

STUDII CU PRIVIRE LA STABILIREA SOLUȚIEI TEHNICE ȘI A CONFIGURAȚIEI OPTIME CU CONDIȚIA ASIGURĂRII PERFORMANȚELOR IMPUSE

1. Studiu privind stabilirea configurației fizice și funcționale a radarului laser. Model matematic.

1.1 Introducere

Radarul laser în denumit engleză LADAR (LAsER Detection And Ranging) sau LIDAR (LIght Detection And Ranging), are principii de funcționare similare cu radarul cu radiație electromagnetică în domeniul lungimilor de undă milimetrice. În afară de diferențele legate de lungimea de undă a radiației folosite, ladarul folosește fascicule laser pentru a scana ținte din teren, după care procesează semnalele reflectate de către acestea pentru a crea o imagine virtuală a zonei scanate. Procesorul sistemului LADAR compară continuu modelele generate de ținte cu modelele 3D ale țintelor stocate în memoria internă.

Sistemele de descoperire a țintelor, echipate cu ladar, pot detecta obiecte și identifica caracteristici specifice ale acestora, cu o foarte bună definiție, de până la 15 cm pentru ținte aflate la distanțe de 1000 m. Un algoritm de Achiziție Automată a Țintei (AAT) procesează în mod continuu datele obținute și le compară cu modelele 3D încărcate în memorie înainte de începerea misiunii. Acest proces identifică dacă țintele din zonă au similitudini cu cele stocate în memorie când acest lucru se întâmplă se comandă scanarea suplimentară din unghiuri diferite pentru definitivarea imaginii 3D. În final se verifică sau se rejectează existența țintei. Există sisteme care apoi selectează cel mai bun unghi de atac pentru obținerea efectului dorit.

În prezent aceste sisteme sunt în proces de dezvoltare de către marile firme producătoare de componente și echipamente optoelectronice. Astfel pe 24 mai 2006 firma Lockheed Martin a câștigat un contract pentru dezvoltarea unui ladar 3D pentru US Air Force, denumit Predator destinat să echipeze vehiculele aeriene tip UAV. Sistemul este în dezvoltare până în anul 2009.

1.2 Principii de funcționare

Ladarul constituie o tehnologie optică care constă în măsurarea proprietăților radiației luminoase împrăștiată pentru a măsura distanța sau alte proprietăți ale unei ținte. Metoda cea mai folosită pentru a măsura distanța până la suprafața unui obiect constă în folosirea impulsurilor laser de mare putere. La fel ca la tehnologia radar care folosește undele radio în locul luminii, distanța până la un obiect se determină prin măsurarea intervalului de timp dintre momentul emisieii impulsului și recepția semnalului reflectat. Tehnologia ladar are importante aplicații în arheologie, geografie, geologie, seismologie,

fizica atmosferei precum și în domeniul militar. Dacă pentru tehnologia civilă este folosit acronimul LIDAR în context militar pentru radarul cu laser se face referire la acronimul LADAR. De asemenea altimetria laser și ALSM (Airborne Laser Swath Mapping) sunt tehnologii înrudite.

Principala diferență dintre radar și lidar constă în faptul că lidarul folosește lungimi de undă mult mai mici ale spectrului electromagnetic, în special în domeniul ultraviolet, vizibil sau infraroșul apropiat. Pentru detectarea unui obiect cu ajutorul radiației electromagnetice este nevoie ca dimensiunea acestuia să fie egală sau mai mare decât lungimea de undă a radiației. Din acest motiv lidarul este mult mai sensibil la aerosoli, nori sau particule, având multe aplicații în domeniul cercetării atmosferice și al meteorologiei.

Obiectul de detectat trebuie să constituie o discontinuitate dielectrică pentru a reflecta radiația electromagnetică. În cazul radarului (frecvențe în domeniul microundelor sau undelor radio) obiectele metalice au o reflectivitate semnificativă. Obiectele nemetalice precum ploaia și particulele din aer produc reflexii mult mai mici iar unele materiale aproape că nu produc reflexii de loc, fiind efectiv invizibile pentru radarul clasic.

Laserii constituie o soluție pentru această problemă datorită strălucirii fasciculului și coerenței acestuia. Domeniul spectral al laserilor este de la circa 200 nm până la 10 μm . La aceste dimensiuni undele electromagnetice sunt reflectate foarte bine de obiectele mici din aer. Acest tip de reflexie se numește retroreflexie. În funcție de tipul de reflexie există mai multe tipuri de sisteme lidar.

Cele mai comune tipuri de reflexie sunt: împrăștierea Rayleigh, Mie, Raman precum și fluorescența. Aceste metode permit efectuarea de măsurători ale fumului, ale aerosolilor, ale norilor sau ale moleculelor din aer.

Prin combinarea tehnologiei lidar cu cea GPS s-a creat posibilitatea stabilirii cu precizie atât a caracteristicilor țintei cât și a poziției acestuia. Astfel în ultimii ani s-au dezvoltat mai multe sisteme aeropurtate de supraveghere și pentru trasarea profilului terenului.

LIDARUL clasic, sau LADARUL în cazul aplicațiilor militare constă într-un telemetru cu laser combinat cu un sistem de scanare. Fasciculul laser este scanat în unul sau două plane peste ținta din teren, generând măsurătorile de distanță la intervale unghiulare specificate.

În general se folosesc două tipuri de sisteme LADAR: sisteme cu microimpulsuri și sisteme cu impulsuri de mare energie. Sistemele LADAR cu microimpulsuri s-au dezvoltat ca rezultat al creșterii puterii de calcul a procesoarelor precum și ca urmare a dezvoltării tehnologiei laser. Aceste sisteme folosesc impulsuri de frecvență ridicată cu energia pe puls de ordinul microjoule-ului. Lungimea de undă este aleasă astfel încât să se încadreze în domeniul eyesafe, de la 1,3 μm la 1,7 μm . În acest domeniu spectral mediile transparente ale ochului au transmisie optică redusă ceea ce duce la o absorbție puternică a radiației, micșorând puterea optică care ajunge pe retină. În general se

folosesc laseri cu lungimea de undă în jur de 1,54 μm ceea ce duce la reducerea riscurilor de accidentare în timpul utilizării sistemului.

Sistemele cu laseri de mare putere sunt folosite în cercetarea atmosferică, pentru măsurarea parametrilor atmosferici: înălțimea, stratificarea și densitatea norilor, temperatura, presiunea, viteza vântului, umiditatea atmosferică, conținutul de gaze (ozon, metan, oxizi de azot, etc.).

1.3 Componentele principale ale sistemelor LADAR

1.3.1 Emițătorul laser

Laserii în domeniul spectral de la 500 nm la 1100 nm sunt încă folosiți în unele aplicații. Ei au un preț mai redus însă datorită faptului că la aceste lungimi de undă ochiul are proprietăți refractive, radiația focalizată accidental pe retină poate să ajungă la densități mari de putere. Din acest motiv puterea maximă care este acceptată este limitată de menținerea lor în domeniul eye-safe (radiație sigură pentru ochi). Această cerință este impusă în majoritatea aplicațiilor.

O alternativă la micșorarea puterii laserilor în domeniul 500 ÷ 1100 nm o constituie folosirea laserilor în jurul lungimii de undă de 1550 nm care sunt eye-safe la puteri mult mai mari. Acești laseri sunt preferați și în aplicațiile militare întrucât nu intră în domeniul de lucru al aparatelor de vedere pe timp de noapte cu intensificatori de imagine care răspund în domeniul vizibil și infraroșul apropiat până la 1000 nm.

Sistemele LADAR aeropurtate pentru aplicații topografice folosesc laseri cu lungimea de undă de 1064 nm cu YAG:Nd pompați cu diode laser, iar cele pentru trasarea profilului bathymetric (fundul de apă) folosesc radiația laser de 532 nm obținută prin dublarea de frecvență a laserilor cu YAG:Nd.

Alte caracteristici importante ale laserilor sunt frecvența de repetiție, care controlează viteza de colectare a datelor și durata impulsului laser. Durata impulsului laser depinde de lungimea rezonatorului laser, de câștigul optic al barei laser precum și de viteza comutatorului laser (Q-switch) care generează impulsul laser gigant. Cu cât durata impulsului laser este mai mică, cu atât rezoluția în distanță obținută este mai bună, dacă amplificatorul și electronica de după amplificator au suficientă lărgime de bandă. În general laserii folosiți în sistemele LADAR au generează impulsuri cu durata în domeniul 25 ns ÷ 200 ps.

1.3.2 Sistemul de scanare, optica de recepție.

Viteza sistemului de scanare asigură rata de achiziție a datelor în sistem.

Există un număr de soluții tehnice pentru scanarea bidimensională în azimut și în elevație. Cele mai folosite sunt cele cu oglinzi plane oscilante (galvanoscanere), câte unul pe fiecare direcție, sau combinația dintre o oglindă oscilantă și o prismă poligonală.

Optica de recepție asigură rezoluția unghiulară însă afectează și distanța maximă de măsură prin apertura de intrare și transmisia optică a lentilelor și filtrului interferențial folosit pentru reducerea zgomotului optic.

1.3.3 Receptorul și electronica aferentă

Receptoarele folosesc fotodiode plasate în focarul obiectivelor de recepție. Fotodiodele folosite sunt de tip PIN pentru distanțe mai mici de măsură datorită responsivității mai reduse de până la 1 A/W sau de tip Avalanșă cu responsivități de ordinul zecilor de A/W folosite în aplicațiile de mare distanță.

Materialul din care este realizată fotodioda este în funcția de lungimea de undă a laserului. Astfel pentru domeniul spectral de la 500 nm la 1064 nm este folosit siliciul iar pentru laserii eyesafe sunt folosite fotodiodele cu InGaAs.

1.3.4 Sistemele de poziționare și de navigație

Sistemele LADAR montate pe platforme mobile precum avioane cu sau fără personal sau sateliții necesită folosirea de dispozitive pentru determinarea poziției absolute și orientarea senzorului. Aceste dispozitive include sistemele de poziționare globală GPS sistemele de măsurare inerțială (Inertial Measurement Unit – IMU).

2 Aplicații ale sistemelor LADAR

2.1 Echiparea roboților inteligenți pentru crearea unei hărți a terenului din fața lor, în vederea ocolirii obstacolelor. Sisteme asemănătoare sunt folosite în prezent și ca senzori anticoloziune în industria auto.

Un astfel de exemplu este prezentat în Figura 1.



Figura 1

2.2 O altă aplicație o constituie folosirea LADAR-ului în combinație cu tehnologia GPS în geologie și seismologie, pentru depistarea faliilor și denivelărilor terenului prin frunzișul pădurilor.

2.3 Sistemele LADAR aeropurtate au permis monitorizarea evoluției ghețarilor și controlul modificării zonelor de coastă.

2.4 Aplicațiile în domeniul forestier permit realizarea de măsurători ale biomasei și ale zonelor înfrunzite.

2.5 În meteorologie permit monitorizarea vitezei vântului controlul deplasării furtunilor, depistarea norilor care pot să producă grindină.

2.6 Prin plasarea unor reflectori pe suprafața lunii s-au efectuat măsurători a distanței pământ – lună cu precizii de milimetri.

2.7 Prin plasarea unui satelit al planetei marte dotat cu astfel de sistem s-a reușit ridicarea topografică precisă a acestei planete.

2.8 În fizica atmosferei LIDAR-ul este folosit pentru măsurarea concentrației de substanțe poluante.

2.9 În oceanografie este folosit pentru estimarea cantității de fitoplancton de la suprafața oceanelor.

2.10 În sistemele de monitorizare a traficului este folosit pentru determinarea vitezei mașinilor.

2.10 Deși aplicațiile militare sunt în general clasificate există suficiente date tehnice legate de acestea. Rezoluția mare le permite să fie folosite pentru identificarea țintelor precum tancuri sau alte obiective militare.

3 Tipuri constructive

Sistemele LADAR se pot împărți în două mari grupe: cu scanare și fără scanare prin folosirea tehnologiei FPA (Focal Plane Array).

În cazul sistemelor cu scanare este folosit un telemetru cu laser având rezoluția în distanță de ordinul zecilor de centimetrii, cu frecvența de repetiție a impulsurilor laser de ordinul zecilor de KHz.

Fasciculul laser este scanat peste zona cercetată cu ajutorul a două oglinzi oscilante, optica de recepție preluând succesiv impulsurile reflectate de țintă și focalizându-le pe suprafața unei fotodiode cu responsivitate ridicată. Sistemul calculează distanța până la fiecare punct al suprafeței țintei, datele fiind transmise către un sistem de calcul care reconstituie apoi imaginea tridimensională a obiectului.

Sistemele fără scanare folosesc așa numitele dispozitive FPA (focal plane array) care constau într-o matrice de fotodiode, în general cu avalanșă, peste care este focalizată imaginea țintei. Fiecărei fotodiode din matrice îi corespunde un punct al țintei

din teren. Electronica aferentă asigură calcularea distanțelor corespunzătoare fiecărui punct din imagine.

3.1 Sisteme LADAR fără scanare sau LADAR 3D

Sistemul ladar fără scanare sau LADAR-ul 3D este caracterizat prin aceea că permite obținerea unui întreg cadru cu un singur impuls laser. Acest lucru oferă unele avantaje față de sistemele convenționale cu scanarea impulsurilor laser. Cel mai important avantaj îl constituie numărul de cadre achiziționate în unitatea de timp mult mai mare. De asemenea eliminarea scanării mecanice a fasciculului laser peste suprafața unei ținte duce la mărirea fiabilității generale a sistemului.

Componenta principală o constituie matricile de fotodiode așezate în planul focal al unui obiectiv de recepție, cunoscut în literatura de specialitate sub denumirea de “3-D focal plane array” sau FPA.

Această nouă tehnologie permite achiziția mult mai rapidă a datelor ceea ce asigură achiziția practic în timp real a imaginilor 3-D ale țintelor. Acest lucru a permis dezvoltarea unor noi tehnici precum ridicarea topografică a configurației terenul în timpul zborului, trasarea traiectoriei unui obiect sau evitarea coliziunii vehiculelor.

Practic frecvența de achiziție a imaginilor 3-D este dată de frecvența de repetiție a laserului folosit.

3.1.1 Descrierea constructivă a senzorului

Datele de mai jos vor face referire la componentele și sistemele LADAR 3-D realizate de firma Advanced Scientific Concepts, Inc. din SUA care este printre pionierii acestui domeniu tehnic de ultimă oră.

Imagistica LADAR 3-D care folosește un singur impuls laser pentru fiecare cadru din imagine implică folosirea tehnologiei 3-D FPA care încorporează linii și coloane de pixeli într-un mod asemănător cu 2-D FPA care sunt specifice camerelor de luat vederi digitale. Acest lucru este prezentat în Figura 2 unde se poate vedea că piesa principală camerelor LADAR 3-D are o construcție similară cu a camerelor digitale 2-D la care pixelii care generează semnale electrice analogice sunt substituiți cu pixeli inteligenți care fiecare independent poate să măsoare distanța până la țintă.

Un impuls laser divergent care să ilumineze întreaga suprafață a ținte este emis de sistem, în mod asemănător cu flash-ul folosit de camerele de luat vederi digitale.

Impulsul laser emis declanșează un numărător intern după care trece printr-o optică de emisie care reglează divergența fasciculului astfel încât pata acestuia să acopere întreaga suprafață a ținte. După reflexia difuză pe țintă imaginea ținte este preluată de optica de recepție a camerei 3-D și focalizată pe suprafața senzorului FPA.

Întrucât fiecare pixel este format dintr-o fotodiodă tip PIN sau cu avalanșă și este cuplat electric la un numărător individual de mare viteză, la recepționarea fotonilor

focalizați de optică aceștia comandă oprirea numărătoarelor individuale. Durata de timp dintre emisia impulsului laser și impulsul de lumină recepționat de pixel înmulțită cu viteza luminii dă distanța dintre punctul de pe țintă corespunzător ariei active a pixelului și camera 3-D.

