

빔 스위칭을 이용한 24 GHz 장거리 탐지용 레이더 송신기

24 GHz Long-Range Radar Transmitter Using Beam Switching

이재은 · 윤정배 · 김동휘 · 송림 · 김병성

Jae-Eun Lee · Jeong-Bae Yoon · Dong-Hwi Kim · Reen Song · Byung-Sung Kim

요 약

본 논문은 3차원 장거리 탐지용 24 GHz FMCW(frequency modulated continuous wave) 레이더 구현을 위한 송신기를 제안한다. 제안하는 송신기는 높은 EIRP(effective isotropic radiation power)와 고각 정보를 획득하기 위해 수직 $\pm 15^\circ$ 사이에 7개의 스위칭 팬빔을 구현한다. 손실이 크고 출력이 제한되는 전자 스위치와 부피가 큰 수동 빔포밍 회로망 대신 각 지향 각도별로 안테나를 설계하고, 각 안테나를 7개의 전력증폭기로 직접 스위칭 구동하여 빔포밍 송신기를 구현하였다. 빔당 EIRP는 48.676 dBm 내외이며, 제작된 송신기 모듈의 크기는 27.5cm×11cm이다.

Abstract

This paper proposes a three-dimensional 24 GHz frequency modulated continuous-wave (FMCW) radar transmitter for long-range detection. The proposed transmitter implements seven switched vertical fan beams from 15° to -15° for high effective isotropic radiated power (EIRP) and vertical angle detection. Instead of using lossy electronic switches and large passive beamforming networks, the beamforming transmitter is achieved by directly switching the power amplifier, which drives a sectoral series patch array antenna. The EIRP of each beam is approximately 48.676 dBm, and the size of the transmitter is 27.5 cm × 11 cm.

Key words: Radar, 24 GHz, Beamforming, Transmitter

I. 서 론

최근 다양한 분야에서 소형 유무인기의 활용이 증가함에 따라, 비행체 사이에 충돌이 우려되고 있다. 따라서, 자율주행 차량과 유사하게 향후에는 유무인기도 센서를 통하여 위험상황을 인지하고, 자동으로 장애물을 회피하는 조종사 보조 시스템이 필요하다. 위험상황을 인지하기 위해서는 최소 1 km 이상의 거리에서부터 타 유무인기가 감지되어야 한다. 또한, 비행체는 3차원 기동을 하기 때

문에, 최소한 거리, 고각, 방위각과 같은 3차원 방향을 탐지하는 센서가 필요하다. 특히 1 km 이상에 위치한 표적을 탐지하기 위해서는 고가의 광학 센서나 레이더가 필수적이다. 고배율 광학 센서는 FOV(field of view)가 작아 탐지 상황에서는 레이더 센서가 필수적이다. 소형 비행체의 가용공간과 비용을 고려해 볼 때 기계식 회전을 사용하는 3차원 레이더나 고성능의 위상 배열 레이더를 장착하기는 어렵다. 따라서, 수 km 탐지 거리를 갖는 저가의 3차원 레이더의 개발이 필요하다. 아울러, 충돌 방지를

「이 연구는 2021학년도 한국산업기술평가관리원의 산업기술혁신사업 지원을 받아 연구되었음(No. 20002712).」

성균관대학교 정보통신대학(College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received September 17, 2021 ; Revised October 5, 2021 ; Accepted October 21, 2021. (ID No. 20210917-081)

· Corresponding Author: Byung-Sung Kim (e-mail: bskimice@skku.edu)

위해서는 탐지 각도가 최소 상하좌우 30° 이상이 필요하며, 수도 이내의 방위각, 양각 해상도를 제공해야 한다^[1].

본 연구에서는 저가의 3차원 전자 스캔 레이더를 구현하기 위해 송신기에서 수직 방향으로 다수의 고 이득 대 전력 팬빔을 구현하여 탐지거리를 늘리고, 양각 정보를 추출할 수 있는 빔포밍 송신기를 제시한다.

통상적으로 패치 안테나의 경우, 빔을 조향하기 위하여 버틀러 매트릭스나 로트만 렌즈와 같은 수동 빔포밍 회로망을 사용하는데, 이 방법은 위상 천이 회로망의 손실이 크고, 전체 송신기의 크기가 매우 커지는 단점이 있다^[2]. 위상 천이기를 쓰면 상대적으로 작은 사이즈로 빔포밍이 가능하나, 24 GHz에서는 해당 전자부품을 구하기도 어려울 뿐더러 손실도 커서 전력 낭비가 심한 문제점이 있다^[3]. 아울러, 위상배열 안테나 구조는 정면 빔에서 멀어질수록 안테나 빔이 넓어지며, 이득이 감소하는 특성이 있어 장거리 탐지와 해상도 면에서 불이익이 있다.

