펄스형 고반복 레이저를 이용한 거리측정

최영수 · 박용찬 · 강응철
국방과학연구소

(1994년 11월 14일 받음)

본 연구에서는 펄스형 고반복 Nd:YAG 레이저를 이용한 거리측정기의 설계 및 그에 따른 제작 성능을 기술하고자 한다. 제작 결과로 얻어진 측정 최대거리는 지상표적에 대하여 약 19 km이다. 이 때 대기의 시정거리는 약 23 km이다.

I. 서 론

수 km 이상의 거리에 위치한 표적의 정확한 거리정보를 실시간에 획득하기 위해서 레이더 및 레이저가 주로 활용된다.[1,2] 레이더의 경우 날씨 조건에 무관하고 수백 km의 장거리 측정이 가능하나 대형이고 비용부담이 크다. 대기 조건에 따라 다소 민감하나 소형이고 노출성이 적은 특수응용에는 주로 펄스형 레이저가 이용된다.[3] 현재 펄스형 레이저 거리측정기로는 1.06 μm Nd:YAG, 1.54 μm 라만 파장변환 Nd:YAG 및 Er:Glass 그리고 10.6 μm CO_2 레이저 등이 이용되고 있다.[4-7] 이들은 대기에 대한 투과특성에 다소 차이를 보인다.[8] 최근에는 다이오드 레이저 및 OPO를 이용한 파장변환 레이저에 대한 관심도 증가되고 있다.[9,10]

펄스형 레이저 거리측정기는 레이저광의 왕복 진행시간 T를 측정하므로 원거리에 위치한 표적 또는 목표물에 대한 거리정보 R을 실시간에 정확히 획득할 수 있도록 식 (1)을 이용한다. 이 때 c는 빛의 속도이고 〈n〉은 진행매질의 평균 굴절률이다.

$$R=\frac{cT}{2\langle n\rangle} \tag{1}$$

펄스형 고반복 레이저를 이용한 거리측정기의 구성은 고반복 레이저 발진기, 고전압 직류변환공급장치, 송광 및 수광광학계, 광검출 신호처리회로 및 거리계산부 그리고 이를 위한 저전압공급장치로 구성된다.

본 연구에서는 진동 충격에도 안정성을 잘 유지하는 엇갈린 포로프리즘 공진기를 이용하여 전기광학적으로 Q-스위칭된 고반복 Nd:YAG 레이저 발진기, 반복률 15 Hz를 위해 플라이백 방법을 이용한 250 W 출력의 고전압 직류변환 공급장치,[11] 레이저광을 효율적으로 표적까지 보내는 송광광학계, 표적으로부터 되반사되어 돌아온 레이저광을 광검출기에 모아주는 수광광학계 그리고 Silicon-APD(Avalanche Photodetector)를 이용한 광검출 및 신호처리회로를 설계 제작하였다. 획득된 거리정보는 거리표시기(HP5082-7415) 및 마이크로 Controller(Intel, 8751)에 의한 RS232C 통신방식으로 컴퓨터에 전달되었다. 야외시험 결과에서 초당 15회로 30초 이상 거리정보를 연속적으로 획득한 시스템의 측정 최대거리는 지상표적에 대하여 약 19 km 이상이다. 이 때 대기투과의 환경조건은 23 km의 시정거리(visibility)이다.

II. 시스템 구성

그림 1은 거리측정을 위한 고반복 레이저 발진기와 송수광학계의 배치 및 구성도이다. 레이저 공진기는 외부 환경변화에 대해 높은 안정성을 유지하는 엇갈린 두 포로프리즘으로 구성하였다.[12,13] 사용된 Nd:YAG 레이저봉의 Nd 도핑농도는 1.1%이며 크기는 직경 5.7 mm 이고 길이 76.2 mm이다. 출력 반사율을 조절하기 위한 포로프리즘(A)는 파장 1.06 μm에서 굴절률 1.45인 Homosil 재질을 사용하였다. 포로프리즘을 반사경으로 사용할 경우 방위각의 조절로 출력반사율의 선택이 용이하다. Homosil 포로프리즘으로는 약 18%에서 90%까지 출력반사율 변화가 가능하며 본 연구에서는 출력반사율을 30%로 고정하였다. Q-스위칭을 위한 포로프리즘(B)는 파장 1.06 μm에서 굴절률 1.506인 Bk-7 재질로 방위각을

