

Μέτρηση απόστασης-Ευθυγράμμιση

Μετρολογία laser

- Είναι σήμερα δεδομένο ότι διατάξεις που βασίζονται σε συστήματα laser κάνουν εφικτές διάφορες μετρήσεις που ήταν αδύνατες πριν την εμφάνιση των laser ή τουλάχιστον ήταν περιορισμένης ακρίβειας.
- Π.χ. για μετρήσεις πάρα πολύ μικρών αποστάσεων-μετατοπίσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το laser με την μορφή του συμβολόμετρου με ακρίβεια τουλάχιστον μερικά δέκατα του μικρόμετρου.
- Αντίστοιχα σε μετρήσεις μεγάλων αποστάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το laser, είτε με τη μέθοδο της τηλεσκόπησης (τηλεμετρίας), είτε με τη μέθοδο της διαμορφωμένης δέσμης.
- Στην περίπτωση της τηλεσκόπησης, η μέτρηση της απόστασης βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ της εκπομπής και της λήψης ενός παλμού laser μετά από την ανάκλαση του (ή σκέδαση του) στο στόχο του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την απόσταση.
- Αντίστοιχα, στη περίπτωση της διαμορφωμένης δέσμης η μέτρηση της απόστασης βασίζεται στην μεταβολή της φάσης μιας εξωτερικά διαμορφωμένης δέσμης laser.

➤ Από τις πρώτες εφαρμογές μετά την ανακάλυψη του laser ήταν οι εφαρμογές μετρολογίας, με κύριο εκφραστή τους τις διατάξεις ευθυγράμμισης και τα αποστασιόμετρα.

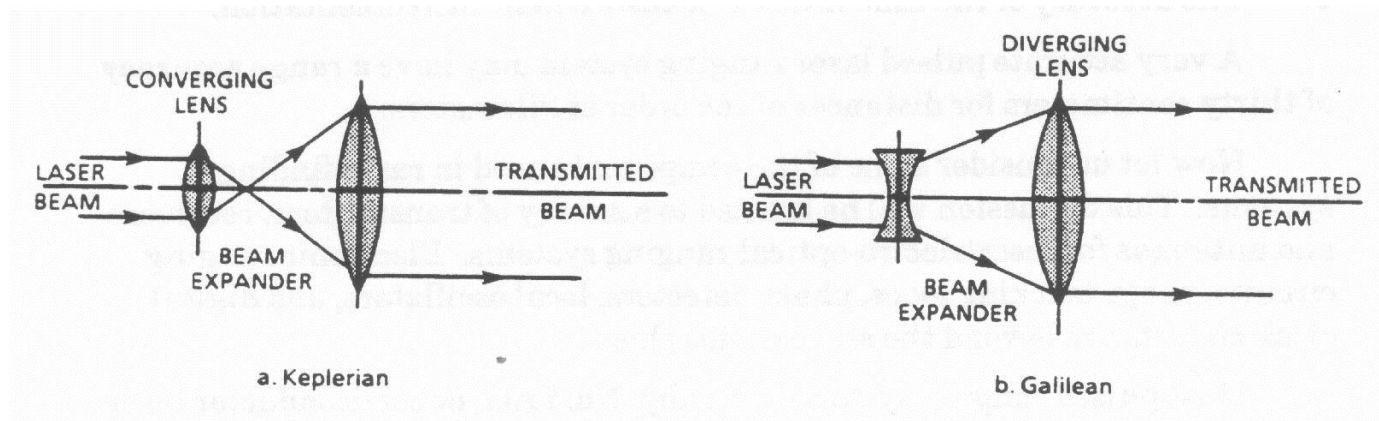
➤ Στο τομέα αυτό, η ανάπτυξη αυτής της νέας τεχνολογίας έδωσε λύσεις σε διάφορα προβλήματα όπως:

- ✓ Ευθυγραμμίσεις
- ✓ Καθετότητες
- ✓ Παραλληλίες
- ✓ Αλφαδιάσματα
- ✓ Ζυγοσταθμίσεις
- ✓ Τρισδιάστατες μετρήσεις ακριβείας στον χώρο
- ✓ Σάρωση και αποτύπωση τρισδιάστατων αντικειμένων στον χώρο
- ✓ Παρακολούθηση και καταγραφή κινουμένων αντικειμένων (πχ. ρομπότ)

➤ Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε αναλυτικότερα τις εφαρμογές ευθυγράμμισης και μέτρησης απόστασης.

Ευθυγράμμιση με laser

- Το laser αποτελεί την τέλεια έκφραση μιας πραγματικής, ορατής (για laser στην ορατή περιοχή), μεγάλου μήκους ευθείας γραμμής, η οποία μπορεί να χρησιμοποιείται σαν γραμμή αναφοράς.
- Αν ειδικά συστήματα laser συνδυαστούν με τηλεσκόπια, η ευθεία αυτή γραμμή έχει σχεδόν σταθερή διάμετρο για μεγάλη απόσταση.
- Εμπορικά συστήματα βασισμένα σε laser He-Ne με κατάλληλους φακούς υπάρχουν από την δεκαετία του 70, τα οποία μπορούσαν να προσφέρουν δέσμη με διάμετρο 10 cm σε απόσταση 1.6 km.
- Έτσι, η διαδικασία ευθυγράμμισης για πληθώρα κατασκευαστικών ή μηχανολογικών εφαρμογών έγινε απλούστερη (π.χ. η σωστή τοποθέτηση εξαρτημάτων ή δομικών μονάδων σε κατασκευές είτε ο καθορισμός της απόκλισης από κάποιον δεδομένο άξονα σε οριζόντια ή κατακόρυφη διεύθυνση).
- Παραδείγματα εφαρμογών είναι τα συστήματα ευθυγράμμισης για κατασκευές τούνελ, τοποθέτηση σωλήνων, κατασκευές γεφυρών, αλλά και τοποθέτηση των δομικών μονάδων σε μεγάλες μηχανές.