Astfel în locul unei imagini analogice generate de pixelii unei camere de luat vederi clasice se obține un profil tridimensional al imaginii țintei. Acest profil tridimensional prin prelucrări ulterioare și combinații cu imaginile color ale unei camere de luat vederi tip CCD se obține o imagine care conține informații vizuale tridimensionale și de asemenea informații numerice privind forma, dimensiunile și poziția țintei.

Fotonii focalizați de optica receptorului pe aria de detectori a hibridului FPA din Figura 3.1.1 generează perechi electron-gol în număr proporțional cu numărul de fotoni. Curentul generat de fotodiada delimitată de pixel, care are dependența de timp dată de fluxul de fotoni trece spre circuitul integrat de citire a datelor (Readout Integrated Circuit - ROIC) prin intermediul unor contacte metalice. Curentul este convertit în tensiune de către amplificatorul individual al pixelului, iar când trece de un anumit prag este format pentru a putea declanșa un ceas intern.

Acest proces este independent pentru fiecare pixel.

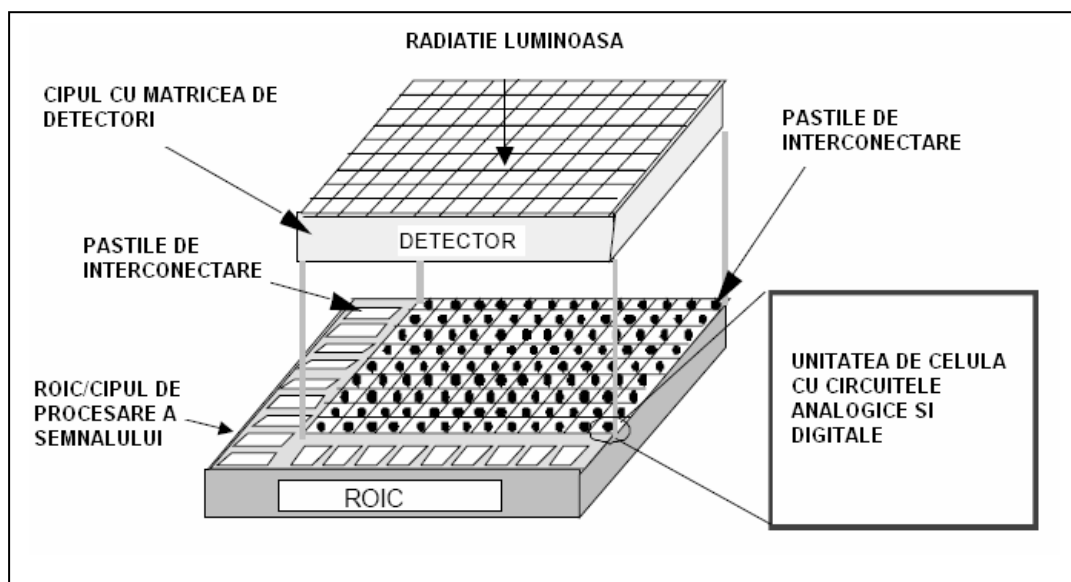


Figura 3.1.1

Există senzori pentru domeniul spectral 400÷1100 nm pe bază de siliciu precum și senzori pe bază de InGaAs pentru domeniul spectral 900÷1700. Datorită cerințelor de a folosi laseri în domeniul spectral eye safe care este de la 1350 la 1700 nm, în general se folosesc laseri în jurul lungimii de undă de 1540 nm. Din acest motiv senzorii pe bază de InGaAs sunt în prezent cei mai folosiți.

3.1.2 Exemple constructive

În Figura 3.1.2 este prezentat un sistem LADAR 3-D portabil care poate fi montat și pe un vehicul.

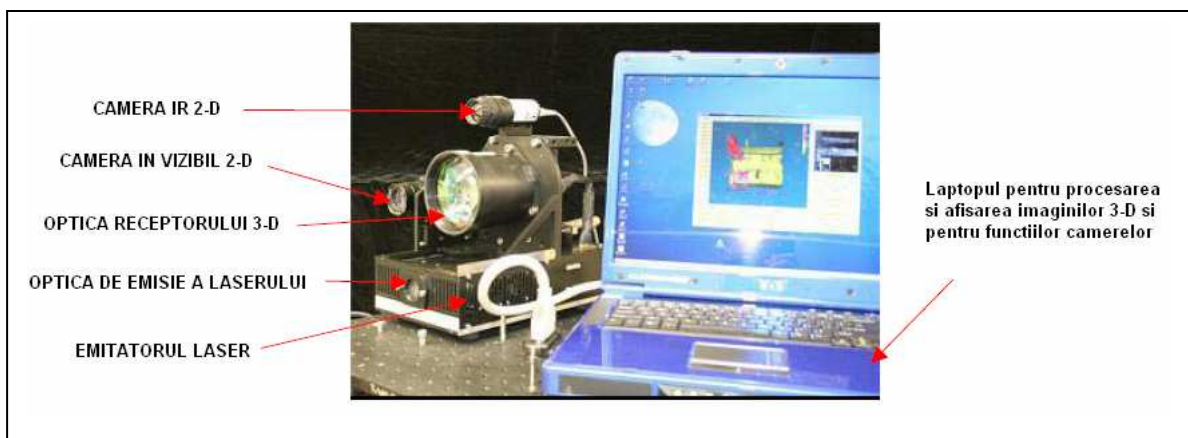


Figura 3.1.2

Sistemul este realizat cu un emițător laser cu energia în impuls de 22 mJ având durata de ordinul nanosecundelor și frecvența de repetiție de 30 Hz. Lungimea de undă de 1570 nm este în domeniul eyesafe.

De asemenea sistemul mai conține o cameră în domeniul vizibil 2-D standard, o cameră miniaturizată în domeniul IR, optica de emisie și de recepție a camerei 3-D, toate acestea cântărind mai puțin de 4,5 Kg. Cele 4 căi optice (laser, cameră 3-D, cameră vizibil 2-D și cameră IR 2-D) sunt aliniată între ele.

Câmpul de vedere al camerei LADAR 3-D este determinat de optica de recepție și de dimensiunile sensorului.

Distanța de vedere maximă a sistemului LADAR este de 1000 m.

În Figura 3.1.3 este prezentat un exemplu privind imaginile 3-D achiziționate cu acest sistem.

Poza conține șase cadre de 129x128 pixeli combinate într-una singură, peste care s-a suprapus informația de culoare a camerei de zi.

Este evidentă cantitatea de informație a modelului 3-D generat față de imaginea clasică 2-D din Figura 3.1.4.



Figura 3.1.3



Figura 3.1.4

Este evidentă cantitatea mai mare de informație din Figura 4, care conține inclusiv relațiile spațiale dintre obiecte. Prin folosirea acestei imagini se pot face măsurători ale obiectelor precum și ale distanțelor dintre ele.

Pentru a observa cum arată imaginea fără informația de culoare în Figura 3.1.5 este prezentată imaginea obținută în urma celor 6 impulsuri laser fără textura de culoare de la camera de zi 2-D.



Figura 3.1.5

Circuitul integrat de citire a informațiilor (ROIC – readout integrated circuit) permite obținerea mai multor moduri operaționale. Astfel acestea sunt:

- a) modul triggerat în care toți pixelii lucrează independent iar distanțele sunt măsurate față de un impuls de trigger generat de emisia impulsului laser;
- b) modul triggerat întârziat în care modul triggerat devine operațional după o anumită distanță;
- c) modul fereastră în care modul triggerat este suprimat iar eșantionarea apare în toți pixelii apare o dată după o anumită distanță. Acest mod de lucru este potrivit pentru observarea obiectelor mascate sau a celor aflate sub apă. În acest caz triggerarea ceasurilor pixelilor este triggerată de reflexia dată de suprafața apei.

Imaginea din Figura 4 a fost obținută în modul triggerat.

3.1.3 Date dinamice

Camera LADAR 3-D poate să lucreze practic la frecvența de repetiție a laserului adică 30 Hz. Ca urmare aceasta poate să înregistreze scene tridimensionale dinamice,

care variază în timp. Figura 3.1.6 arată patru cadre ale unei persoane mergând. Cadrele sunt luate din două direcții, din față și din lateral. Distanța de observare a fost de 50 m, fiind codată color. După cum se observă sistemul permite stabilirea coordonatelor tridimensionale, traiectoria obiectelor individuale și extrapolările privind traiectoriile.

Pentru realizarea celor de mai sus este necesară măsurarea distanțelor cu precizie la nivel de cm.

În cazul obiectelor cu viteză mare sunt necesare frecvențe de repetiție mai mari de 30 Hz, deci laseri cu frecvențe de repetiție mai mari și FPA-uri mai rapide. Acest lucru este perfect realizabil chiar cu tehnologiile cunoscute în prezent.

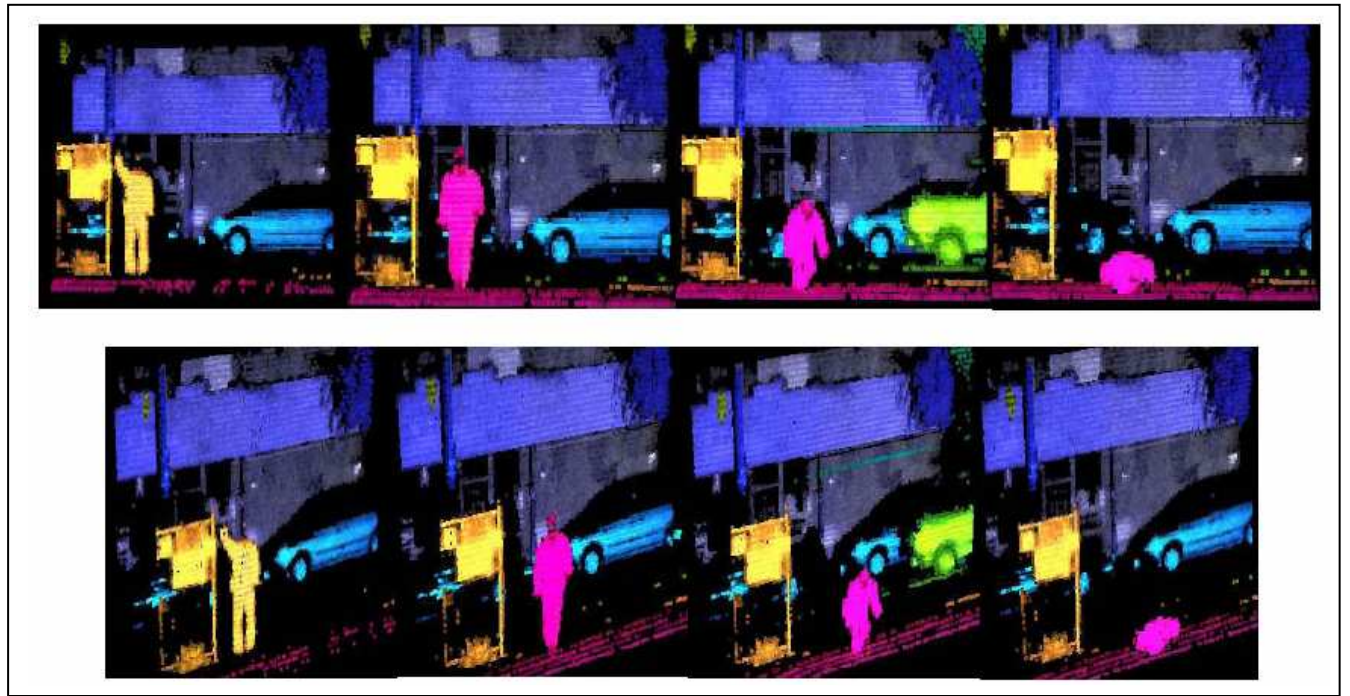


Figura 3.1.6

În Figura 3.1.7 este fotografia color a cadrelor 3-D de mai sus.



Figura 3.1.7

3.1.4 Concluzii

Conform rezultatelor obținute cu camera 3-D fabricată de firma ASC din SUA putem trage concluzia că se pot achiziționa cadre cu frecvențe de repetiție de peste 30 Hz. Fiecare cadru este achiziționat instantaneu funcție de mișcarea obiectului în câmpul de vedere al camerei LADAR. Deși s-au obținut imagini ale obiectelor în mișcare de la distanțe de numai 50 m s-au achiziționat de asemenea imagini statice de la distanțe la 1000 m. Acest lucru indică faptul că în viitor se vor putea mări distanțele de observare și vitezele de lucru prin folosirea unor laseri cu frecvențe de repetiție mai mari și a unor FPA-uri mai sensibile și cu rezoluție mai mare de 128x128 pixeli.

Deși mărirea ariei detectorului duce la creșterea timpului de citire, în mod sigur 30 de Hz nu constituie o limită superioară pentru acest tip de camere, permițând ca în viitor să poată fi urmărite și ținte cu viteze mai mari.

Aplicațiile camerelor 3-D sunt numeroase și se vor dezvolta în timp, fiind limitate numai de imaginație. Printre primele aplicații ale acestui tip de cameră o constituie sistemele anticolozionale și navigatia vehiculelor terestre sau aeriene cu sau fără personal.

Prin renunțarea la sistemele cu scanarea fasciculului laser camerele LADAR 3-D au dus la miniaturizarea sistemelor, la creșterea fiabilității și la reducerea prețurilor.

3.2 Sisteme LADAR cu scanare

Există raportate diverse sisteme LADAR cu scanare a fasciculului laser, care au capacitatea de a realiza imaginea 3-D a țintei și de a pune în evidență chiar ținte camuflate.

În acest capitol este descris un astfel de sistem care folosește un laser cu mediu activ YAG:Nd de tip microchip cu emisia pe lungimea de undă de 1,064 μm , având durata impulsului de 1,2 ns și frecvența de repetiție de 3 kHz.

La recepție s-a folosit o fotodiodă cu avalanșă cu InGaAs, iar controlul scanării fasciculului laser și eșantionarea datelor recepționate sistem s-a făcut cu un minicomputer. Rezultatele obținute se bazează pe dezvoltarea tehnologiei laserilor cu

mediu activ solid, precum laserii cu YAG:Nd tip microchip pompați optic cu diode laser, fiind stimulate de cerințele militarilor de a realiza sisteme LADAR cu capacitatea de a detecta ținte mascate de plase, frunze sau fum și de a realiza recunoașteri de ținte pe baza unei imagini 3-D.

Cerințe similare sunt transmise și de forțele de ordine precum și de diverse activități de monitorizare și supraveghere a terenului, a stării de înfrunzire a copacilor și de asemenea pentru urmărirea stării culturilor agricole.

3.2.1 Principii de lucru

Principiile de lucru ale LADAR-ului cu scanarea fasciculului laser se bazează pe principiile de lucru ale telemetrelor cu laser. Pentru măsurarea distanțelor telemetrele cu laser au în componerea lor un emițător laser în general cu mediu activ solid, o optică de colimare a fasciculului laser pentru micșorarea divergenței fasciculului laser prin care impulsul laser este direcționat pe țintă și un sistem de recepție compus dintr-un obiectiv care focalizează radiația de pe țintă pe aria activă a unei fotodiode PIN sau cu avalanșă. Semnalul electric generat de fotodiodă este amplificat de către un amplificator transimpedanță și apoi format TTL pentru a putea fi procesat de calculatorul de distanță.

Distanța până la țintă este obținută prin măsurarea timpului dus-întors de la plecarea impulsului laser și până la întoarcerea impulsului optic reflectat de țintă, înmulțirea acestei valori obținute cu viteza luminii și împărțire valorii obținute la 2.

Pentru un LADAR laser 3-D ceea ce se întâmplă la un telemetru cu laser monoimpuls este repetat pentru fiecare pixel din scena de lucru când fasciculul laser cu frecvență de repetiție ridicată este scanat astfel încât să genereze un rastru.

Caracteristicile temporale ale impulsului reflectat este dependent de țintele existente în fața fasciculului. Astfel dacă în fața fasciculului se află o singură țintă forma semnalului va fi cea din Figura 3.2.1.a.

Dacă o parte din fascicul trece pe lângă prima țintă și se reflectă de o a doua țintă aflată în spatele primei ținte forma semnalelor va fi cea din Figura 3.2.1.b. În cazul existenței a mai multor ținte pe direcția fasciculului, precum frunze sau plase de mascare vom avea forma semnalelor din Figura 3.2.1.c, adică semnale multiple aflate la distanțe crescătoare.