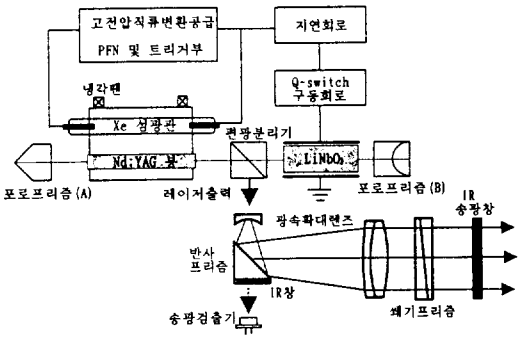

그림 1. 거리측정을 위한 레이저 발진기 및 송광광학계 구성도.

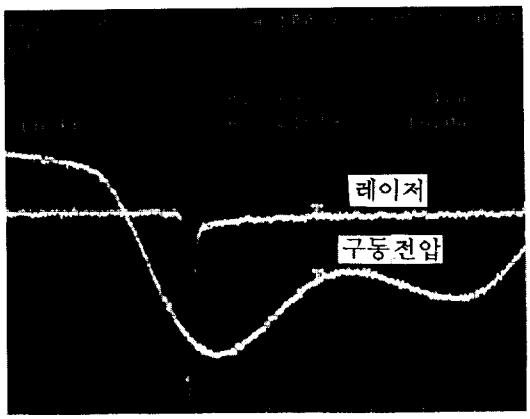

사진 1. 전기광학적 Q-스위칭 구동전압 및 레이저 펄스 파형.

엇갈린 45° 방향으로 고정하였다. 이 때 포로프리즘의 내부전반사에 의한 총 위상지연은 4.466 rad이다. 전기광학적 Q-스위칭을 위한 편광분리기의 소멸비는 1000:1이다. 또 Q-스위칭 결정체로는 크기가 9×9×25 mm인 $LiNbO_3$를 사용하였다. 포로프리즘에 의한 위상지연을 고려할 때 공진기의 최대 손실을 위하여 Q-스위칭 결정체 $LiNbO_3$에 가해지는 Q-스위칭 단힘전압은 약 −640 V이다. 고반복 동작시 발생되는 열발생을 제거하기 위해 두 개의 냉각 팬을 장반경 11.2 mm, 단반경 8.6 mm 그리고 길이 54 mm인 금도금 반사체에 부착하였다. 네모꼴 광펌핑 펄스 발생을 위해 PFN 회로는 30 μH, 25 μH 인턱턴스와 두개의 20 μF Capacitor로 이중 LC 회로를 구성하였다.

사진 1은 전기광학적 Q-스위칭 구동전압과 그에 따른 레이저 펄스의 파형이다. 전기광학적으로 Q-스위칭된 레이저 출력에너지는 80 mJ 이상이고 펄스폭은 15 ns

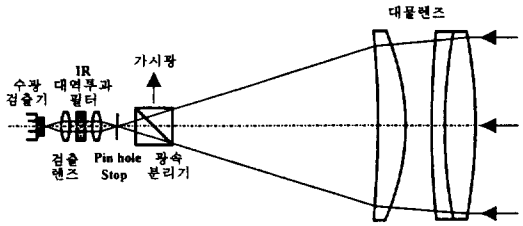

그림 2. 거리측정을 위한 수광광학계 구성도.

이하이다. 이 때 열림전압은 이론적으로 약 900 V이나 본 연구에서 인가된 Q-스위칭 열림전압은 1200 V 이상이다. 이는 결정체의 변형이 발생되기 전에 Q-스위칭 열림동작이 끝나므로 압전광학효과가 무시되어 광탄성 효과에 의한 광탄성계수가 실제 값보다 낮아지므로 전압을 높혀 보상한 때문이다.[12] Q-스위칭 열림지연시간은 Xe섬광관에 인가되는 트리거전압을 기준으로 130 μs 지연되었다.