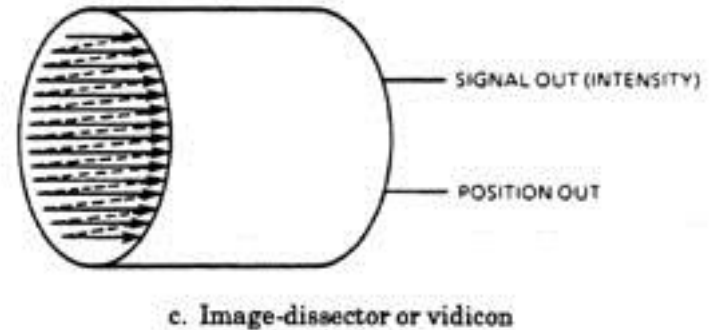
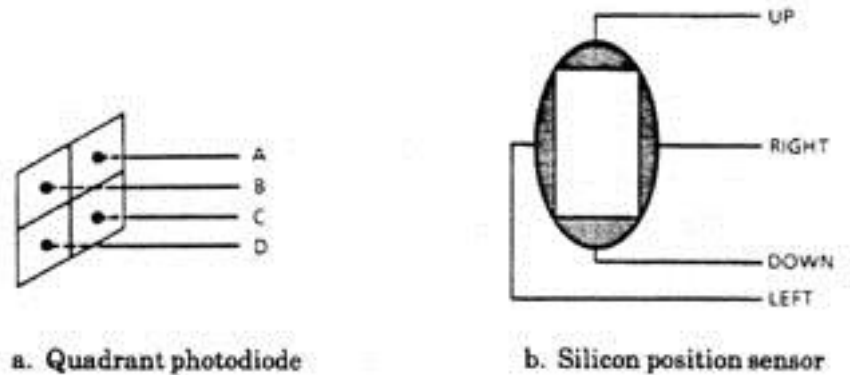


- Η βασικότερη παράμετρος σε σύστημα ευθυγράμμισης με laser είναι η απόκλιση της δέσμης, καθώς αυτή καθορίζει την μέγιστη απόσταση όπου η εφαρμογή ευθυγράμμισης λειτουργεί σωστά.
- Ένα σύστημα ευθυγράμμισης απαιτεί την χρήση συστήματος laser με την μικρότερη δυνατή απόκλιση.
- Ταυτόχρονα τα laser συνδυάζονται με ειδικά τηλεσκόπια, διατάξεις που σχηματίζονται με συνδυασμό φακών και οδηγούν στην ελάττωση της απόκλισης.
- Ταυτόχρονα όμως, ένα τηλεσκόπιο αυτού του τύπου μεγαλώνει την διατομή της δέσμης, ιδιότητα απαραίτητη για το σύστημα ευθυγράμμισης που επιβάλλεται για λόγους ασφαλείας.

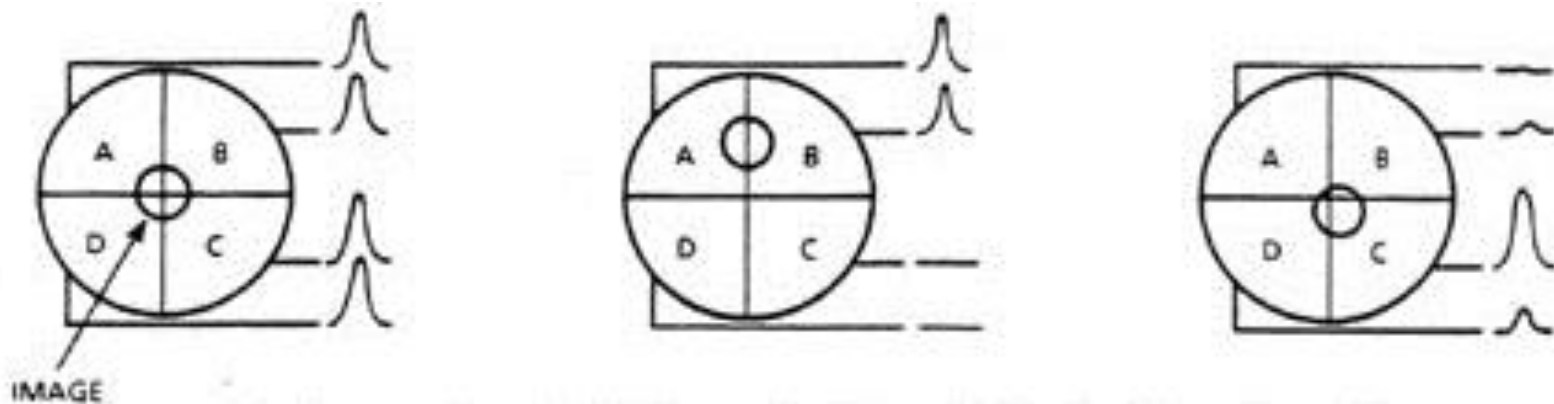
➤ Ένα από τα τεχνολογικά προβλήματα που αντιμετώπισαν οι εφαρμογές ευθυγράμμισης ήταν ο ορισμός του κέντρου της δέσμης κατά την διαδικασία της ευθυγράμμισης αλλά και η μέτρηση της απόκλισης από τον οριζόμενο άξονα.

➤ Στα πλαίσια αυτά έχουν αναπτυχθεί ειδικοί ανιχνευτές που παρουσιάζουν χωρική ευαισθησία (position sensitive detector).