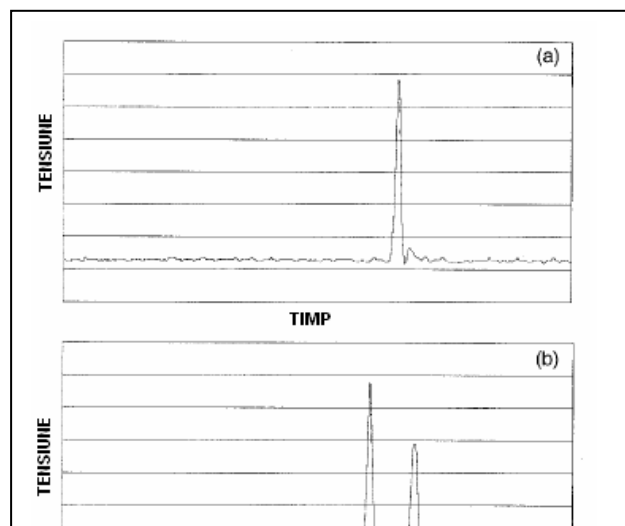


Figura 3.2.1

Recepțiile de impulsuri multiple sunt caracteristice situațiilor tactice întâlnite pe câmpul de luptă.

În mod normal telemetrul clasic măsoară distanțele până la toate țintele de pe direcția fasciculului iar utilizatorul își alege o singură distanță pentru utilizare. În realitate toate semnalele reflectate conțin informație și ar trebui utilizate și aceasta se referă la țintele mascate de frunze, plasa de camuflaj, fum de mascare sau praf generat de explozii.

Sistemul LADAR prezentat digitizează și stochează întregul tren de impulsuri pe o durată preselectabilă. Aceasta capacitate a sistemului este extrem de importantă în cazul folosirii sistemului pentru depistarea țintelor mascate.

Figure 2 illustrates the effect of digitizing and storing the return signal for a range gate of interest.

Datele obținute din întreaga zonă scanată constau într-o matrice 3-D de 8 biți pe pixel. În Figura 3.2.2 este reprezentat volunul scanat sub forma unor plane 2-D succesive.

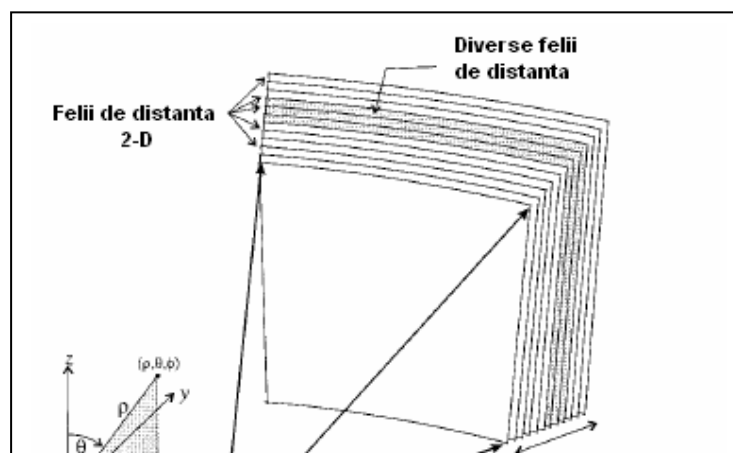


Figura 3.2.2

Volumul de date este determinat de parametrii de scanare și de lungimea de digitizare a semnalelor recepționate de către fotodioda cu avalanșă. Separarea temporală dintre felile de distanță este dată de frecvența de digitizare f_d conform formulei de mai jos,

$$r = \frac{c}{2f_d} \quad 3.2.1$$

Unde c este viteza luminii.

Datele obținute pot fi afișate în diverse moduri, de la o imagine 2-D cu variații de intensitate sau de culoare, până la o randare 3-D completă a întregului volum de date. Aceste moduri de afișare vor fi prezentate în paragraful 3.2.4,

3.2.2 Arhitectura sistemului LADAR

Schema bloc al LADAR-ului cu scanarea fasciculului laser se bazează pe principiile de funcționare ale telemetrelor cu detecție directă. Fasciculul generat de un emițător laser de tip microchip YAG:Nd pompat optic cu diode laser și comutat optic pasiv, este direcționat către oglinzile scannerului 2-D, care direcționează rastrul format de petele succesive ale impulsurilor laser peste tinta din teren.

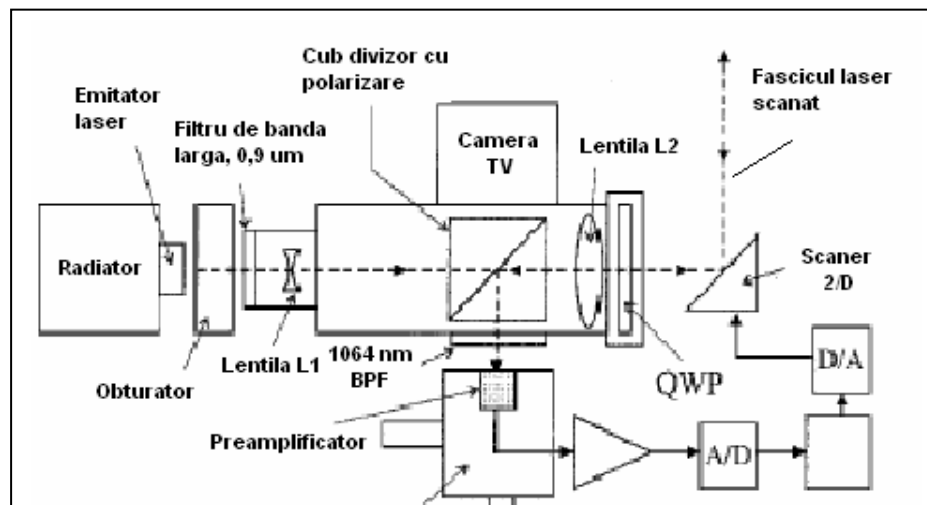


Figura 3.3.1

Radiația care ajunge la țintă este reflectată către optica de recepție care este comună cu calea de emisie. Separarea emisie de recepție se face prin folosirea polarizării fasciculului laser.

Semnalele recepționate sunt digitizate și stocate, rezultând o matrice de date 3-D reprezentând volumul de interes.

Emițătorul laser are următoarele caracteristici:

- Lungimea de undă: 1,064 μm ;
- Energia în impuls: 6 μJ ;
- Durata impulsului: 1,2 ns;
- Frecvența de repetiție: 3,0 kHz.

Deși lungimea de undă a fasciculului laser este în zona de risc crescut, datorită energiei foarte mici acesta se încadrează în clasa 3b, în concordanță cu cerințele standardului Z136.1 al Institutului American de Standardizare (ANSI).

Pentru a micșora la maxim riscul folosirii acestui laser în schema optică a fost introdus un obturator optic care permite trecerea fasciculului laser numai când scanerul laser sunt active.

Tot din motive de reducere a riscului la ieșirea din laser a fost poziționat un filtru de bandă largă care taie posibila radiație scăpată de la diodele laser de pompaj optic al laserului cu YAG:Nd.

Lentila divergentă L1 împreună cu obiectivul L2 formează o lunetă de colimare care are rolul de micșorare a divergenței fasciculului laser până la nivelul de aproximativ 100 μrad . Între cele 2 lentile este intercalat un cub divizor cu polarizarea fasciculului.

Imediat după lentila L2 radiația fasciculului laser polarizată liniar este transformată în radiație polarizată circular de către o lamă sfert de undă cu diametrul de 35 mm.

Pentru scanare s-au folosit două scanere galvanometrice, care scanează radiația sub forma unui rastru 2-D.

Radiația reflectată de țintă este colectată tot de oglinzile scannerului și direcționată de către cubul divizor către o fotodiodă cu avalanșă cu InGaAs iar apoi semnalul electric este preluat de un preamplificator Fujitsu model RM5W231DR.

Preamplificatorul are o bandă de 2,5 GHz și un diametru de 30 μm .

Luând în considerare focala obiectivului de recepție de 100 mm și diametrul ariei active a fotodiodei rezultă un câmp optic al receptorului de 300 μrad .

După preamplificator a fost folosit un modul de amplificare model LN cu banda de 500 MHz, rezultând semnalele care sunt preluate de către minicomputer.

Pentru conversia analog digitală s-a folosit o placă de achiziție Acqiris DP210 cu frecvența de 2 giga eșantioane/s.

Pentru scanarea fascicului laser s-au folosit două galvanoscanere cu oglinzi oscilante, controlate tot de către minicalculator prin intermediul unei placi de comandă care generează tensiunile analogice. Minicalculatorul validează și secvența de digitizare a datelor recepționate.

Întrucât emițătorul laser nu este controlat din exterior, impulsul emis de către acesta trigherează și secvența de achiziție. După o întârziere selectabilă placa de achiziție începe să digitizeze semnalul de la fotodetector. Numărul de eșantionare este selectabil software.

După finalizarea achiziției datelor computerul transmite tensiunile de comandă ale galvanoscanerelor pentru următorul punct din rastu, până la finalizarea unui cadru complet.

Există 2 moduri de operare: achiziție monoimpuls și achiziție cu mediere pe 4 impulsuri consecutive.

O scanare completă de 256x256 pixeli x 256 eșantioane durează aproximativ 40 s, iar una cu mediere pe 4 impulsuri 90 s.

3.2.3 Rezultate obținute

După cum s-a menționat anterior sistemul LADAR digitizează întregul tren de impulsuri pentru fiecare poziție din scanare, permițând detectarea țintelor mascate. În urma achiziției rezultă o matrice 3-D cu dimensiunile de 256x256x256 nivele de intensitate. Astfel fiecare set de date necesită aproximativ 16, Mb de memorie în cazul stocării necomprimată.

Pentru a descrie algoritmi de procesare și tehnicile de afișare a datelor achiziționate a fost folosită ca țintă un autoturism tip camionetă de culoare albă situat la o distanță de 55 m, prezentată în Figura 4.1



]

Figura 4.1

Unghiul total de scanare a fost de 97,0 mrad iar dimensiunea unui pas de scanare a fost de 379 μ rad. Întrucât divergența fascicului laser a fost de 100 μ rad a rezultat că un pas de scanare a fost de aproximativ patru ori mai mare decât dimensiunea fascicului laser.

În Figurile 4.2 și 4.3 prezintă două tipuri de procesare și afișare ale țintei: unul bazat pe intensitatea fascicului recepționat iar al doilea bazat pe informația de distanță.

În cele 2 figuri s-au aplicat algoritmi care au permis reducerea datelor tridimensionale la o imagine bidimensională. Astfel în Figura 4.2 s-au ales pixelii de distanță care au intensitatea cea mai mare, rezultând o imagine în tonuri de gri.

Îmaginea în tonuri de gri din Figura 4.2 s-a obținut prin alocarea impulsurilor cu amplitudinea maximă valoarea de tonuri de gri 254, adică alb, iar impulsurilor cu amplitudinea minimă li s-a alocat valoarea minimă adică zero. Valorilor intermediare le-au fost alocate în mod liniar tonuri de gri. Zonelor din jurul autovehiculelor cu semnale foarte slabe li s-a alocat prin normalizare valoarea apropiată de zero, adică negrul.

Pe de altă parte în Figura 4.3 fiecărei distanțe îi corespunde o anumită culoare, distanța fiind aleasă tot după impulsul cu amplitudinea cea mai mare. Albastrul este corespunzător distanței mai mici, verdele și galbenul corespunzând distanțelor intermediare, iar roșul distanței maxime.

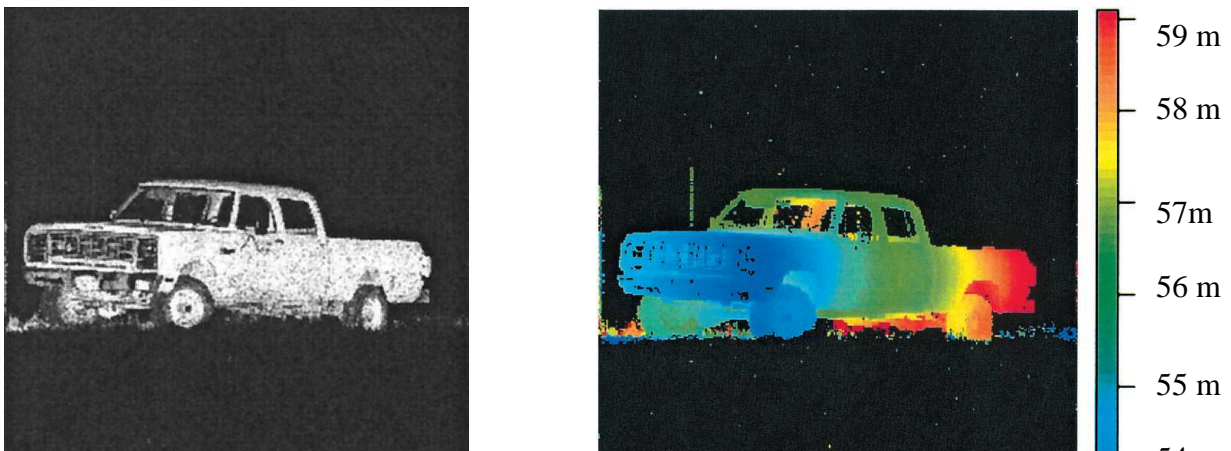


Figura 4.2

Figura 4.3

Totuși imaginea și din Figura 4.3 a necesitat folosirea unei valori de prag de intensitate pentru generarea fondului negru din jurul mașinii.

Pentru investigarea preciziei în distanță s-a folosit o țintă de 1,22m x 2,44m, având în centru un piston pătrat deplasabil cu latura de 0,305 m. Reflectivitatea țintei a fost de 20% la 1,064μm.

Pentru scanarea țintei unghiul total a fost de 37,3 mrad iar pasul de scanare a fost de 146μrad. Aceasta înseamnă că pasul de scanare a fost de aproximativ 1,5 ori dimensiunea fasciculului laser

În Figura 4.4 este prezentată variația de intensitate și de distanță rezultată cu pistonul deplasat în fața țintei la 3,81 cm, distanța fiind de 57,3 m. Se observă pistonul bine definit în fața țintei.

În Figura 4.5 este prezentată o gamă de patru distanțe codate color, distanțele având o separare între ele de 0,075 cm. Și în această imagine se observă pistonul profilat în fața țintei.

Din cele 2 imagini se observă că ținta este ușor înclinată față de sistemul LADAR. Astfel colțul din stânga jos este punctul cel mai apropiat iar cel din dreapta sus este cel mai depărtat punct.

Folosind ecuația 3.2.1 rezultă că pentru un pixel dat se obține o rezoluție în distanță de aproximativ 8 cm.

