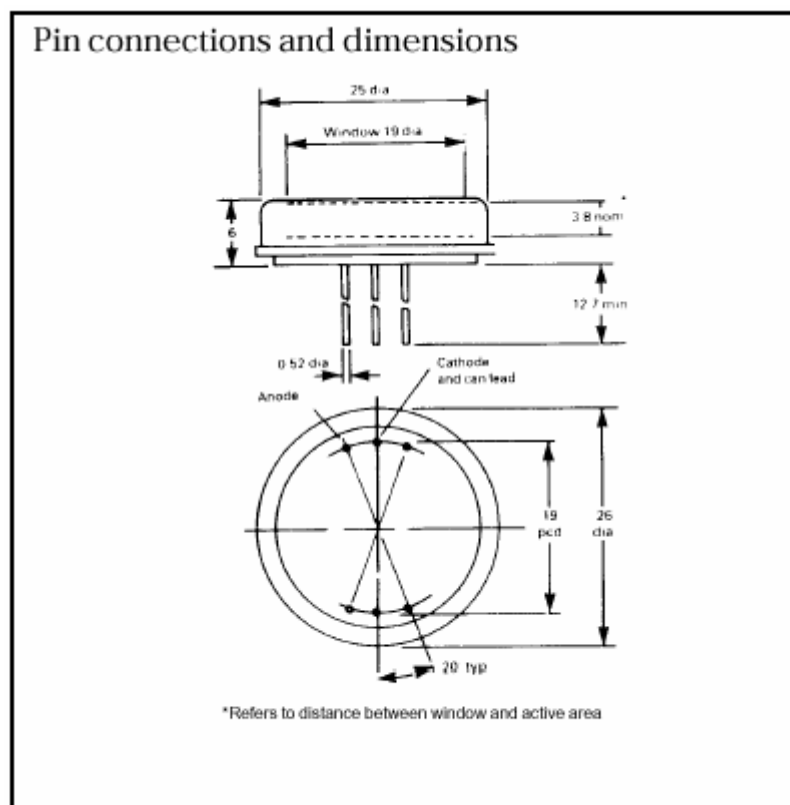
6.2.3 Φωτοδίοδος

Μετά τον εστιακό φακό, στη διάταξη του δέκτη, βρίσκεται η φωτοδίοδος. Η φωτοδίοδος συγκεντρώνει την οπτική ισχύ που πέφτει στην επιφάνειά της και την μετατρέπει σε ρεύμα. Η ποσότητα του ρεύματος που παράγεται από τη φωτοδίοδο εξαρτάται από την λαμβανόμενη ισχύ και από την ευαισθησία (responsivity) της φωτοδίοδου η οποία δίνεται σε A/W. Η φωτοδίοδος που χρησιμοποιείται (Hermetically Sealed Large Area 100mm² Photodiode, Σχήμα 6.14) είναι μια PIN φωτοδίοδος με μεγάλη επιφάνεια ανίχνευσης. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευαισθησία, ευρύ φάσμα λειτουργίας (350 έως 1150nm) με κορυφή στα 900nm, καλή συμπεριφορά σε θορυβώδες περιβάλλον, γρήγορη απόκριση (50ns) και μικρή χωρητικότητα (350pF). Η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από -55°C έως $+70^{\circ}\text{C}$. Έτσι, η φωτοδίοδος θα λειτουργεί ικανοποιητικά σε συνθήκες γήινου περιβάλλοντος όπου θα γίνει και το πείραμα. Στον Πίνακα A3 του Παραρτήματος φαίνονται όλα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοδίοδου στους 25°C .



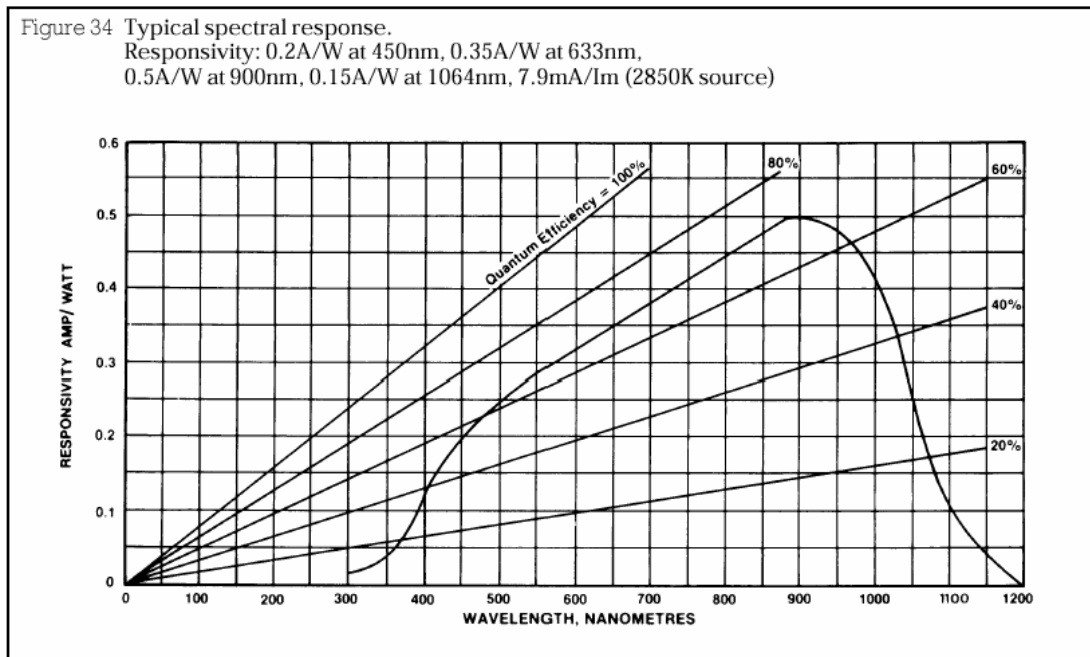
Σχήμα 6.14: Large Area photodiode

Στο Σχήμα 6.15 φαίνονται οι διαστάσεις της φωτοδιόδου η οποία είναι τοποθετημένη σε μια θήκη με διάμετρο 26.2mm και έχει επιφάνεια ανίχνευσης 100mm^2 .



Σχήμα 6.15: Διαστάσεις της φωτοδιόδου

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η συχνότητα λειτουργίας του Laser είναι 670nm. Στο Σχήμα 6.16 φαίνεται η ευαισθησία ανίχνευσης (responsivity) της φωτοδιόδου σε συνάρτηση με το μήκος κύματος. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα, στα 670nm η ευαισθησία ανίχνευσης είναι περίπου 0.36A/W.

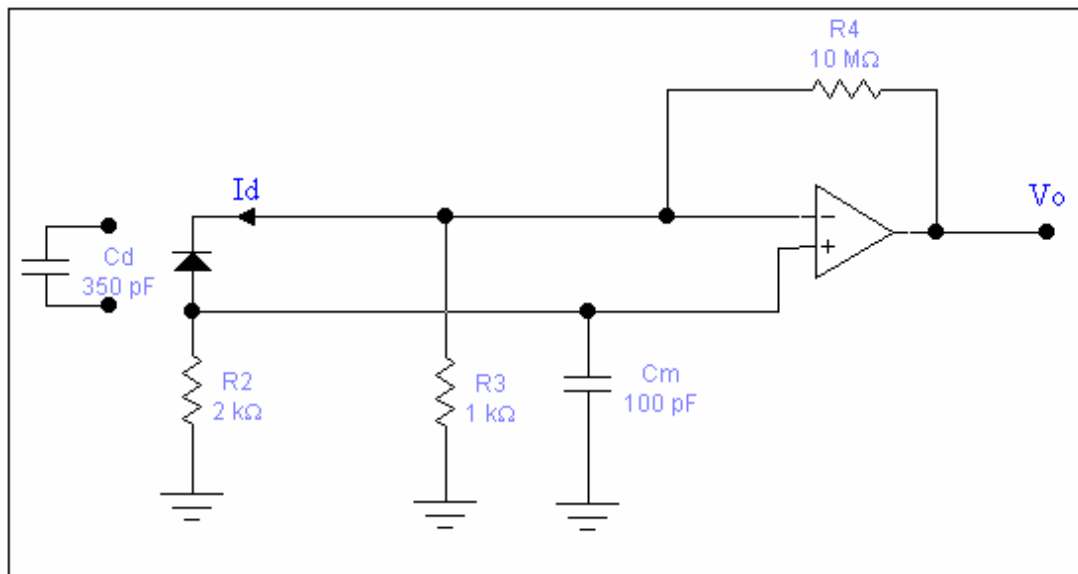


Σχήμα 6.16: Φασματική απόκριση

Πρέπει να σημειώσουμε ότι πριν από τη φωτοδίοδο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα οπτικό φίλτρο το οποίο θα αφήνει να περάσει μόνο το μήκος κύματος που θέλουμε και θα απορρίπτει τα άλλα μήκη κύματος. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα που θα εισέρχεται στη φωτοδίοδο θα περιέχει πολύ λιγότερο θόρυβο.

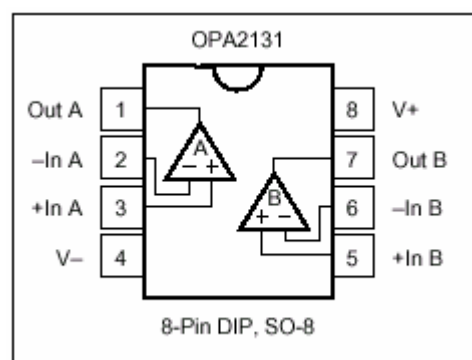
6.2.4 Ενισχυτής

Το επόμενο βήμα στη σχεδίαση του δέκτη είναι ο ενισχυτής ο οποίος θα δέχεται σαν είσοδο το ρεύμα που θα παράγει η φωτοδίοδος και θα το μετατρέπει σε τάση. Πρέπει να σημειώσουμε ότι το ρεύμα της φωτοδίοδου θα είναι αρκετά ασθενές επειδή η λαμβανόμενη ισχύς είναι σε χαμηλά επίπεδα (nW). Έτσι, η ενίσχυση που θα γίνει, πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε το σήμα να είναι δυνατόν να επεξεργαστεί. Στο Σχήμα 6.17 φαίνεται το κύκλωμα του ενισχυτή που θα χρησιμοποιηθεί. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιείται γιατί μπορεί να προσφέρει μια αρκετά μεγάλη ενίσχυση στο εισερχόμενο σήμα.



Σχήμα 6.17: Κύκλωμα ενισχυτή

Ένας πολύ καλός ενισχυτής για γενική χρήση είναι ο ενισχυτής OPA 131 ο οποίος προσφέρει υψηλή απόδοση σε χαμηλό κόστος. Χαρακτηρίζεται από χαμηλή τάση αντιστάθμισης (low offset voltage, 750μV), χαμηλό drift (low drift) και καλά δυναμικά χαρακτηριστικά. Επίσης, ένα άλλο πλεονέκτημα αυτού του ενισχυτή είναι η τάση τροφοδοσίας η οποία κυμαίνεται από $\pm 4.5\text{V}$ έως $\pm 18\text{V}$. Επειδή η τάση τροφοδοσίας των κυκλωμάτων πρέπει να είναι χαμηλή μπορούμε να τροφοδοτήσουμε τον ενισχυτή αυτόν με τάση 5V που σημαίνει ότι θα έχει χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το εύρος ζώνης λειτουργίας του είναι 4MHz. Πρέπει να σημειώσουμε ότι επειδή στο επόμενο στάδιο του δέκτη, στη σχεδίαση του φίλτρου, θα χρειαστεί και άλλος ενισχυτής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο OPA 2131 στο οποίο βρίσκονται τοποθετημένοι δύο ενισχυτές όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.18: Ολοκληρωμένο OPA 2131

Η τάση εξόδου του κυκλώματος του ενισχυτή που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα δίνεται από τον τύπο:

$$V_0 = R_2 I_D \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \quad (6.6)$$

όπου R_2 είναι η αντίσταση της φωτοδιόδου η οποία πρέπει να είναι μικρή για να μην έχουμε απώλειες ισχύος, R_3 είναι η αντίσταση εισόδου και R_4 είναι η αντίσταση ανάδρασης η οποία πρέπει να είναι μεγάλη γιατί από αυτήν θα προέρθει το κέρδος του κυκλώματος. Το κέρδος θορύβου που προσφέρει αυτό το κύκλωμα δίνεται από τη σχέση:

$$G_N = \left(1 + \frac{C_D}{C_m} \right) \quad (6.7)$$

όπου C_D είναι η χωρητικότητα της φωτοδιόδου (350pF) και ο πυκνωτής C_m πρέπει να έχει μικρή τιμή αλλά κοντά στην τιμή της C_D .

Οι τιμές που έχουν επιλογή για το κύκλωμα του ενισχυτή είναι: $R_2=2\text{k}\Omega$, $R_3=1\text{k}\Omega$, $R_4=10\text{M}\Omega$ και $C_m=100\text{pF}$. Οι τιμές αυτές δίνουν ένα κέρδος της τάξης 2×10^6 . Στον Πίνακα 6.3 δίνονται οι τιμές που θα έχει η τάση εξόδου του ενισχυτή. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από την λαμβανόμενη ισχύ, η οποία μετατρέπεται σε ρεύμα από τη φωτοδίοδο με ευαισθησία ανίχνευσης (responsivity) 0,36A/W. Το ρεύμα αυτό θα μετατρέπεται σε τάση και θα ενισχύεται από τον ενισχυτή.