송광광학계는 6배율 광속확대기, 직각반사프리즘, 광학 쐐기프리즘쌍 그리고 적외선 투과 송광창으로 구성되었다. 레이저의 광발산각을 줄이기 위한 광속확대기는 단일 오목렌즈와 이중접합 볼록렌즈로 구성된 무초점 광학계로 제작하였다. 이는 레이저광 집속에 따른 공기의 이온화 현상의 방지와 광속확대기의 전체 길이를 짧게 할 수 있기 때문이다. 반복률 15 Hz 동작시 광발산각은 0.7 mrad이다. 광속확대기 속에 있는 직각반사프리즘은 광진행방향을 90° 전환하기 위한 것이다. 이 때 일부 손실되는 레이저광을 광섬유를 통해 송광검출기로 검출하여 시작신호(start pulse)를 얻었다. 기준주파수 30 MHz인 수정발진자가 시작신호를 기준으로 동작한다. 또 Viedo 증폭기의 시간에 따른 증폭이득 조절이 진행된다. 이는 시스템의 오측정률을 감소시키기 위한 것이다. 송광과 수광학계의 광축방향 정렬을 위해 광 편차가 30분인 광학 쐐기프리즘의 쌍을 이용하여 광축 방향을 조정하였다. 적외선 투과필터를 이용한 송광창은 섬광관에 의해 발생되는 가시광을 차단하므로 외부노출을 방지하기 위한 것이다. 파장 1.06 μm에 대한 송광광학계의 투과도는 약 75%이다.

표적으로부터 난반사된 레이저광을 광검출기에 집속하기 위한 수광광학계는 집광용 대물렌즈, 편광분리기, Pin-hole Stop, 적외선 대역투과필터 그리고 광검출렌즈로 구성되었다. 전체 시스템의 제약된 크기를 고려하여 대물렌즈는 개구직경을 120 mm 그리고 F수를 2.3 이하로 설계하였다. 대물렌즈의 개구직경은 최대측정거리의 결정에 영향을 미치므로 레이저 거리방정식과 시스템의

총 NEP와의 관계를 통해 결정하였다. 수차보정과 작은 F수를 위해 집광용 대물렌즈는 이중 집합렌즈와 Positive Meniscus형 단렌즈로 설계 제작되었다. 이 때 파장 1.06 μm에 대한 유효초점거리는 274 mm이다. 대물렌즈의 초점면에 위치한 직경 0.41 mm의 Pin-hole Stop에 의한 광검출기의 시계(FOV, Field of View)는 1.5 mrad이다. Pin-hole Stop 앞에 위치한 광속분리기는 가시광에 대한 반사코팅과 1.06 μm에 대한 무반사 코팅이 되었다. 이는 송수광학계의 광축 정렬조정이 용이하도록 차선을 지닌 접안렌즈를 부착하여 사용하기 위한 때문이다. 이 때 파장 1064 nm와 637 nm에 의한 대물렌즈의 유효초점거리 차는 약 3 mm이다.

대물렌즈의 초점면에 모여진 광은 Pin-hole Stop을 통해 두개의 광검출렌즈와 적외선 대역투과필터를 지나서 직경 0.8 mm의 광검출기면에 전달된다. 전달된 광은 너무 미약하므로 광검출기와 증폭기를 거쳐 정지신호(stop pulse)를 발생하여 수정발진자의 동작을 멈추게 하므로 표적에 대한 광의 왕복진행시간을 얻게 된다. 이 때 적외선 대역투과 필터는 파장 1.06 μm에 대한 투과율이 88%이고 중심파장 1.06 μm에 대한 단파장쪽 대역폭은 15 nm이다. 두 광검출렌즈에 의한 배율은 1이고 직경은 6 mm이다. 파장 1.04 μm에 대한 수광광학계의 투과도는 약 80%이다. 송광 및 수광광학계에 사용된 모든 광학면은 파장 1.06 μm에 대하여 무반사 코팅되었다.

