Mr Nenad Dodić,
dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

LASERSKI DALJINOMERI U PROTIVVAZDUŠNOJ ODBRANI

UDC: 623.418.2:531.715

Rezime:

U radu su razmatrani različiti tipovi lasera vojne namene, posebno laserski daljinomeri pogodni za primenu u protivvazdušnoj odbrani. Detaljnije je opisan laserski daljinomer tipa Nd-YAG sa Ramanovom ćelijom za povećanje talasne dužine zračenja, koja ga čini bezbednim za oko. Dat je pregled savremenih brzih laserskih daljinomera i predloženi su postupci za poboljšanje merenja daljine.

Ključne reči: laserska tehnika, laserski daljinomer, merenje daljine, Ramanova ćelija, protivvazdušna odbrana.

LASER RANGEFINDERS IN AIR DEFENSE

Summary:

Various types of military lasers are discussed, especially laser rangefinders for air defense applications. The paper gives a more detailed description of Nd-YAG laser rangefinder with Raman cell that increases the wavelength of radiation and makes a laser eye-safe. A review of contemporary highfrequency laser rangefinders is given too. Some procedures to enhance the of range measurement are proposed.

Key words: laser techniques, laser rangefinder, range measurement, Raman cell, air defense.

Uvod

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je izvor intenzivnog monohromatskog koherentnog elektromagnetnog zračenja u infracrvenom, vidljivom ili ultraljubičastom delu spektra. Laserska tehnika je mlada disciplina. Prvi laserski uređaj pojavio se 1960, a prvi laserski daljinomer 1961. godine. Pored mikroprocesora laseri postižu verovatno najbrži razvoj u istoriji tehnike, i danas nalaze primenu u gotovo svim oblastima ljudske delatnosti. Iz mnoštva laserskih uređaja izdvaja se laserski dalji-

nomer, koji ima važnu ulogu u protivvazdušnoj odbrani (PVO), jer omogućava da se precizno izmeri daljina do cilja.

Osnovni delovi laserskog daljinomera su laserski predajnik i laserski prijemnik. Daljina se meri tako što predajnik emituje kratak svetlosni impuls, koji se odbija od cilja. Deo odbijenog laserskog zračenja dospeva u laserski prijemnik, koji ga detektuje. Daljina do cilja se izračunava na osnovu vremenske razlike između trenutaka detekcije i emisije i poznate brzine prostiranja svetlosti.

Kada se, pored daljine, u realnom vremenu mere i uglovi azimuta (pravca)

i elevacije (visine) cilja, moguće je, kroz postupke praćenja cilja i balističkog proračuna, obezbediti veliku verovatnoću pogađanja cilja, čak i nevođenim projektilima. Precizno merenje daljine je uslov za precizno određivanje tačke susreta projektila i cilja [1], što je naročito važno pri gađanju protivavionskim topovima, jer se putanja artiljerijskog projektila ne može korigovati u toku njegovog leta.

Merenje daljine može se obaviti i korišćenjem optičkih uređaja (na primer teodolita) koji se nalaze na dovoljno velikom rastojanju – kroz takozvani postupak triangulacije, ali je ovakvo merenje mnogo nepreciznije nego lasersko merenje daljine. Kada se za merenje koristi nišanski radar, preciznost je bliska onoj koju postiže laserski daljinomer. Teorijski posmatrano, merenje daljine laserom je najpreciznije, zbog male talasne dužine laserskog zračenja.

U odnosu na radar, laserski daljinomer se pri radu teže otkriva (zbog uskog snopa zračenja) i vrlo teško ometa. Osim toga, pri praćenju cilja laser se može povremeno i isključivati, bez značajne degradacije tačnosti praćenja – zahvaljujući zasebnim senzorima za merenje uglova cilja. Na taj način protivniku se otežava da locira sistem PVO. S druge strane, isključivanje radara za praćenje, po pravilu, znači i prekid praćenja cilja. Cena laserskog daljinomera višestruko je manja od cene radarskog sistema.