➤ Κλασικά παραδείγματα τέτοιων ανιχνευτών είναι η φωτοδίοδος τεταρτημορίου, ο αισθητήρας θέσης πυριτίου και το vidicon.



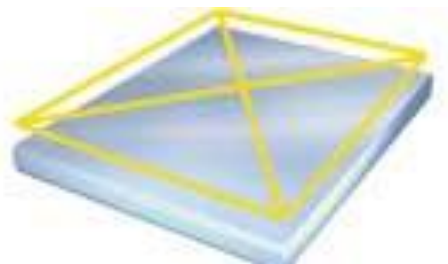
Ανιχνευτές με ευαισθησία θέσης



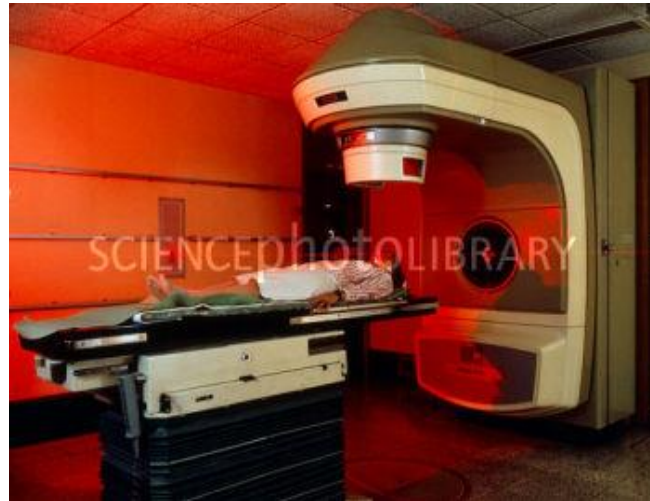
➤ Η φωτοδιόδος τεταρτημορίου είναι ο απλούστερος ανιχνευτής με ευαισθησία θέσης. Αποτελείται από τέσσερις ίσης επιφάνειας περιοχές, καθεμία από τις οποίες λειτουργεί αυτόνομα σαν ανιχνευτής και έχει χωριστή έξοδο.

➤ Η θέση που προσπίπτει μια δέσμη μπορεί να βρεθεί από την σχετική ένταση των τεσσάρων σημάτων στην έξοδο. Τα σήματα θα είναι ίσα μόνο αν η δέσμη προσπίπτει ακριβώς στο κέντρο, ενώ η απόκλιση δίνεται από το τεταρτημόριο με το μεγαλύτερο σήμα.

➤ Το ποσοστό και η κατεύθυνση μετακίνησης σε άξονα «πάνω-κάτω» δίνεται από το μέγεθος της ποσότητας $(A+B)-(C+D)$, ενώ αντίστοιχα για τον άξονα δεξιά-αριστερά» από την ποσότητα $(A+D)-(C+B)$.



- Σχετικά με την ευθυγράμμιση με laser, αυτή αφορά μία πληθώρα εφαρμογών με πάρα πολύ ακριβή αποτελέσματα.
- Π.χ. τοποθέτηση δομικών μονάδων σε κατασκευές μεγάλων διαστάσεων με ακρίβεια καλύτερη από 1 mm (τοποθέτηση πτερυγίων σε μηχανές αεροσκαφών ή έλικα και άξονα του σε πλοία).
- Μέτρηση αποκλίσεων από άξονα ευθυγράμμισης με ακρίβεια της τάξης 1 mrad (1 δευτερόλεπτο της μοίρας).
- Με χρήση ανιχνευτών με ευαισθησία θέσης είναι επίσης εφικτή η αναγνώριση μετατοπίσεων 50 μm.



Μέτρηση απόστασης με laser

- Οι ιδιότητες οι οποίες προσφέρονται από μία δέσμη laser, έδωσαν την δυνατότητα ανάπτυξης διαφόρων τεχνικών μέτρησης απόστασης με μεγάλη ακρίβεια.
- Η μέτρηση της απόστασης με laser μπορεί να αφορά πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές αποστάσεις, με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα, την μέτρηση της απόστασης Γης-Σελήνης με ακρίβεια 15 cm (σε μία απόσταση της τάξης των 380000 km) που πραγματοποιήθηκε το 1969, αφού πρώτα τοποθετήθηκε στην επιφάνεια της Σελήνης ειδικό σύστημα ανακλαστήρων από τους αστροναύτες του Απόλλων 11.

Οι κύριοι μέθοδοι μέτρησης απόστασης με laser είναι τρεις:

- τηλεμετρία,
- διαμορφωμένη δέσμη
- συμβολομετρία.