III. 시스템 성능

레이저를 이용한 거리측정에서 최대측정거리는 수광광학계로부터 얻어지는 광검출 출력이 시스템의 최소검출신호(MDS, Minimum Detectable Signal)의 크기와 같거나 클 때 주어진다. 최대측정거리를 위한 시스템의 최소검출신호는 식 (2)와 같이 표현된다.[2,14]

$$\mathrm{MDS}=\mathrm{SNR}\times\mathrm{NEP} \tag{2}$$

광검출신호는 여러 잡음신호와 함께 증폭기에 입력된다. 따라서 시스템에서 요구되는 레이저광의 검출확률 P_d과 오동작률(FAR, False Alarm Rate)에 따른 신호 대 잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)와 검출문턱전류 대 잡음비(TNR, Threshold to Noise Ratio)는 식 (3)과 (4)로 주어진다.[8,15] 또 시스템의 총 NEP(Noise Equivalent Power)는 광검출기 k_{Det}, 광대역 증폭기 k_{Amp} 및 배경복사 k_B에 의한 NEP의 합으로 주어진다. 본 연구에서 사용된 Si-APD 광검출기(EG&G, C30950E)는 초단증폭기를 자체에 내장하고 있다. 따라서 광검출기와 배경에 의한 NEP는 식 (5)로 표현된다. 사용된 광검출기의 전기적 특성은 표 1과 같다.

표 1. Si-APD 광검출기(EG&G, C30950E)의 전기적 특성

변수 (λ=1064 nm)	특 성
광검출기 유효직경	0.8 mm
응답도	1.4×10^5 V/W
양자효율	16%
NEP(0)	0.11 pW/Hz$^{1/2}$
대역폭 Δf	50 MHz
Rise/Fall Time	7 ns

$$P_d=\frac{1}{2}\left[1+erf\left(\frac{I_s-I_t}{\sqrt{2}I_n}\right)\right]$$
$$=\frac{1}{2}\left[1+erf\left(\frac{SNR-TNR}{\sqrt{2}}\right)\right] \tag{3}$$

$$TNR=\frac{I_t}{I_n}=\sqrt{-2\ln(2\sqrt{3}\tau FAR)} \tag{4}$$

$$NEP^2=(A_R T)^2[(k_{Det})^2+(k_{Amp})^2+(k_B)^2]\Delta f$$
$$=[NEP(0)^2+2\frac{hc}{\eta}\frac{FOV}{A_R T}\frac{\Delta\lambda}{\lambda}N_h\times10^4]\Delta f \tag{5}$$

이 때 I_s는 광검출신호전류, I_t는 검출문턱전류 그리고 I_n는 rms 잡음전류이다. τ는 레이저 펄스폭, Δf는 광검출기의 대역폭, $NEP(0)$는 사용된 광검출기의 NEP로 초단증폭기를 포함한 값, h는 Plank 상수, FOV는 광검출시계, $\Delta\lambda$는 적외선 투과 필터 대역폭으로 30 nm, λ는 레이저 파장 1.06 μm, N_h는 배경에 의한 파장별 광복사량[8] 그리고 η는 광검출기의 양자효율이다.

광검출기로 얻은 광검출 출력신호는 매우 미약하여 약 100배의 이득을 지닌 Differential Video 증폭기(LM 733)를 거쳐 정지신호를 얻었다. 이 때 시작신호와 정지신호의 시간차는 표적에 대한 레이저광의 왕복 진행시간을 의미한다. 두 신호의 시간차는 기준주파수 30 MHz인 수정발진자로 측정하고 식 (1)을 이용하여 거리계산이 이루어졌다. 이 때 획득된 거리정보의 측정오차는 ± 10 m이다.

식 (3)과 (4)에서 얻어진 검출확률 99%에 대한 TNR은 5이고 시스템의 SNR은 7.3이다. 광검출 증폭회로의 출력단에서 측정된 전체잡음은 약 12 mV이므로 검출확률

표 2. 고반복 레이저를 이용한 거리측정기의 설계 및 성능값

시스템 변수	성능값
최대측정거리 R_{max}	20 km(지상)
측정확률 P_d	99%
오측정률	1%
총 *NEP*	3 nW
신호 대 잡음비 *SNR*	7.3
최소검출신호 *MDS*	22 nW
레이저출력 P_t	7 MW
광발산각 θ	0.7 mrad
광학계 투과도 η_{sys}	60%
수광광학 개구직경 D	120 mm
광검출시계 FOV	1.5 mrad
거리측정오차	± 10m