U poređenju s radarom, laser ima i određene nedostatke: manji mu je domet i osetljiviji je na atmosferske prilike (vlažnost, oblačnost). Osim toga, zbog uskog snopa zračenja (uslovljenog relativno malom energijom zračenja) laserski snop se mora vrlo precizno usmeriti ka cilju, znatno preciznije nego snop nišanskog radara.

Navedeni nedostaci lasera su manje izraženi pri praćenju bliskih ciljeva. Ako se, uz laserski daljinomer, koristi kamera i postupak obrade slike, automatsko praćenje može se postići i bez upotrebe radara. Ako se koristi termovizijska kamera, omogućeno je praćenje i gađanje ciljeva noću. Može se zaključiti da lasersko merenje daljine ima prednost nad radarskim u sistemima bliske PVO.

Tipovi lasera vojne namene

Postoji veliki broj tipova lasera, zavise od materijala od kojeg su izrađeni (čvrsti, tečni, gasoviti) i načina dovođenja energije (optičko, električno, hemijsko, mehaničko,...). Laseri se razlikuju po tehnologiji izrade, snazi zračenja, stepenu korisnosti, talasnoj dužini, učestalosti impulsa izlazne energije, itd. Laseri koji se najčešće koriste u vojne svrhe mogu se podeliti u tri grupe [2]:

- laseri čvrstog tela,
- gasni laseri,
- poluprovodnički laseri.

Lasери čvrstog tela

Prvi laserski daljinomeri bili su rubinski i pojavili su se početkom šezdesetih godina. Rubinski laseri zrače crvenu svetlost talasne dužine 0,69 mikrometara. S obzirom na to da je ovakvo zračenje vidljivo i opasno za oko, da su stepen iskorišćenja i učestalost ponavljanja impulsa rubinskih lasera mali, oni nisu naročito pogodni za vojnu primenu.

Sedamdesetih godina pojavljuju se Nd-YAG i Nd staklo-laseri. Konverzija energije u njima obavlja se posredstvom neodima (Nd). Atomi ovog aktivnog elementa utisnuti su u matricu kristala itrijum-aluminijum-silikat ($Y_3Al_2(SiO_4)_3$) ili

u polikristalnu matricu (specijalno staklo). Nd laseri se odlikuju velikom snagom impulsa (do 30 MW, obično 2 do 5 MW, pri čemu je energija impulsa 0,04 do 0,09 J), velikom učestalošću (do 30 Hz) i vrlo dobrim iskorišćenjem energije. Zrače u infracrvenom području – talasna dužina im je 1,06 μm . Snop zračenja ima izuzetno malu divergenciju i male energetske gubitke pri prolasku kroz atmosferu. Sve to ih čini izuzetno pogodnim za vojnu primenu, pa je većina lasera u vojnoj upotrebi upravo tipa Nd-YAG.

Na žalost, zračenje od 1,06 μm je vrlo štetno za oči, jer razara mrežnjaču. Zato se pri vežbovnoj upotrebi ovakvih lasera moraju preduzeti posebne mere opreza: poslužiocci nose naočari sa zaštitnim filterom, laser se ne sme usmeravati ka ljudstvu, itd. Krajem sedamdesetih godina počela je da se koristi takozvana Ramanova ćelija, koja se dodaje Nd-YAG laseru ili umeće u njega, a talasnu dužinu zračenja podiže sa 1,06 μm na 1,54 μm . Ovakvo zračenje je bezopasno za oko, jer se apsorbuje u tečnom delu oka, pre nego što dospe do mrežnjače [3].

U lasere čvrstog tela spadaju i erbijum staklo-laseri, koji su se do sredine sedamdesetih godina retko koristili, zbog vrlo male energetske korisnosti – desetak puta manje nego kod Nd-YAG lasera. Kod ovih lasera aktivni element je erbijum, utisnut u strukturu silikatnog stakla. Kada je sredinom osamdesetih godina silikatno staklo zamenjeno poboljšanim fosfatnim staklom, postignuta je efikasnost bliska onoj koju ima Nd-YAG laser [4]. Prednost erbijum staklo-lasera jeste što zrači na talasnoj dužini 1,54 μm , koja je bezopasna za oko.