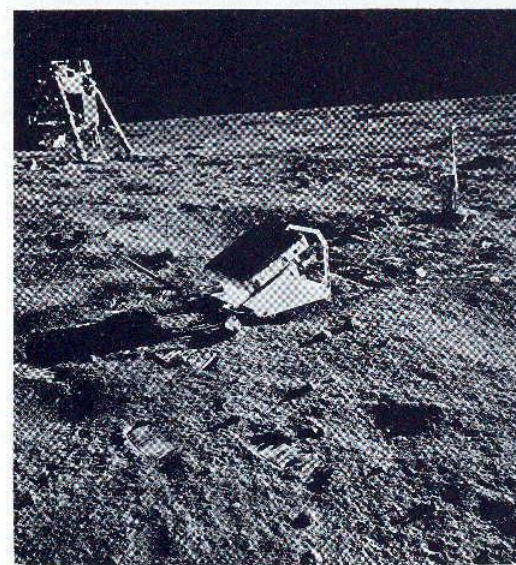
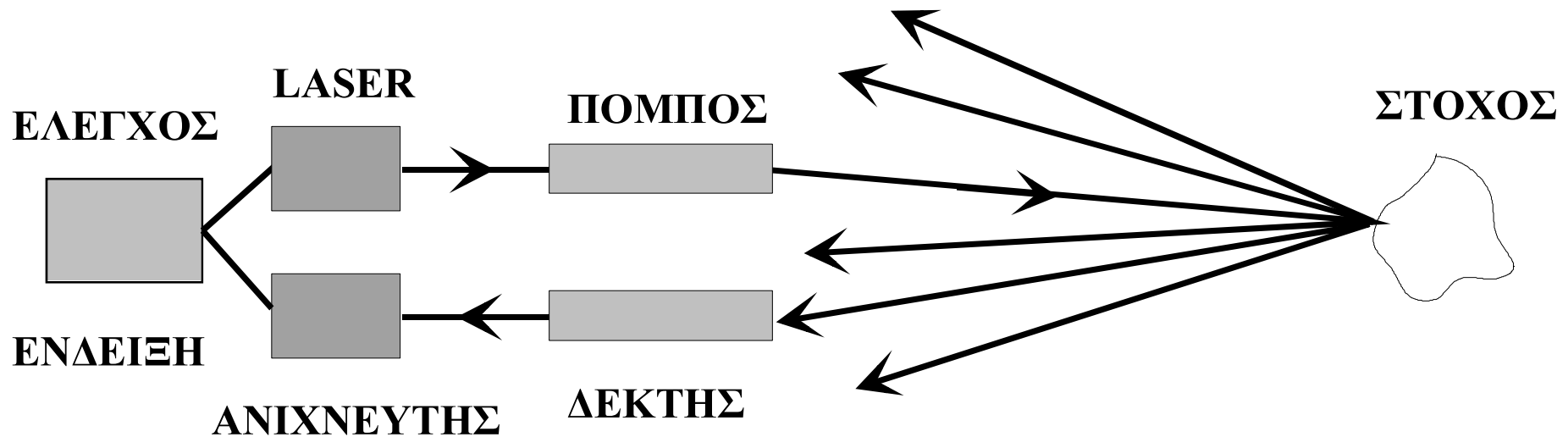


Fig. 9.10. Laser retroreflector on the surface of the moon. (Photograph by courtesy of N.A.S.A.)



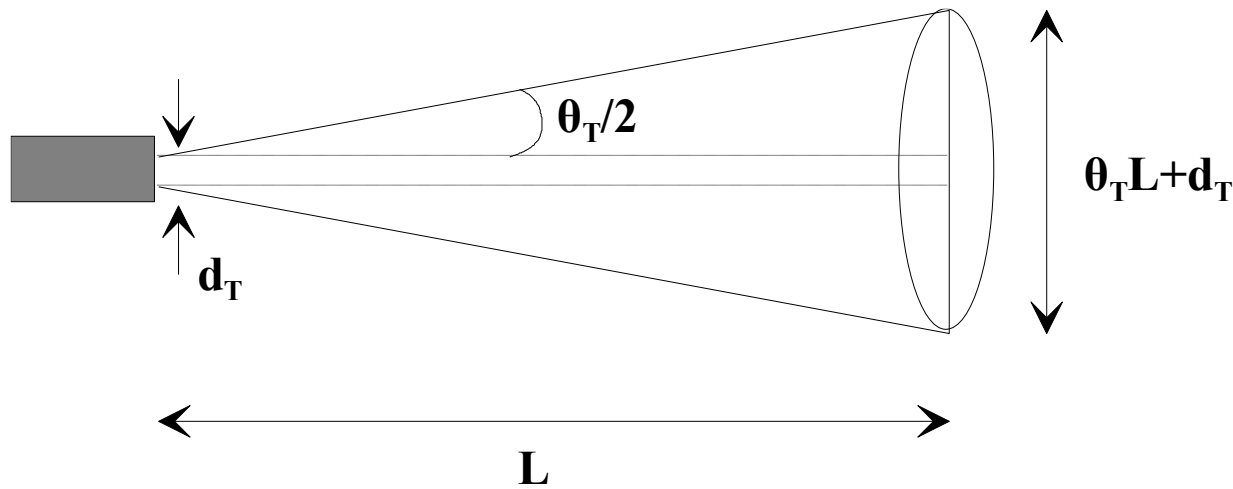
Τηλεμετρία.



Διάταξη LIDAR

- Η απλούστερη διάταξη μέτρησης απόστασης αφορά την μέτρηση μεγάλων αποστάσεων με τηλεμετρία και βασίζεται στην ίδια φυσική αρχή με αυτή του RADAR.
- Η μόνη διαφορά μεταξύ RADAR και τηλεμετρίας laser είναι το μήκος κύματος της χρησιμοποιούμενης ΗΜ ακτινοβολίας και έχει εισαχθεί ο τεχνολογικός όρος LIDAR κατ' αντιστοιχία του RADAR.

- Μία τυπική διάταξη LIDAR βασίζεται σε ένα παλμικό laser αρκετής ισχύος, η δέσμη του οποίου μέσω κατάλληλου πομπού οδηγείται σε στόχο του οποίου την απόσταση θέλουμε να μετρήσουμε.
- Η δέσμη στο στόχο υφίσταται ανάκλαση-σκέδαση (ανάλογα με την ποιότητα της επιφάνειας της) και μέρος της εκπεμπόμενης ισχύος να επιστρέφει σε κατάλληλο σύστημα δέκτη-ανιχνευτή.
- Στη συνέχεια, η απόσταση του στόχου L μπορεί να υπολογιστεί από τον χρόνο ταξιδιού της δέσμης Δt σύμφωνα με την σχέση $L=(1/2)c\Delta t$, όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και ο παράγοντας $1/2$ σχετίζεται με το γεγονός ότι η δέσμη ταξιδεύει δύο φορές την απόσταση μεταξύ του συστήματος μέτρησης και του στόχου.
- Για απόσταση 15 m, το Δt είναι 0.1 μsec . Άρα, υπάρχει ανάγκη χρήσης παλμών laser μικρής χρονικής διάρκειας (της τάξης nsec) καθώς σε διαφορετική περίπτωση θα υπάρχει αλληλεπικάλυψη των παλμών εκπομπής και λήψης.
- Αντίστοιχο μπορεί να δημιουργηθεί πρόβλημα με τον ρυθμό επανάληψης του laser που δεν πρέπει να είναι μεγάλος (για 100 Hz, η μέγιστη απόσταση είναι 106 m, ενώ στα 10000 Hz, 104 m).