	Λαμβανόμενη ισχύς (σε Watt)	Ρεύμα (σε A)	Τάση (σε V)
GPS	0.14×10^{-9}	0.0504×10^{-9}	1.008×10^{-4}
DGPS	1.27×10^{-9}	0.4572×10^{-9}	9.114×10^{-4}

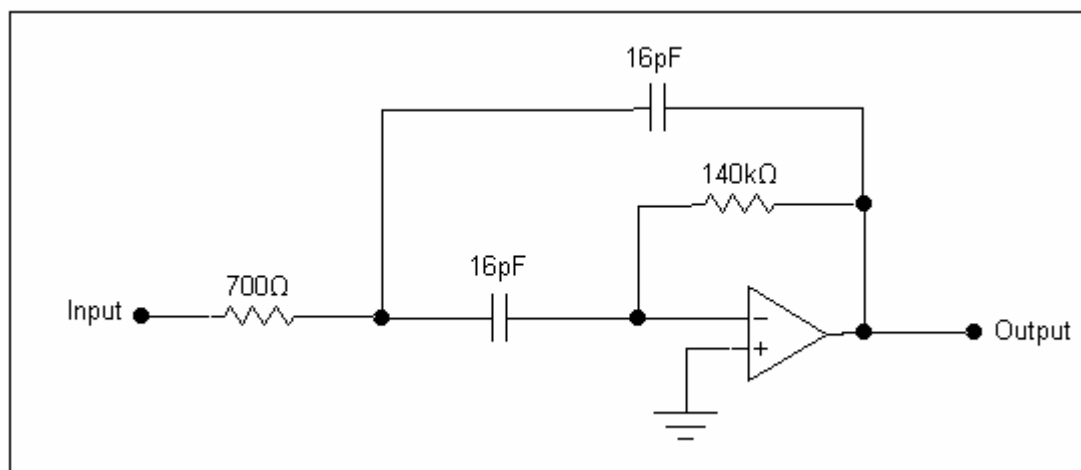
Πίνακας 6.3: Υπολογισμός τάσης εξόδου ενισχυτή

Όπως βλέπουμε στον παραπάνω πίνακα το επίπεδο του ενισχυμένου σήματος είναι αρκετό έτσι ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί. Επίσης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια APD φωτοδίοδο αντί για PIN. Στην περίπτωση αυτή το σήμα θα είναι ακόμα πιο ισχυρό αφού οι APD φωτοδιόδους έχουν ένα κέρδος που κυμαίνεται από 50 έως 200 ενώ στις PIN φωτοδιόδους το κέρδος είναι μονάδα. Μην

ξεχνάμε ότι η έξοδος του ενισχυτή θα ενισχυθεί και στο επόμενο στάδιο του δέκτη το οποίο είναι ένα ενεργό φίλτρο.

6.2.5 Φίλτρο

Μετά τον ενισχυτή, στη διάταξη του δέκτη, βρίσκεται ένα ενεργό ζωνοπερατό φίλτρο. Το φίλτρο αυτό θα δέχεται σαν είσοδο την έξοδο του ενισχυτή, θα κόβει τις συχνότητες που βρίσκονται έξω από τη ζώνη διέλευσής του και θα προσφέρει μια επιπλέον ενίσχυση στο εισερχόμενο σήμα. Στο Σχήμα 6.19 [Φίλτρα, Σ. Πακτίτης, 1995] φαίνεται το κύκλωμα του φίλτρου που θα χρησιμοποιηθεί. Το φίλτρο αυτό είναι ένα φίλτρο πολλαπλών ανασυζεύξεων, στενής ζώνης διέλευσης με κεντρική συχνότητα 1MHz. Το κέρδος που προσφέρει στο εισερχόμενο σήμα είναι 20db ($G=100$). Το φίλτρο αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι για την υλοποίησή του χρησιμοποιούνται λίγα στοιχεία.

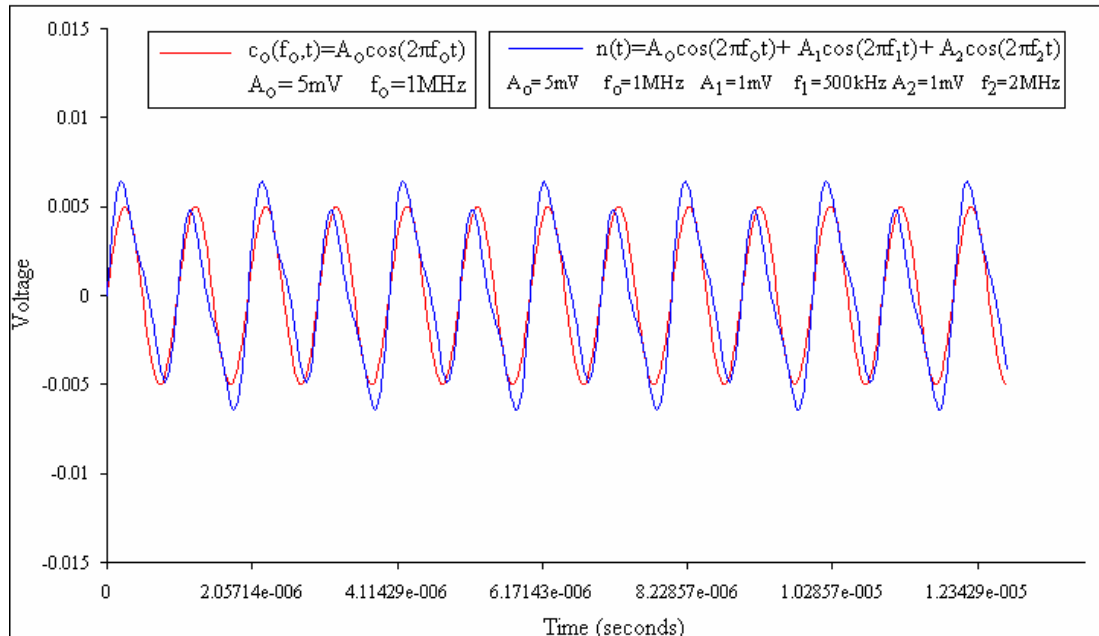


Σχήμα 6.19: Ενεργό φίλτρο στενής ζώνης διέλευσης (Σ. Πακτίτης, 1995)

Οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές που χρησιμοποιούνται υλοποιούν ένα βαθυπερατό και ένα υψιπερατό φίλτρο συνδεδεμένα σε σειρά. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται το κύκλωμα ζωνοπερατού φίλτρου. Οι τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών φαίνονται στο Σχήμα 6.19. Ο τελεστικός ενισχυτής που χρησιμοποιείται είναι ο OPA 2131, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο (§ 6.2.4, Σχήμα 6.18), ο οποίος προσφέρει υψηλή απόδοση σε χαμηλό κόστος. Η τάση τροφοδοσίας του θα είναι 5V, προσφέροντας χαμηλή κατανάλωση ισχύος, και το εύρος ζώνης λειτουργίας του είναι 4MHz.

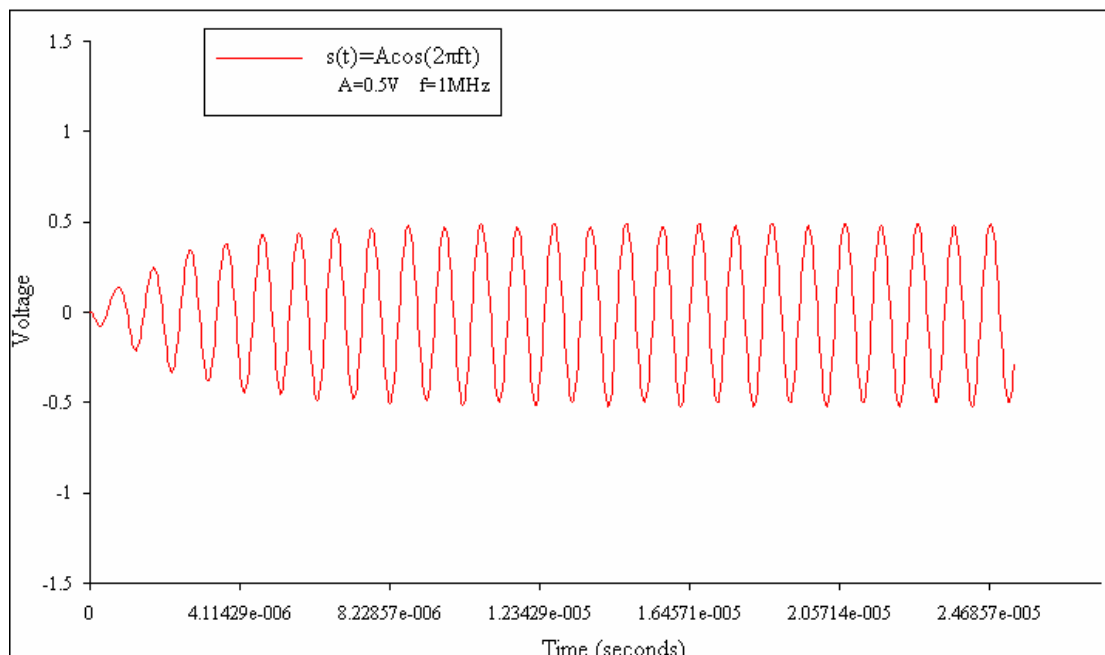
Για τον έλεγχο σωστής λειτουργίας του φίλτρου έγινε μια προσομοίωση με το πρόγραμμα Electronic Workbench. Στο Σχήμα 6.20 φαίνεται το σήμα εισόδου που

χρησιμοποιήθηκε (μπλε κυματομορφή, $n(t)$), το οποίο περιέχει τη συχνότητα μετάδοσης (1MHz) και δύο συχνότητες παρεμβολών (500kHz και 2MHz). Το πλάτος κάθε κυματομορφής είναι 5mV, δηλαδή ίδιας τάξης μεγέθους με το σήμα εξόδου του ενισχυτή (Πίνακας 6.3).



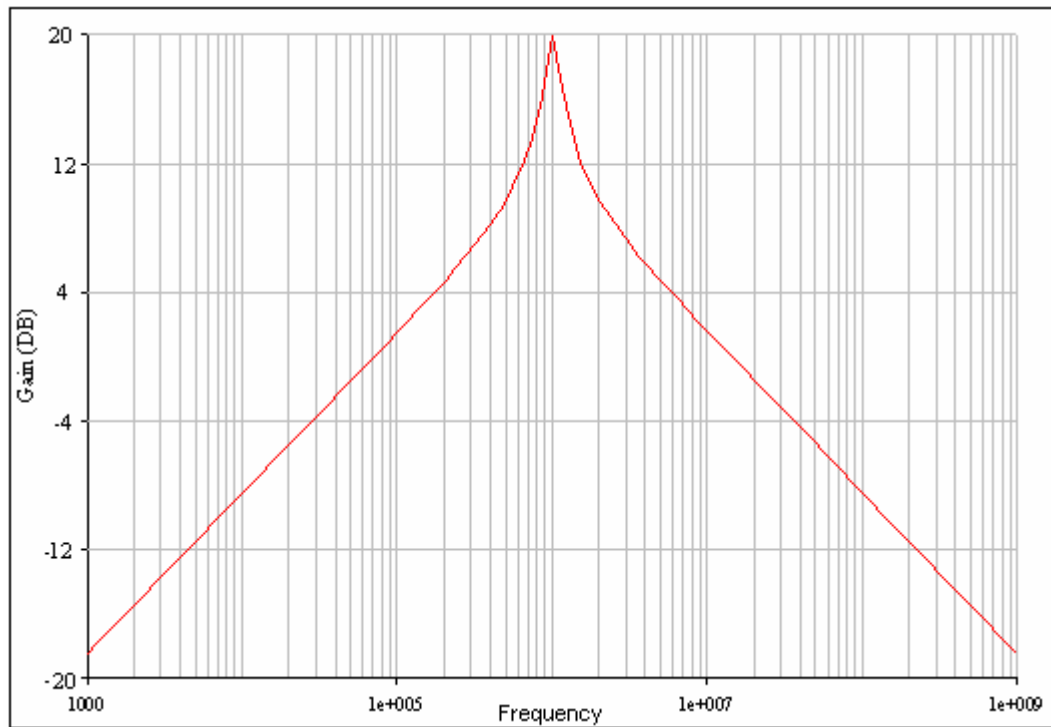
Σχήμα 6.20: Σήμα εισόδου + θόρυβο

Στο Σχήμα 6.21 φαίνεται η έξοδος του φίλτρου ($s(t)$). Βλέπουμε ότι οι συχνότητες παρεμβολών (500kHz και 2MHz) έχουν φιλτραριστεί ενώ το πλάτος του σήματος με τη συχνότητα μετάδοσης (1MHz) έχει ενισχυθεί 100 φορές (20db, από 5mV σε 0.5V)