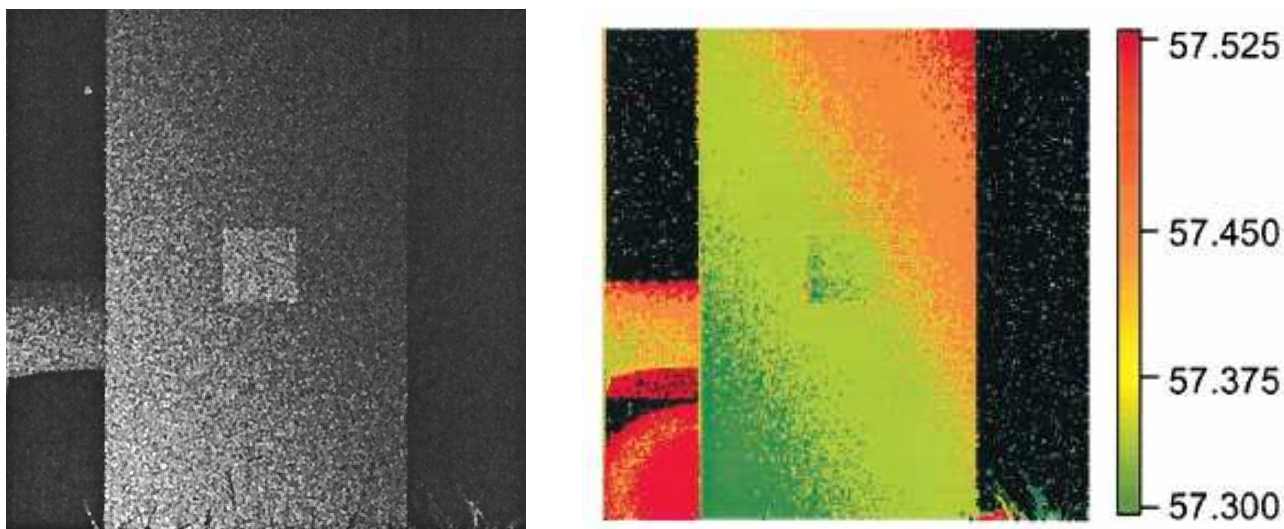


Figura 4.4

Figura 4.5

Cu toate acestea este posibil să se distingă diferențe de distanță mai mici de 8 cm. Astfel când fasciculul laser scanează o zonă situată între două planuri de distanță conform rezoluției aparatului, distanțele obținute vor fi distribuite statistic între cele 2 valori. Dacă distanța este mai apropiată de distanța corespunzătoare culorii galbene vor rezulta un număr mai mare de pixeli galbeni, față de altă culoare, spre exemplu verde.

Așa cum ochii au tendința de integrare a informației din câmpul de vedere și în acest caz putem observa un număr dublu de distanțe prin combinarea nuanțelor de culoare. De exemplu unde sunt două plane de distanță codificate cu culorile galben și portocaliu, observatorul va putea distinge o zonă galbenă o zonă portocalie și o zonă galben-portocalie.

3.2.4 Capacitatea sistemului de a observa ținte mascate

Principalul avantaj al acestui sistem este acela de a obține imagini 3-D ale țintelor mascate parțial, de frunze sau de plasă de camuflaj. Această capacitate este demonstrată în mod practic.

În Figura 4.6 este prezentată camioneta albă camuflată de o plasă de camuflaj, în timp ce Figurile 11 și 12 prezintă datele de distanță de la radar. Distanța până la camionetă este de aproximativ 57 m.

Plasele de camuflaj sunt poziționate între LADAR și camionetă la distanțe de aproximativ 54 și 55 m.

Scanarea s-a făcut într-un unghi total de 111.9 mrad iar dimensiunea unui pas de scanare a fost de 437 μ rad.



Figura 4.6

Figura 4.7 este obținută prin afișarea informației de intensitate din volumul de scanare iar Figura 4.9 este obținută prin afișarea informației de distanță codată color, din același volum.

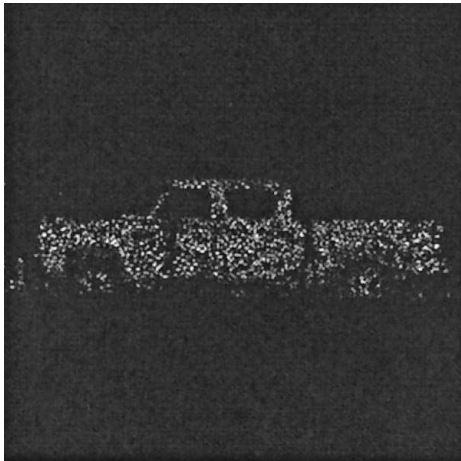


Figura 4.8

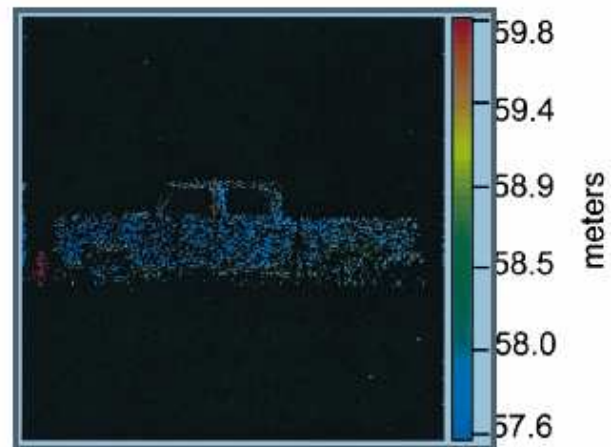


Figura 4.9

Poarta de măsură în distanță este de 20 de felii în domeniul de la 57,6 la 59,8 m. Pentru comparație sunt prezentate în Figurile 4.10 și 4.11 fără plasele de camuflaj

Numărând pixelii de distanță obținuți în cele 2 cazuri au rezultat un număr de 9799 pixeli în cazul fără camuflaj și 3122 distanțe măsurate în cazul cu plase de camuflaj.

A rezultat că sistemul are capacitatea de a detecta aproximativ 32% din informația țintei prin cele 2 plase de mascare.

Pentru îmbunătățirea tehnicilor de identificare prin frunziș dens este necesară combinarea mai multor seturi de date luate din unghiuri diferite.

Conform datelor din literatură o identificare corectă a țintei se poate face cu un minim de 200 de pixeli ai țintei cu condiția unui raport semnal zgomot ridicat și o rezoluție în distanță de 15 cm sau mai bună.

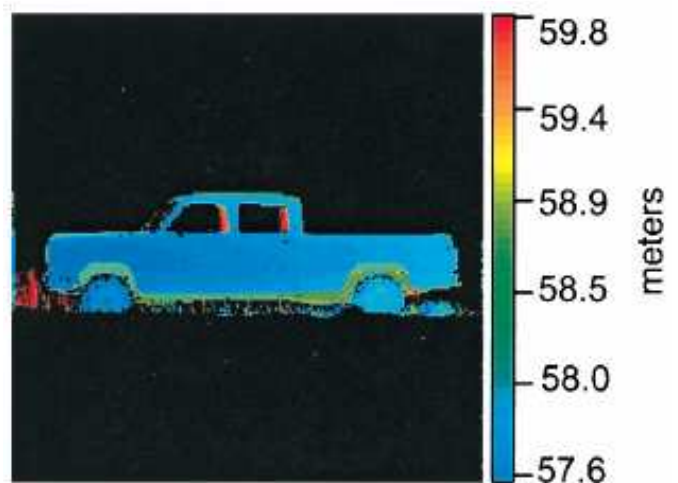
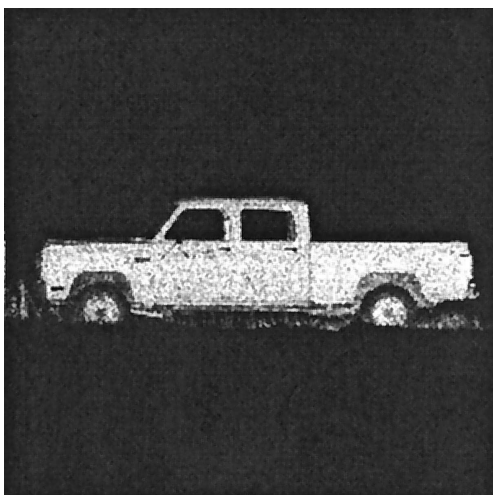


Figura 4.10

Figura 4.11

3.2.5 Concluzii

Sistemul LADAR cu scanarea fasciculului laser a fost dezvoltat cu scopul recunoașterii țintelor mascate de frunziș, plase de mascare fum sau praf.

Lungimea de undă a laserului folosit a fost de $1,064 \mu\text{m}$ generată de un laser tip microchip pompat optic cu diode laser, iar receptorul optic a fost unul cu fotodiodă cu avalanșă cu InGaAs.

Pentru a asigura recunoașterea țintelor mascate este necesară realizarea unei scheme de detecție care include un convertor analog digital de mare viteză și un sistem stocare a datelor digitizate într-un domeniu selectabil de distanțe, pentru fiecare țintă din teren.

Țintele din teren mascate generează în general mai multe impulsuri decalate în timp. Această informație este incorporată în imaginea 3-D astfel încât 63% din măsurătorile de distanță conțin două sau mai multe impulsuri iar 13,5 % conțin trei sau mai multe impulsuri.

Se poate face de asemenea o combinere a datelor obținute din scanări multiple. În situația prezentată datele au fost colectate de pe o țintă obturată de plase de mascare în proporție de 70%. Pentru a simula preluarea datelor din unghiuri diferite s-au mișcat plasele de mascare sau au fost colectate date când a bănut vântul iar efectul a fost similar cu acela de mișcare a plaselor.

Prin combinarea datelor din mai multe achiziții s-a îmbunătățit procentul de la 70% la 86%.

Îmbunătățirea tehnologiei microlaserilor în domeniul eyesafe precum și a tehnologiilor de recepție optică, digitizare de mare viteză și stocare vor duce la micșorarea timpului de achiziție a datelor, la micșorarea dimensiunilor sistemelor și chiar la reducerea prețurilor.

4 Problemele teoretice legate de proiectarea receptorului optic al sistemului LADAR, calculul puterii optice recepționate

Indiferent de varianta constructivă de radar laser (cu scanare a fasciculului laser sau cu senzor FPA) calculul puterii optice pe fotodioda receptoare este același, fiind similar cu cel folosit în sistemele de telemetrare clasice, care măsoară distanța de la

aparat la țintă prin măsurarea timpului parcurs de impulsul laser de la emisie la recepționarea semnalului reflectat de țintă.

În aplicațiile militare telemetrele cu laser sunt folosite ca "senzori" de distanță. După efectuarea măsurătorii de distanță aceasta este folosită de un sistem de calcul pentru diverse scopuri precum determinări de coordonate sau calcule balistice.

4.1 Telemetrele cu laseri în impuls, principii generale

Majoritatea telemetrelor aflate în prezent în exploatare folosesc laseri cu mediu activ solid pompiți optic în impuls.

Impulsurile laser folosite în telemetrie au în general durate între 1 și 40 ns ceea ce permite să se obțină precizii de măsurare a distanțelor de ordinul metrilor aceasta fiind dictată practic de frecvența numărătorului cu care se măsoară intervalul de timp dintre impulsul de START și cel de STOP furnizate de receptorul laser.

Laserii cu impulsuri mai scurte sunt folosiți la telemetrele lunare sau satelitare care trebuie să asigure precizii de măsurare mai mari.

Schema optică a unui telemetru clasic este dată în Figura 4.1.

Sistemele de telemetrare clasice sunt realizate cu trei căi optice. Acestea sunt: luneta de vizare a țintei, luneta de colimare a fasciculului laser și obiectivul de recepție.

În prezent telemetrele moderne miniaturizate au calea optică de vizare comună cu cea de recepție, separarea radiației laser recepționate fiind făcută cu un cub divizor cu transmisia în domeniul vizibil mai mare de 90% și reflectivitatea la unghi de 90° mai mare de 95%. Schema optică a unui astfel de telemetru este cea din Figura 4.2.

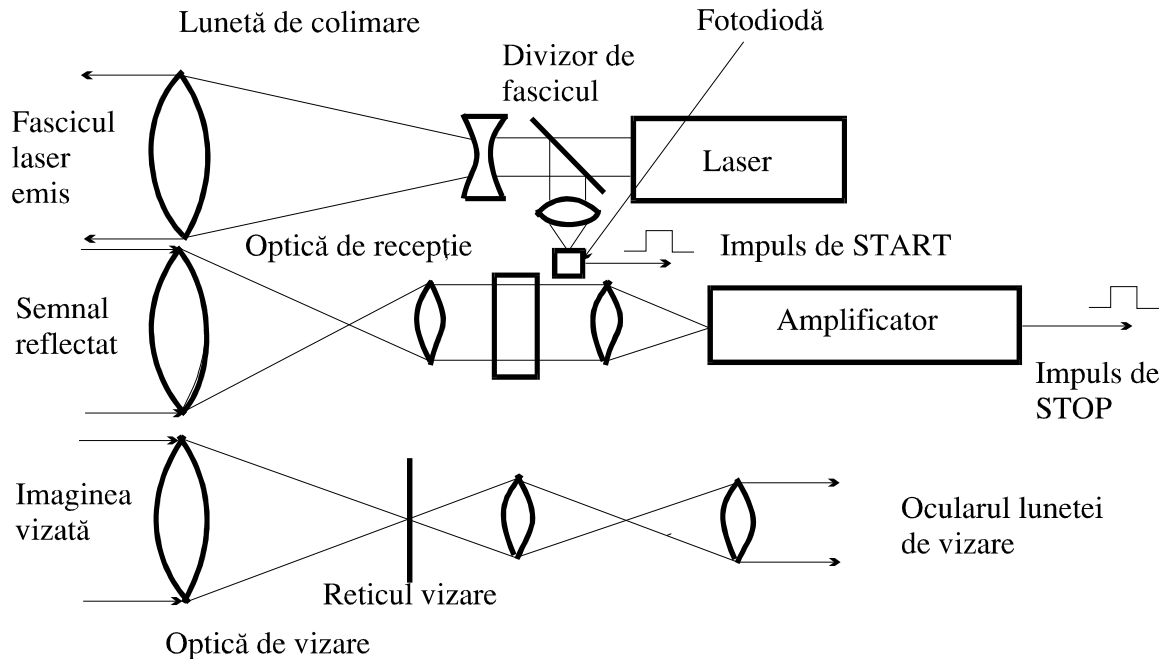


Figura 4.1

Obiectivul comun focalizează radiația laser reflectată de țintă pe aria activă a fotoreceptorului (fotodiodă PIN sau cu avalanșă), rezultând un semnal cu amplitudinea în jur de $100 \mu\text{V}$, care este apoi amplificat și format TTL. Impulsul astfel format este introdus în electronica de prelucrare.

Radiația reflectată de țintă și preluată de obiectiv este reflectată de cubul divizor la 90° spre fotodioda de recepție. Cubul divizor are o depunere reflectantă dielectrică cu reflectivitate selectivă pe lungimea de undă a laserului. În locul cubului se poate folosi și o

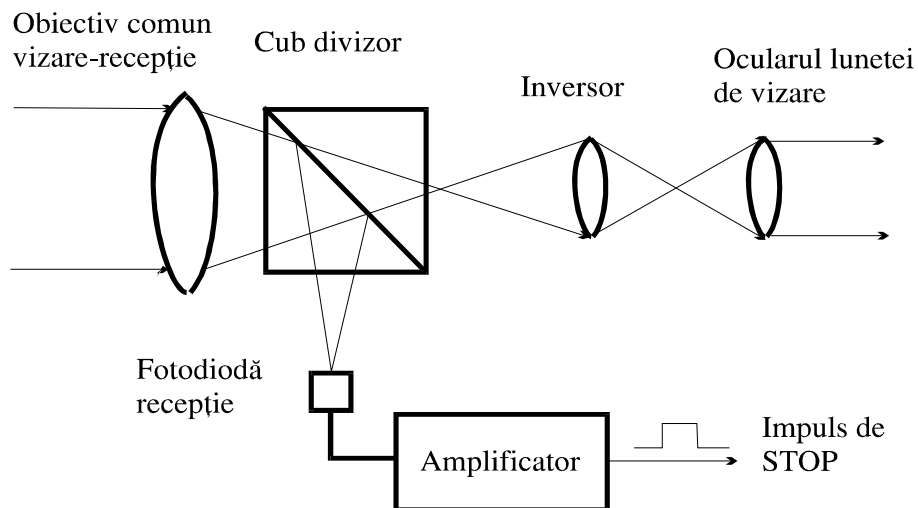


Figura 4.2

oglină dicroică, însă aceasta implică corecții suplimentare pentru lanțul optic de vizare.

Radiația vizibilă trece prin cubul divizor spre inversor și ocularul care împreună cu obiectivul formează luneta de vizare. Luneta de colimare este aceeași ca și la telemetrul cu trei căi optice distincte. Aceasta are rolul de a reduce divergența fasciculusului laser la valori în jur de 0,5 mRad pentru telemetrele care măsoară distanțe de peste 10 Km. Lunetele de colimare folosite au în general grosismente în domeniul $\Gamma=4\div 10$. Ele reduc divergența fasciculelor laser de Γ ori. Laserii cu mediu activ solid pompați optic cu lămpi flash în impuls au în general divergențe între 3 și 6 mRad, astfel încât prin folosirea lunetelor de colimare aceasta ajunge la 0,5÷1 mRad.