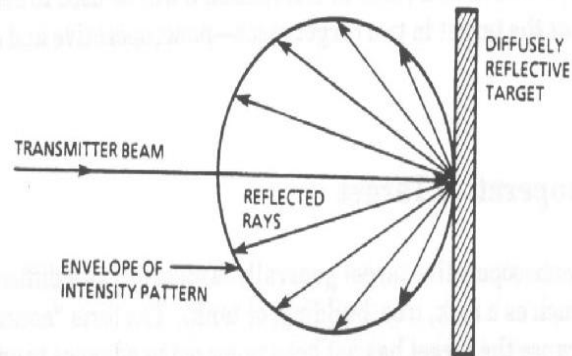


- Ένα σημαντικό μέγεθος ενός συστήματος LIDAR είναι η αναγκαία εκπεμπόμενη ισχύς, η τιμή της οποίας καθορίζεται από διάφορους παραμέτρους όπως ποιότητα επιφάνειας και μέγεθος στόχου, μέγεθος και ευαισθησία ανιχνευτή, απόκλιση δέσμης laser κλπ.
- Έστω ότι η δέσμη στην έξοδο του πομπού έχει διάμετρο d_T και απόκλιση θ_T . Αν η δέσμη οδηγηθεί σε στόχο σε απόσταση L , τότε η διάμετρος της δέσμης στο σημείο του στόχου θα είναι $\theta_T L + d_T$. Επομένως, η πυκνότητα ισχύος της δέσμης στο στόχο I_Σ θα είναι:

P_T η ισχύς πομπού, T συντελεστής με τιμή από 0 έως 1 που αφορά απορρόφηση και σκέδαση στον χώρο διάδοσης της δέσμης

$$I_\Sigma = \frac{4P_T T}{\pi(\theta_T L + d_T)^2}$$

- Η δέσμη στην συνέχεια, θα ανακλαστεί-σκεδαστεί στον στόχο.
- Ανάλογα με την συμπεριφορά ανάκλασης-σκέδασης, έχουμε δύο είδη στόχων: τους μη συνεργαζόμενους και τους συνεργαζόμενους.
- Στην πρώτη περίπτωση, ο στόχος δεν είναι κατάλληλα προετοιμασμένος για να λειτουργήσει σαν ανακλαστήρας οπτικής ακτινοβολίας (σαν παράδειγμα πέτρα, κτίριο, δένδρο κλπ), οπότε δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη ανακλαστικότητα.
- Αν η ανακλαστικότητα δεν είναι γνωστή, συνήθως χρησιμοποιείται μία τιμή της τάξης 0.2 (20%).
- Όμως, είναι φανερό ότι ο στόχος στην περίπτωση αυτή δεν λειτουργεί σαν ανακλαστήρας αλλά προκαλεί μία διάχυτη σκέδαση μέσα σε μία ημισφαιρική δομή που έχει μέγιστο στον άξονα διάδοσης της αρχικής δέσμης.



- Αν η ανακλαστικότητα του στόχου είναι R και η διάμετρος του d_Σ (θεωρώντας κυκλικό στόχο), η ανακλώμενη ισχύς P_Σ θα είναι:

$$P_\Sigma = I_\Sigma R \frac{\pi d_\Sigma^2}{4}$$

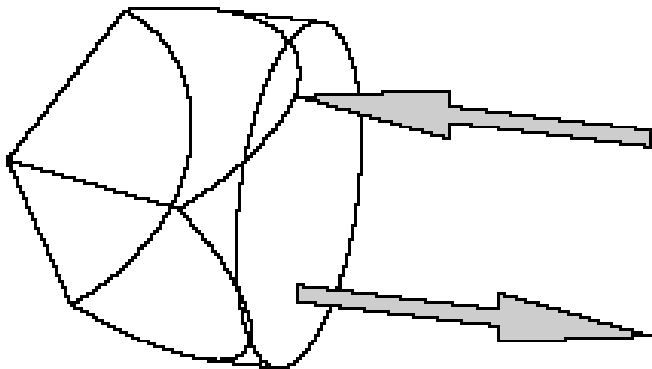
- Τέλος, για να υπολογίσουμε την ισχύ που φτάνει στον δέκτη, θα θεωρήσουμε ότι η ανακλώμενη ισχύς διαμοιράζεται σε ένα ημισφαίριο ακτίνας L (απόσταση πομπού-στόχου).
- Ο δέκτης θα δέχεται ποσοστό ισχύος ίσο με το λόγο της επιφάνειας του προς την επιφάνεια του ημισφαιρίου ακτίνας L . Δηλαδή, η ισχύς P_R σε δέκτη με διάμετρος d_R θα δίνεται από μία εξίσωση της μορφής:

$$P_R = P_\Sigma T \left(\frac{\pi d_R^2 / 4}{2\pi L^2} \right)$$

- Με βάση τα παραπάνω, ο λόγος της ισχύος στο δέκτη προς την ισχύ στον πομπό (για μεγάλες τιμές του L) δίνεται από:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{R d_R^2 d_\Sigma^2 T^2}{8L^2 (\theta_T L + d_T)^2} \approx \frac{R d_R^2 d_\Sigma^2 T^2}{8L^4 \theta_T}$$