Zračenje lasera čvrstog tela kompatibilno je sa vidljivom svetlošću, pa se za usmeravanje laserskog zraka i vidljive

svetlosti može koristiti jednak sklop sočiva, prizmi i ogledala. Ova činjenica pojednostavljuje ugradnju laserskih daljinomera čvrstog tela u nišanske sprave borbenih sredstava.

Gasni laseri

Aktivnu supstancu gasnih lasera čini ugljen-dioksid (CO_2). Energija se dovodi električnim putem ili mikrotalasnim zračenjem. Gasni laseri se nazivaju i CO_2 -laseri, a zrače u infracrvenom području, na talasnoj dužini 10,59 μm , saglasnoj sa termovizijskim kamerama (čiji je opseg zračenja 8 do 12 μm). Za ove lasere i termovizijske kamere koristi se, dakle, ista optika (germanijumska). Snaga impulsa zračenja obično iznosi do nekoliko megavata, a učestalost impulsa može biti stotinak kiloherca. Zračenje CO_2 -lasera nije štetno za oči, ali su gubici zračenja pri prolasku kroz atmosferu znatno veći nego kod lasera čvrstog tela, naročito kada ima vlage u vazduhu.

Refleksija zraka CO_2 -lasera od cilja manja je nego kod lasera čvrstog tela, naročito ako je cilj vlažan, hladan ili pokriven snegom (zbog veće apsorpcije zračenja). Ipak, najvažniji nedostatak ovih lasera je visoka cena – oni su dva do tri puta skuplji od Nd-YAG lasera.

Poluprovodnički laseri

Aktivni materijal poluprovodničkih lasera je kombinacija poluprovodnika (Ga As, In Ga P, itd. [2]). Kroz taj materijal propušta se električna struja velike gustine. Ovi laseri emituju zračenje u opsegu od 0,7 do 0,9 μm , a vršna snaga im je svega nekoliko stotina vati. Ako se tome doda i velika divergencija snopa – oko 20 stepeni (naspram nekoliko stotih

delova stepeni kod Nd-YAG lasera), može se zaključiti da su poluprovodnički laseri slični izvorima nekoherentne svetlosti i da se mogu koristiti samo za merenje jako malih daljina. Postoje nago-veštaji da će se razviti laserske diode sa stabilnijom talasnom dužinom i snagom većom stotinu puta od dosadašnje, što bi povećalo njihovu primenu u vojnoj obla-sti, ali ne i za merenje daljine u PVO, gde se zahtevaju mnogo veće snage laser-skog zračenja.

Laserski daljinomer tipa Nd-YAG

Posebna pažnja biće posvećena Nd-YAG laserskom daljinomeru, jer se on, zbog velike efikasnosti i niske cene, naj-više koristi, uprkos činjenici da je opasan po ljudsko zdravlje.

Šema generisanja zračenja ovog tipa daljinomera prikazana je na slici 1. Ak-tivni materijal (Nd-YAG) nalazi se iz-među dva paralelna ogledala. Prostor između njih naziva se laserska šupljina ili laserski rezonator. Dovođenjem optičke energije spolja, atomi Nd u laserskom materijalu, koji ima oblik štapa, dolaze u stanje povišene energije. Izvor optičke energije je zračenje ksenonske bleskalice. Kada dovedena energija dostigne odre-

Sl. 1 – Šema rada lasera

đen nivo, atomi počinju da emituju fotone koji se odbijaju od paralelno postavljenih ogledala, ponovo prolaze kroz aktivni materijal i izbijaju iz njega nove fotone,

čime se energija zračenja povećava. Jedno ogledalo reflektuje sve zrake (to-talna refleksija), a drugo propušta izve-stan deo zračenja. Iza ovog ogledala obra-zuje se snop paralelnih zraka iste talasne dužine.

Laserski daljinomer treba da emituje zrake u kratkim impulsima (14 do 20 ns), što se može postići zamenom jednog od paralelnih ogledala (slika 1) obrtnom pri-zmom (Q-prizma). Stimulisano zračenje u tom slučaju se odvija samo u kratkom vremenskom periodu kada je reflektivna površina prizme praktično paralelna sa nepomičnim ogledalom. Kada to nije slu-čaj, nema višestruke refleksije laserskih zraka, rasipanje energije u laserskoj šup-ljini je veliko i ne formira se izlazni snop. Laserski daljinomeri za sisteme PVO su repetitivni – mere daljinu 10 do 25 puta u sekundi. Mala divergencija snopa i velika snaga impulsa zračenja ovih dalji-nomera omogućuju domete merenja da-ljine koji zadovoljavaju potrebe bliske PVO.