본 논문에서는 고각 방향에 따라 각도별 지향성을 갖는 다수의 마이크로스트립 배열 패치 안테나를 구현하고, 각 안테나를 구동하는 전력증폭기를 직접 스위칭함으로써 고 이득 대 전력으로 넓은 탐지 범위를 가진 레이더 송신기를 구현하며, 전력 분배를 하는 과정에서 생기는 전력손실을 보완하고자 구동 증폭기를 입력단에 추가하였다.

본 논문은 2장에서는 레이더 송신기의 구성도를, 3장에서는 양방향 급전 마이크로스트립 팬빔 배열 패치 안테나의 구성과 각 안테나 배열에 전력을 분배하기 위한 마이크로스트립 전력 분배기의 설계, 전력 증폭기 스위칭을 위한 게이트 전압 조절에 대해 설명하고, 4장에서는 측정 및 시뮬레이션 결과를, 마지막으로 5장에서는 결론을 제시한다.

II. 레이더 송신보드 구성도

그림 1은 송신 신호 발생 모듈과 안테나 모듈로 나누어 구현한 레이더 송신기의 구성도이다. 신호 발생 모듈은 외장 PLL과 VCO 내장 송신 칩으로 구성되어 FMCW 신호를 만들어 안테나 모듈로 공급한다. 공급된 고주파 신호는 안테나 보드의 구동 증폭단을 통하여 1차 증폭되고,

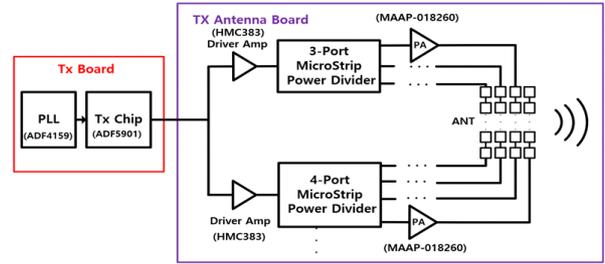


그림 1. 24 GHz 레이더 송신보드 구성도
Fig. 1. 24 GHz radar transmit board diagram.

3포트 및 4포트 마이크로스트립 전력 분배기를 통해 각 전력 증폭기로 분배된 후 구역별 안테나로 방사된다. 각 안테나는 $-15^\circ \sim +15^\circ$ 의 상하 각도를 5° 씩 나누어지며, 전력증폭기를 직접 스위칭하여 선택적으로 한 빔씩 방사한다. 안테나 모듈의 크기를 줄이기 위해 중앙 방사 안테나를 제외한 안테나는 양방향에서 급전하여 하향빔과 상향빔을 한 안테나로 구현하였다^[4]. 전력증폭기는 연산증폭기를 이용한 전압 가산 회로로 게이트 바이어스를 조절해 스위칭하였다.

III. 안테나 및 전력 분배기 설계

3-1 양방향 급전 마이크로스트립 팬빔 배열 안테나 설계

장거리의 목표물을 탐지하기 위해서는 높은 EIRP를 갖는 송신 모듈을 구현해야 한다. 고 이득 안테나는 직렬 급전 방식의 마이크로스트립 배열 안테나를 2열로 배치하여 구현하였다. 0° 방향을 탐지하는 안테나는 단일 방향 급전 구조로, 0° 를 제외한 $-15^\circ \sim +15^\circ$ 각도를 탐지하는 안테나는 양방향 급전 구조로 구성했다. 하향빔은 그림 2에서 상위 포트에서 급전하며, 복사 패치 간 급전 길이를 $\frac{\lambda}{2} + \theta$ 로 늘려 구현하였으며, 대칭성을 이용해 상향빔은 하위 포트에서 급전해 구현하였다. 안테나는 Rogers사의 Ro5880 10 mil 기판에 설계하였다.

그림 3은 설계된 안테나의 상하 방사패턴이다. 표 1은 각 안테나의 이득을 정리하였고, 모든 안테나의 SLL은 10 dB 이상이 되도록 설계하였다.