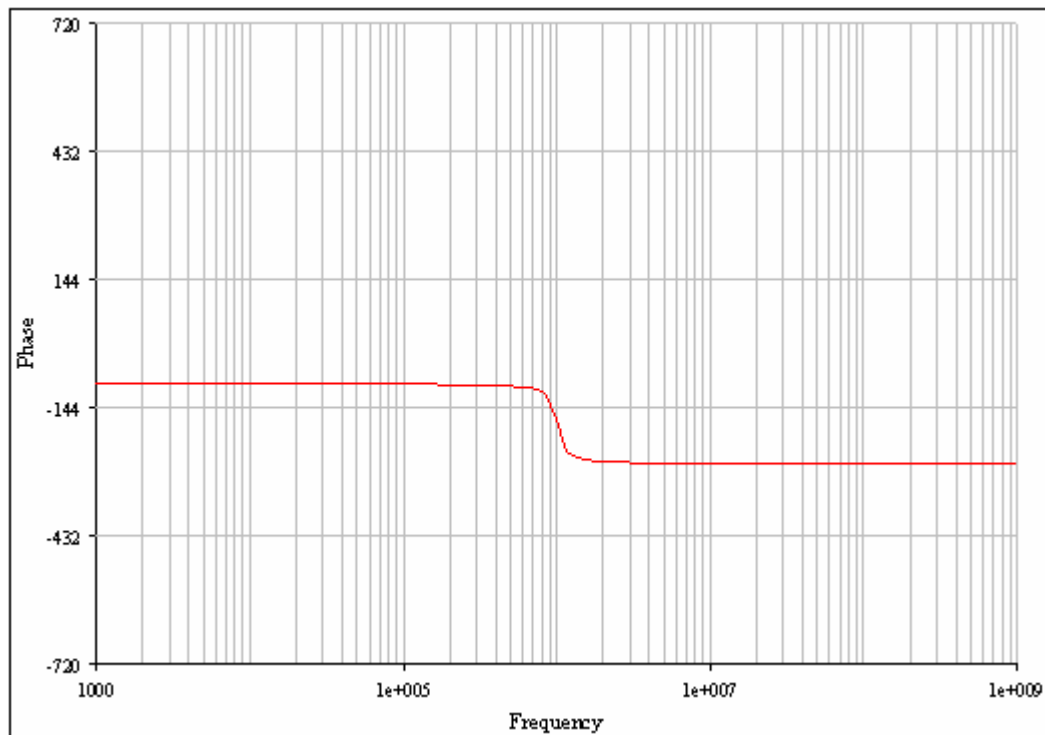


Σχήμα 6.21: Σήμα εξόδου

Στα Σχήματα 6.22 και 6.23 φαίνονται η απόκριση πλάτους και η απόκριση φάσης του φίλτρου. Στην απόκριση πλάτους βλέπουμε ότι το κέρδος είναι 20db και η κλίση είναι 20db/δεκάδα.



Σχήμα 6.22: Απόκριση πλάτους



Σχήμα 6.23: Απόκριση φάσης

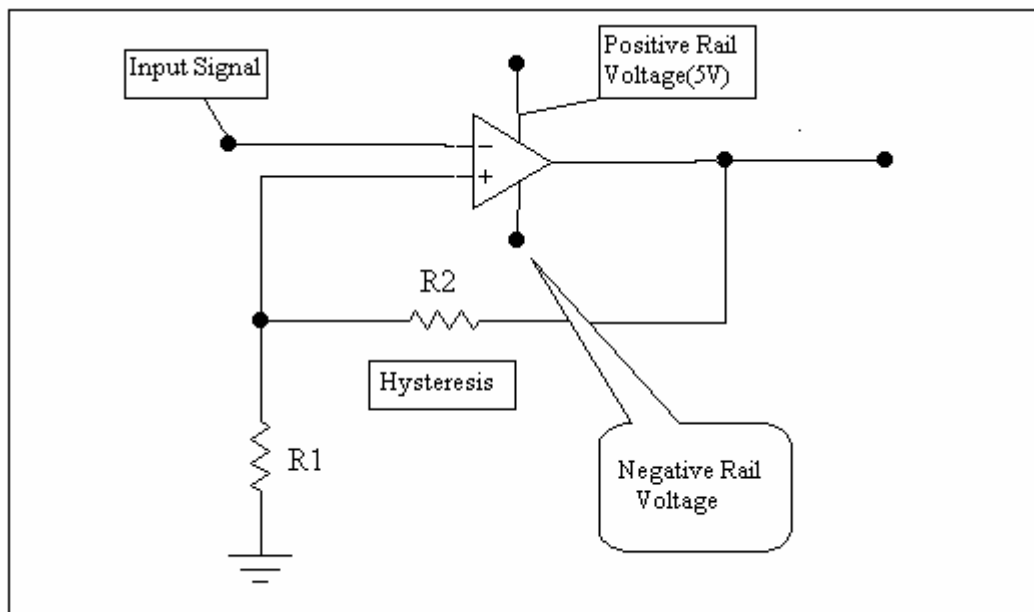
6.2.6 Συγκριτής

Το τελικό στάδιο του κυκλώματος του δεκτή είναι η αποδιαμόρφωση. Η αποδιαμόρφωση έχει σκοπό την ανάκτηση της πληροφορίας η οποία έχει σταλεί από το πομπό. Το βασικό πρόβλημα το οποίο ο συγκριτής έχει να αντιμετωπίσει είναι ο συγχρονισμός ανάμεσα στο σταλμένο bit και στα λαμβανόμενα δεδομένα, το οποίο μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό ρολοί (clock extraction) στο κύκλωμα απόφασης.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνουμε είναι να αναφέρουμε μερικές λεπτομέρειες για τον συγκριτή και πως μπορεί να τον εφαρμόσουμε στο κύκλωμά μας. Ο συγκριτής είναι ένας τελεστικός ενισχυτής που συγκρίνει δυο εισερχόμενα σήματα (εισόδου και αναφοράς) και παράγει στην έξοδο τετραγωνικούς παλμούς που μεταβάλλονται μεταξύ των δυο τάσεων φράγματος (rail voltage). Με σκοπό να παράγουμε δυαδικά δεδομένα (επειδή η έξοδος του συγκριτή παίρνει μόνο δυο τιμές, τις τιμές των τάσεων φράγματος), το αρνητικό φράγμα πρέπει να γειωθεί, και το θετικό πρέπει να πάρει την τιμή των 5V. Όσον αφορά αυτήν την εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένας ειδικός τύπος κυκλώματος συγκριτή που θα είναι ένα Schmitt Trigger.

Όταν λέμε Schmitt Trigger εννοούμε έναν συγκριτή με θετική ανάδραση. Επειδή εδώ υπάρχουν δυο πιθανές τάσεις εξόδου, θα υπάρχουν δυο τάσεις αναφοράς και δυο σημεία λειτουργίας. Η διαφορά τάσης μεταξύ των δύο σημείων λειτουργίας ονομάζεται τάση υστέρησης (hysteresis voltage) και είναι νεκρή ζώνη. Αυτό σημαίνει ότι αν η τάση εισόδου είναι ανάμεσα σε αυτά τα δυο σημεία τότε καμία αλλαγή δεν θα συμβεί στην τιμή εξόδου. Με την χρησιμοποίηση των δυο σημείων λειτουργίας στο συγκριτή, μια καλύτερη ελάττωση του θορύβου μπορεί να παρουσιαστεί, από την περίπτωση του απλού συγκριτή με μόνο ένα σημείο λειτουργίας.

Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε σχηματικά πως το Schmitt Trigger λειτουργεί και πως μπορούμε να βρούμε τις τιμές των σημείων λειτουργίας.



Σχήμα 6.24: Το κύκλωμα του Schmitt Trigger

Πρώτα από όλα τα δυο σημεία λειτουργίας πρέπει να βρεθούν, επόμενος για το άνω σημείο λειτουργίας (Upper Trip Point UTP) θα είναι :

$$UTP = +V_0 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (6.8)$$

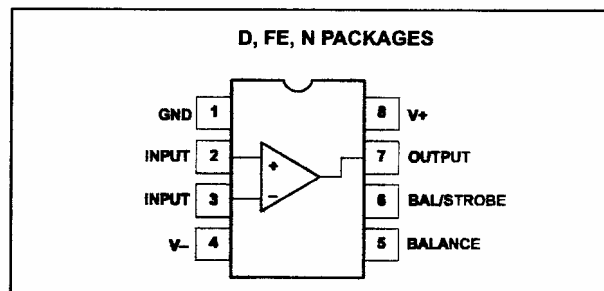
και στην άλλη περίπτωση για το κάτω σημείο λειτουργίας (Lower Trip Point) η μόνη διάφορα είναι το αρνητικό πρόσημο άρα:

$$LTP = -V_0 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (6.9)$$

Η τάση υστέρησης (hysteresis voltage) είναι η διάφορα ανάμεσα στα δυο σημεία λειτουργίας.

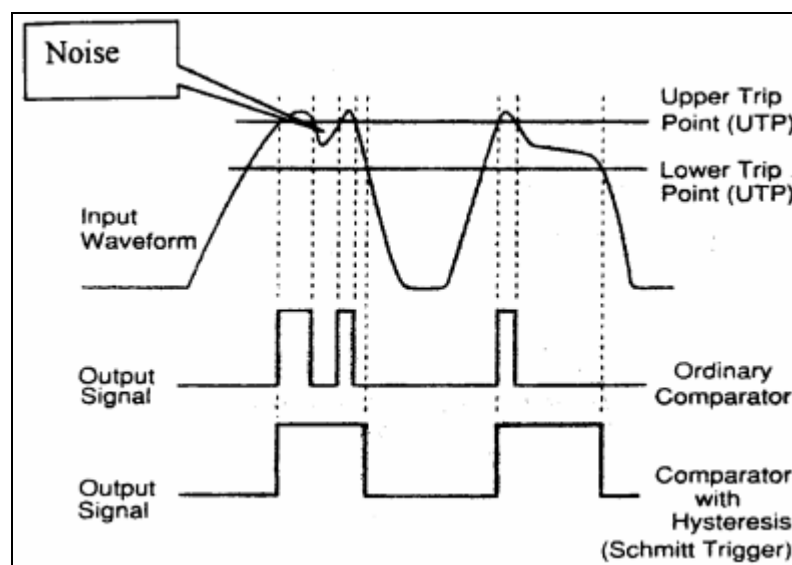
Ο συγκριτής ο οποίος έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο είναι ο LM311.

PIN CONFIGURATION



Σχήμα 6.25: LM311

Όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι δορυφόροι είναι ο θόρυβος περιβάλλοντος και οι άλλες μορφές θορύβου. Με τον σχεδιασμό του κυκλώματος του ανιχνευτή και των φίλτρων αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί. Αλλά δεν πρέπει να ξεχάσουμε ότι ο θόρυβος υπάρχει επίσης και στον ενισχυτή και στα φίλτρα. Για αυτό το λόγο το σήμα μπορεί να παραμορφωθεί από το θόρυβο ο οποίος δημιουργείται μέσα στο δέκτη. Έτσι μπορούμε να οδηγηθούμε σε λάθος αποδιαμόρφωση στα δεδομένα. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την χρησιμοποίηση των δυο σημείων λειτουργίας αντί για ένα, με σκοπό την σωστή αποδιαμόρφωση του σήματος.(η οποία με άλλες λέξεις είναι η διαφορά ανάμεσα στο Schmitt Trigger και σε ένα απλό συγκριτή).



Σχήμα 6.26: Απαλοιφή του θορύβου με χρησιμοποίηση των δυο σημείων λειτουργίας

6.3 Ανάλυση μάζας και ισχύος (Mass and Power Budget)

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια ανάλυση για τη συνολική μάζα του συστήματος (Πίνακας 6.4) και της συνολικής κατανάλωσης ισχύος (Πίνακας 6.5)

Εξάρτημα	Μάζα (Kg)
Laser	0.055
Βάση του Laser	No details (~0.05)
Ηλεκτρονικά κυκλώματα	~0.05
Οπτικά συστήματα	No details (~0.07)
Συνολικά (κατά προσέγγιση)	0.225

Πίνακας 6.4: Ανάλυση μάζας

Εξάρτημα	Ισχύς (W)
Πομπός	
Κύκλωμα οδήγησης	0.02
Laser	0.6
Δέκτης	
Φωτοδίοδος	0.1
Ενισχυτής	0.2
Φίλτρο	0.2
Συγκριτής	0.135
Συνολικά	1.255

Πίνακας 6.5: Ανάλυση ισχύος

Τα δεδομένα για τους παραπάνω υπολογισμούς δίνονται στα χαρακτηριστικά κάθε εξαρτήματος (Παράρτημα)

6.4 Εναλλακτική λύση

Ο τρόπος επικοινωνίας των νάνο-δορυφόρων που εξετάστηκε παραπάνω είναι πολύ χρήσιμος για μικρές αποστάσεις. Η απόσταση μεταξύ των νάνο-δορυφόρων έχει αποφασιστεί να είναι 100m, όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα. Αυτό θα συμβεί για κάποιο χρονικό διάστημα. Μετά, οι νάνο-δορυφόροι θα αρχίσουν να απομακρύνονται ο ένας από τον άλλον μέχρι να φτάσουν σε μια απόσταση των 30km. Σε τέτοιες μεγάλες αποστάσεις η μέθοδος παρατήρηση / παρατήρηση (stare/stare) που έχει

προταθεί δεν είναι αποδοτική λόγω της μεγάλης εξασθένισης που θα έχει υποστεί το σήμα με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να ανιχνευτεί στον δέκτη. Η εξασθένιση αυτή θα οφείλεται στο μεγάλο άνοιγμα που θα έχει η δέσμη Laser για να καλύψει όλη την περιοχή αβεβαιότητας με αποτέλεσμα η οπτική ισχύς της δέσμης να είναι καταναμημένη σε όλη την περιοχή αυτή.

Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε μια εναλλακτική λύση η οποία είναι πιο αποδοτική για μεγάλες αποστάσεις. Μια από τις κυριότερες διαφορές της μεθόδου αυτής από τη μέθοδο που αναλύθηκε παραπάνω είναι το άνοιγμα της δέσμης. Στην περίπτωση αυτή το άνοιγμα της δέσμης θα είναι πολύ μικρότερο με αποτέλεσμα η οπτική ισχύς να είναι συγκεντρωμένη για να μπορεί να ανιχνευτεί σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό θα έχει ως συνέπεια την αύξηση της πολυπλοκότητας στο σύστημά μας γιατί θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε μία από τις μεθόδους σάρωσης που έχουν αναφερθεί στο 4^ο κεφάλαιο. Επίσης, οι ταλαντεύσεις των δορυφόρων λόγω των εσωτερικών συστημάτων και άλλων εξωτερικών πηγών μπορεί να προκαλέσουν διαταραχές στη δέσμη του Laser με αποτέλεσμα να χαθεί η επικοινωνία μεταξύ των νάνο-δορυφόρων.

Εδώ προτείνεται μια διαδικασία για την εγκατάσταση της επικοινωνίας και διατήρησή της για όλη την διάρκεια αποστολής, που ακολουθεί τα βήματα της ανίχνευσης (acquisition), στόχευσης (pointing) και παρακολούθησης (tracking). Το σύστημα ανίχνευσης σκοπεύει στην εξουδετέρωση των μεγάλων σφαλμάτων στόχευσης στην αρχή της διαδικασίας έτσι ώστε να πετύχει ένα ελάχιστο επιθυμητό σφάλμα το οποίο θα σηματοδοτήσει την αρχή της διαδικασίας παρακολούθησης και οπτικής επικοινωνίας. Η σάρωση της περιοχής αβεβαιότητας μπορεί να εκτελεστεί σε διάφορα στάδια. Στην αρχή ο δορυφόρος αρχίζει την αναζήτηση με μεγάλο άνοιγμα δέσμης και μικρή ακρίβεια και μετά συνεχίζεται η σάρωση με μικρότερο άνοιγμα δέσμης και μεγαλύτερη ακρίβεια. Η διαδικασία στόχευσης του άλλου δορυφόρου είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα εξ αιτίας της μεγάλης απόστασης, του μικρού ανοίγματος της δέσμης Laser, του θορύβου και των ταλαντώσεων του συστήματος στόχευσης.

Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι ο πομπός και ο δέκτης που εξετάζουμε σε αυτή την παράγραφο μπορεί να είναι ίδιοι με αυτούς που εξετάσαμε παραπάνω αρκεί να προσθέσουμε ένα σύστημα ανίχνευσης, να χρησιμοποιήσουμε μικρό άνοιγμα της δέσμης Laser ρυθμίζοντάς το κατάλληλα και στον δέκτη να χρησιμοποιήσουμε έναν

φωρατή ανίχνευσης (§ 3.5.2) ο οποίος μπορεί να είναι ένας τεταρτιμοριακός APD ανιχνευτής (quadrant detector).

Στο 4^ο κεφάλαιο έχουν αναφερθεί όλες οι μέθοδοι και οι τεχνικές σάρωσης που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία δορυφόρων με Laser. Παρακάτω ακολουθεί μια πρόταση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύστημά μας.

6.4.1 Σχεδίαση του συστήματος ανίχνευσης

Για να αρχίσει η διαδικασία ανίχνευσης, ένας από τους δύο δορυφόρους εκπέμπει μια δέσμη Laser, αρχίζει την αναζήτηση στην περιοχή αβεβαιότητας στην οποία θα βρίσκεται ο άλλος δορυφόρος και περιμένει απάντηση απ αυτόν.

Κατά τη διάρκεια σχεδίασης του συστήματος ανίχνευσης πρέπει να λάβουμε υπ όψιν τους παρακάτω παράγοντες:

- Τις διαστάσεις της επιφάνειας αβεβαιότητας, η οποία υπολογίζεται από την ακρίβεια με την οποία το GPS μπορεί να υπολογίσει τη θέση των δορυφόρων. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η ακρίβεια αυτή θα είναι 15m χρησιμοποιώντας GPS και 2-5m χρησιμοποιώντας D-GPS.
- Το αρχικό σφάλμα στόχευσης και το επιθυμητό σφάλμα στόχευσης.
- Τη μέθοδο σάρωσης που θα χρησιμοποιήσουμε για την ποία θα αναφερθούμε παρακάτω πιο αναλυτικά
- Τον συνολικό χρόνο αναζήτησης ο οποίος εξαρτάται από τη μέθοδο σάρωσης που θα χρησιμοποιήσουμε.
- Τον χρόνο που η δέσμη Laser παραμένει σε κάθε θέση (Dwell time)
- Την πιθανή θέση του δορυφόρου την οποία πρέπει να γνωρίζουμε εκ των προτέρων
- Την απώλεια ισχύος κατά τη διάρκεια διαδικασίας ανίχνευσης
- Τον θόρυβο και τις ταλαντώσεις του δορυφόρου
- Το μήκος κύματος (670nm) και το άνοιγμα δέσμης το οποίο πρέπει να χρησιμοποιήσουμε
- Την σχετική κίνηση των δορυφόρων
- Τις διαστάσεις και το βάρος του οπτικού συστήματος και του δορυφόρου
- Τις απαιτήσεις του συστήματος επικοινωνίας

Σκοπός αυτού του συστήματος είναι ο δορυφόρος δέκτης να ανιχνεύσει τη δέσμη Laser με κάποια προκαθορισμένη πιθανότητα και σε κάποιο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Όπως αναφέραμε και παραπάνω η δυσκολία που παρουσιάζεται εδώ οφείλεται στο μικρό άνοιγμα της δέσμης Laser. Η αβεβαιότητα στο σύστημα πλοήγησης του δορυφόρου εκφράζεται σαν αβεβαιότητα στο αζιμούθιο και στην ανύψωση (§ 4.1).

Στη διαδικασία αναζήτησης πρέπει να σαρωθεί όλη η επιφάνεια αβεβαιότητας αρχίζοντας με κάποιο αρχικό σφάλμα στόχευσης και προσπαθώντας να το μειώσουμε έτσι ώστε να αρχίσει η διαδικασία της επικοινωνίας. Στο 4^ο κεφάλαιο αναφέρονται οι τεχνικές σάρωσης που μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι οποίες είναι:

- παρατήρηση / παρατήρηση (stare/stare)
- παρατήρηση / σάρωση (stare/scan)
- σάρωση / παρατήρηση (scan / stare)
- σάρωση / σάρωση (scan/scan)

Η καταλληλότερη τεχνική σάρωσης για την περίπτωση που εξετάζουμε είναι η παρατήρηση / σάρωση, κατά την οποία ο πομπός σαρώνει όλη την περιοχή αβεβαιότητας με μια δέσμη Laser και ο δέκτης παρατηρεί. Η πιθανότητα και ο χρόνος ανίχνευσης για την τεχνική αυτή δίνονται στο 4^ο κεφάλαιο και τις ξαναγράφουμε για ευκολία:

$$P_{acq} = P_{det} \cdot P_{area} \quad (6.10)$$

$$T_{acq\ stare/scan} = \left[\frac{\theta_{unc}^2}{\theta_{beam}^2} \right] \cdot T_{dwell} \cdot N_t \quad (6.11)$$

όπου θ_{unc} είναι η διάμετρος της περιοχής αβεβαιότητας, θ_{beam} είναι το 1/e του ανοίγματος της εκπεμπόμενης δέσμης Laser, T_{dwell} είναι η διάρκεια χρόνου που η δέσμη παραμένει σε κάθε θέση και N_t είναι ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων της σάρωσης. Κατά τη διάρκεια σάρωσης υπάρχει ένα ποσοστό επικάλυψης της περιοχής αβεβαιότητας με σκοπό να αυξήσουμε την πιθανότητα ανίχνευσης. Ο συντελεστής επικάλυψης δίνεται από τον τύπο (Lambert & Casey)

$$\xi_{-t} = (1 - k)^2 \quad (6.12)$$

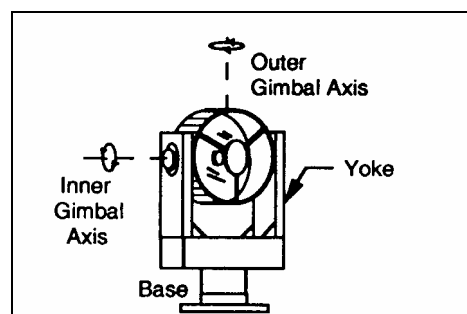
όπου $k = 10-15\%$, ο χρόνος ανίχνευσης γίνεται:

$$T_{acq} = \left[\frac{\theta_{unc}^2}{\theta_{beam}^2 \cdot \xi_t} \right] \cdot T_{dwell} \cdot N_t \quad (6.13)$$

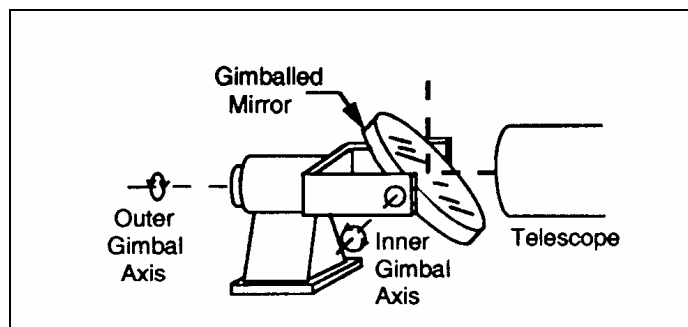
Επίσης, στο 4^ο κεφάλαιο αναφέρονται και οι τρόποι σάρωσης (spiral, raster και οι υποπεριπτώσεις τους, Σχήματα 4.5 και 4.6) τους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Στην παράγραφο §6.4.4 αναφέρουμε τον τρόπο σάρωσης ο οποίος είναι καταλληλότερος για την περίπτωση που εξετάζουμε.

6.4.2 Σύστημα Οδηγού δέσμης (beam steering system)

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για να κατευθύνει τη δέσμη Laser προς την κατεύθυνση που θέλουμε όταν γίνεται η σάρωση της περιοχής αβεβαιότητας. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να υλοποιήσουμε αυτό το σύστημα (Lambert & Casey, 1995). Παρακάτω παρουσιάζονται δύο απλά συστήματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εργασία μας. Πρώτο είναι το σύστημα στηρίγματος του τηλεσκοπίου (gimbal telescope system, Σχήμα 6.27) το οποίο είναι κατάλληλο για συστήματα κάλυψης μεγάλων γωνιών (μεγάλη περιοχή αβεβαιότητας). Στο σύστημα αυτό κινείται ολόκληρο το εξάρτημα του Laser. Δεύτερο είναι το σύστημα στηρίγματος επίπεδου καθρέφτη (gimbal flat system, Σχήμα 6.28) το οποίο χρησιμοποιεί ακίνητο τηλεσκόπιο και ένα εξωτερικό επίπεδο καθρέφτη. Ο καθρέφτης τοποθετείται σε ένα στήριγμα και είναι ελεύθερος να κινηθεί προς διάφορες κατευθύνσεις. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για κάλυψη μικρών γωνιών (μικρή περιοχή αβεβαιότητας) και έχει μικρότερο κόστος και βάρος από το πρώτο σύστημα. Πρέπει να σημειώσουμε ότι τα συστήματα αυτά θα τα κινεί ένας μηχανισμός ο οποίος θα είναι προγραμματισμένος να εκτελεί την κίνηση του τρόπου σάρωσης που έχουμε επιλέξει.



Σχήμα 6.27: Σύστημα στηρίγματος τηλεσκοπίου (Lambert & Casey, 1995)



Σχήμα 6.28: Σύστημα στηρίγματος επίπεδου καθρέφτη (Lambert & Casey, 1995)

6.4.3 Υπολογισμός της γωνίας κατεύθυνσης (Point ahead angle)

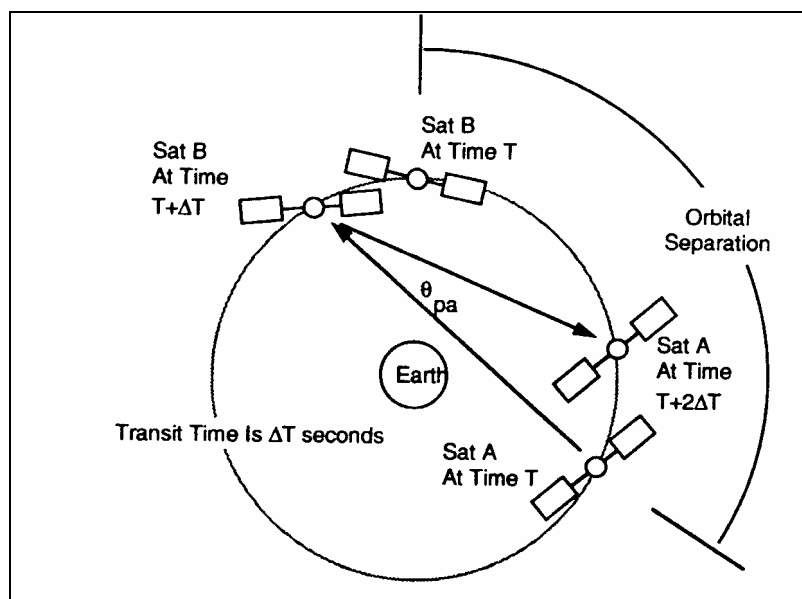
Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανίχνευσης πρέπει να υπολογιστεί η γωνία (point ahead angle) προς την οποία πρέπει να στοχεύσει ο δορυφόρος έτσι ώστε να εξουδετερωθεί ο χρόνος που κάνει το σήμα να ταξιδέψει σε μεγάλες αποστάσεις. Η γωνία αυτή υπολογίζεται από τις γωνιακές ταχύτητες των δύο νάνο-δορυφόρων. Πρέπει δηλαδή, να λάβουμε υπ όψιν την τροχιά και την ταχύτητά τους. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 6.29 όπου ο κάθε δορυφόρος ταξιδεύει με γωνιακή ταχύτητα V και η διαφορική γωνιακή ταχύτητα (differential angular velocity) θα είναι (Lambert & Casey, 1995):

$$V_{\text{diff}} = V + V \cos(\beta) \quad (6.14)$$

Στις περισσότερες περιπτώσεις το συνημίτονο παραλείπεται δίνοντας έτσι μια προσέγγιση της γωνίας κατεύθυνσης. Γνωρίζοντας λοιπόν την γωνιακή ταχύτητα και την απόσταση των δορυφόρων μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία προς την οποία πρέπει να κατευθυνθεί η δέσμη Laser από τον τύπο:

$$\theta_{pa} = \frac{2V}{c} \quad (6.15)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός.