Sl. 2 – Laserski daljinomer UAL 11612

Tipičan Nd-YAG laserski daljinomer za sisteme PVO – ERRICSON UAL 11612, prikazan je na slici 2. Funkcio-nalna šema predajnika ovog daljinomera prikazana je na slici 3. Bleskalica se napaja strujom iz okidačkog kola (koje sadrži kondenzator i tiristor za okidanje), preko okidačkog transformatora, koji diže napon na 15 do 20 kV [5]. Električno kolo za formiranje impulsa (prigušnica i

kondenzator) omogućava da blesak lampe bude pravilan. Okidanje bleskalice sinhronizuje se korišćenjem beskontaktnog davača (pick-up), a samo okidanje

je. Neposredno pre emitovanja zraka daljinomer šalje signal za postavljanje brojača na nulu. Brojač služi za merenje vremena između emitovanja zraka i pri-

vrši se neposredno pre nego što deflekciona prizma dođe u položaj totalne refleksije. Može se uočiti da se, umesto jedne rotirajuće prizme, koristi jedna rotirajuća i jedna nepomična prizma, čime se dvostruko skraćuje trajanje laserskog impulsa u odnosu na rešenje s jednom prizmom.

Laserski prijemnik – jedinica sa zasebnom optikom, sadrži uskopojasni filter (interferencijski filter) i prijemnu diodu (kod pomenutog daljinomera to je lavinska silicijumska dioda), na koju se fokusira primljeno lasersko zračenje. Dioda detektuje prijem reflektovanog laserskog impulsa. Uloga filtera je da spreči da nelaserska svetlost iz okoline aktivira diodu.

Daljinomerom upravlja računarska jedinica, razmenjujući signale TTL-nivoa (0 do 5 V). Pojedinačno merenje daljine počinje tako što računarska jedinica pošalje daljinomeru signal koji startuje okidačko kolo i otpočinje dovođenje energije

jema reflektovanog zraka. U trenutku emitovanja laserskog zraka daljinomer šalje signal za startovanje brojača, a u trenutku prijema reflektovanog zraka daljinomer šalje signal za zaustavljanje brojača. Ukoliko nema laserskog odraza, brojač se zaustavlja kada dođe do kraja brojnog opsega.

Izmerena daljina predstavlja umnožak sadržaja davača i kvanta daljine. Za kvant daljine 5 m, koji je najčešći kod laserskih daljinomera u PVO, učestalost brojača treba da bude 30 MHz. Savremeniji laserski daljinomeri imaju u sebi brojačku elektroniku i sa računarom komuniciraju preko serijske veze (RS-422, RS-485 i dr.).

Laserni Nd-YAG bezbedni za oko

Istaknuto je da zračenje Nd-YAG lasera, talasne dužine $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, oštećuje vid, a da laserski zraci od $1,54 \mu\text{m}$ nisu opasni za oko. Ovaj ozbiljni nedosta-

tak Nd-YAG lasera može se otkloniti, ako se talasna dužina zračenja poveća sa $1,06\text{ }\mu\text{m}$ na $1,54\text{ }\mu\text{m}$. Ovo pomeranje talasne dužine može se ostvariti korišće-

daljinomera tek krajem sedamdesetih godina. Prvi Nd-YAG laseri poboljšani Ramanovim rezonatorom pojavili su se na tržištu sredinom osamdesetih godina, da

Sl. 4 – Funkcionalna šema Nd-YAG lasera sa Ramanovom ćelijom

njem gasa metana pod pritiskom od 30 bara, smeštenog u takozvanu Ramanovu ćeliju, koja se postavlja ispred Nd-YAG lasera ili umeće u samu lasersku šupljinu (slika 4). Talasna dužina laserskog zraka koji izlazi iz odašiljača konvertuje se u veću talasnu dužinu postupkom stimulisanog vibratornog Ramanovog rasejanja [3], u cilindru s metanom. Kao i laserska šupljina, Ramanova ćelija predstavlja optički rezonator. Na izlazu iz ćelije postavlja se još i filter za blokiranje zaostalog zračenja od $1,06\text{ }\mu\text{m}$, kako bi se obezbedilo da izlazni snop bude sasvim bezopasan za oko.

