

## 함정용 레이다 운용을 위한 전광변환장치

## Electro-Optic Conversion Device for Naval Radar Operation

손 범 익<sup>1</sup> · 최 재 흥<sup>2</sup> · 김 종 만<sup>3\*</sup>

Beom-Ik Son<sup>1</sup> · Jae-Hung Choi<sup>2</sup> · Jong-Mann Kim<sup>3\*</sup>

### 요 약

함정용 능동위상배열 다기능레이다는 일반적으로 함내에 신호원이 위치하여 함상의 안테나부로 전기적 신호원을 송신할 경우 이격거리로 인해 충분한 신호원 공급이 어렵다. 본 논문에서는 신호원을 전광변환하여 공급함으로써 이격거리를 극복한 전광변환장치를 설계 및 제작하였다. 제작된 전광변환장치는 기준신호, 국부신호, 타이밍 펄스의 전광변환을 수행하였으며 EDFA(erbium doped fiber amplifier) 모듈을 이용하여 증폭하였다. 출력단 60개 포트를 샘플링하여 측정 한 결과, 예상 버짓대비 평균 약 +2 dB의 광출력을 보였다. 또한 고출력 광신호로부터 운용자를 보호하기 위해 자동으로 출력을 차단하는 인터락 기능을 적용하였으며 정상동작함을 확인하였다.

### Abstract

Generally, the signal source of active phased array multi-function naval radars is located inside the ship; thus, when an electrical signal source is transmitted to the antenna of the ship, it is difficult to supply a sufficient source to the antenna owing to the distance. In this study, we designed and fabricated an electro-optical conversion device that overcomes this problem by converting electrical signals into optical signals before supplying them. The fabricated device performed electro-optical conversion of the reference signal, local signal, and timing pulses and amplified them using an erbium-doped fiber amplifier module. The sampling and measuring results of 60 output ports showed that the average optical outputs were approximately 2 dB higher than the expected output. Additionally, to protect the operator from high-output optical signals, an interlock function that automatically cuts off the output was applied, and it was confirmed that the interlock function operates normally.

Key words: E/O, Optical Transmitter, Interlock

### I. 서 론

함정용 능동위상배열 다기능레이다에서 안테나부와 신호원과의 거리 및 연결성은 레이다 시스템 구성에 있

어 중요한 요소이다. 특히 함내에 신호원이 위치할 경우 함상의 안테나부로 기준신호, 동기신호, 국부신호 등을 전송하기 위해서는 많은 케이블과 신호 손실을 감수해야 한다. 이를 방지하고자 안테나부 내부에 신호원을 탑재할

「이 연구는 국방과학연구소 과제의 지원으로 연구되었음 (과제번호: UC160030FD).」

한화시스템(Hanwha Systems)

\*국방과학연구소(Agency of Defence Development)

1: 전문연구원(<https://orcid.org/0000-0001-8003-2608>), 2: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-2071-1454>), 3: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-0616-639X>)

· Manuscript received February 11, 2022 ; Revised February 4, 2022 ; Accepted March 23, 2022. (ID No. 20220211-001S)

· Corresponding Author: Beom-Ik Son (e-mail: [beomik.son@hanwha.com](mailto:beomik.son@hanwha.com))

경우 안테나부 전체 발열 및 무게 증가의 원인이 된다.

광통신방식을 사용하게 될 경우 일반적인 아날로그 및 디지털신호 전송방식에 비해 손실, 경량, 대역폭, 전자파 내성, 보안성 등 많은 이점을 갖게 된다<sup>[1]</sup>. 본 논문에서는 레이다 운용에 필요한 아날로그 및 디지털 신호를 신호 발생장치로부터 수신받아 전광 변환 및 증폭하여 안테나부로 공급하는 전광변환장치를 설계 및 제작하였다. LD(laser diode)를 기반으로 아날로그 E/O(electro-optic) 모듈을 제작하였고, 디지털 타이밍신호를 시리얼라이저를 이용하여 직렬화 후 SFP(small form-factor pluggable)로 전광변환하는 디지털 E/O 모듈을 제작하였다. 변환된 광신호는 1W급 EDFA(erbium m doped fiber amplifier)를 통해 증폭하여 안테나부로 전송된다. 이 때 레이다 설치환경에 따라 버짓을 만족하도록 출력레벨을 제어할 수 있게 하였다. 또한 레이저 안전 표준등급 class IV 기준인 500 mW 이상의 고출력 광신호의 경우 눈, 피부 등에 조사될 경우 상당한 손상을 초래할 수 있으므로<sup>[2]</sup>, 광 커넥터 탈착 시 자동으로 EDFA의 출력을 차단함으로써 운용자를 보호하는 인터락 기법을 적용하였다.

측정결과 제작된 전광변환장치는 광 링크 버짓을 만족하였고 광커넥터 분리 시 인터락 기능이 정상 동작함을 확인하였다.