- Σαν παράδειγμα, ας δούμε την περίπτωση όπου $P_T=10 \text{ kW}$, $\theta_T=1 \text{ mrad}$, $R=1 \text{ km}$, $d_R=d_\Sigma=0.1 \text{ m}$ και $T=0.8$ (το R θα θεωρηθεί 0.2), βρίσκουμε ότι $P_R \approx 10^{-7} \text{ W}$.
- Στην περίπτωση του συνεργαζόμενου στόχου λαμβάνεται ειδική μέριμνα ώστε να υπάρχει ενισχυμένη ανάκλαση προς την κατεύθυνση του δέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ειδικού συστήματος ανάκλασης προς την ίδια ακριβώς διεύθυνση όπως για παράδειγμα ο οπισθο-ανακλαστήρας (retro-reflector).
- Στην περίπτωση αυτή, η ανακλαστικότητα φτάνει το 1 (100%) αλλά ταυτόχρονα εισάγονται διάφοροι άλλοι παράμετροι στον υπολογισμό της ισχύος στον δέκτη. Αν d_A είναι η διάμετρος του οπισθο-ανακλαστήρα, η ισχύς στο δέκτη P_R δίνεται:



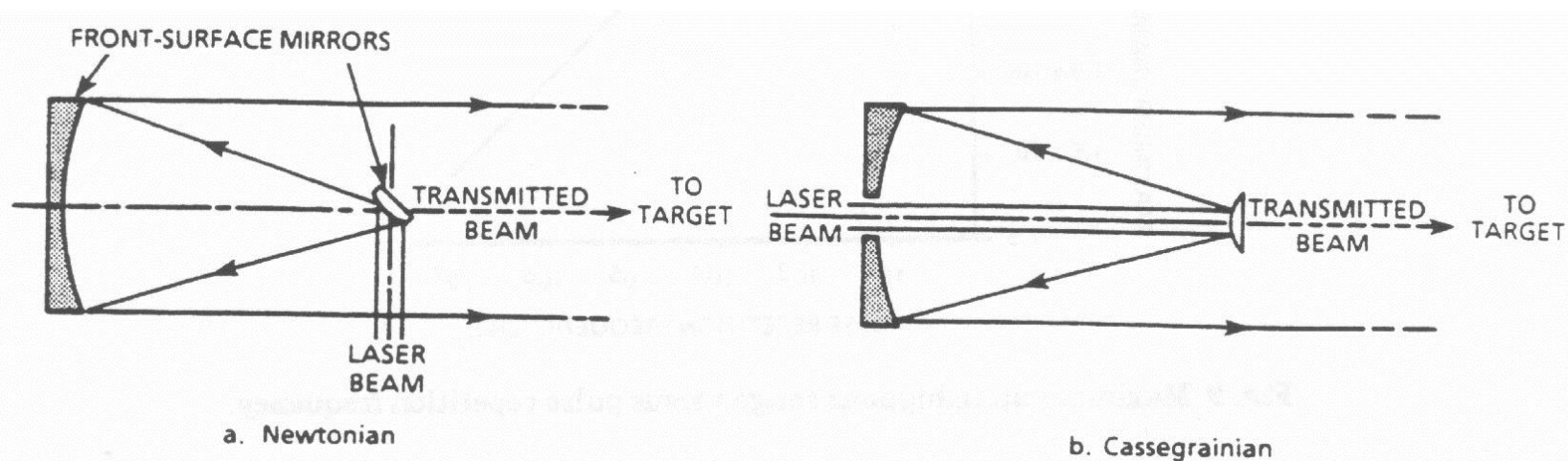
$$P_R = \frac{d_R^2 d_A^2 T^2}{(2d_A + 2.44L\lambda/d_A)^2 (\theta_T L + d_T)^2} P_T$$

- Για μετρήσεις σε μεγάλη απόσταση ($2.44\lambda L/d_A \gg 2d_A$ και $\theta_T L \gg d_T$), ή για μικρές αποστάσεις ($2.44\lambda L/d_A \ll 2d_A$), η εξίσωση γίνεται:

$$P_R = \frac{d_R^4 d_A^2 T^2}{(2.44L)^2 R^4 \theta_T^2} P_T \qquad P_R = \frac{d_R^2 T^2}{4(\theta_T L + d_T)^2} P_T$$