Umetanjem Ramanovog rezonatora između reflektivnih površina (ogledalo, prizma), odnosno u lasersku šupljinu, pojednostavljuje se i pojeftinjuje konstrukcija lasera, a povećava efikasnost konverzije i kvalitet izlaznog zraka. Ovakvo rešenje je pouzdanije, jer je manje delova koji se podešavaju (rektifikuju), a veći intenzitet zračenja energije.

Stimulisano Ramanovo rasejavanje otkriveno je još 1962. godine, ali je počelo praktično da se koristi za razvoj laserskih

bi u devedesetim on postao standardna opcija za laserske daljinomere.

U tabeli su dati osnovni podaci za više savremenih laserskih daljinomera, namenjenih PVO [6]. Neki od njih prikazani su na slici 5.

Zahtevi za laserski daljinomer u bliskoj PVO

U sistemima PVO se izmerena daljina cilja, zajedno sa izmerenim uglovima azimuta i elevacije cilja, koristi u postupku praćenja za ocenjivanje (određivanje) vektora brzine i ubrzanja cilja (videti npr. [7]). Na osnovu ovih veličina određuje se tačka susreta projektila i cilja i oruđe usmerava u pravcu koji taj susret obezbeđuje. Da bi se ostvarilo uspešno praćenje i gađanje brzih ciljeva, položaj cilja mora da se meri sa dovoljno velikom tačnošću, učestalošću i pouzdanošću.

Pri projektovanju sistema upravljanja vatrom sa elektro-optičkim nišanskim uređajem, koji se nalazi u sklopu sistema PVO, treba postaviti zahteve za laserski daljinomer čija se ugradnja planira.

Alenia GAQ-4

El-Op HRLR

Simrad LV350

Eloptro LR-40

Litton NT-90

Ericsson Eye-safe

Ericsson UAL 11636

CILAS THS 304-06

GEC-Marconi
Type 629

Eloptro LT-20

Sl. 5 – Savremeni laserski daljinomeri za sisteme PVO

Naziv	Zemlja	Talasna dužina (μm)	Masa (kg)	Energija impulsa (J)	Frekvencija (Hz)	Opseg daljina (m)	Divergencija – vidni ugao		Tačnost (m)
							Odašiljač (mrad)	Prijemnik (mrad)	
SIMRAD LV 350	Norveška	1,06	2	–	–	150–9 995	–	8	5
GEC–Marconi 629	Britanija	1,06	6	0,06	10	300–10 000	–	–	2,5
Ericsson UAL 11612	Švedska	1,06	12	0,09	10	450–10 000	2	2	4
Ericsson UAL 11636	Švedska	1,06	10	0,08	do 25	200–20 475	1,5 (3)	3	5
Ericsson Eye-safe	Švedska	1,54	–	–	–	–	–	–	–
El-Op HRLR-ES	Izrael	1,54	14	–	10–20	250–19 995	2	–	5
Eloptro LR-40	Juž. Afrika	1,54	13,3	0,02	12,5 (20)	do 20 400	1,2	1,2	5
Eloptro LT-20	Juž. Afrika	1,06	17	0,08	–	200–65 535	1 (4)	4	1
Cilas THS 304–06	Francuska	1,54	30	–	2–20	300–40 000	–	–	4,5
Zeiss-Eltro CE658	Nemačka	1,54	–	30	12,5	do 40 000	–	3	–
Zeiss-Eltro HELEM II	Nemačka	1,54	2,5	15	20	–	1	–	–
Litton NT-90	SAD	1,06	10	0,09	20	do 20 000	0,5	–	–
Hughes HR	SAD	1,54	–	0,035	15 (20)	–	–	–	–
Alenia GAQ-4	Italija	1,06	11,5	–	20	300–10 235	–	–	6

Osnovni zahtevi za laserski daljinomer, sa stanovišta procesa praćenja cilja i upravljanja vatrom, u ovom slučaju su:

- opseg merenja daljine,
- učestalost merenja daljine (repeticija),
- tačnost merenja daljine.