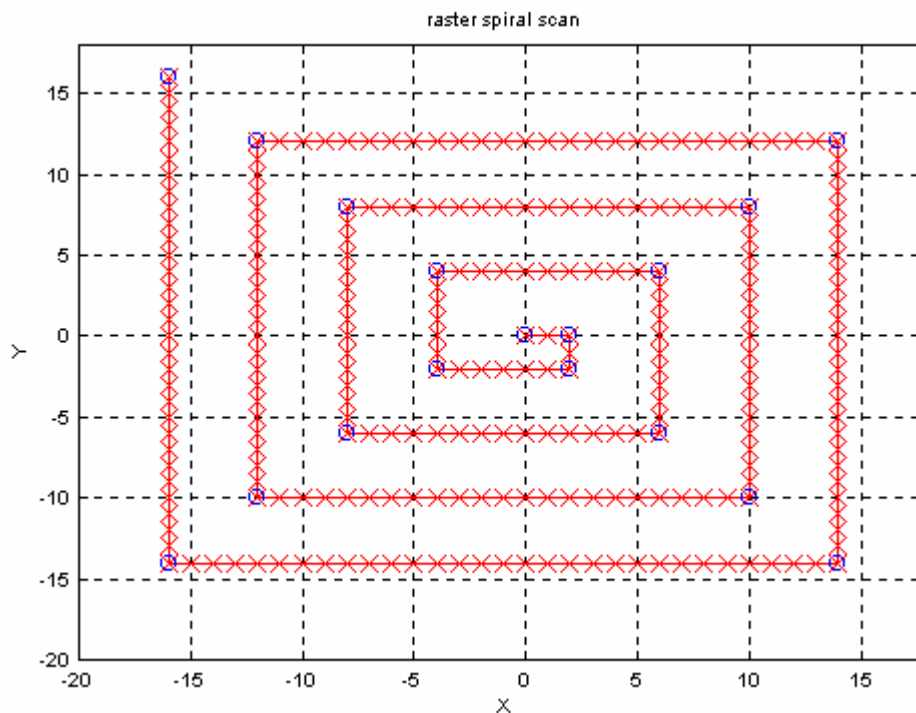
Σχήμα 6.29: Γεωμετρία υπολογισμού γωνίας κατεύθυνσης (Lambert & Casey, 1995)

6.4.4 Επίδραση των ταλαντώσεων στο σύστημα ανίχνευσης

Εξαιτίας των μηχανικών και των κινούμενων μερών του δορυφόρου, της μεγάλης ταχύτητας και του θορύβου από τα ηλεκτρικά συστήματα, η απόδοση του συστήματος ανίχνευσης μειώνεται.

Για να εγκατασταθεί επικοινωνία μεταξύ των δύο νάνο-δορυφόρων, ο δορυφόρος πομπός πρέπει να σαρώσει όλη την περιοχή αβεβαιότητας. Επειδή το σφάλμα υπολογισμού θέσης από το GPS μπορεί να είναι προς κάθε κατεύθυνση η περιοχή αυτή θα είναι μια κυκλική επιφάνεια. Ο καλύτερος τρόπος για να σαρωθεί αυτή η επιφάνεια είναι μια κυκλική διαδρομή. Ένας τέτοιος τρόπος είναι η συνεχής σπειροειδής σάρωση (continues spiral scan) που έχει αναλυθεί στο 4^ο κεφάλαιο. Αυτός ο τρόπος όμως έχει μερικά μειονεκτήματα. Πρώτον, το σύστημα δεν μπορεί να υλοποιήσει ακριβώς τη σπειροειδή σάρωση επειδή είναι ένα διακριτό σύστημα. Δεύτερον, η διαφορά μεταξύ δύο διαδρομών είναι αρκετά μεγάλη και σε μεγάλες ακτίνες θα υπάρχουν “νεκρές” ζώνες τις οποίες η δέσμη Laser δεν θα καλύπτει. Επίσης, η δεύτερη μέθοδος σάρωσης (raster scan) δεν είναι αρκετά αποδοτική, εξαιτίας του μεγάλου χρόνου ανίχνευσης, της υπερκάλυψης των άκρων και της αδυναμίας να σαρώσει προς την κατεύθυνση από την περιοχή μεγαλύτερης πιθανότητας προς την περιοχή μικρότερης πιθανότητας ανίχνευσης. Ο συνδυασμός της σπειροειδής με την “raster” μέθοδο οδηγεί σε σάρωση από την περιοχή μεγαλύτερης προς την περιοχή μικρότερης πιθανότητα ανίχνευσης. Αυτή η ενδιάμεση μέθοδος είναι εύκολα υλοποιήσιμη. Επίσης, είναι εύκολη η σχεδίαση της περιοχής

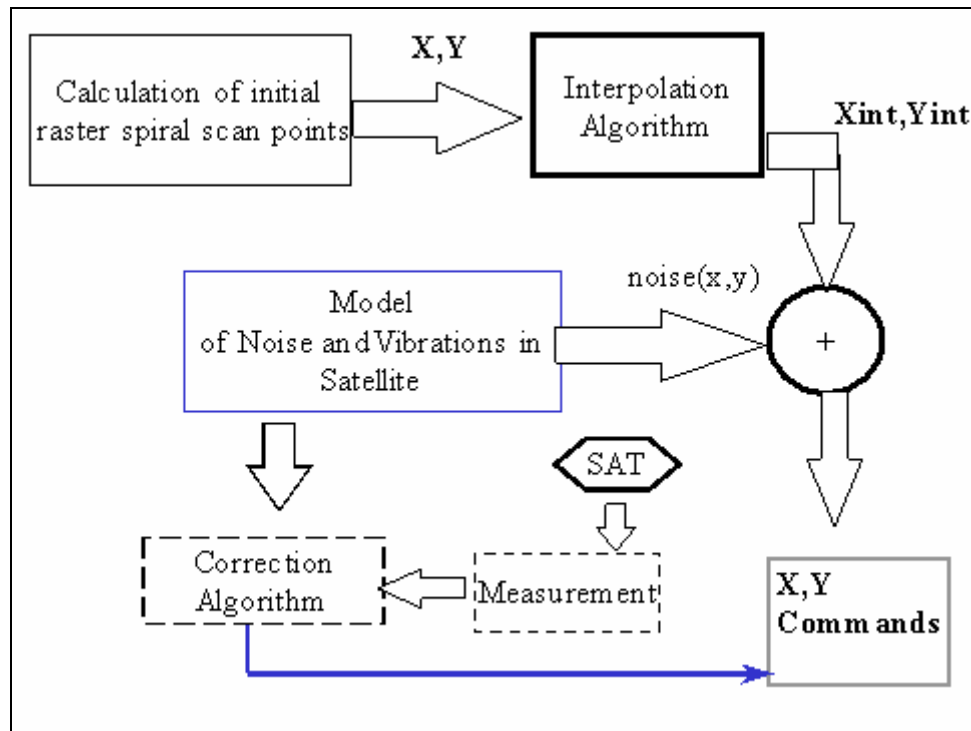
σάρωσης και η αποφυγή των “νεκρών” ζωνών. Γι αυτό το λόγο στην εργασία αυτή εξετάζεται η μέθοδος αυτή η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6.30. Η αρχική περιοχή αναζήτησης καθορίζεται από το σύστημα GPS και στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια της σάρωσης, πρέπει να συνυπολογιστεί η και ταχύτητα του δορυφόρου για να βρεθεί η γωνία (point ahead angle) προς την οποία πρέπει να στοχεύσει η δέσμη Laser.



Σχήμα 6.30: Raster spiral scan

Για την υλοποίηση της μεθόδου σάρωσης “raster spiral”, στην αρχή καθορίζονται τα σημεία τα οποία πρέπει να σαρωθούν, τα οποία σημειώνονται στο σχήμα με κύκλους, και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο παρεμβολής υπολογίζονται τα ενδιάμεσα σημεία, τα οποία σημειώνονται στο σχήμα με ‘X’.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται σε μπλοκ διάγραμμα το μοντέλο του συστήματος “raster spiral” που χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο διόρθωσης για την εξουδετέρωση του θορύβου και των ταλαντώσεων. Στην αρχή υπολογίζονται τα αρχικά σημεία (X_{int} , Y_{int}) στα οποία θα γίνει η σάρωση και μετά προσθέτουμε τη διόρθωση που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο για να καθοριστούν τα τελικά σημεία σάρωσης (X , Y).



Σχήμα 6.31: Σύστημα “raster spiral”

Στον Πίνακα 6.6 φαίνονται οι μορφές του θορύβου και των ταλαντώσεων που παρουσιάζονται σε έναν δορυφόρο.

Μορφή θορύβου	Συχνότητα (Hz)
transient process in altitude control loops	$10.^{-1}$: $10.^{-2}$
elastic vibrations of the satellite structure	10-100
thermal deformations of optical assemblies	$10.^{-3}$: $10.^{-4}$
white noise due to electrical parts, movement of satellite	all

Πίνακας 6.6: Μορφές θορύβου

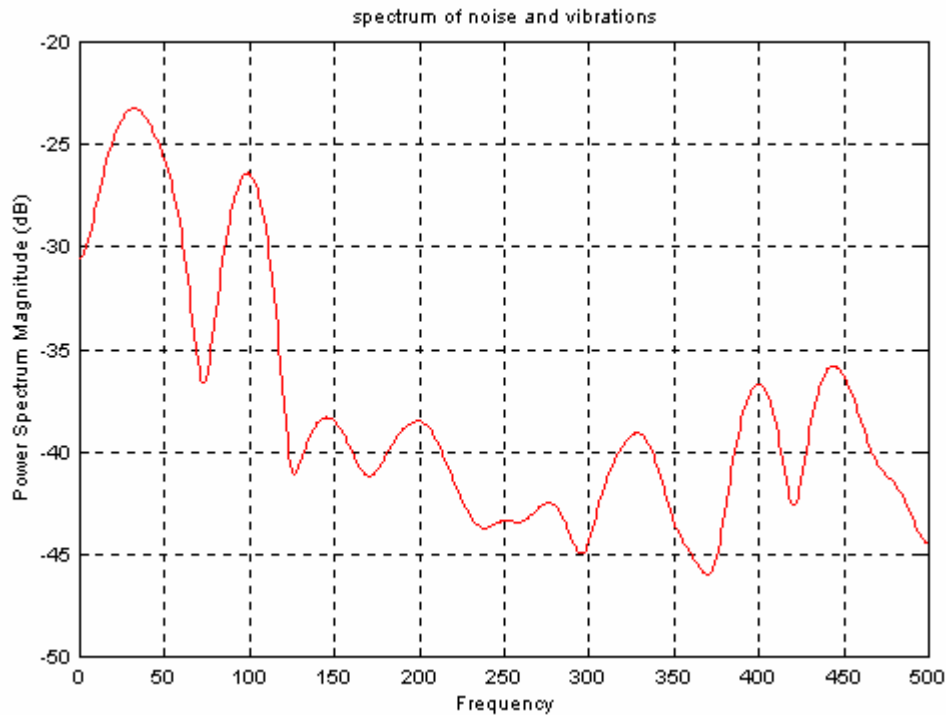
Ο συματοθορυβικός λόγος θα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$SNR = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} \left((s_x(k+1) - s_x(k))^2 + (s_y(k+1) - s_y(k))^2 \right)}{\sum_{m=1}^{\infty} (n_x^2(m) + n_y^2(m))} \quad (6.16)$$

όπου: s_x, s_y είναι οι x, y συνιστώσες του σήματος και

n_x, n_y είναι οι x, y συνιστώσες του θορύβου

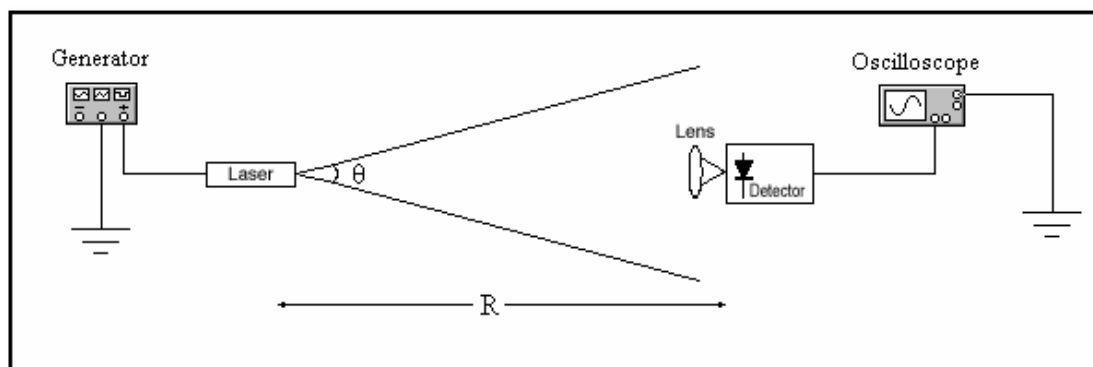
Στο Σχήμα 6 φαίνεται το φάσμα του θορύβου και των ταλαντώσεων του δορυφόρου. Όπως φαίνεται από το σχήμα οι τιμές του θορύβου για μικρές συχνότητες είναι μεγάλες.