Divergența fasciculusului laser este un parametru important deoarece densitatea de putere la nivelul țintei crește cu pătratul micșorării divergenței, ceea ce duce la mărirea distanței maxime de telemetrare.

Au fost realizate și telemetre laser cu cele trei căi optice combinate într-una singură, însă elementele optice introduse pentru cuplarea celor trei căi (cuburi divizoare, polarizori, oglinzi de diferite tipuri, etc.) introduc pierderi atât de mari încât eficiența telemetrului scade foarte mult.

Câmpul de vedere al canalului de recepție este determinat de raportul dintre diametrul suprafeței active a fotoreceptorului și distanța focală a obiectivului. Dimensiunea petei laser la nivelul țintei este în general cu cel puțin 20% mai mică decât câmpul de vedere al receptorului astfel încât micile dezalinieri dintre cele două axe optice să nu afecteze funcționarea telemetrului.

Luneta de vizare este prevăzută cu un reticul de ochire reglabil. Acest reticul se aliniază după direcția fasciculusului laser. Astfel privind prin lunetă și vizând ținta cu ajutorul reticolului, fasciculusul laser va nimeri ținta, eroarea fiind dată de precizia de aliniere dintre cele trei căi optice.

Tehnica de aliniere a celor trei căi optice depinde în general de schema optică folosită. Aceasta va fi descrisă într-un capitol separat.

Schema bloc a unui sistem de telemetrare este dată în Figura 4.3.

În urma unei comenzi date de operator sursa de înaltă tensiune a laserului este pornită și încarcă condensatorul de acumulare la o valoare prestabilită dată de punctul de funcționare al laserului. Când luneta de vizare a fost pusă pe țintă este declanșat impulsul laser.

O mică parte din impulsul laser este preluată de o fotodiodă rapidă. Rezultă un semnal de START care declanșează un numărător rapid ale cărui impulsuri sunt generate de un oscilator cu cuarț. Semnalul de START poate fi generat și de către fotodioda receptoare prin preluarea radiației de la ieșirea lunetei de colimare cu ajutorul unei prisme și direcționarea ei către obiectivul de recepție, sau direct ca radiație retroreflectată de către moleculele și aerosolii din aer. Frecvențele cele mai folosite pentru oscilator sunt de 30 MHz, care asigură precizii de măsurare a distanței de ± 5 m.

Radiația generată de laser atinge ținta după care o mică parte din ea este colectată de obiectivul de recepție și focalizată pe aria activă a fotodiodei receptoare.

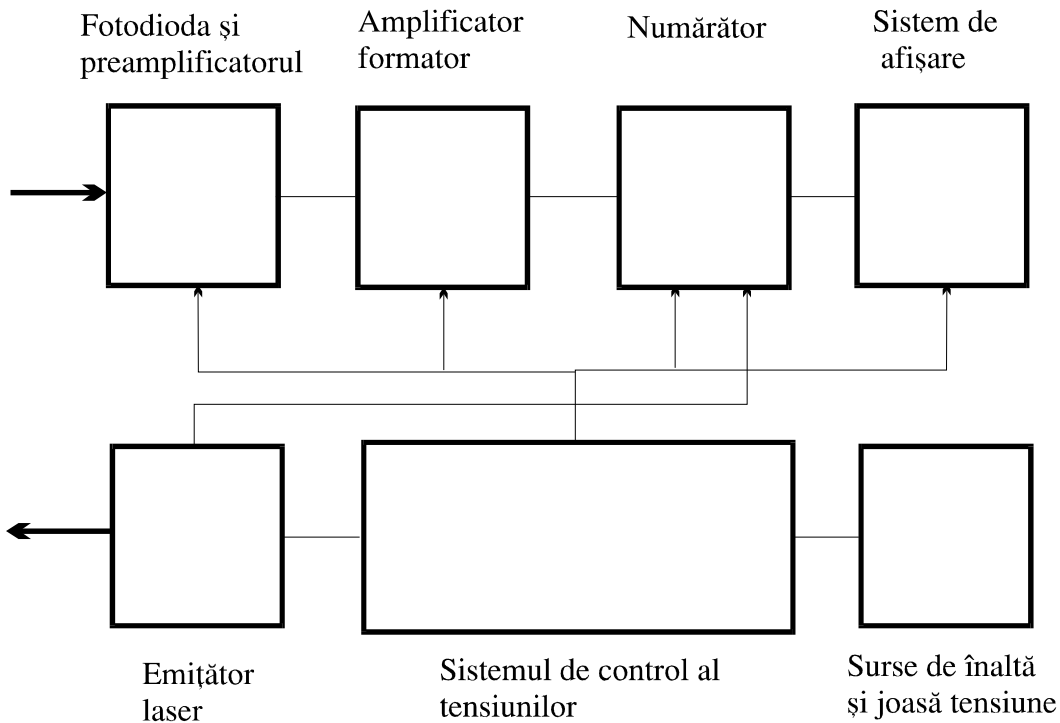


Figura 4.3

Banda optică a detectorului este limitată de filtrul interferențial pentru limitarea radiației optice de fond care este o sursă de zgomot.

Semnalul de ieșire din fotodiodă este amplificat de către modulul preamplificator, care este amplasat cât mai aproape de fotodiodă, pentru a minimiza influența zgomotelor electrice provenite din etajele de putere. Acest preamplificator este de tip transimpedanță, convertind curentul generat pe impedanța mare de intrare într-un semnal de joasă impedanță, în același timp minimizând și zgomotul electric.

Din preamplificator semnalul intră apoi într-un etaj amplificator-formator. Amplificatorul este în unele cazuri de tip logaritmic astfel încât are amplificare mai mare pentru semnalele slabe și mai mică pentru cele puternice provenite de la ținte apropiate. După amplificare semnalul intră într-un comparator cu rol de formator a unui semnal de STOP standard de tip TTL. Comparatorul formează toate semnalele cu amplitudine peste o valoare prestabilită, eliminând în acest mod formarea unor semnale provenite din zgomot.

Semnalul de STOP oprește numărătorul. Dacă frecvența oscilatorului este aleasă corect, numărul de perioade preluate de numărător pot fi corelate foarte ușor în distanțe până la țintă. De exemplu dacă frecvența este de 29,978 MHz, lumina va parcurge distanța de 10 m într-o perioadă, precizia în distanță a telemetrului fiind de ± 5 m.

La majoritatea telemetrelor numărătorul nu se oprește la primul impuls de STOP, ci valoarea numărului de perioade numărate de acesta este stocată într-un registru de memorie. Același lucru se întâmplă și cu celelalte semnale de STOP provenite de la alte ținte aflate pe direcția fasciculului laser. De obicei sunt stocate distanțele până la primele două sau trei ținte, iar operatorul poate să selecteze distanța dorită, care se afișează pe un display.

Conform teoriei telemetrelor cu detecție directă dacă impulsul laser are o anumită energie iar fotoreceptorul și amplificatorul nu limitează banda de frecvență, cel mai bun raport semnal/zgomot se obține când energia este concentrată în cel mai scurt impuls care poate fi obținut.

4.2 Surse laser folosite în telemetrie

4.2.1 Laseri cu mediu activ solid

Marea majoritate a telemetrelor cu laser existente folosesc laseri cu mediu activ solid pompați optic în impuls. Toți laserii cu mediu activ solid constau într-un mediu capabil să realizeze un câștig optic care asigură un feed-back pozitiv. Mediul activ este în general sub forma unei bare. La unii laseri de putere medie ridicată se folosesc discuri care asigură o răcire mai bună. Bara laser are în general diametre între 3 și 7 mm și lungimi între 30 și 70 mm.

S-au depus eforturi considerabile pentru mărirea eficienței de pompaj optic. În prezent se folosesc cavități de pompaj optic de tip cilindru eliptic, la care lampa de pompaj optic (lampa flash) este plasată într-unul din focare iar mediul activ în celălalt. Există și cavități optice reflectante din ceramică de tip "cuplaj strâns" la care reflexia radiației de pompaj optic are loc pe pereții difuși ai cavității, cu reflectivitate pe domeniul spectral de interes mai mare de 98%.

Oglinzile rezonatorului laser asigură feed-back-ul pozitiv astfel încât în urma pompajului optic al mediului activ de către lampa flash, la ieșire va apare oscilația laser.

Oglinzile laser sunt realizate prin depuneri dielectrice cu reflectivitate selectivă pe lungimea de undă a radiației. Ele sunt de obicei plane însă în unele cazuri se folosesc și oglinzi sferice cu rază mare de curbură. Oglinzile sunt aliniate față de fețele mediului activ și între ele.

Primul mediu activ folosit în telemetria cu laser a fost rubinul (cristal de oxid de aluminiu dopat cu ioni de Cr^{3+} în procent de 0,5%). Acest material are o eficiență cuantică redusă fiind necesare energii de pompaj optic de sute de Jouli.

Dintre ionii activi folosiți ca dopanți mai fac parte: Nd^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} . Cel mai folosit mediu activ în diverse aplicații printre care și cele de telemetrie rămâne în continuare de la crearea sa și până în prezent granatul de ytriu și aluminiu dopat cu ioni de Nd^{3+} , prescurtat YAG:Nd. Succesul acestui mediu activ este dat de calitățile sale deosebite.

Are un câștig optic ridicat, proprietăți mecanice și termice foarte bune. Datorită acestora permite obținerea unor eficiențe de pompaj optic cu lămpi flash de până la 2%, comparativ cu 0,05% la rubin. Rezistența mecanică și conductivitatea termică mare permit folosirea sa în sistemele de mare putere și frecvențe de repetiție ridicate.

Pompajul optic se face în general cu ajutorul lămpilor flash cu Xenon, Kripton sau un amestec al celor două gaze. Cu astfel de lămpi se obțin impulsuri laser gigant de 2÷3 Mw la durate de 5÷50 ns cu pompaj optic în domeniul 8÷20 J.

În ultimul timp au început să se extindă aplicațiile laserilor cu YAG:Nd pompați cu diode laser, cu eficiențe de peste 10%.

Singurul dezavantaj al acestui mediu activ îl constituie faptul că radiația laser cu lungimea de undă de 1,064 μm poate să focalizeze pe retină în caz de privire accidentală în fascicul, putând să producă leziuni grave. Doar radiația laserilor cu lungimea de undă de peste 1,4 μm este absorbită de mediile transparente ale ochiului, ceea ce face ca aceștia să înlocuiască treptat vechii laseri cu YAG:Nd.

Limita superioară a domeniului spectral în aplicațiile de telemetrie este de 1,7 μm dată de răspunsul spectral al fotodiodelor de recepție.

Pentru obținerea impulsurilor laser de mare putere este necesară generarea de impulsuri laser în regim "declanșat" sau de Q-switch.

Dacă rezonatorul laser conține numai mediul activ și oglinzile laser se obține regimul relaxat sau de generare liberă. Impulsurile obținute în acest mod au durate de ordinul zecilor de microsecunde și puteri de ordinul Kilowaților.

Dacă aceste impulsuri sunt preluate cu o fotodiodă rapidă și vizualizate pe un osciloscop ele apar sub forma unor trenuri de impulsuri cu amplitudini aleatorii. Acest regim de lucru nu este potrivit pentru telemetria cu laser.

Dacă în rezonator este introdus un dispozitiv denumit comutator laser, care inhibă pentru o perioadă apariția oscilațiilor laser prin introducerea unor pierderi optice mari, în mediul activ apare un număr mare de atomi în stare excitată. Când pierderile optice din rezonator sunt mari, factorul de calitate Q al acestuia este scăzut, iar efectul laser inhibat.

Dacă dispozitivul introdus în rezonator permite micșorarea bruscă a pierderilor, se crează condițiile pentru obținerea impulsurilor laser. Când se obține condiția de prag de oscilație $\exp(g-\alpha)=1$, începe să apară oscilația laser. În acest moment câștigul optic $\exp(gl)$ egalează pierderile optice $\exp(-\alpha l)$. Întrucât prin inhibarea emisiei de către comutatorul laser în mediul activ s-a obținut o inversie de populație ridicată și deci un câștig optic deasemenea ridicat, dezexcitarea atomilor prin emisie stimulată este foarte puternică, iar după câteva zeci de trasee dus-întors ale fotonilor prin rezonator, mediul activ este complet dezexcitat.

Impulsul obținut este denumit impuls laser în regim "declanșat" (Q-switch) sau impuls laser gigant. El diferă mult de impulsul în regim de generare liberă. Durata este în domeniul 10÷50 ns iar puterea obținută de ordinul Megawaților.

Schema optică a unui astfel de laser este dată în Figura 4.4. Oglinda laser de extracție are reflectivitatea pe lungimea de undă laser în domeniul 20÷40%. Comutatorii folosiți în aplicațiile de telemetrie sunt atât pasivi cât și activi, mai ales la laserii cu frecvență mare de repetiție. Comutatorii laser activi permit controlul din exterior. Cu excepția celor mecanici cu prismă rotitoare, aceștia se bazează pe efectele optice neliniare Pockels sau Kerr.

La acești comutatori pierderile din rezonator sunt controlate cu ajutorul unei tensiuni exterioare care duce la rotirea planului de polarizare al radiației laser când aceasta trece printr-o celulă Kerr sau un cristal care prezintă efectul Pockels.

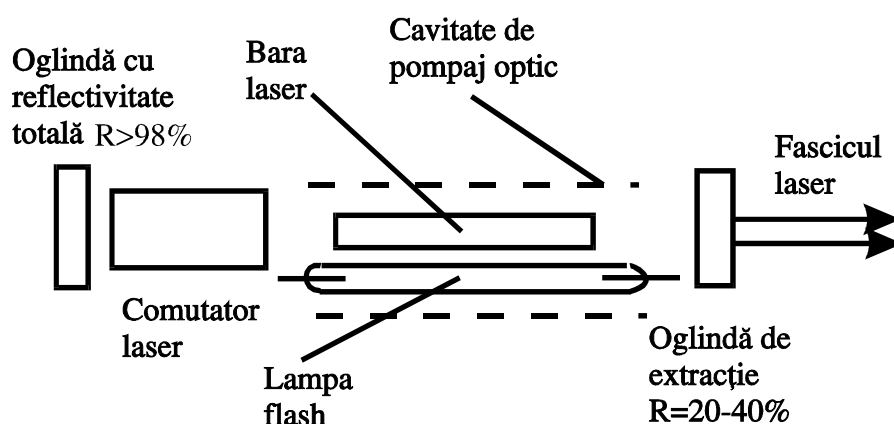


Figura 4.4

Prin cuplarea acestui dispozitiv cu un polarizor rezultă un comutator laser foarte rapid care poate fi controlat cu un impuls de tensiune. Acești comutatori laser permit obținerea radiației polarizate. Au deasemenea avantajul că permit controlul apariției impulsului laser.

Comutatorii laser pasivi se bazează pe fenomenul optic neliniar de saturare a absorbției. Ei sunt de două tipuri: cu coloranți saturabili sau cu centrii de culoare.

Prin introducerea lor în rezonator se realizează o creștere a pierderilor optice prin absorbție a radiației generate de mediul activ. Când intensitatea radiației atinge un anumit prag apare fenomenul de saturare a absorbției. Aproape toți centrii de absorbție se află pe stările excitate superioare iar materialul absorbant devine transparent. Acest fenomen apare datorită timpului de viață mare pe stările superioare excitate.

Comutatorii pasivi cu coloranți saturabili se prezintă sub formă lichidă sau solidă. Coloranții lichizi se introduc în cuve cu ferestre din sticlă optică. Prin înglobarea coloranților în anumite materiale plastice transparente se obțin folii solide cu aceeași proprietate de saturabilitate a absorbției. Aceste folii sunt mai ușor de folosit.