## II. 전광변환장치 설계 및 제작

본 논문에서 제안된 전광변환장치 및 광 링크 블록도는 그림 1과 같다. 전광변환장치는 신호발생장치로부터 기준신호(reference), 국부신호(local), 타이밍신호(timing)를 입력받는다. 기준신호는 레이다 시스템 전체 동기 클럭용, 국부신호는 송수신모듈의 주파수 합성용이며 타이밍신호는 레이다 운용에 필요한 펄스 생성용이다. 이 중 RF 신호인 기준신호와 국부신호의 경우 아날로그 E/O 모듈에서 LD를 통해 광신호로 변환된다. 타이밍신호의 경우 다수의 펄스가 디지털 E/O 모듈에서 시리얼라이저를 통해 직렬데이터로 변경되고 SFP를 통해 광신호로 변환된다. 변환된 광신호는 EDFA를 통해 증폭되어 안테나부의 광분배기를 통과하여 각 송수신모듈로 수신된다. 송수신 모듈에서 아날로그 신호는 O/E 모듈의 PD(photo diode)

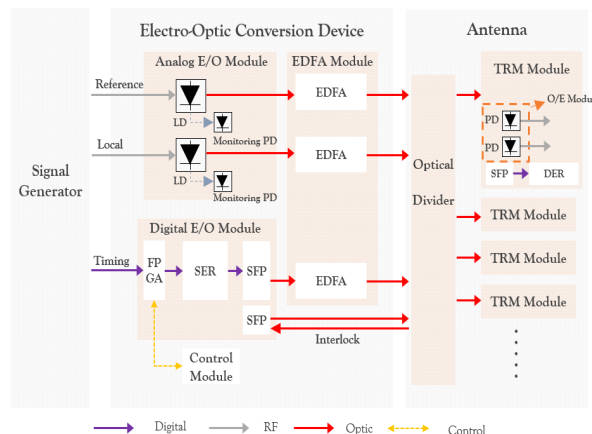


그림 1. 레이다 광 링크 블록도

Fig. 1. Block diagram of radar optic link.

를 통해 다시 RF 신호로 복원되며, 타이밍신호는 SFP를 통해 디지털신호로 변환되어 디시리얼라이저를 통해 본래 디지털 펄스로 복원된다. 디지털 E/O 모듈에는 별도의 인터락용 SFP가 존재하여 송신 광출력이 루프백되어 돌아오지 않을 경우 모든 광출력을 차단함으로써, 레이다 운용 중 운용자가 광 링크 중 일부 커넥터를 탈착할 경우 고출력 광신호로부터 운용자를 보호하는 역할을 수행한다.

안테나부 송수신모듈 구동에 필요한 신호레벨이 정해지면 전체 레이다 시스템의 광 링크 버짓계산을 수행한다. 광 링크 버짓은 기준신호, 국부신호와 같은 아날로그 신호와, 타이밍신호인 디지털신호가 계산방식에 차이가 있다. 타이밍 신호의 경우 디지털신호이므로 단순히 케이블 손실, EDFA 출력레벨, 광분배기의 손실을 고려하여 최종적으로 송수신 모듈의 SFP 수신단 감도 이상의 광레벨만 수신되도록 설계하면 된다. 그러나 아날로그 광신호의 경우에는 이와 더불어 전광-광전 과정에서 발생하는 변환손실, 광손실에 의한 RF 손실값이 계산되어야 한다. 먼저 광케이블의 경우 길이에 따른 손실은 km당 0.2 dB로 장거리 통신이 아닌 함 내 통신환경에서 거의 영향이 없으나 광커넥터에 의한 점점손실은 주요한 손실이 된다. 그림 1 구성도에서 장치 내부케이블은 LC(lucent connector), FC(fiber transmission connector) 타입 커넥터이나 장치 외부케이블은 모두 MIL급 D38999 커넥터가 적용되었다. 본 논문에서 버짓 산정 시 LC, FC 타입의 광 커넥

터 점점 손실은 약 0.2 dB이며 MIL급 D38999 커넥터의 경우 점점 손실이 약 0.5~1 dB이다. 또한 기준신호, 국부 신호와 같은 RF 신호는 전광/광전 변환과정을 통해 변환 손실  $CL$ (conversion loss)이 발생하게 되는데 이는 식 (1)과 같이 송신측 E/O 모듈 LD의  $SE$ (slope efficiency)와 수신측 O/E 모듈 PD의  $PDR$ (photo diode response), 50 옴 임피던스 매칭 과정에서 발생하는 손실  $L$ 에 의해 결정된다<sup>[3]</sup>.