Σχήμα 6.32: Φάσμα θορύβου και ταλαντώσεων

6.5 Πείραμα

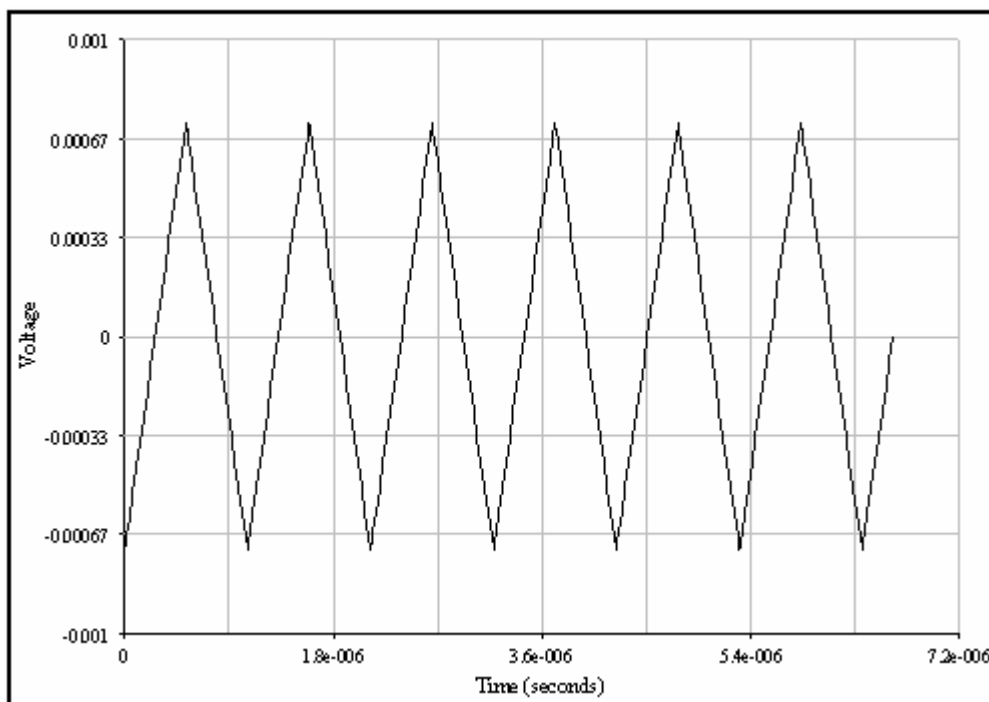
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας έγινε ένα πείραμα για να δούμε στην πράξη πως γίνεται η επικοινωνία μεταξύ δύο απομακρυσμένων σημείων χρησιμοποιώντας μια δέσμη Laser. Στο Σχήμα 6.33 φαίνεται η αναπαράσταση αυτού του πειράματος. Ακολουθεί μια ανάλυση των μετρήσεων που έγιναν.



Σχήμα 6.33: Κύκλωμα πειράματος

6.5.1 Πομπός

Σαν πηγή πληροφορίας χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια τριγωνικών παλμών. Μετά από μετρήσεις που έγιναν στον παλμογράφο, το πλάτος του σήματος εξόδου της γεννήτριας ήταν $V=0.72\text{ V}$ και η συχνότητά του $f=943\text{ kHz}$ (Σχήμα 6.34).



Σχήμα 6.34: Έξοδος γεννήτριας

Το Laser που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα Laser νέου (Metrologic Neon Laser) με ισχύ εξόδου $P_i=1.47\text{ mW}$ και άνοιγμα δέσμης $\theta=1.2\text{ mrad}$ (σχετικά μικρό). Οι μετρήσεις της οπτικής ισχύος έγιναν με ένα φωτόμετρο “Newport Research, Model 815”.

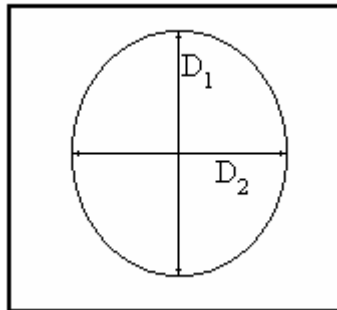
6.5.2 Δέκτης

Πριν από το κύκλωμα του δέκτη χρησιμοποιήθηκε ένας φακός για να αυξηθεί η λαμβανόμενη ισχύς. Η διάμετρος του φακού ήταν 6.4 cm και εστιακή απόσταση 16.5 cm .

Ο δέκτης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο “Metrologic Instruments, Model no: 45-720” και περιείχε μια φωτοδίοδο με επιφάνεια 16 mm^2 και έναν ενισχυτή για την ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος.

6.5.3 Μετρήσεις

Η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη ήταν 100 m και οι διαστάσεις του spot του Laser σε αυτήν την απόσταση ήταν $D_1=12.7$ cm και $D_2=11.8$ cm (Σχήμα 6.35).



Σχήμα 6.35: Διαστάσεις του spot

Οι μετρήσεις στον δέκτη έγιναν με δύο τρόπους. Στην αρχή δεν χρησιμοποιήθηκε ο φακός εστίασης και βρέθηκαν:

Η προσπίπτουσα οπτική ισχύς στην επιφάνεια της φωτοδιόδου ($S=16$ mm²) ήταν 3.45 μ W και ο η ισχύς θορύβου περιβάλλοντος (μέτρηση απουσία σήματος) 0.51 μ W. Μετά από την ενίσχυση του σήματος στον δέκτη, με μετρήσεις που έγιναν στον παλμογράφο, βρέθηκαν η τάση του σήματος $V=9$ mV (τριγωνική μορφή με συχνότητα 943 kHz) και η τάση του θορύβου 1 mV.

Με τη χρησιμοποίηση του φακού εστίασης οι αντίστοιχες τιμές βρέθηκαν:

Προσπίπτουσα οπτική ισχύς στην επιφάνεια του φακού ($S=402$ mm²): 1.28mW

Τάση του σήματος μετά την ενίσχυση στον δέκτη: 0.52 V (τριγωνική μορφή με συχνότητα 943 kHz).

Από τις μετρήσεις που έγιναν συμπεραίνουμε ότι για μικρό άνοιγμα δέσμης ($\theta=1.2$ mrad) και για μικρή απόσταση (100 m) το σύστημα λειτουργεί ικανοποιητικά ακόμα και χωρίς την χρησιμοποίηση του φακού εστίασης.

Κεφάλαιο 7^ο

Ανάλυση ζεύξης

Αυτό το κεφαλαίο είναι ένα από τα πιο σημαντικά στο σχεδιασμό του συστήματος επικοινωνίας με Laser. Για πρώτη φορά σε αυτό το κεφαλαίο θα εξηγήσουμε την συμπεριφορά του νάνο δορυφόρου στο διάστημα. Αν και οι απαιτήσεις για ελάχιστο μέγεθος, βάρος και ισχύς μπορεί να υπάρχουν σε πίνακες εργασίας των μηχανικών δορυφορικών συστημάτων, για να κατορθώσουμε αυτό το αποτέλεσμα πρέπει να γίνουν αρκετές επαναλήψεις σχεδίασης. Μερικές επαναλήψεις, παρόλο που μας δίνουν την καλύτερη απόδοση στον δορυφόρο, δεν πληρούν τις απαιτήσεις για μικρότερο βάρος στο σύστημα επικοινωνίας με Laser.

Αυτό το κεφαλαίο μπορεί να δώσει στο σχεδιαστή του συστήματος επικοινωνίας με Laser περισσότερες πληροφορίες για το σύνολο του συστήματος διασύνδεσης με Laser. Θα παρουσιαστή μια ανάλυση σχεδιασμού διασύνδεσης (cross link) έχοντας υπόψη τις αρχικές απαιτήσεις της σύνδεσης. Πρέπει να έχουμε υπόψη ότι για να σχεδιάσουμε ένα ικανοποιητικό σύστημα επικοινωνίας με Laser πρέπει να καταλάβουμε τις απαιτήσεις που είναι απαραίτητες για την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

7.1 Απαιτήσεις

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να αρχίσουμε να την ανάλυση σχεδιασμού του συστήματος έχοντας υπόψη τις απαιτήσεις που δίνονται. Ο παρακάτω πίνακας μας δίνει όλες τις απαιτήσεις για το σχεδιασμό του συστήματος επικοινωνίας με Laser. Όπως παρατηρούμε το σύστημα απαιτεί να λειτουργεί σε μια LEO τροχία με κλίση $97,79^\circ$ και η απόσταση μεταξύ των δυο νάνο δορυφόρων θα είναι 100m. Η απόσταση των νάνο δορυφόρων από την Γη θα είναι 640 km (ή 800km). Το σύστημά μας θα μεταφέρει δεδομένα με ρυθμό μετάδοσης 1Mbps full duplex και η πιθανότητα εσφαλμένου bit (bit error rate, BER) πρέπει να είναι μικρότερη από 10^{-6} , το βάρος μικρότερο από 0.2kg και η ισχύς λειτουργίας θα είναι 1-1,5W. Η διάρκεια ζωής του συστήματος θα είναι περίπου 1 χρόνο και με μια αξιοπιστία περίπου 80%.

Απαιτήσεις	Τιμές
Data rate	1Mbps full duplex
BER	10^{-6}
Απόσταση μεταξύ νάνο δορυφόρων	100 m
Απόσταση από την Γη	640km
Τροχιά	LEO
Βάρος	<0.4kg
Ισχύς	1-1.5W
Διάρκεια Ζώης	1 year
Αξιοπιστία	80%

Πίνακας 7.1: Απαιτήσεις συστήματος

7.2 Το περιβάλλον

Ένα σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση του συστήματος επικοινωνίας με Laser παίζει και η επίδραση του περιβάλλοντος. Μερικοί από τους σημαντικότερους παράγοντες του περιβάλλοντος που επηρεάζουνε την λειτουργία του δορυφόρου και πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπόψη είναι:

- Η φυσική ακτινοβολία
- Η τεχνητή ακτινοβολία
- Η θερμική πυκνότητα ισχύος
- Οι ταλαντώσεις
- Pyroshock
- Τα ηχητικά φαινόμενα
- Το κενό
- Η μόλυνση
- Οι διαταραχές

Μερικές από τις φυσικές αλληλεπίδρασης με τις οποίες η διασύνδεση (cross link) και ο δορυφόρος αλληλεπιδρούν, είναι :

- Satellite ephemeris accuracy
- Ακριβές θέση δορυφόρου στο διάστημα (Satellite attitude accuracy)
- Potential mounting location
- Command interface type and rate

- Όρια οπτικού πεδίου (View field limits)
- Ενδεχόμενα εμπόδια (Potential obstructions)
- Χαρακτηριστικά αλληλεπίδρασης ενέργειας (Power interface characteristics)
- Χαρακτηριστικά αλληλεπίδρασης δεδομένων (Data interface characteristic)
- Γωνία του ήλιου στο οπτικό πεδίο (Solar angles to line of sight)
- Άλλες πηγές περιβάλλοντος (Other background sources)

7.3 Επιλογές συστήματος (System Choices)

Για το σχεδιασμό του συστήματος επικοινωνίας με Laser υπάρχουν πολλές επιλογές που μπορούμε να κάνουμε. Αν πρέπει να διαλέξουμε ανάμεσα σε ομόδυνη και άμεση φώραση, τότε διαλέγουμε την άμεση φώραση. Αυτή η επιλογή γίνεται με κριτήριο αξιοπιστίας, κόστους και δυσκολίας υλοποίησης, και στην περίπτωση μας η άμεση φώραση εκπληρώνει αυτά τα κριτήρια .

Η τεχνολογία Laser που επιλέγεται για αυτό το σύστημα είναι Laser ημιαγωγού. Το Laser που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το Visible/Infrared Modulating Laser Diode Modules από την εταιρία RS. Θα έχει κατανάλωση ισχύος 1mW, 660-680nm μήκος κύματος, και μπορεί να διαμορφωθεί στις συχνότητες από 100Hz μέχρι 50 MHz που είναι στα όρια που θέλουμε. Διαλέγουμε αυτό το Laser επειδή πρώτα από όλα έχει χαμηλή κατανάλωση ισχύος που είναι το πιο σημαντικό κομμάτι που μας ενδιαφέρει γιατί η κατανάλωση ισχύς είναι περιορισμένη .Στο διάστημα ο νάνο δορυφόρος θα έχει σαν τροφοδοσία μια μπαταρία με περιορισμένη ισχύ ειδικά όταν θα βρεθεί σε περιοχή που δεν καλύπτεται από τον Ήλιο. Επίσης είναι Laser με μεγάλη διάρκεια ζωής, παίρνει άμεση διαμόρφωση και είναι εύκολο στην χρήση. Για το πείραμα που θα κάνουμε στο εργαστήριο το Laser είναι απλό και χαμηλού κόστους ενώ για το διάστημα τα πράγματα θα είναι διαφορετικά .Στο διάστημα θα λειτουργεί σε διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και η επιλογή θα είναι πολύ δύσκολη ιδικά στο κόστος και στο χρόνο ζωής του Laser.