Pored ovih zahteva, daljinomer treba da zadovolji još niz drugih zahteva, sa stanovišta eksploatacije i održavanja (opseg radnih temperatura, vlažnost, pouzdanost rada,...), što neće biti razmatrano u ovom radu.

Opseg merenja daljine određen je donjom i gornjom granicom merenja daljine. Donja granica uslovljena je činjenicom da lasersko zračenje, reflektovano od čestica iz okolnog vazduha (naročito čestica vode), ima dovoljno energije da aktivira laserski prijemnik (što prouzrokuje pogrešno merenje daljine cilja). Radi toga elektronski snop laserskog daljinomera treba da spreči merenje daljine ispod vrednosti koja se obično kreće od 200 do 300 metara. Ovakva donja granica

merenja daljine je prihvatljiva, s obzirom na to da se cilj vrlo retko i vrlo kratko nalazi na tako malim daljinama.

Gornja granica merenja daljine uslovljena je efikasnim dometom oruđa PVO i vremenom koje treba da protekne od zahvata cilja i prvog merenja daljine do otvaranja vatre. Artiljerijska oruđa PVO obično imaju kalibre do 40 mm i efikasan domet do 4 000 metara. Raketni sistemi bliske PVO obično imaju domet do 10 000 m. Vreme koje je neophodno da postupak praćenja dostigne tačnost potrebnu za gađanje, računajući od prvog merenja daljine, zavisi od tipa praćenja (poluautomatsko, automatsko), načina kretanja cilja, ali i od tipa oruđa i projektila koji se koriste. Može se usvojiti da se ovo vreme kreće od jedne do pet sekundi. Ako se usvoji da je najveća brzina kretanja cilja na malim visinama do 600 m/s, onda on za to vreme može preći najviše 3 000 metara. Za gornju granicu za merenje daljina može se usvojiti zbir dometa oruđa i dužine koju cilj

može preći za vreme od početka merenja daljine do otvaranja vatre. Tako je gornja granica za artiljerijska oruđa bliske PVO 7 000 metara, a za raketna oruđa bliske PVO do 13 000 metara.

Vrednosti opsega merenja daljina koje daju proizvođači lasera (tabela) treba razmatrati s rezervom, jer neke od njih predstavljaju samo tehničku mogućnost, ostvarljivu jedino u izuzetno pogodnim uslovima merenja. Efektivna gornja granica merenja daljine laserskim daljinomerom, za realne ciljeve PVO, ne prelazi desetak kilometara.

Potrebna učestalost merenja daljine zavisi od načina kretanja cilja i postupka njegovog praćenja. Prema Šenonovoj teoremi [8] učestalost merenja treba da bude dvostruko veća od frekventnog spektra promena veličina koje se mere. Proizilazi da ova učestalost treba da bude 20 Hz, u slučaju da je cilj borbeni avion [9].

U slučaju automatskog praćenja cilja korišćenjem TV ili termovizijske kamere poželjno je da učestalost merenja daljine bude 25 Hz, kako bi laser radio sinhronizovano s kamerom. U slučaju poluautomatskog praćenja [10], koje podrazumeva aktivno učešće operatora u celom toku praćenja i obezbeđuje precizno otvaranje vatre protivavionskim topom samo kada se cilj kreće pravolinijski konstantnom brzinom, učestalost merenja daljine od 10 metara sasvim je zadovoljavajuća.

Ispitivanja postupka praćenja i gađanja cilja korišćenjem računarske simulacije [11] pokazuju da tačnost merenja daljine u granicama ± 5 m obezbeđuje precizno praćenje ciljeva u vazdušnom prostoru i efikasno otvaranje vatre.