$$CL = 20 \log \left( \frac{PDR}{SE} \right) + 2L \quad (1)$$

본 논문에서 설계된 LD의  $SE$ 는 약 0.125 mW/mA, PD의  $PDR$ 은 약 0.85 mA/mW,  $L$ 은 약 3 dB로 변환손실  $CL$ 은 약 17 dB로 설계되었다. 그림 2에 RF 신호의 아날로그 광 링크 버짓 블록도를 보였다. 입사 RF 신호는 E/O 모듈에서 전광변환되어 케이블, 점점 loss에 의해 감소하고 EDFA를 통해 증폭된 후 광분배손실을 거쳐 안테나부 O/E 모듈에서 RF 신호로 복원된다. 이 경우 출력  $RF_{OUT}$ 은 다음 식 (2)와 같이 계산된다.

$$RF_{OUT} = RF_{IN} + [(P_{IN} - P_O) \times 2] - CL \quad (2)$$

여기서  $RF_{IN}$ 은 E/O 모듈의 RF 입력레벨,  $P_{IN}$ 은 O/E 모듈의 광 입력레벨,  $P_O$ 는 E/O의 출력 광레벨이다. 식 (2)에서 RF 손실이 광파워 손실의 2배가 되는 이유는 PD에서의 광파워 변화는 파워가 아닌 전류의 변화를 끌어내기 때문에,  $P = I^2 R$ 에서  $I^2$ 에 비례하여 낮아지기 때문이다<sup>[4]</sup>. 식 (2)로 계산한 결과  $RF_{OUT}$ 이 송수신 모듈을 구동하기에 충분한 값이 되도록 EDFA를 선정하여야 한다. 안테나부 송수신 모듈 구동을 위한  $RF_{OUT}$ 은 약 -15 dBm으로 EDFA 출력레벨을 24 dBm으로 설정할 경우 광 링크 버짓은 표 1과 같다. MIL급 D38999 커넥터의 경우 점점 손실의 범위가 0.5~1 dB이므로 표 1의 4번 항의 손실은 실제로 -4.5~-9 dB의 범위를 갖는다. 본 논문에서는

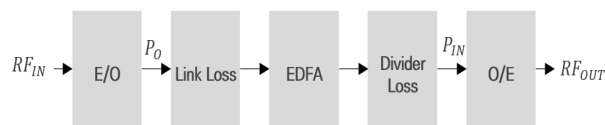


그림 2. 아날로그 광 링크 버짓  
Fig. 2. Analog optic link budget.

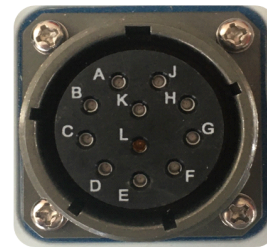
출력레벨 가변이 가능하고 최대 30 dBm 출력이 가능한 상용 EDFA를 선정함으로써 해당 범위의 광 링크 버짓을 만족하였다.

증폭된 광신호는 광분배기까지 다수의 D38999 타입 커넥터를 거치는데, 고출력 신호이므로 운용자가 실수로 송신 중에 커넥터를 탈착할 경우 안구, 피부 등에 큰 손상을 초래할 수 있다. 이를 방지하기 위해 그림 3과 같이 D38999 커넥터 여분핀 중 2개를 각각 디지털 E/O 모듈의 SFP 송신, 수신 포트에 연결하여 인터락 송수신 신호로 사용한다. 이 때 인터락 신호가 피드백되어 돌아오는 모든 경로의 점점 손실은 표 1을 참고하여 계산한다. 계산한 결과 수신감도가 전체 광 경로 버짓을 만족하는 SFP를 선정한다. 제어 모듈에서는 인터락용 SFP의 수신 상태 정보를 모니터링하여, 만약 인터락신호가 피드백되어 수신되지 않는다면 FPGA 제어를 통해 아날로그 E/O 모듈

표 1. 광 링크 버짓(1,550 nm, SM)

Table 1. Optic link budget (1,550 nm, SM).

No.	Parameter	Gain	Value	Type
1	$RF_{IN}$		10 dBm	RF
2	$P_O$		2 dBm	Optic
3	EDFA	22 dB	24 dBm	Optic
4	MIL D38999, 9 pcs	-4.5 dB	19.5 dBm	Optic
5	LC, FC type, 3 pcs	-0.6 dB	18.9 dBm	Optic
6	Optical divider loss	-20 dB	-1.1 dBm	Optic
7	$P_{IN}$		-1.1 dBm	Optic
8	$CL$	-17 dB		RF
9	$RF_{OUT}$		-13.2 dBm	RF



A : Timing  
B : Local  
C : Reference  
D : Interlock Tx  
E : Interlock Rx

그림 3. D38999 광커넥터 인터락 적용 형상  
Fig. 3. Interlock application of D38999 optic connector.