99%에 대한 문턱전압을 60 mV로 하였다. 이 때 근거리 대기에서 나타나는 산란광에 의한 오측정률을 줄이기 위해 송광검출기로 얻은 시작신호를 기준으로 330 μs 동안 증폭이득조정회로로 시간에 따른 문턱전압을 조절하였다.[16] 식 (5)에 의한 NEP값은 약 2.3 nW이나 Video 증폭기와 주변 회로를 고려할 때 시스템의 총 NEP는 약 3 nW이다. 따라서 식 (2)에서 설계 제작된 시스템의 최소검출신호 MDS는 약 22 nW이다.

검출확률 99%를 만족하고 최대측정거리 20 km를 획득할 수 있도록 설계 제작된 Nd:YAG 레이저 거리측정기의 설계 및 성능값은 표 2와 같다.

레이저광이 송광광학계를 통해 표적으로 보내어진 후 표적으로부터 난반사되어 수광광학계를 통해 광검출되는 왕복진행과정에서 측정거리와 광검출 출력에 대한 레이저 거리방정식은 식 (6)과 같이 표현된다.[2]

$$P_r = \frac{P_T}{R^2 \Omega_T(\theta)} \rho_T A_P(R) \frac{A_R}{R^2 \Omega_r} T \eta_{sys} \qquad (6)$$

레이저 거리방정식에서 광검출 출력 $P_r(W)$은 레이저 출력 $P_T(W)$, 송광광학계에 의한 광발산각 θ(rad), 표적 평균반사율 ρ_T, 표적거리 R(m), 수광광학면적 A_R(m^2), 대기투과도 $\eta_{atm}=\exp(-2\alpha R/1000)$ 그리고 광학계 총투과도 T 등의 함수로 나타난다. 이 때 표적물은 일반적으로 레이저광에 대해 Lambertian 표적이므로 표적의 난반사 입체각 Ω_r은 π steradian이고 $A_T(R)$는 $\pi R^2\theta^2/4$로 거리에 따른 광발산면적 그리고 α는 대기투과 감쇄계수(km $^{-1}$)이다.

레이저광의 발산면적보다 충분히 큰 표적 즉 지상표적의 경우, 표적거리에 따른 표적 유효단면적 $\sigma(R)$은

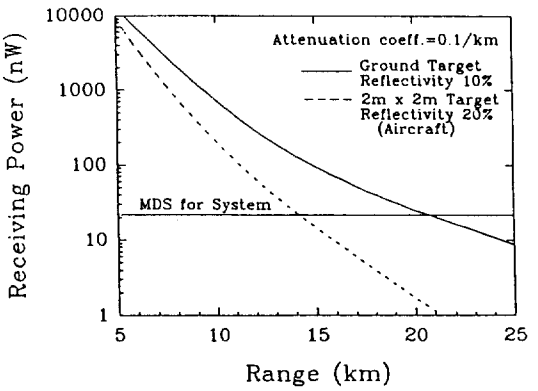

그림 3. 레이저 거리방정식에 의한 측정거리와 수광검출 출력관계.

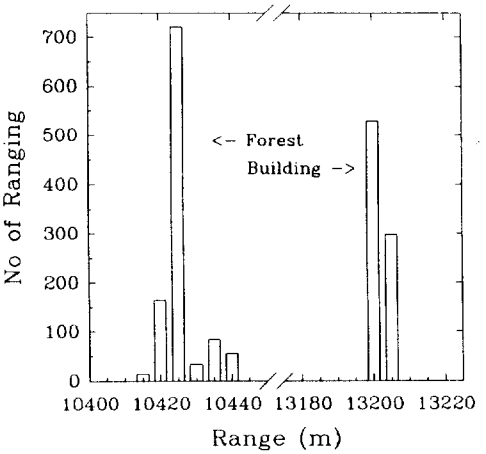

그림 4. 숲(10 km)과 빌딩(13 km)에 대한 거리측정치 분포.