Comutatorii pasivi cu centrii de culoare se obțin prin iradierea cu radiație γ sau cu electroni a unor cristale. Așa cum s-a arătat în Capitolul 1, prin iradierea cristalelor de LiF se crează centrii de culoare F_2^- . Acești centrii prezintă fenomenul de saturare a

tranzițiilor spectrale la fel ca și coloranții saturabili. Spre deosebire de aceștia, ei permit obținerea unor puteri în impuls mai mari precum și a unor fascicule laser cu divergență mai mică. Aceștia pot fi folosiți deasemenea la frecvențe de repetiție de până la 50 Hz, față de maxim 0,5 Hz la coloranții saturabili.

4.2.2 Laseri cu semiconductori

Datorită măririi puterii de emisie și posibilităților de colimare a fasciculului de ieșire la valori comparabile cu a laserilor cu solid, laserii cu semiconductori sunt tot mai utilizați în aplicațiile de telemetrie. Cei mai folosiți sunt cei cu GaAs. Distanța maximă de măsură la care s-a ajuns în prezent este în jur de 3000 m în condiții favorabile de vizibilitate. Există totuși un număr important de aplicații pentru măsurarea cu precizie a distanțelor de până la 200÷300 m pentru care se folosesc diferite componente de emisie și recepție. Pentru sistemele de distanță mică se folosesc la emisie LED-uri de strălucire mare iar la recepție fotodiode PIN. Sistemele mai complexe și mai scumpe folosesc diode laser de mare putere cu o optică de colimare care corectează divergența fasciculului la valori mai mici de 0,5 mRad, iar la recepție fotodiode cu avalanșă cu responsivitatea mai mare cu un ordin de mărime decât a fotodiodelor PIN. Un mare avantaj al diodelor laser îl constituie dimensiunile reduse și fiabilitatea mare. Lungimea de undă a acestora este în domeniul 800÷900 nm iar puterea în impuls poate să ajungă la valori de peste 100W la durate ale impulsului de 50 ns. Efectul laser se obține în aceste dispozitive prin crearea unei inversii de populație în vecinătatea joncțiunii p-n alimentată direct pentru a produce injecția de purtători. Suprafața oglinzii laser a diodei este de ordinul fracțiunilor de milimetru pătrat. Lărgimea de bandă poate să ajungă la câțiva nanometrii .

4.2.3 Laseri cu radiație "sigură pentru ochi"

Radiația laser sigură pentru ochi (eyesafe) este considerată ca fiind radiația cu lungimea de undă de peste 1400 nm. Aceasta este absorbită de părțile transparente ale ochiului, în special de corneea, astfel încât nu mai ajunge pe retină. Acest lucru este în contrast față de radiația laser cu grad de risc ridicat din domeniul spectral 400÷1400 nm (vizibil și infraroșu apropiat), pentru care părțile anterioare ale ochiului au transmisie mare și proprietăți refractive.

Nivelele de iradiere la aceste lungimi de undă la nivelul retinei sunt în general cu 5 ordine de mărime mai mari față de cele de la nivelul corneei. Deși radiația "sigură pentru ochi" ajunge pe retină mult atenuată, poate totuși să afecteze pielea sau corneea prin efectele sale termice.

Se consideră că un laser intră în categoria laserilor cu radiație "sigură pentru ochi" dacă el se încadrează în Clasa I de protecție.

În prezent în telemetria cu laser se folosesc mai multe tipuri de laseri cu radiație "sigură". Printre aceștia sunt: laserii cu YAG:Nd în regim de Q-switch cu conversie Raman și laserii cu mediu activ sticlă:Er în regim de Q-switch.

4.3 Propagarea radiației laser prin atmosferă

4.3.1 Atenuarea

Factorul de transmisie pentru un drum dus-întors al radiației pe distanța R de la telemetru la țintă este $T = \exp(-2KR)$, unde coeficientul de absorbție K este suma coeficienților de absorbție K_a și de împrăștiere K_i , $K = K_a + K_i$ [103].

Pentru telemetria cu laser banda de transmisie prin atmosferă este limitată inferior la 300 nm de absorbția ozonului și superior de 14 μm de vaporii de apă. Între aceste două valori coeficientul de atenuare are o variație foarte complicată cu lungimea de undă. Se poate vorbi de ferestrele de transmisie prin atmosferă a radiației infraroșii între 3÷5 și 8÷14 μm însă aceasta este o simplificare a unei realități mult mai complexe. În Tabelul 4.3 sunt date lungimile de undă laser cele mai folosite și absorbția moleculară a atmosferei.

Tabelul 4.1

Lungimea de undă	Absorbția moleculară din atmosferă
530 nm (radiația Nd ³⁺ dublată) 632,8 nm (He-Ne) 1,064 (YAG:Nd)	Absorbția atmosferică este nesemnificativă
694,3 nm (rubin)	Liniile de absorbție ale H ₂ O la 694,2 și 694,4 nm. rubinul generează radiație cu $\lambda = 694,3$ nm în domeniul de temperaturi 295÷315 K. Absorbția este deci neglijabilă.
800÷900 nm (diode laser cu GaAs)	În domeniul 800÷900 nm nu se cunosc absorbții semnificative. Totuși în interval H ₂ O are picuri de absorbție care pot fi luate în considerație (0,1 cm ⁻¹ la 850 nm la nivelul mării, umiditate relativă de 51%, la t=18° C)
2,1 μm (Ho)	La nivelul mării are un coeficient mic de absorbție, în jur de 0,03 Km ⁻¹ .
9÷11 μm (CO ₂)	La nivelul mării anumite linii au atenuarea de 0,5 Km ⁻¹ . În perioada iernii acesta este pe acest domeniu de la 0,1 Km ⁻¹ la 0,03 Km ⁻¹ .

În Figura 4.9 este dat spectrul de transmisie al atmosferei de la nivelul mării pe o distanță de 2 Km. Cantitatea de apă precipitabilă pe această grosime de atmosferă este de 17 mm.

4.3.1.1 Împrăștierea moleculară

Ponderea împrăștierii moleculare (Rayleigh) este de $0,01 \text{ Km}^{-1}$ pentru radiația de 532 nm (verde) obținută prin dublarea celei de $1,064 \mu\text{m}$ generată de Nd^{3+} . La lungimi de undă mai mari ea devine neglijabilă.

4.3.1.2 Împrăștierea și absorbția pe aerosoli

Aerosolii constau în particule solide (praf, fum, etc) sau lichide (ceața, picături de ploaie, lapoviță, etc.). Particulele de apă în cădere pot să se combine cu particulele solide astfel că distincția dintre solide și lichide nu este absolută. Studiile cantitative sunt dificile datorită faptului că pe distanța de câțiva Km compoziția aerosolilor nu este constantă [104].

Tratările teoretice bazate pe teoria împrăștierii Mie presupun particule sferice, fiind direct aplicabile aerosolilor lichizi. Valorile prezise depind de dimensiunea picăturilor. Pentru picături de dimensiuni mari (raza mai mare de $5 \mu\text{m}$) coeficientul de atenuare K_s variază puțin cu lungimea de undă în domeniul $0,5\div 10 \mu\text{m}$.

Pentru particule mici (raza sub $5 \mu\text{m}$) valoarea lui K_s scade rapid cu creșterea lungimii de undă de la $0,5$ la $10 \mu\text{m}$. Pentru particule solide de formă neregulată și dimensiuni diferite situația este foarte complexă.

Metoda cea mai utilă pentru estimarea lui K_s se bazează pe măsurarea vizibilității atmosferice V . Această estimare este utilă pentru lungimi de undă în domeniul vizibil sau apropiate de acesta și pentru trasee optice aproape orizontale. Totuși valorile obținute nu sunt foarte precise.

Vizibilitatea V este definită ca lungimea de drum la care transmisia optică pentru $\lambda=0,55 \mu\text{m}$ (maximul sensibilității spectrale a ochiului uman) este de 2%. Aceasta este aproximativ distanța la care un obiect negru (2% contrast) abea poate fi văzut pe linia orizontului. Deseori este folosită o relație empirică pentru determinarea atenuării date de aerosoli la lungimea de undă λ (în microni) când vizibilitatea este "V" (în kilometrii):

$$k_s = \left(\frac{3,91}{V}\right)\left(\frac{0,55}{\lambda}\right)^p ; \text{ cu } p=0,585V^{1/3} \text{ pentru } V<6. \quad 4.1$$

În Tabelul 4.4 este dată variația pierderilor prin atenuare obținută cu formula anterioară în domeniul de lungimi de undă de la $0,5$ la $1,0 \mu\text{m}$.

Tabelul 4.2

Lungimea de undă (μm)	k_s (km^{-1})	Transmisia optică pentru un traseu de 10 km (ținta este la 5 km)
0,53	0,81	$2,99 \cdot 10^{-4}$
0,69	0,62	$1,96 \cdot 10^{-3}$
1,06	0,41	$1,73 \cdot 10^{-2}$

Norii în general atenuază rapid fasciculele laser pe toate lungimile de undă, atenuarea fiind mult mai mare de 1 km^{-1} .

Coeficientul de atenuare prezis datorat ploii variază puțin cu lungimea de undă de la 0,5 la $10 \mu\text{m}$ și are valoarea de aproximativ $1,2 \text{ km}^{-1}$ pentru o ploaie de 10 mm/h . Această valoare este în concordanță cu valorile obținute experimental.

4.3.2 Turbulența

Uniformizarea parametrilor atmosferici este determinată de turbulența și mișcările de convecție ale aerului cu variația de temperaturi. Acestea duc la variații ale indicelui de refracție [105].

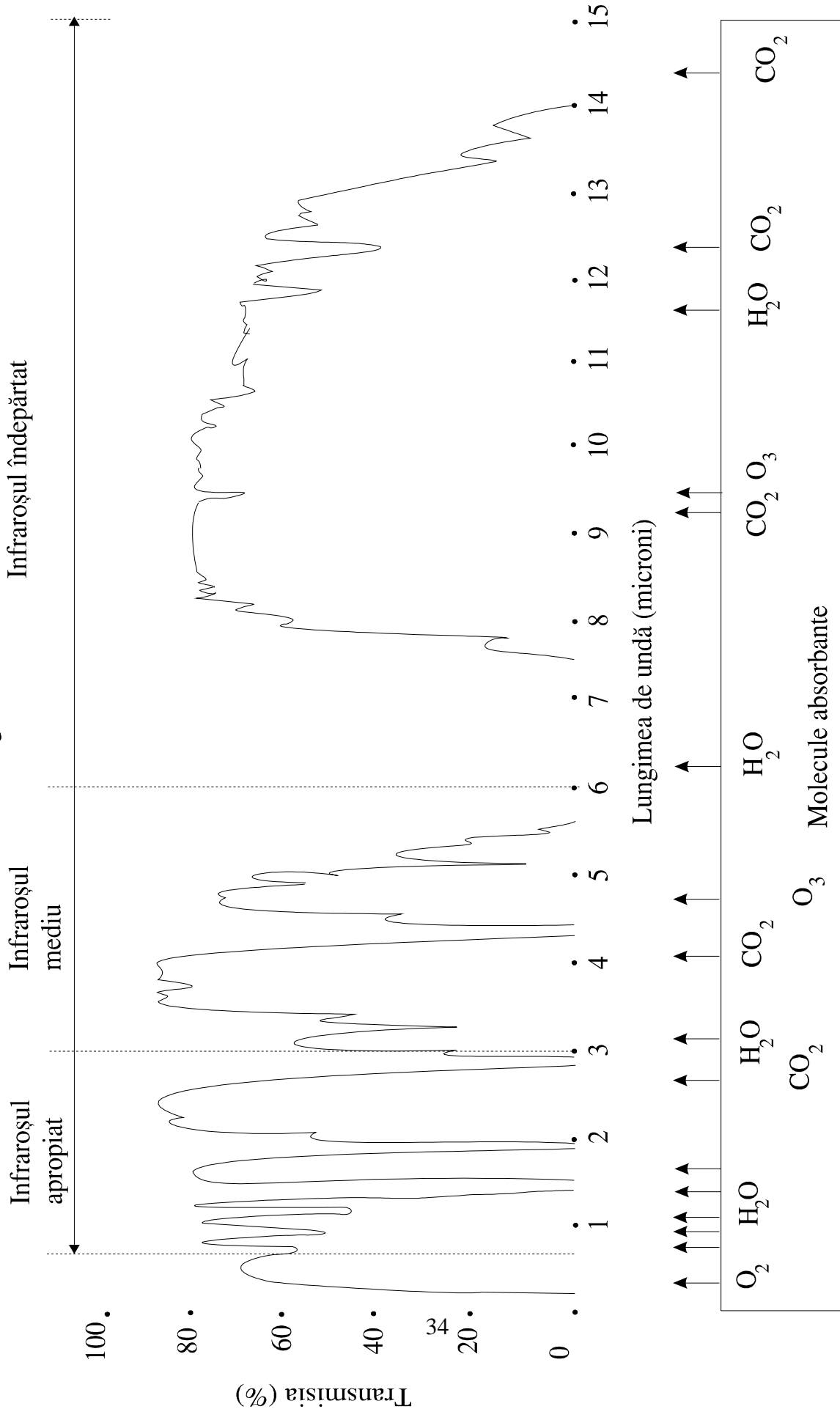
Efectele cele mai importante generate de turbulență sunt:

- Devierea fasciculului când axa centrală a fasciculului este deflecată întâmplător în domeniul $1 \div 100 \mu\text{Rad}$ la un traseu de 5 km. Rezultă devieri ale fasciculului sub 1m.
- Ruperea fasciculului cu lungimea de undă λ în lobi cu dimensiuni de ordinul $(\lambda R)^{1/2}$, după ce a parcurs un traseu cu lungimea R. Dimensiunea lobilor este de aproximativ 10 cm pentru $R=5 \text{ km}$ iar $\lambda=1 \mu\text{m}$.

Fluctuațiile de intensitate în diferite puncte pe țintă datorate efectelor a. și b. influențează funcționarea telemetrelor doar dacă țintele au dimensiuni mici, de exemplu retroreflectorii pentru telemetrele cu ținte cooperante.

Turbulența în mod normal scade rapid cu altitudinea, astfel încât efectele acesteia la înălțimi de peste 100 m deasupra solului sunt mult mai mici comparate cu cele de la 1 m.

Figura 4.5



4.4 Calculul puterii optice recepționate, ecuația telemetriei

Datorită divergenței reduse a fasciculului laser, în multe cazuri dimensiunea țintei este mai mare decât secțiunea fasciculului.

Este important să se poată estima ordinul de mărime al radiației electromagnetice retroîmprăștiată de ținte.

Se consideră că ținta are suprafața plană, cu un coeficient de reflexie difuză Lambertian ϵ , care reprezintă raportul dintre semnalul reflectat de țintă și cel al unei ținte cu reflectivitate 100% cu o distribuție unghiulară de tip Lambertian.

Dacă ținta aflată la distanța R este iluminată normal cu un fascicul cu densitatea de putere ϕ , puterea medie P_t colectată de un fotoreceptor de arie A_t este:

$$P_t = \frac{\epsilon\phi}{2\pi} \frac{A_t}{R^2} \exp(-2kR) \quad 4.2$$

Ultimul termen al expresiei ia în considerare atenuarea atmosferică pe distanța R .

Pentru ca toată această putere optică să ajungă pe detector, câmpul de vedere al obiectivului de recepție trebuie să fie suficient de mare pentru a acoperi zona iluminată.

Dacă ținta cu reflectivitate difuză de arie A este mai mică decât dimensiunea petei fasciculului laser expresia de mai sus trebuie multiplicată cu factorul $(4A)/(\pi R^2 \theta^2)$ unde s-a considerat că puterea fasciculului este uniform distribuită în conul de radiație cu divergența θ . Reflectivitatea difuză a țintelor depinde de materialul din care sunt realizate, de lungimea de undă și în mai mică măsură de unghiul de incidență. Ele pot să aibă variații foarte mari. Suprafețele lucioase prezintă o variație destul de puternică cu unghiul de incidență.

Semnalul recepționat de pe suprafețele neregulate poate fi estimat prin însumarea efectelor suprafețelor înclinate constituente.