의 LD 출력 및 디지털 E/O 모듈의 타이밍용 SFP 출력을 차단한다. EDFA의 경우 입력신호가 없으면 출력되지 않으므로 전광변환장치의 모든 출력신호는 차단된다. 이 경우 안전을 위해 전광변환장치 부팅 시 E/O 모듈이 출력되는 시퀀스보다 인터락 신호 수신에 되지 않을 경우 E/O 모듈 출력을 차단하는 시퀀스가 시간적으로 우선시되도록 설계하였다. 이와 같이 설계함으로써 함 내 신호원부터 함상 안테나부까지 다수의 광케이블 커넥터 어느 곳을 분리하더라도 광출력이 차단됨으로써 작업자의 실수로 인한 사고를 방지할 수 있다.

### III. 측정결과

그림 1에 보인 광신호 경로의 모든 접점을 고려하고 EDFA 출력 24 dBm 설정 시 표 1과 식 (2)를 참고하면  $P_{IN}$ 의 예상값은 약 -1 dBm로 나타난다. 실제  $P_{IN}$ 의 측정결과를 그림 4에 보였다. 60개 포트를 샘플링하여 측정하였으며, 측정결과 -2~2 dBm까지 편차를 보였고 평균값은 예상값보다 약 2 dB 높은 약 1 dBm으로 측정되었다. -2 dBm이 출력된 포트는 송수신 모듈 단의 O/E 이후 증폭부에서 보상가능한 값이다. 측정결과와 편차가 발생하는 이유는 동일한 D38999 광 커넥터라도 접합할 때 미세한 광코어 얼라인의 부정합이 필연적으로 발생하기 때문이다. 변환손실을 고려하였을 때  $RF_{OUT}$ 의 예상값은 -13 dBm이었으나 예상값 대비 약 2 dB 높은 광레벨로

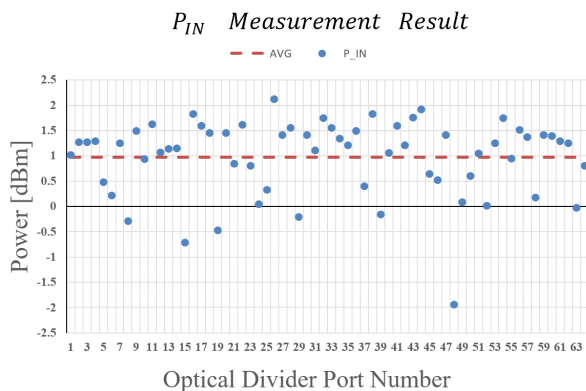


그림 4.  $P_{IN}$  측정결과

Fig. 4.  $P_{IN}$  measurement result.

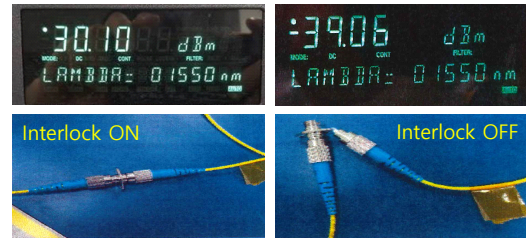


그림 5. 인터락 동작시험

Fig. 5. Interlock operation test.

인해 약 4 dB 높은 평균 -9 dBm을 보였다. 또한 본 EDFA는 출력레벨 제어가 가능하기 때문에 일반적으로 출력레벨 가변이 어려운 아날로그 신호원을 이용하는 레이더 시스템에 비해 레이더 설치 환경변화에 유연하게 된다.

인터락 동작 측정결과를 그림 5에 보였다. EDFA 레벨을 30 dBm으로 설정하고 그림 3의 D와 E핀을 광케이블로 연결하였다. 연결될 경우 1 W 이상의 신호가 정상출력되고 반대의 경우 출력신호가 차단되었다.

### IV. 결 론

본 논문에서는 함정용 능동위상배열 다기능레이더의 안테나부 신호공급을 위한 전광변환장치를 설계 및 제작하였다. 제작된 전광변환장치는 광출력 측정결과 예상대비 평균 약 2 dB 높게 측정되어 링크 시스템 버짓을 만족하였으며 광증폭레벨 제어, 타이밍 신호 직렬변환 전송, 인터락 기능이 정상 동작하였다.

### References

- [1] J. Hecht, *Understanding Fiber Optics*, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2002.
- [2] D. H. Sliney, "Laser safety," *Lasers in Surgery and Medicine*, vol. 16, no. 3, pp. 215-225, Jan. 1995.
- [3] Emcore, "Design guide: RF and microwave fiber optic." Available: <https://emcore.com/wp-content/uploads/2016/03/RF-and-Microwave-Fiber-Optic-Design-Guide.pdf>
- [4] MITEQ, "Fiber optic product directory," 2020. Available: [https://nardamiteq.com/docs/MITEQ\\_FiberOptic\\_c40.pdf](https://nardamiteq.com/docs/MITEQ_FiberOptic_c40.pdf)