$\pi\rho_T R^2\theta^2$이다. 따라서 거리방정식에서 난반사된 레이저광의 광검출 출력은 표적거리의 제곱에 반비례한다. 반면에 송광된 레이저광의 발산면적보다 작은 항공표적의 경우, 거리에 따른 표적면적 A가 거리와 무관하게 일정하므로 표적 유효단면적은 $4\rho_T A$이다.그러므로 항공표적에서의 광검출 출력은 표적거리의 4제곱에 반비례한다.

레이저거리방정식에서 나타난 설계 제작된 시스템의 지상 및 항공표적에 대한 측정거리와 광검출 출력과의 관계는 그림 3과 같다. 최대측정거리 20 km에서 시스템의 광검출 출력은 시스템의 손실을 약 3 dB로 고려할 때 30 nW 이상으로 최소검출신호의 크기를 충분히 만족한다. 이 때 지상표적의 반사율이 10%이고 시정거리가 약 23 km로 대기 투과 감쇄계수가 0.1 km $^{-1}$이다.[9] 항공표적에 대한 최대 측정거리는 약 14 km이다. 이는 거리

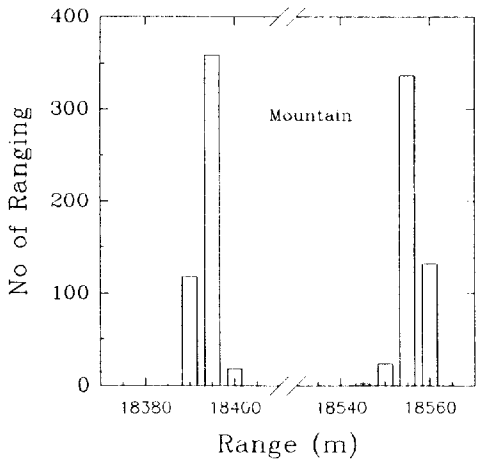

그림 5. 산(19 km)에 대한 거리측정치 분포.

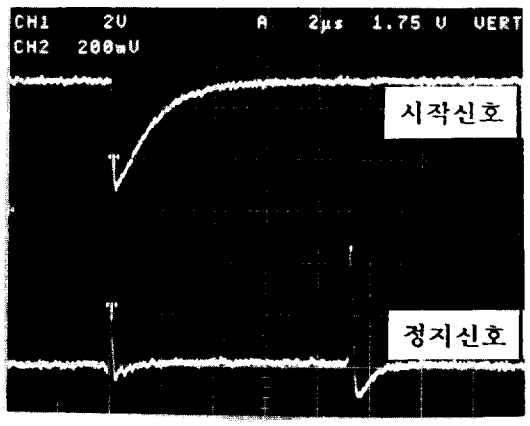

사진 2. 거리계산을 위한 시작 및 정지신호의 시간차.

증가에 따라 표적의 유효단면적은 일정하나 광발산면적은 늘어나므로 광검출 출력이 거리 증가에 따라 급격히 줄어들기 때문이다. 이 때 항공표적의 크기는 2 m×2 m이고 표적반사율은 0.2로 가정한 결과이다.[9]

그림 4와 그림 5는 고정된 거리측정기로부터 약 10, 13 그리고 19 km에 위치한 지상표적에 대해서 초당 15회로 30초이상 거리정보를 연속적으로 획득한 거리측정치의 분포이다. 지형적 요인으로 표적이 나무숲일 때 콘크리트 빌딩보다 거리측정치가 다소 분산되어 나타난다. 지상표적에 대하여 약 18.5 km의 거리정보가 획득될 때 시스템의 오측정은 0.5% 이하로 나타났다. 지형적 거리제한으로 19 km 이상의 지상표적에 대하여서는 거리측정이 이루어지지 못하였다.

사진 2는 실제 거리측정에서 나타난 시작신호(상)와 정지신호(하)의 시간차를 보인 것이다. 이 두신호의 시간차는 광의 왕복 진행시간으로 거리정보가 약 1.4 km임을 보인다. 시작신호와 동시에 나타나는 정지신호의 초기펄스는 인접한 대기 중에서 레이저광의 산란에 의한 것이다. 거리계산은 시작신호의 초기 하강하는 순간을 기준으로 시작되고 이는 레이저 펄스에 의해 나타난다. 그러나 시작신호의 뒷부분이 레이저 펄스보다 긴 것은 사용된 검출회로의 *RC* 시정수에 의해 나타난 것으로 의미가 없다.