7.4 Σχεδιασμός σύνδεσης επικοινωνίας

Ο σχεδιασμός της σύνδεσης επικοινωνίας (Configuring the communication link) είναι ένα πολύ σημαντικό μέρος στην εργασία μας.

Για αυτό το σχεδιασμό, οι απαιτήσεις της σύνδεσης υποδεικνύουν ένα λογικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Από την εργασία μας ξέρουμε πως χρειαζόμαστε για

αυτήν την σύνδεση περίπου 1Mbps, χρησιμοποιούμε κοινή τροχιά και στον επικοινωνιακό δέκτη μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η συνολική πολυπλοκότητα του οπτικού συστήματος και των εξαρτημάτων που τον αποτελούν.

7.4.1 Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και διαμόρφωση

Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι 1Mbps, ωστόσο θα πρέπει να προσθέσουμε data bit για την εσωτερική τηλεμετρία. Άρα ο ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων θα παρουσιάσει μια μείωση των 5% και θα είναι 0.95Mbps.

Στο σύστημά μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία από τις διαμορφώσεις, non return to zero (NRZ) και Manchester. Εμείς θα βασιστούμε στη διαμόρφωση NRZ όπως έχουμε αναφέρει και στο 4^ο κεφάλαιο.

7.4.2 Ρυθμός σφαλμάτων και κωδικοποίηση

Ο ρυθμός σφαλμάτων που θα έχουμε στο σύστημα μας θα πρέπει να είναι $\leq 10^{-6}$. Στην περίπτωση μας δεν χρησιμοποιούμε κωδικοποίηση επειδή θα είχαμε ελάττωση της συνολικής ισχύς και η ισχύς είναι περιορισμένη στο δικό μας σύστημα. Όμως η κωδικοποίηση της κωδικοποίησης θα μας έδινε καλύτερα αποτελέσματα στο ρυθμό σφαλμάτων (θα είχαμε μικρότερο BER). Όταν αναλύουμε το σύστημα επικοινωνίας με Laser, πρέπει να λάβουμε υπόψη τις επιδράσεις των εκρήξεων του συστήματος σκόπευσης. Για αυτό το λόγο, ο απαιτούμενος BER είναι χωρισμένο σε δυο ίσια μέρη ανάμεσα στο δέκτη και στο σύστημα σκόπευσης.

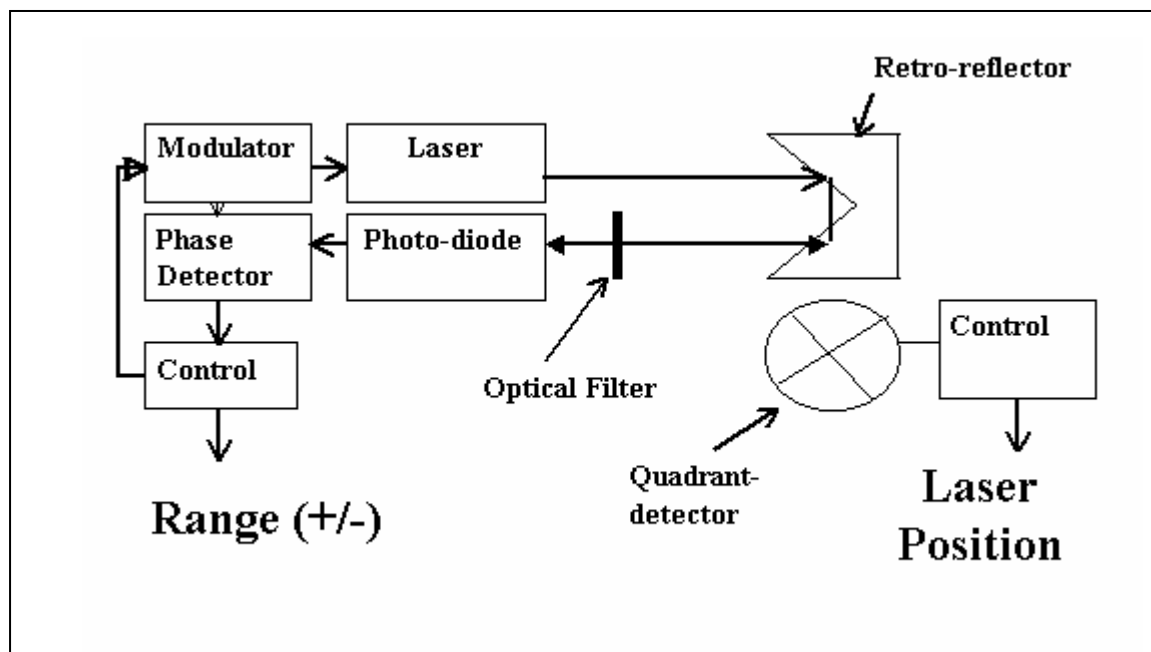
Από το ρυθμό σφαλμάτων που αναφέραμε πιο πάνω το απαιτούμενο SNR μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$P_E = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2}\right) \quad (7.1)$$

7.4.3 Απόσταση

Η απόσταση των δυο νάνο δορυφόρων θα είναι 100m. Για να ενημερωθεί το σύστημα και να γίνουν οι απαιτούμενες διορθώσεις για αυτή την απόσταση το σύστημα θα χρησιμοποιήσει εσωτερική τηλεμετρία που βασίζεται και πάλι στο Laser. Με το σύστημα της τηλεμετρίας που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα η ακρίβεια για την απόσταση των νάνο δορυφόρων είναι πολύ μεγάλη ενώ η ενημέρωση που περνούμε από το απλό GPS για μια απόσταση των 100m δεν είναι

ακριβής. Γενικά αυτό το πρόβλημα που δεν είναι στα πλαίσια της εργασίας μας και έχει αναλυθεί από μια ομάδα φοιτητών του Πανεπιστημίου του Southampton .



Σχήμα 7.1: Το σύστημα τηλεμετρίας

7.4.4 Παράμετροι του δέκτη

Στο δέκτη του συστήματος μας χρησιμοποιείται μια PIN φωτοδίοδος . Η πυγές θορύβου που είναι παρόν περιλαμβάνουν το θόρυβο περιβάλλοντος, το θόρυβο βολής, θόρυβο σκότους, τον θόρυβο του προ ενισχυτή και το υπερβολικό θόρυβο σήματος ανίχνευσης (Lambert & Casey, 1995).

7.4.4.1 Θόρυβος περιβάλλοντος

Η ενέργεια του θορύβου περιβάλλοντος μπορεί να περιοριστεί άμεσα με ένα φίλτρο στενής ζώνης και με περιορισμό του οπτικού πεδίου . Το οπτικό πεδίο (field of view(FOV)) περιορίζεται από το μέγεθος του spot και από την γωνία σάρωσης . Στο δικό μας σύστημα η γωνία οπτικού πεδίου είναι 0,1 rad και θεωρούμε ότι το οπτικό φίλτρο που θα χρησιμοποιήσουμε έχει εύρος ζώνης 60Å.

Η πυκνότητα ισχύος του θορύβου περιβάλλοντος μπορεί να υπολογιστεί για το δίσκο του φεγγαριού από τον τύπο:

$$P_B = H_B \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (FOV)^2 \cdot B_f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{aper})^2 \cdot L_R \quad (7.2)$$

όπου:

$$H_B = 0,002424 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$$

$$\text{FOV} = 0,1 \text{ rad}$$

$$B_f = 60 \text{ \AA}$$

$$D_{\text{aper}} = 11,3 \text{ mm}$$

$$L_R = 5\%$$

Άρα τελικά θα έχουμε: $P_B = 5.79 \times 10^{-11} \text{ W}$

Χρησιμοποιώντας αυτή την τιμή μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα ρεύματος του θορύβου περιβάλλοντος από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_B^2 = 2qP_B R_d \quad (7.3)$$

$$\sigma_B^2 = 2 \times (1,602 \times 10^{-19}) \times 5,79 \times 10^{-11} \times 0,5$$

$$\sigma_B^2 = 8,78 \times 10^{-30} \text{ A}^2/\text{Hz}$$

όπου:

$$q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Το R_d είναι η ευαισθησία του ανιχνευτή και είναι περίπου 0,5.

7.4.4.2 Θόρυβος σκότους

Ο θόρυβος σκότους για PIN φωτοδίοδο μπορεί να υπολογιστεί από το πιο κάτω τύπο :

$$\sigma_d^2 = 2qI_u \quad (7.4)$$

όπου:

$$q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}, I_u = 0.5 \mu\text{A} \text{ (Πίνακας A3, Παράρτημα)}$$

Τελικά θα έχουμε: $\sigma_D^2 = 1.602 \times 10^{-24} \text{ A}^2/\text{Hz}$

7.4.4.3 Θόρυβος προ-ενισχυτή (Preamplifier noise)

Στα προηγούμενα κεφαλαία συζητήσαμε για αυτό το θόρυβο. Και είχαμε καταλήξει στο τύπο που μας δίνει αυτό το είδος θορύβου:

$$\sigma_{pa}^2 = (NEI)^2 \quad (7.5)$$

όπου το $NEI = 3 \times 10^{-15} \text{ A} / \sqrt{\text{Hz}}$ (δες Παράρτημα)

Το NEI είναι το ισοδύναμο ρεύμα θορύβου

Άρα $\sigma_{pa}^2 = 9 \times 10^{-30} \text{ A}^2 / \sqrt{\text{Hz}}$

7.4.4.4 Θόρυβος Βολής (Shot Noise)

Ο τελευταίος όρος που συμβάλει στο συνολικό θόρυβο είναι ο θόρυβο βολής και δίνεται από το πιο κάτω τύπο :

$$\sigma_{ss}^2 = 2qI_{avg} \quad (7.6)$$

όπου:

$$I_{avg} = P_{avg} \cdot R_d$$

$$R_d = 0.5$$

$$P_{avg} = 1.27 \cdot 10^{-9} W = 1.27 nW$$

$$q = 1,602 \times 10^{-19}$$

η τιμή του P_{avg} έχει υπολογιστεί στον πίνακα 6.1.

Άρα τελικά το σ_{pa}^2 θα είναι : $\sigma_{ss}^2 = 2,03 \times 10^{-28} A^2 \sqrt{Hz}$

7.4.4.5 Συνολική Ισχύς Θορύβου

Η τελική ισχύς θορύβου μπορεί να υπολογιστεί σαν άθροισμα όλων των ορών που αναφέραμε πιο πάνω και εκφράζεται από τον τύπο :

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_B^2 + \sigma_D^2 + \sigma_{pa}^2 + \sigma_{ss}^2 \quad (7.7)$$

και τελικά θα είναι :

$$\sigma_{total}^2 = 1.6 \times 10^{-24} A^2 / \sqrt{Hz}$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο (5.21) από το 5^ο κεφάλαιο όπου έχουμε κάνει την αντικατάσταση $SNR=z$ μπορούμε να υπολογίσουμε την αναγκαία ισχύ του σήματος:

$$I_{pk} = \frac{2qFBz(1 + \frac{1}{N_e})}{(1 - \frac{1}{N_e})} + \sqrt{\left[\frac{2qFBz(1 + \frac{1}{N_e})}{(1 - \frac{1}{N_e})} \right]^2 + \frac{4\sigma_{tot}^2}{(1 - \frac{1}{N_e})}} \times z \quad (7.8)$$

όπου το N_e παίρνει την τιμή 10.

$$I_{pk} = 8.89 \text{ pA} \text{ και}$$

$$P_{pk} = \frac{I_{pk}^2}{R_d} \text{ και τελικά έχουμε}$$

$$P_{pk} = 17.8 \text{ pW}$$

7.4.5 Εκπεμπόμενη Ισχύς (Transmit Power)

Τώρα μετά από το υπολογισμό όλων των παραμέτρων θα επιστρέψουμε στην ανάλυση της σύνδεσης για να υπολογίσουμε την απαιτούμενη πηγή ενέργειας. Από την λαμβανόμενη και την απαιτούμενη τιμή της ισχύος μπορούμε να υπολογίσουμε το Link Margin από τη σχέση (4.25). Μια τυπική τιμή του LM στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι 3 dB

Χρησιμοποιώντας την τιμή της απαιτούμενης ισχύος που υπολογίσαμε συμπληρώνουμε τον πιο κάτω πίνακα:

Πινάκας 7.2 :Communication Link Margin

Parameter	Value	dB Value
Transmit power	1mW	-20
Transmitter optic transmission loss	76.5%	-1.16
Transmitter gain	1	0
Range loss	78.54	-68.96
Receiver gain	1	0
Receiver transmission loss	55.3%	-2.57
Received signal level	0.54 nW	-92.69
Required signal level	17.8 pW	-107.5
Excess link margin		14.81>3

Τελικά βλέπουμε ότι το Link Margin είναι αρκετά μεγαλύτερο από 3dB που σημαίνει ότι η επικοινωνία δεν θα έχει πρόβλημα.

Κεφάλαιο 8^ο

Συμπέρασμα

Το τελευταίο μέρος αυτής της εργασίας είναι να αναφέρουμε τα συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε βασισμένοι στην ανάλυση που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια. Στην εργασία αυτή ασχοληθήκαμε με τα συστήματα οπτικής επικοινωνίας που μπορεί να χρησιμοποιηθούν στους δορυφόρους. Η ανάλυση αυτή έγινε στα πλαίσια μιας μελέτης για την κατασκευή δύο νάνο-δορυφόρων με την ονομασία MUSTANG.