Predlog postupaka za poboljšanje merenja daljine

U sistemima bliske PVO sve se više koriste elektro-optički (optoelektronski)

automatski uređaji za praćenje, koji sami detektuju cilj u prostoru i mere njegove uglove u odnosu na stajnu tačku, korišćenjem televizijske ili termovizijske kamere. S obzirom na to da ove kamere, po evropskom standardu, daju sliku cilja svake 0,04 sekunde i da se slika sastoji od dve poluslike, koje su međusobno isprepletane, a koje se generišu svake 0,02 sekunde – merenje uglova cilja i praćenje cilja obično se odvija sa učestalošću od 25 ili 50 Hz. Računarska simulacija pokazuje da praćenje cilja sa učestalošću od 25 Hz obezbeđuje efikasno upravljanje vatrom protivavionskih topova, naročito ako se i merenje daljine obavlja sa istom učestalošću.

Tehnički nije problem napraviti laser koji meri daljinu s učestalošću od 25 Hz, ali je tada, zbog većeg temperaturnog naprezanja, potrebno koristiti kvalitetnije materijale i bolje rešiti hlađenje lasera, što povećava njegovu cenu. Većina savremenih lasera ima maksimalnu dopuštenu učestalost 20 Hz ili manju, pa se zbog toga javlja problem sinhronizacije merenja daljine s merenjem uglova cilja i postupkom praćenja. Predlog rešenja ovog problema izložen je u nastavku.

Neka je t trenutak u kojem su izmereni uglovi cilja, a t_L njemu najbliži trenutak u kojem je laserom izmerena daljina – $y_d(t_L)$. Izmerena daljina svodi se na trenutak t na sledeći način:

$$y_d(t) = y_d(t_L) - (t_L - t)v_d(t)$$

gde je v_d ocena radijalne brzine cilja (brzine promene daljine cilja), dobijena u postupku praćenja, korišćenjem ocena vektora položaja i brzine cilja. Korišćenje vrednosti $y_d(t)$, određene prethodnom relacijom, umesto vrednosti $y_d(t_L)$, koju daje laserski daljinomer, kompenzuje asinhronost merenja daljine.

Navedena jednačina omogućava i da se daljina koja se meri predviđa i u kratkim periodima kada laserski snop promašuje cilj ili kada dolazi do lažnih merenja (usled refleksije od drugog, bliskog cilja ili objekta, kao i usled greške u radu laserskog prijemnika), što u praksi nisu retke pojave (tipična verovatnoća pojave lažnih merenja je oko 0,5% [5]).

Osim od cilja, u laserski prijemnik gotovo uvek dospeva i deo zračenja koje se odbija od obližnjih čestica atmosfere (na udaljenosti od nekoliko metara do par desetina metara). Zbog toga elektromer u laserskom uređaju treba da blokira slanje signala za zaustavljanje brojača vrlo kratko vreme nakon laserske emisije.

Laserski prijemnik šalje signal kad god prijemnu diodu osvetli laserski zrak. To može biti zrak reflektovan od cilja, nekog drugog objekta ili od atmosfere – naročito kada u njoj ima kapljica vode. Tako se pri jednom poslatom laserskom impulsu može detektovati više od jednog laserskog odraza. Samo jedan odraz može biti od praćenog cilja ili su svi registrovani odrazi lažni.

Da bi se povećala pouzdanost merenja treba sprovesti sledeće aktivnosti:

- ispitati valjanost izmerene daljine,
- očitavati daljine koje odgovaraju većem broju registrovanih laserskih odraza, kako bi se smanjila verovatnoća da se izgubi merenje, zato što je pravom odrazu prethodio lažni.

Predlaže se sledeći postupak za ispitivanje valjanosti izmerenih daljina. Ispituje se uslov:

$$|y_d - d| < \Delta d_{\text{lim}}, \Delta d_{\text{lim}} > 0,$$

gde je d ocena daljine u posmatranom trenutku merenja, a Δd_{lim} dopušteno odstupanje. Ocena daljine dobija se na

osnovu ocene vektora položaja cilja u posmatranom trenutku, a ocena ovog vektora dobija se u postupku praćenja cilja, na osnovu prethodno obavljenih merenja. Smatra se da je y_d valjano merenje daljine, ako je dati uslov ispunjen. U početnom trenutku, kao i u slučaju da nije izmerena valjana daljina ni jednom na vremenskom intervalu $(t - \Delta t_{\text{lim}}, t)$, Δd_{lim} uzima maksimalnu vrednost: $\Delta d_{\text{lim}} = \Delta d_{\text{max}}$, a zatim eksponencijalno opada:

$$d_{\text{lim}}(t) = \lambda d_{\text{lim}}(t - \Delta t), 0 < \lambda < 1$$

sve do vrednosti $\Delta d_{\text{lim}} = \Delta d_{\text{min}}$. Δd_{lim} je unapred zadato vreme.