사진 3. 설계 제작된 펄스형 레이저 거리측정기.

IV. 결 론

본 연구에서는 지상표적에 대해 최대측정거리가 20 km인 펄스형 고반복 레이저 거리측정기를 설계 제작하였다. 엇갈린 포로프리즘 공진기를 이용한 Nd:YAG 레이저 발진기, 반복률 15 Hz를 위해 플라이백 방법을 이용한 250 W 출력의 고전압 직류변환 공급장치, 레이저광의 발산각을 조절하여 표적으로 보내는 송광광학계, 표적으로부터 난반사되어 되돌아오는 레이저광을 광검출기에 모아주는 수광광학계 그리고 Si-APD를 이용한 광검출 및 신호처리회로를 설계하였다.

사진 3은 설계 제작된 펄스형 고반복 레이저 거리측정기를 삼각대에 거치한 모습이다. 검출확률 99%에 대한

시스템의 SNR은 7.3이고 최소검출신호는 약 22 nW이다. 야외시험에서 초당 15회로 30초 이상 거리정보를 연속적으로 획득한 시스템의 측정 최대거리는 지상표적에 대하여 약 19 km이고 시스템의 오측정은 0.5% 이하로 나타났다. 이 때 대기의 시정거리는 23 km 이상이다.

설계 제작된 펄스형 고반복 레이저 거리측정기는 빠른 속도로 이동하는 목표물의 거리정보를 연속적으로 획득할 수 있어 전자광학 추적장비(EOTS, Electro-Optical Tracking System), 레이저 조사기(Designator) 및 다양한 유도무기의 사격통제센서로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

[1] M. I. Skolinik, *Introduction to Radar Systems*, 2nd Ed.(McGraw-Hill, New-York, 1980).

[2] Albert V. Jelalian, *Laser Radar System*, (Artech House, Boston, 1991).

[3] M. L. Stitch, *Laser Handbook*, Vol. 2, edited by F. T. Arecchi and E. O. Schulz-Dubois, (North-Holland, Amsterdam, 1972).

[4] D. W. Coffey and V. J. Norris, Appl. Opt., **11**, 1013(1972).

[5] E. Gregor, D. E. Nieuwsma and R. D. Stultz, SPIE, **1207**, 124(1990).

[6] M. A. Woodall, J. R. Minch, J. Nunez, H. S. Keeter and A. M. Johnson, SPIE, **1207**, 100 (1990).

[7] M. J. Taylor and etal., Appl. Opt., **17**, 885(1978).

[8] Walter R. Kaminski, SPIE, **227**, 65(1980).

[9] Doug Flint, Photonics Spectra, pp. 116-118, April 1994.

[10] Larry R. Marshall, A. D. Hays, J. Kasinski and R. Burnham, SPIE, **1419**, 141(1991).

[11] Abraham I. Pressman, *Switching and Linear Power Supply, Power Converter Design*, (Hayden Book Company Inc., New Jersey, 1977).

[12] 김영대, 이종민, 새물리, **24**, 305(1984).

[13] M. K. Chun and E. A. Teppo, Appl. Opt., **15**, 1942 (1972).

[14] Clifton S. Fox, *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, Vol. 6, edited by J. S. Accetta, D. L. Shumaker, (SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1993), ch. 2.

[15] Electro-Optics Handbook, RCA Corporation, Lancaster, PA(1974).

[16] Ian D. Crawford, SPIE, **1419**, 9(1991).

Pulsed 15 Hz Laser System for Ranging

Young Soo Choi, Yong Chan Park and Eung Cheol Kang

Agency for Defense Development, Taejon 305-600, Korea

(Received: November 14, 1994)

Pulsed Nd:YAG laser system for the distance measurement has been developed and evaluated on the 15Hz repetition rate. For the 99% detection probability, signal to noise ratio (SNR) and minium detectable signal (MDS) of the laser ranging system are 7.3 and 22 nW, respectively. In field test, we obtained the maxmium range performance up to 19 km for the ground target under the 23 km visibility. Also, using the laser range equation, the relation of the receiving power and target range was evaluated for the ground and the aircraft target.