Στην αρχή έγινε μια γενική αναφορά για τα είδη των Laser που υπάρχουν έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να επιλέξουμε το καταλληλότερο για την περίπτωση που εξετάζουμε. Ακολούθησε μια θεωρητική ανάλυση των μεθόδων επικοινωνίας με Laser στο διάστημα και αναφέρθηκαν όλα τα πιθανά προβλήματα που παρουσιάζονται σε κάθε μία από αυτές. Από τις μεθόδους αυτές επιλέξαμε τις δύο καταλληλότερες λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του συστήματός μας, όπως η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, το μικρό βάρος και η απλότητα κατασκευής.

Η πρώτη μέθοδος που εξετάστηκε είναι η παρατήρηση / παρατήρηση η οποία είναι η απλούστερη των περιπτώσεων και είναι κατάλληλη για σχετικά μικρές αποστάσεις. Επίσης, έγινε μια σχεδίαση ενός πομποδέκτη για αυτή τη μέθοδο, τα εξαρτήματα του οποίου επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτό ήταν και το σημαντικότερο μέρος της εργασίας αυτής. Ακολούθησε μια ανάλυση της ζεύξης παίρνοντας υπόψη τον θόρυβο που υπεισέρχεται στο σύστημα και τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Η δεύτερη μέθοδος που εξετάστηκε είναι η Παρατήρηση / Σάρωση. Η μέθοδος αυτή είναι περισσότερο πολύπλοκη και οι παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν είναι πολύ περισσότερες καθώς πρέπει να επιλεγούν τα κατάλληλα συστήματα σάρωσης η λειτουργία των οποίων επηρεάζεται πάρα πολύ από τις ταλαντώσεις του δορυφόρου. Η μέθοδος αυτή είναι η περισσότερο χρησιμοποιούμενη στην πράξη και χρησιμοποιείται για σχετικά μεγάλες αποστάσεις.

Ελπίζουμε, η εργασία αυτή να φανεί χρήσιμη στη συνέχεια της μελέτης και της κατασκευής αυτού του συστήματος.

Παράρτημα

Πίνακας A1: Γενικά χαρακτηριστικά του Laser

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Nominal wavelength	670	nm
Maximum power output	1	mW
Typical power output stability (@ 20°C)	2	%
Typical power output temperature dependence	15	μW/°C
Operating voltage	-8 to -12	Volts
Typical operating current at minimum voltage	75	mA
Typical operating current at maximum voltage	110	mA
Power supply rejection ratio (50Hz to 100kHz)	0.6	%/V
TTL disable voltage	>4	Volts
Maximum TTL pulse rate	10	Hz
Interlock 'enable'	-5 to +2.5	Volts
Modulation type (AM)	Analogue or digital	
Modulation signal levels into 50Ω for linear response	500mV pk to pk	
Maximum modulation signal levels into 50Ω	8V pk to pk	
Modulation frequency band width (-3dB points)	100 Hz to 50 MHz	
Frequency range	100 Hz to 100 MHz	
Modulation depth (Pulse)	90	
Mean time to failure (MTTF) @ 30°C	80000	Hours
Connections	250mm flying leads	
Black lead	-ve supply	
Green lead	0	Volts
Blue lead	TTL disable	
White lead	Interlock	
Yellow and green twisted pair	Modulation input	

Πίνακας A2: Οπτικά χαρακτηριστικά του Laser

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Beam size	3.5 × 2.5	mm
Minimum focus (lens extended)	25	mm
Spot size at minimum focus	>50	Micron
Polarization ratio	80:1	
Pointing stability	<0.05	mrاد
Output aperture diameter	3.5	mm
Angular deviation of beam to case (front cell)	>5	mrاد

Πίνακας Α3: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοδιόδου στους 25°C

	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{(BR)}$	Breakdown Voltage	$I_D=100\mu A$	50		1.5	V
I_D	Dark Current	Dark rev. bias 10V	0.5	0.22		μA
R_e	Responsivity @ 450nm		0.2	0.4		A/W
	633nm		0.35	0.55		
	900nm		0.5	0.16		
	1065nm		0.15			
C	Capacitance	at 0V	1500			pF
		at 10V rev. bias.	350			
t_i	Response time (10% to 90%)	at 0V RL 50 Ω	0.5			μs
		at 10V RL 50 Ω , $\lambda < 910nm$	50			ns
R_S	Shunt resistance	at 0V $\pm 0.1V$	5			M Ω
I_n	Noise current	at 0V F=1kHz	0.1			pA (rms)
		at 10V rev. bias f=1kHz	0.4			$\sqrt{Hz}$
NEP	Noise equiv. @ 450nm	at 0V	0.5			pW
	power	at 10V rev. bias	2			$\sqrt{Hz}$
	900nm	at 0V	0.2			pW
	(at f=1kHz)	at 10V rev. bias	0.8			$\sqrt{Hz}$

Σχήμα Α1: Ετικέτα προϊόντος (laser)

Πίνακας Α4: Χαρακτηριστικά ενισχυτή

SPECIFICATIONS

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, and $R_L = 2\text{k}\Omega$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITION	OPA131PA, UA OPA2131PA, UA OPA4131PA, UA, NA			OPA131PJ, UJ OPA2131PJ, UJ OPA4131PJ, NJ			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
OFFSET VOLTAGE Input Offset Voltage OPA131P, U models only vs Temperature ⁽¹⁾ vs Power Supply OPA131P, U models only	Operating Temperature Range $V_S = \pm 4.5\text{V to } \pm 18\text{V}$		± 0.2 ± 0.2 ± 2 50 50	± 1 0.75 ± 10 200 100		*	± 1.5 * *	mV mV $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ $\mu\text{V/V}$ $\mu\text{V/V}$
INPUT BIAS CURRENT⁽²⁾ Input Bias Current vs Temperature Input Offset Current	$V_{CM} = 0\text{V}$ $V_{CM} = 0\text{V}$		+5 See Typical Curve ± 1	± 50 * ± 50		*	*	pA pA
NOISE Input Voltage Noise Noise Density, $f = 10\text{Hz}$ $f = 100\text{Hz}$ $f = 1\text{kHz}$ $f = 10\text{kHz}$ Current Noise Density, $f = 1\text{kHz}$			21 16 15 15 3			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
INPUT VOLTAGE RANGE Common-Mode Voltage Range Common-Mode Rejection OPA131P, U models only	$V_{CM} = -12\text{V to } +14\text{V}$	(V ⁺)-3 70 80	80 86	(V ⁺)-1	*	*	*	V dB dB
INPUT IMPEDANCE Differential Common-Mode	$V_{CM} = 0\text{V}$		$10^{10} \parallel 1$ $10^{12} \parallel 3$			*		$\Omega \parallel \text{pF}$ $\Omega \parallel \text{pF}$
OPEN-LOOP GAIN Open-Loop Voltage Gain OPA131P, U models only	$V_O = -12\text{V to } +12\text{V}$	94 100	110 110		*	*		dB dB
FREQUENCY RESPONSE Gain-Bandwidth Product Slew Rate Settling Time 0.1% 0.01% Total Harmonic Distortion + Noise	$G = -1$, 10V Step, $C_L = 100\text{pF}$ $G = -1$, 10V Step, $C_L = 100\text{pF}$ 1kHz, $G = 1$, $V_O = 3.5\text{Vrms}$		4 10 1.5 2 0.0008			*		MHz V/ μs μs μs %
OUTPUT Voltage Output, Positive Negative Short-Circuit Current		(V ⁺)-3 (V ⁻)+3	(V ⁺)-2.5 (V ⁻)+2.5 ± 25		*	*		V V mA
POWER SUPPLY Specified Operating Voltage Operating Voltage Range Quiescent Current (per amplifier)	$I_O = 0$	± 4.5	± 15 ± 1.5	± 18 ± 1.75	*	*	*	V V mA
TEMPERATURE RANGE Operating Range Storage Thermal Resistance, θ_{JA} 8-Pin DIP SO-8 Surface-Mount 14-Pin DIP SO-14, SOL-16 Surface-Mount		-40 -40		+85 +125	0 *		+70 *	$^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C}$ $^\circ\text{C/W}$ $^\circ\text{C/W}$ $^\circ\text{C/W}$ $^\circ\text{C/W}$

* Specifications same as OPA131PA, OPA131UA.

NOTES: (1) Guaranteed by wafer test. (2) High-speed test at $T_J = 25^\circ\text{C}$.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

Πίνακας Α5: Χαρακτηριστικά συγκριτή

Philips Semiconductors Linear Products

Product specification

Voltage comparator

LM111/211/311/
LM311BDC ELECTRICAL CHARACTERISTICS^{1, 2, 3, 6}

Over temperature range unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM111/LM211			LM311			LM311B			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _{OS}	Input offset voltage ³	T _A =25°C, R _S ≤50kΩ		0.7	3.0		2.0	7.5		2.0	7.5	mV
I _{OS}	Input offset current ³	T _A =25°C		4.0	10		6.0	50		6	25	nA
I _{BIAS}	Input bias current	T _A =25°C		60	100		100	250		100	200	nA
A _V	Voltage gain	T _A =25°C		200			200			200		V/mV
	Response time ⁴	T _A =25°C		200			200			500		ns
V _{SAT}	Saturation voltage	LM111/211 V _{IN} ≤5mV, I _{OUT} =50mA LM311/B V _{IN} ≤10mV, I _{OUT} =50mA T _A =25°C		0.75	1.5		0.75	1.5		0.75	1.5	V
I _{BAL/STR}	Strobe on current	T _A =25°C		3.0			3.0			3.0		mA
I _{LEAKAGE}	Output leakage current ⁶	LM111/211 V _{IN} ≥5mV, V _{OUT} =35V LM311/B V _{IN} ≥10mV, V _{OUT} =35V T _A =25°C, I _{STROBE} =3mA (V ₋ = V _{GND} = -5V)		0.2	10		0.2	50		0.2	50	nA
V _{OS}	Input offset voltage ³	R _S ≤50kΩ			4.0			10			10	mV
I _{OS}	Input offset current ³				20			70			50	nA
I _{BIAS}	Input bias current				150			300			250	nA
V _{IN}	Input voltage range	V=±15V (Pin 7 may go to 5V)	-14.5	13.8 to -14.7	13.0	-14.5	13.8 to -14.7	13.0	V ₋ +0.5		V ₊ -1.5	V
V _{OL}	Saturation voltage ⁶	V ₊ ≥ 4.5V, V ₋ = 0 LM111/211 V _{IN} ≤6mV, I _{SINK} ≤8mA LM311/B V _{IN} ≤10mV, I _{SINK} ≤8mA		0.23	0.4		0.23	0.4		0.23	0.4	V
I _{OH}	Output leakage current	V _{IN} ≥5mV, V _{OUT} =35V		0.1	0.5							μA
I _{CC}	Positive supply current	T _A =25°C		5.1	6.0		5.1	7.5		1.6	3.5	mA
I _{EE}	Negative supply voltage	T _A =25°C		4.1	5.0		4.1	5.0				mA

NOTES:

1. This rating applies for ±15V supplies. The positive input voltage limit is 30V above the negative supply. The negative input voltage limit is equal to the negative supply voltage or 30V below the positive supply, whichever is less.
2. These specifications apply for V_S=±15V and 0°C < T_A < 70°C unless otherwise specified. With the LM211, however, all temperature specifications are limited to -25°C ≤ T_A ≤ 85°C and for the LM111 is limited to -55°C T_A < 125°C. The offset voltage, offset current, and bias current specifications apply for any supply voltage from a single 5V supply up to ±15V supplies.
3. The offset voltages and offset currents given are the maximum values required to drive the output within a volt of either supply with 1mA load. Thus, these parameters define an error band and take into account the worst case effects of voltage gain and input impedance.
4. The response time specified is for a 100mV input step with 5mV over-drive.
5. Do not short the strobe pin to ground; it should be current driven at 3mA to 5mA.
6. LM311B, all parameters are at V₊ = 3V ±10%, V₋ = GND = 0V.

Βιβλιογραφία

1. (Lambert & Casey, 1995): S.G. Lambert, W.L. Casey, “Laser Communication in Space” Boston, USA, 1995.
2. (Green, 1993): “Fiber Optics Networks” New Jersey, USA, 1993.
3. (Papoulis, 1965): A. Papoulis, “Probability, Random Variables and Stochastic Processes” New York, USA, 1965.
4. (Horowitz & Hill, 19980): P. Horowitz, W. Hill, “The Art of Electronics” Cambridge University, 1980.
5. (Haykin, 1995): Simon Haykin, “Συστήματα Επικοινωνιών” μετάφραση, Αθήνα 1995.
6. (Sedra & Smith, 1994): A. Sedra, K. Smith, “Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα” μετάφραση, Αθήνα 1994.
7. (Maral & Bousquet, 1993): G. Maral, M Bousquet, “Satellite Communication Systems”, Second Edition, England 1993.
8. (Σεραφετινίδης, 1990): Α. Σεραφετινίδης, “Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική”, Αθήνα, 1990.
9. (Σεραφετινίδης 19980): Α. Σεραφετινίδης, “Βασικές αρχές λειτουργίας των Lasers”, Αθήνα, 1980.
10. (Πακίτης, 1995): Σ. Πακίτης, “Φίλτρα”, Αθήνα, 1995.