În unele cazuri se folosesc ca ținte reflectori care pot fi prisme colț de cub care reflectă fasciculul pe direcția de incidență. Un retroreflector perfect de arie A reflectă un front de undă plan într-un unghi solid la limita de difracție de ordinul $(4\lambda^2)/A$. Puterea optică recepționată este:

$$P_t = \left(\frac{\phi A_t}{2\pi} \right) \left(\frac{A}{R^2 \theta \lambda} \right)^2 \exp(-2kR) \quad 4.3$$

Expresia de mai sus nu ia în considerare imperfecțiunile retroreflectorului și turbulența atmosferică. Un retroreflector cu aria de 10^{-2} m^2 va reflecta radiația cu lungimea de undă de $1 \text{ }\mu\text{m}$ într-un unghi solid de aproximativ $4 \cdot 10^{-10}$ steradiani, în timp ce un reflector 100% Lambertian la incidență normală va înapoia radiația într-un unghi

solid de π steradiani. Rezultă o diferență între cele două semnale de 10^{10} . Aceasta este diferența dintre țintele cooperante și cele necooperante sau retroreflective.

Folosind ecuația 4.10 putem estima puterea optică recepționată în funcție de caracteristicile emițătorului laser și ale opticii de recepție.

Pentru a face această estimare vom considera 2 tipuri de laseri folosiți în cele 2 tipuri de sisteme LADAR, cu senzor FPA și cu scanare a fasciculului laser.

4.4.1 Calculul puterii optice recepționate de senzorul FPA

Pentru acest tip de sistem LADAR se folosesc laseri de putere în impuls suficient de mare datorită faptului că fasciculul pleacă cu o divergență mare pentru a acoperi întreaga suprafață a țintei. Frecvența de repetiție este însă relativ redusă de la un Hz la zeci de Hz.

Vom considera un emițător laser cu următorii parametrii:

- Energia în impuls, E: 25 mJ;
- Durata impulsului laser τ : 1 ns;
- Lungimea de undă: 1,54 μ m;
- Divergența fasciculului laser 40 mrad.

Receptorul are următoarele caracteristici:

- Diametrul unei fotodiode-pixel: 70 μ m;
- Focala obiectivului de recepție: 100 mm;
- Apertura obiectivului de recepție 50 mm.

Ținta are următoarele caracteristici:

- Coeficientul de reflectivitate difuză 25%;
- Dimensiunea țintei 5x3 m;
- Distanța până la țintă 500 m.

Prelucrând ecuația 4.10 precum și datele de mai sus vom obține puterea totală colectată de un pixel al FPA, P_t :

$$P_t = \frac{\epsilon P_p A_t}{2\pi R^2} \exp(-2kR);$$

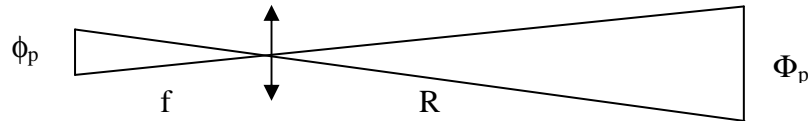
unde:

ϵ =reflectivitatea difuză a țintei;

$P_p = D_p * S_p$; este puterea optică reflectată de țintă, aflată în câmpul de vedere al unui pixel al FPA;

D_p =densitatea de putere la nivelul țintei;

S_p =suprafața din planul țintei corespunzătoare unui pixel conform desenului de mai jos;
 $k=-0,41 \text{ Km}^{-1}$, este coeficientul de atenuare atmosferică;



Φ_p =diametrul corespunzător țintei aflat în câmpul de vedere al pixelului FPA;

ϕ_p =diametrul unui pixel al FPA;

Din desenul de mai sus rezultă:

$$\Phi_p = \frac{\phi_p \times R}{f};$$

Introducând valorile:

$$f=100 \text{ mm};$$

$$R=500 \text{ m};$$

$$\phi_p=70 \text{ }\mu\text{m};$$

$$\text{Rezultă } \Phi_p=350 \text{ mm};$$

Densitatea de putere optică la nivelul țintei va fi $D_p=P_L/S_{pl}$;

unde:

P_L =puterea impulsului laser;

S_{pl} =suprafața petei laser la nivelul țintei;

$$S_{pl}=\pi R_{pl1/2}^2$$

Considerând α , divergența fasciculului laser reglată din sistemul de colimare astfel încât pata să aibă un diametru de 20 m, rezultă $R_{pl1/2}=5\text{m}$;

Introducând valorile de mai sus va rezulta $S_{pl}=3,14 \times 10^6 \text{ cm}^2$;

Pentru ca pata laser să aibă diametrul de 20 m rezultă $\alpha=2.3^\circ$;

Va rezulta o densitate de putere $D_p= D_p=P_L/S_{pl}=E/\tau / S_{pl} \approx 8\text{W/cm}^2$.

Puterea optică aflată în câmpul de vedere al unui pixel va fi:

$$P_p=D_p \cdot S_p=2,5 \times 10^5 \text{ W};$$

Luând în considerare o reflectivitate difuză a țintei $\epsilon=20\%$ și introducând valorile de mai sus vom obține puterea totală colectată de un pixel al FPA, P_t :

$$P_t \approx 26 \text{ }\mu\text{W};$$

Unde suprafața aperturii opticii de recepție pentru un diametru de 50 mm, este:

$$A_t=\pi r_0^2=19,6 \text{ cm}^2.$$

Concluzie: Puterea optică permite obținerea unor semnale electrice suficient de mari pentru a fi detectate de senzorii cu multiplicare în avalanșă.

4.4.2 Calculul puterii optice recepționate de senzorul LADAR cu scanare

În cazul senzorului LADAR cu scanare calculul optic prezintă similitudini, cu diferența că la recepție vom avea un singur senzor optic, în al cărui câmp se va afla pata generată de fasciculul laser.

Vom considera un emițătorul laser cu următorii parametrii:

- Energia în impuls, E: 1 mJ;
- Durata impulsului laser τ : 0,8 ns;
- Lungimea de undă: 1,54 μ m;
- Divergența fasciculului laser max. 0,8 mrad.

Receptorul are următoarele caracteristici:

- Diametrul ariei active a fotodiodei: 70 μ m;
- Focala obiectivului de recepție: 100 mm;
- Apertura obiectivului de recepție 50 mm.

Ținta are următoarele caracteristici:

- Coeficientul de reflectivitate difuză 25%;
- Dimensiunea țintei 5x3 m;
- Distanța până la țintă 500 m.

Prelucrând ecuația 4.1 precum și datele de mai sus vom obține puterea totală colectată de fotodioda receptoare:

$$P_t = \frac{\epsilon P_p A_r}{2\pi R^2} \exp(-2kR);$$

unde:

ϵ =reflectivitatea difuză a țintei;

P_p =puterea optică a impulsului laser reflectată de țintă, aflată în câmpul de vedere al fotodiodei;

$$P_p \approx E/\tau = 1,25 \cdot 10^6 \text{ W};$$

Luând în considerare o reflectivitate difuză a țintei $\epsilon=20\%$ și introducând valorile de mai sus vom obține puterea totală colectată de fotodioda receptoare P_t :

$$P_t \approx 200 \mu\text{W};$$

Unde suprafața aperturii opticii de recepție pentru un diametru de 50 mm, este:
 $A_t = \pi r_0^2 = 19,6 \text{ cm}^2$.

Concluzie: Puterea optică în cazul LADAR-ului cu scanare este mai mare cu aproape un ordin de mărime față de soluția tehnică cu fotoreceptor FPA. Deci în acest caz se vor putea mări semnificativ distanțele de detecție a țintelor mascate de vegetație.

4.5 Sistemele de recepție

La recepție se folosesc obiective sau sisteme de oglinzi care concentrează radiația colectată pe un fotodetector. Principalii parametri ai sistemului optic sunt câmpul de vedere și apertura de intrare. Pentru un sistem optic realizat cu un obiectiv, câmpul de vedere al receptorului este dat de raportul dintre dimensiunea ariei active a detectorului și distanța focală a obiectivului:

$$\theta = \frac{d}{f} \quad 4.4$$

Apertura de intrare a obiectivului determină puterea optică recepționată.

Pentru fotodetectorii aflați în focarul sistemului optic principalii parametri sunt sensibilitatea și timpul de răspuns [114, 115]. Timpul de răspuns este legat de precizia cerută pentru telemetrul cu laser. În general se folosesc fotodiode cu timpul de răspuns în domeniul $1 \div 100 \text{ ns}$. Responsivitatea spectrală a fotodiodelor scade cu creșterea lungimii de undă peste $1 \mu\text{m}$ și cu scăderea acesteia spre roșu. În Figura 4.6 este dat răspunsul spectral al unei fotodiode PIN.

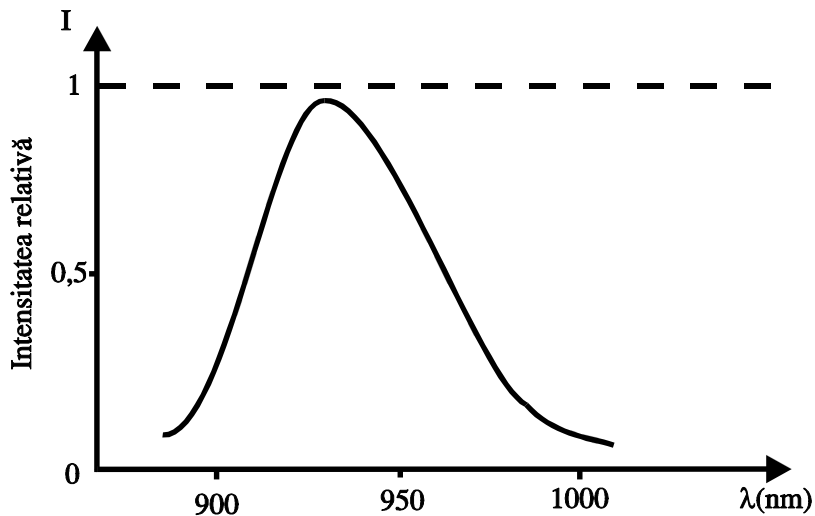


Figura 4.6

Pentru radiația laserilor cu YAG:Nd de 1,064 μm , la recepție se folosesc fotodiode cu siliciu de tip PIN sau cu avalanșă. La fotodiodele cu avalanșă câștigul intern este asigurat de multiplicarea în avalanșă a perechilor electron-gol într-un câmp electric invers, aplicat joncțiunii p-n .

Pentru lungimi de undă până la 1,7 μm se folosesc fotodiode PIN sau cu avalanșă realizate din semiconductori din grupele III-IV de tip InGaAs.

În prezent asistăm la trecerea treptată de la telemetrele cu laseri cu YAG:Nd pe lungimea de undă de 1,064 μm la cele cu radiație sigură pentru ochi, pe lungimea de undă de 1,54 μm . Aceasta a dus la modificări în tehnologia de realizare a emițătoarelor laser și a receptoarelor.

Pentru lungimea de undă de 1,064 μm fotodiodele cu avalanșă cu siliciu asigură responsivități de până la 35 A/W. Datorită acestei responsivități ridicate, preamplificatoarele sistemelor de recepție ale telemetrelor cu laseri cu YAG:Nd sunt optimizate pentru a asigura mai degrabă o gamă dinamică mare precum și protecția la reflexii la distanțe mici decât pentru un zgomot minim. Cu trecerea la 1,54 μm s-a trecut la folosirea fotodiodelor cu germaniu și InGaAs în locul celor cu siliciu al căror răspuns spectral cade la 1,1 μm .

Pentru lucrul în gamă extinsă de temperaturi materialul folosit este InGaAs pentru curenții de scurgere mici. Pe măsură ce performanțele acestora au crescut au început să înlocuiască detectorii cu germaniu.

În Tabelul 4.5 sunt prezentați comparativ parametrii fotodiodelor cu germaniu și cu InGaAs.

Tabelul 4.3

Parametrul	Germaniu	InGaAs
Preț	Scăzut	Scăzut-mediu
Responsivitate	0,7 A/W	0,8 A/W
Dimensiuni	Aproape nelimitată	Până la 3 mm în diametru
Capacitate	6 pf (diametru de 0,3 mm)	6 pf (diametru de 0,3 mm)
Timpe de răspuns	≈ 2 ns (funcție de producător)	2 ns (diametru de 0,3 mm)
Tensiune de alimentare	Nu sunt diferențe semnificative	
Zgomot	0,5÷1 pA/Hz (Φ 0,3 mm)	0,2 pA/Hz
Curent de scurgere	1 μA funcție de dimensiune și temperatură	30 nA

La început au fost preferate fotodiodele PIN datorită prețului scăzut, lucrului la tensiuni de alimentare mici, riscului de distrugere redus precum și datorită suprafeței active mari.

Fotodiodele cu avalanșă cu germaniu și InGaAs sunt deasemenea disponibile în prezent, însă sunt destul de scumpe, iar responsivitatea acestora nu a ajuns încă la nivelul celor cu siliciu, necesitând folosirea unui preamplificator cu zgomot redus.

În Tabelul 4.6 sunt prezentați comparativ parametrii fotodiodelor PIN și cu avalanșă de tip InGaAs.

Tabelul 4.4

Parametrul	Fotodiode PIN	Fotodiode cu avalanșă
Preț	Redus-mediu	Ridicat
Responsivitate	0,8 A/W	Până la 10 A/W
Dimensiuni	Până la 3 mm	Până la 85 μm
Capacitate	6 pf (diametru de 0,3 mm)	<1 pf (diametru de 85 μm)
Timp de răspuns	2 ns	<1 ns
Tensiune de alimentare	0 la 15 V (afectează capacitatea)-Nu este critică	Până la 95 V (afectează responsivitatea)-Este critică la câștig ridicat. Dependentă de temperatură.
Rezistența la distrugere	Bună	Acceptabilă
Zgomot	0,2 pA/Hz	1,5 pA/Hz
Curent de scurgere	30 nA (diametru de 0,3 mm)	200 nA (diametru de 85 μm)

La lungimea de undă de 1,54 μm zgomotul solar este mai redus astfel încât filtrul interferențial folosit la 1,064 μm se poate înlocui cu un filtru de tăiere a radiației cu lungime de undă mai mică. Retroîmprăștierea atmosferică este de asemenea mai redusă ceea ce permite să se folosească preamplificatoare fără variația câștigului pentru distanțe mici de măsură. Deasemenea aceasta micșorează riscul blocării preamplificatorului datorită semnalului retroîmprăștiat puternic.

În prezent există receptoare laser hibride de mici dimensiuni care conțin în aceeași capsulă și preamplificatorul. Fotodiodele cu avalanșă au nevoie de alimentare la tensiune ridicată, în jur de 70 V ceea ce impune folosirea unui convertor c.c.-c.c. sau preluarea acestei tensiuni din sursa de alimentare a laserului.

Pentru păstrarea unui câștig cât mai constant pe întregul domeniu de temperaturi de lucru se folosesc o serie de metode de control a tensiunii de alimentare:

- a). Măsurarea temperaturii și stabilirea tensiunii de alimentare pentru a urmări un coeficient de temperatură;
- b) Ajustarea tensiunii de alimentare funcție de zgomot, care la rândul său este dependent de temperatură;
- c) Folosirea unei fotodiode cu avalanșă "oarbe" pentru stabilirea tensiunii;
- d) Folosirea unei tensiuni fixe și termostatarea fotodiodei;

Toate aceste metode au avantaje și dezavantaje însă cea mai folosită este metoda

a). Pentru fotodiodele cu avalanșă InGaAs un coeficient de temperatură tipic este în jur de $0,18 \text{ V/}^\circ\text{C}$. În Figura 4.7 este dată schema bloc a unui receptor laser.