Da bi se smanjila mogućnost gubitaka podataka o cilju zbog registrovanja laserskih odraza koji ne potiču od cilja, nakon slanja laserskog impulsa, treba registrovati dva laserska odraza i meriti vreme putovanja laserskog zraka za svaki registrovani odraz. Dakle, treba koristiti dva ili više laserskih brojača i ispitivati validnost podataka o daljini koje daju svi korišćeni brojači.

Zaključak

Može se zaključiti da je laserski daljinomer najpogodnije sredstvo za merenje daljine cilja u bliskoj PVO. Jedina dobra, iako znatno skuplja alternativa je nišanski radar. On je bolji u lošijim vremenskim uslovima, ali ga protivnik i lakše otkriva, locira i ometa. Od mnoštva različitih tipova lasera, za primenu u bliskoj PVO mogu se preporučiti: Nd-YAG, erbijum-staklo i CO₂-laseri. Najbolji odnos cene i performansi ima Nd-YAG laser, koji dodavanjem Ramanovog rezonatora postaje bezopasan za oko. Takav laser trenutno predstavlja najbolji izbor.

Pri izboru određenog modela Nd-YAG laserskog daljinomera treba voditi računa da svojim osobinama (tačnost, opseg, učestalost merenja) zadovolji potrebe sistema u koji se ugrađuje. U radu se preporučuju brojčane vrednosti ovih osobina u slučaju upotrebe laserskog daljinomera u sistemima bliske PVO.

Ako je učestalost merenja daljine manja od učestalosti rada uređaja za praćenje (što je najčešći slučaj) podaci koje daje laser moraju se uskladiti sa podacima koje daju ostali senzori. Rešenje za ovaj problem predloženo je u radu.

Takođe, predložen je postupak za ispitivanje valjanosti podataka koje šalje laserski daljinomer. Zbog povremene pojave lažnih podataka predlaže se da se za merenje daljine koriste dva ili tri laserska brojača.

Literatura:

- [1] Milinović, M., Dodić, N.: Problem susreta projektila i cilja u sistemu automatskog upravljanja vatrom protivavionskog topa, *Vojnotehnički glasnik*, br. 5, str. 525–532, 1996.
- [2] Zorgno, M.: The Laser for tactical military applications, *Military technology*, Vol. 9, № 6, pp. 194–196, 1985.
- [3] Ogorkiewity, R.: Eye-safe neodymium lasers, *Int. Defense Review*, Vol. 23, № 2, pp. 174–175, 1990.
- [4] Pengelley, R.: OEC's eye-safe laser option, *Int. Defense Review*, Vol. 23, № 2, p. 176, 1990.
- [5] Laser rangefinder for BOFI UAL 11612 – technical manual, L M Erricson, Molndal, Sweden.
- [6] JANE'S ELECTROOPTIC SYSTEMS 1995–96 (na CD-u).
- [7] Dodić, N.: Praćenje manevrišućih ciljeva preključivanjem Kalmanovih filtera, *Vojnotehnički glasnik*, br. 2, str. 175–185, 1997.
- [8] Grujić, Lj.: Diskretni sistemi, Mašinski fakultet, Beograd, 1980.
- [9] Stojić, R.: Prilog sintezi dinamičkog upravljanja letom aviona – doktorska disertacija, Tehnička vojna akademija, Beograd, 1984.
- [10] Dodić, N.: Poluautomatsko praćenje letelica u sistemu upravljanja vatrom protivavionskog topa, *Naučnotehnički pregled*, vol. XLIV, br. 7, str. 28–34, 1994.
- [11] Dodić, N.: Istraživanje novih metoda praćenja manevrišućih ciljeva sa primenom na sisteme PVO, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1988 (predato za odbranu).