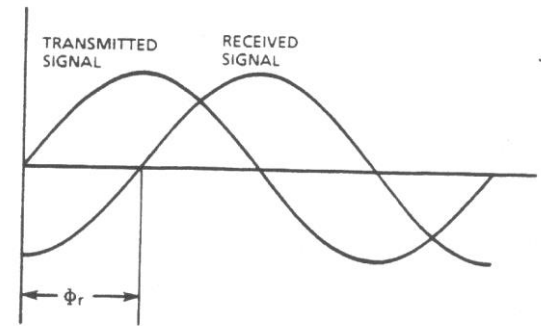
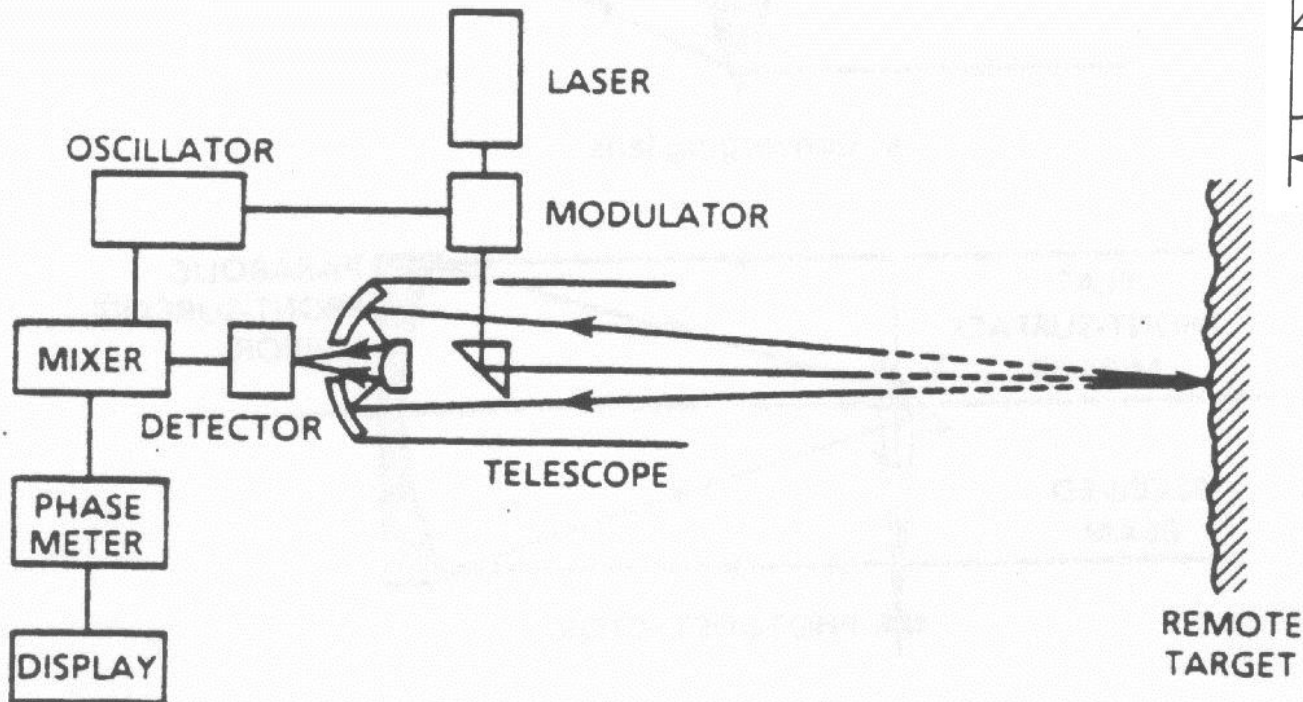
- **Σαν παράδειγμα, στη περίπτωση όπου $P_T=10$ kW, $\theta_T=1$ mrad, $R=1$ km, $d_R=d_\Sigma=0.1$ m, $d_A=0.03$ m και $T=0.8$ (το R θα θεωρηθεί 1), βρίσκουμε ότι $P_R \approx 2$ W, τιμή πάρα πολύ μεγαλύτερη από αυτή που βρήκαμε για μη συνεργάσιμο στόχο.**
- **Φυσικά, είναι φανερό ότι η λύση του συνεργάσιμου στόχου απαιτεί και πρόβλεψη-προετοιμασία της μέτρησης αλλά και άμεση επαφή με τον στόχο.**
- **Μπορεί όμως να δώσει πάρα πολύ καλά και ακριβή αποτελέσματα όπως για παράδειγμα η μέτρηση της απόστασης γης-σελήνης η οποία πραγματοποιήθηκε με σύστημα 100 οπισθο-ανακλαστήρων, καθένας με διάμετρο 4 cm, στην επιφάνεια της σελήνης, που είχε σαν αποτέλεσμα διάμετρο δέσμης στον δέκτη 16 km.**

- Μία βασική παράμετρος στα συστήματα LIDAR είναι η απόκλιση της δέσμης, καθώς η ισχύς στο δέκτη είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόκλισης. Για να ελαττωθεί η απόκλιση χρησιμοποιούμε τηλεσκόπιο το οποίο ταυτόχρονα μεγαλώνει και την διατομή της δέσμης για λόγους ασφαλείας.
- Πομπός και δέκτης του LIDAR μπορεί να είναι το ίδιο τηλεσκόπιο. Η εκπομπή γίνεται συνήθως ομοαξονικά με την λήψη, το κάτοπτρο έχει μεγάλη διάμετρο και υπάρχει ειδική οπτική διάταξη για την εστίαση της επιστρεφόμενης δέσμης στον ανιχνευτή.
- Τα συστήματα LIDAR χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές αλλά και σε μέτρηση/παρακολούθηση αντικειμένων από μακριά.



Μέθοδος διαμορφωμένης δέσμης

- Μία άλλη τεχνική μέτρησης μεγάλων-μεσαίων αποστάσεων χρησιμοποιεί σταθεροποιημένα λέιζερ συνεχούς λειτουργίας και βασίζεται στην ημιτονική διαμόρφωση του πλάτους της δέσμης (ονομάζεται και τηλεμετρία διαμορφωμένης δέσμης).