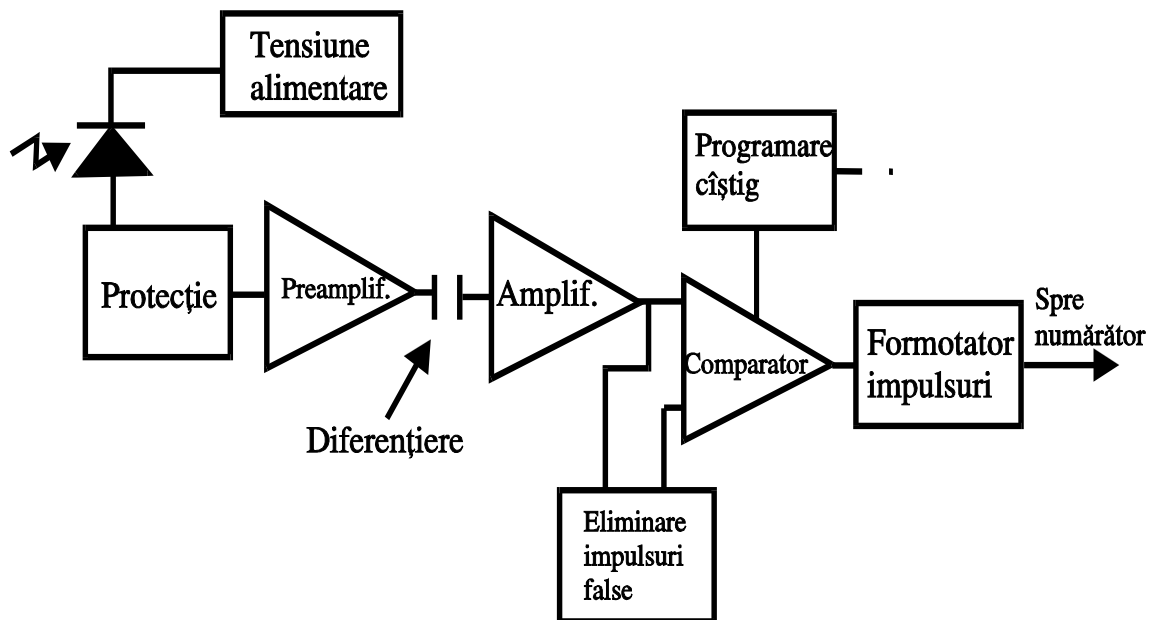


Figura 4.7

În anumite situații receptoarele laser pot fi distruse datorită reflexiilor întâmplătoare din timpul utilizării sau în momentul realizării alinierilor optice. Defectele pot să apară datorită: a) Distrugerii directe a materialului; b) Supraîncălzirii induse de radiația focalizată pe suprafața activă.

Chiar dacă radiația este distribuită uniform pe suprafața activă, pot să apară puncte de concentrare a radiației care să supraîncălzească zona respectivă. Radiația solară este în general eliminată cu ajutorul filtrelor, însă probleme pot să apară datorită impulsurilor laser. Pentru a evita distrugerea fotodetectorului se poate defocaliza ușor radiația pe suprafața acestuia, însă în anumite limite pentru a nu reduce prea mult sensibilitatea.

4.6 Alinierea axelor optice ale telemetrelor cu laser

Alinierea axei optice de emisie cu cea de vizare și cu cea de recepție constituie una din operațiile de bază care permit obținerea performanțelor maxime pentru un telemetru cu laser.

În câmpul de vedere al lunetei de vizare există în general mai multe repere gravate sau proiectate pentru ochire și afișarea diferitelor date.

Alinierea axei optice de emisie cu cea de vizare se obține prin suprapunerea mărcii de telemetrare peste direcția fasciculului laser. În acest mod marca de telemetrare materializează direcția fasciculului laser.

După alinierea emisie cu vizarea trebuie aliniată fotodiode de recepție în focarul obiectivului de recepție astfel încât radiația care vine de la ținta telemetrată să focalizeze pe aria activă a fotodiodei.

Alinierea celor trei axe optice se face conform Figurii 4.8, prin alinierea telemetrului față de un colimator cu focala de minim 1 m. Apertura colimatorului trebuie să cuprindă toate obiectivele telemetrului. Telemetrul și colimatorul se fixează rigid între ele pe un banc optic.

Pentru alinierea axei de emisie cu cea de vizare se plasează în focarul colimatorului o hârtie fotografică dispusă pe un suport plan, după care se declanșează un impuls laser. Se vizează prin lunetă pata "arsă" de impulsul laser pe suprafața hârtiei fotografice după care se deplasează reticulul de telemetrare până la suprapunerea lui peste pata vizată.

După alinierea emisie cu vizarea se îndepărtează hârtia fotografică din planul focal al colimatorului, iar în locul acesteia se poziționează o sursă de radiație pulsată, în general o diodă laser, cu durata impulsului cât mai apropiată de durata impulsului generat de telemetru. Se vizează prin lunetă și se reglează poziția diodei laser în planul focal al colimatorului până la suprapunerea mărcii de telemetrare peste aria de emisie a diodei laser (oginda de extracție a diodei laser). Se alimentează dioda laser și se reglează poziția fotodiodei de recepție, care în general este dispusă într-o montură cu excentrice de reglaj, până la obținerea la ieșirea preamplificatorului a unui semnal maxim. Semnalul se vizualizează cu ajutorul unui osciloscop. Aceste operații de aliniere sunt în principiu aceleași pentru toate telemetrele cu unele modificări în funcție de schema optică a acestora.

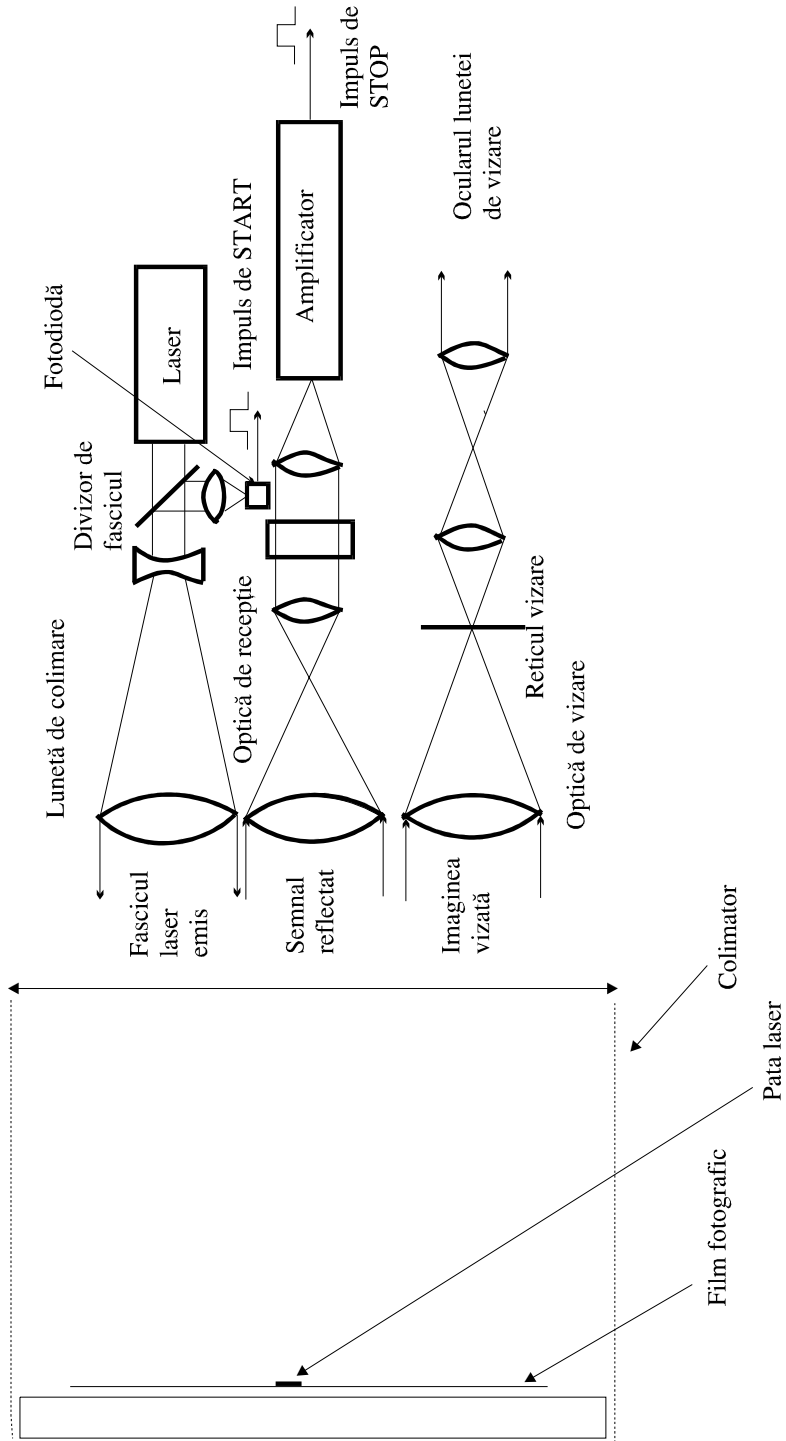


Figura 4.9

Bibliografie

1. E. R. Murray and J. E. van der Laan, "Remote measurement of ethylene using a CO₂ differential-absorption lidar," *Appl. Opt.* **17**, 814–817 _1978_.
2. N. Menyuk, D. K. Killinger, and W. E. DeFeo, "Laser remote sensing of hydrazine, MMH, and UDMH using a differentialabsorption CO₂ lidar," *Appl. Opt.* **21**, 2275–2286 _1982_.
3. H. Ahlberg, S. Lundqvist, and B. Olsson, "CO₂ laser long-path measurements of diffuse leakages from a petrochemical plant," *Appl. Opt.* **24**, 3924–3928 _1985_.
4. A. Ben-David, S. L. Emery, S. W. Gotoff, and F. M. D'Amico, "High pulse repetition frequency, multiple wavelength, pulsed CO₂ lidar system for atmospheric transmission and target reflectance measurements," *Appl. Opt.* **31**, 4224–4232 _1992_.
5. C. B. Carlisle, J. E. van der Laan, L. W. Carr, P. Adam, and J.-P. Chiaroni, "CO₂ laser-based differential absorption lidar system for range-resolved and long-range detection of chemical vapor plumes," *Appl. Opt.* **34**, 6187–6200 _1995_.
6. T. J. Kane, W. J. Kozlovsky, R. L. Byer, and C. E. Byvik, "Coherent laser radar at 1.06 μ m using Nd:YAG lasers," *Opt. Lett.* **12**, 239–241 _1987_.
7. A. N. Dills, G. Anderson, and R. J. Knise, "Holographic Raman _Rayleigh lidar for all-atmosphere thermal profiles," in *Laser Radar and Technology Applications VI*, G. W. Kamerman, ed., Proc. SPIE **4377**, 186–193 _2001_.
8. J. A. Hutchinson, C. W. Trussell, T. H. Allik, S. J. Hamlin, J. C. McCarthy, and M. Jack, Multifunction laser radar II," in *Laser Radar Technology and Applications V*, G. W. Kamerman, U. N. Singh, C. Werner, and V. V. Molebny, eds., Proc. SPIE **4035**, 248–253 _2000_.
9. C. L. Smithpeter, R. O. Nellums, S. M. Lebien, and G. Studor, "A miniature, high-resolution laser radar operating at video rates," in *Laser Radar Technology and Applications V*, G. W. Kamerman, U. N. Singh, C. Werner, and V. V. Molebny, eds., Proc. SPIE **4035**, 279–286 _2000_.
10. B. L. Stann, W. C. Ruff, and Z. G. Sztankay, "Intensitymodulated diode laser radar using requency-modulation_ continuous-wave ranging techniques," *Opt. Eng.* **35**, 3270–3278 _1996_.
11. A. V. Jelalian, *Laser Radar Systems* _Artech House, Boston, Mass., 1991_.
12. R. W. Byren, "Laser rangefinders," in *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook*, J. S. Accetta and D. L. Shumaker, eds. _Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Mich. and SPIE, Bellingham, Wash. 1993_.
13. T. N. Dreishuh, L. L. Gurdev, and D. V. Stoyanov, "Effect of pulse-shape uncertainty on the accuracy of deconvolved lidar profiles," *J. Opt. Soc. Am. A* **12**, 301–306 _1995_.
14. Y. J. Park, W. S. Dho, and H. J. Kong, "Deconvolution of long-pulse lidar signals with matrix formulation," *Appl. Opt.* **36**, 5158–5161 _1997_.
15. C. W. Trussell, "3D imaging for Army applications," in *Laser Radar and Technology Applications VI*, G. W. Kamerman, ed., Proc. SPIE **4377**, 126–131 _2001_.
16. Q. Zheng, S. Der, and H. Mahmoud, "Model-based target recognition in pulsed lidar imagery," *EEE Trans. Image Process.* **10**, 565–572 _2001_.
17. J. E. Nettleton, B. W. Schilling, D. N. Barr, and J. S. Lei, "Monoblock laser for a low-cost, eyesafe, microlaser range finder," *Appl. Opt.* **39**, 2428–2432 _2000_.
18. S. D. Setzler, P. A. Budni, and E. P. Chicklis, "A high energy Q-switched erbium at 1.62 microns," in *Advanced Solid-StateLasers*, C. Marshall, ed., Vol. 50 of OSA Trends in Optics and Photonics _Optical Society of America, Washington, D.C., 2001_, pp. 309–311.
19. T. R. Schibli, T. Kremp, U. Morgner, F. X. Ka`rtner, R. Butendeich, J. Schwarz, H. Schweizer, F. Scholz, J. Hetzler, and M. Wegener, "Continuous-wave operation and Q-switched mode locking of

- Cr4:YAG microchip lasers,” in *Advanced Solid- State Lasers*, C. Marshall, ed., Vol. 50 of OSA Trends in Optics and Photonics _Optical Society of America, Washington, D.C., 2001_, pp. 343–345.
20. S. Masuda, S. Takahashi, T. Nose, S. Sato, and H. Ito, “Liquidcrystal microlens with a beam-steering function,” *Appl. Opt.* **36**, 4772–4778 _1997.
21. Brevet de invenție nr.104799 "Dispozitiv de aliniere și fixare pentru oglinzi laser", autori Jurbă Mihai, Păunescu Marius;
22. Brevet de invenție nr. 104800 "Cap laser cu mediu activ solid pentru laseri pompați optic în impuls sau continuu", autori Jurbă Mihai, Păunescu Marius;
23. A. Sona, "Laser Handbook", edited by F.T. Arecchi and E. O. Schultz-Dubois, North-Holland, Amsterdam, 1457-1485, (1972)
24. J.D. Crawford, *SPIE Proc.* 21 Jan. 9, (1991)
25. P.P. Webb, *SPIE Proc.* 21 Jan. 17, (1991)
26. G.H. Olsen, D.A. Ackley, J. Hladky, J. Spadafora, K.M. Woodruff, M.J. Lange, *SPIE Proc.* 21 Jan. 24, (1991)
27. B.I. Denker, G.V. Maksimova, V.V. Osiko, A.M. Prokhorov, S.E. Sverchkov, *SPIE Proc.* 21 Jan. 50, (1991)
28. R.D. Stultz, D.E. Nieuwsma, E. Gregor, *SPIE Proc.* 21 Jan. 64, (1991)
29. J. Ottusch, D. Rockwell, *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 24, no. 10, 2076, Oct. (1998)
30. A. Perger, J. Metz, J. Tiedeke, E. P. Rille,) *SPIE Proc.* 21 Jan. 75, (1991)
31. H.S. Keeter, G.A. Gudmundson, M.A. Woodal II, *SPIE Proc.* 21 Jan. 84, (1991)
32. J.G. Daly, *SPIE Proc.* 21 Jan. 94, (1991)
33. S. J. Hamlin, J.D. Myers, M.J. Myers, *SPIE Proc.* 21 Jan. 100, (1991)
34. M.L.Mosbrooker, *SPIE Proc.* 21 Jan. 107, (1991)
35. G.T. Maker, A.I.Ferguson, *Appl. Phys. Lett.* 56, 1614, (1990)
36. V.J. Cocoran, *SPIE Proc.* 21 Jan. 160, (1991)
37. R.M. Gielen, R.P. Slegtenhorst, *SPIE Proc.* 21 Jan. 153, (1991)
38. M. B. Danailov, *J. Appl. Phys.* 75 (12), 8240, 15 June (1994)
39. R.K. Powell, B.N. Berdanier, J. McKay, Texas Instruments Inc. *SPIE Proc.* 21 Jan. 126, (1991)