- Η δέσμη από λέιζερ συνεχούς λειτουργίας, με πολύ καλή συμφωνία και μονοχρωματικότητα, διαμορφώνεται κατά πλάτος με κατάλληλο διαμορφωτή και στέλνεται προς στόχο, του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την απόσταση.
- Η ανακλώμενη-σκεδαζόμενη από το στόχο δέσμη συλλέγεται με κατάλληλο τηλεσκόπιο και οδηγείται σε ανιχνευτή και κατάλληλα ηλεκτρονικά για αναγνώριση φάσης.
- Ο χρόνος ταξιδιού της δέσμης t_R σχετίζεται με την διαφορά φάσης $\Delta\phi_r$ μεταξύ των ημιτονοειδών σημάτων εκπομπής και λήψης

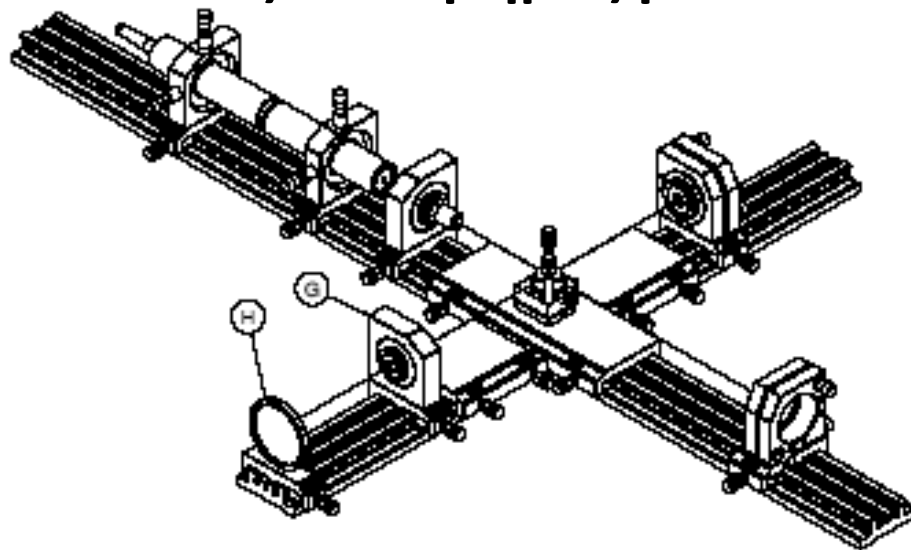
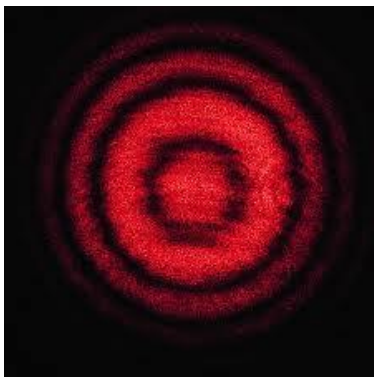
$$L = (1/2)ct_R = \frac{c\Delta\phi_r}{2\omega_{\text{mod}}}$$

- Σχετικά με τις ικανότητες ενός συστήματος μέτρησης απόστασης με διαμορφωμένη δέσμη, η συχνότητα διαμόρφωσης καθορίζει την μέγιστη μετρούμενη απόσταση, η οποία δίνεται από την σχέση: $L_{\max} = c/2f_{\text{mod}}$ (π.χ. για συχνότητα διαμόρφωσης 100 kHz, η μέγιστη μετρούμενη απόσταση είναι 1.5 km).
- Το σύστημα είναι ικανό για μετρήσεις με ακρίβεια καλύτερη από 1 cm για αποστάσεις μερικά km. Ένα σημείο που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή είναι η ατμοσφαιρική κατάσταση ανάλογα με το είδος του laser που χρησιμοποιείται.
- Σαν παράδειγμα, το laser CO₂ λειτουργεί καλύτερα σε ομίχλες, όμως τα laser He-Ne, διοδικά και Nd:YAG laser ευθυγραμμίζονται πιο εύκολα λόγω του μήκους κύματος που διαθέτουν.

Συμβολομετρία.

- Η ακριβέστερη μέθοδος μέτρησης μικρών αποστάσεων και μετακινήσεων είναι η συμβολομετρία, τεχνική με παλιές μεν ρίζες, που όμως πριν το laser είχε περιορισμένες δυνατότητες (αποστάσεις της τάξης cm).
- Μετά την ανακάλυψη της τέλει σύμφωνης πηγής, το laser, η συμβολομετρία αναπτύχθηκε ταχύτητα σαν μία τεχνική μεγάλης ακρίβειας και ευελιξίας.
- Σήμερα, οι συμβολομετρικές διατάξεις μέτρησης απόστασης παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτές της τηλεμετρίας και της διαμορφωμένης δέσμης, όμως ταυτόχρονα παρουσιάζουν και πολλές απαιτήσεις σε σχέση με τις ιδιότητες της πηγής laser αλλά τις ανάγκες σταθερής ατμόσφαιρας διάδοσης.
- Η βασικότερη συμβολομετρική διάταξη για μέτρηση της απόστασης είναι το συμβολόμετρο Michelson, όπου σαν πηγή χρησιμοποιείται ένα σταθεροποιημένο He-Ne laser,

- Από το σταθεροποιημένο He-Ne laser δημιουργούνται δύο δέσμες από κατάλληλο διαιρέτη, μία ως δέσμη αναφοράς και μία ως δέσμη μετακίνησης.
- Οι δύο δέσμες καταλήγουν σε οθόνη ή ανιχνευτή όπου αναπτύσσονται κροσσοί συμβολής, φωτεινός ή σκοτεινός ανάλογα με την διαφορά δρόμου των δύο δεσμών.
- Μετακίνηση του καθρέφτη μετατόπισης κατά $\lambda/4$, έχει σαν αποτέλεσμα μια αλλαγή στη διαφορά δρόμου μεταξύ των δύο δεσμών κατά $\lambda/2$ και μετατροπή ενός φωτεινού σε σκοτεινό (ή το αντίθετο).
- Επομένως, η διάταξη είναι ένας αισθητήρας μετατόπισης με ακρίβεια $\lambda/4$.



- Στην πράξη, η ακρίβεια αυτή μπορεί να γίνει μεγαλύτερη αν βαθμολογηθεί η μεταβολή της έντασης του κροσσού σε συνάρτηση με την μετακίνηση του καθρέφτη μετατόπισης, φτάνοντας τα $\lambda/20$ ή και καλύτερα.