그림 4는 설계된 안테나의 반사 손실 그래프이다. 모든

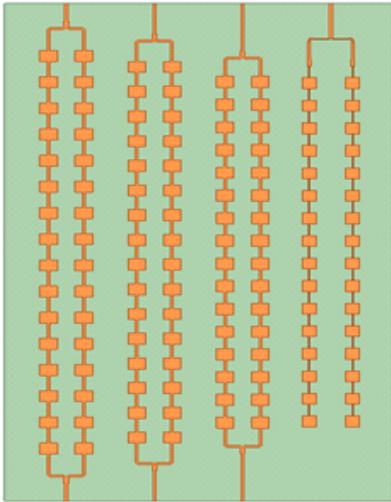


그림 2. 설계된 안테나
Fig. 2. Designed antenna.

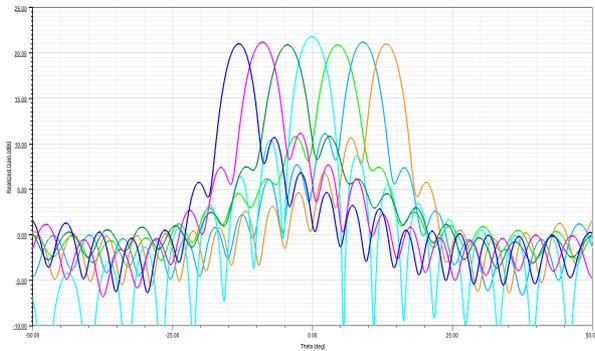


그림 3. 설계된 안테나의 상하 방사 패턴
Fig. 3. Designed antenna elevation radiation pattern.

표 1. 안테나의 시뮬레이션 결과
Table 1. Antenna simulation result.

degree	Gain
-13.2°	20.99 dBi
-9°	21.16 dBi
-4.5°	20.88 dBi
0°	21.47 dBi
4.5°	20.87 dBi
9°	21.16 dBi
13.2°	20.98 dBi

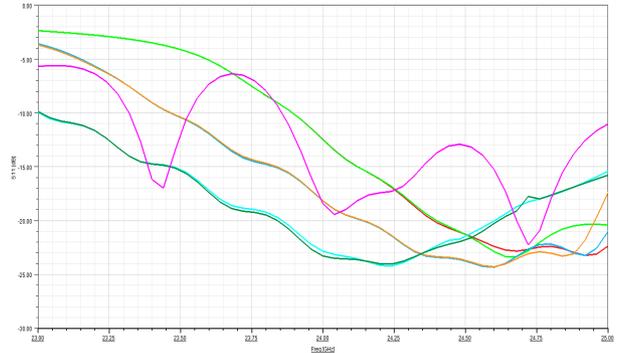


그림 4. 설계된 안테나의 반사 손실
Fig. 4. Designed antenna return loss.

안테나는 송신 보드의 동작 주파수인 24~24.25 GHz에서 반사손실이 -12 dB 이하로 설계하였다.

3-2 마이크로스트립 전력 분배기 설계

단일 신호원으로부터 섹터별 지향 안테나에 고주파 신호를 전달하기 위해 그림 5의 간단한 구조의 마이크로스트립 선로 전력 분배기를 구현하였다^[5]. 마이크로스트립 전력 분배기의 특성 임피던스 Z_1 은 식 (1)에 의해 계산된다.

$$Z_1 = \frac{Z_2}{N} \quad (1)$$

여기서 Z_2 는 다중 병렬 마이크로스트립 출력 라인의 특성 임피던스이며, N 은 출력 포트 수이다. 본 논문에서는 Z_0 , Z_2 는 50 Ω, 4포트 분배기의 Z_1 은 12.5 Ω, 3포트 분배기의 Z_1 은 16.67 Ω으로 설계하였다. 마이크로스트립 전력 분배기는 안테나와 같은 ANSYS사 HFSS EM 시뮬레이션을 통하여, Roger사의 Ro5880 10 mil 기판에 설계하였다. 그림 6(a)는 설계된 3포트 마이크로스트립 전력 분배기 모델이고, 그림 6(b)는 4포트 마이크로스트립 전

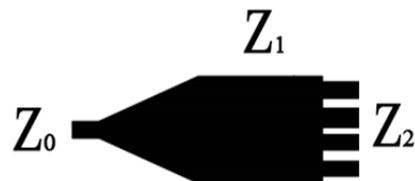


그림 5. 전력 분배기 구조
Fig. 5. Power divider structure.

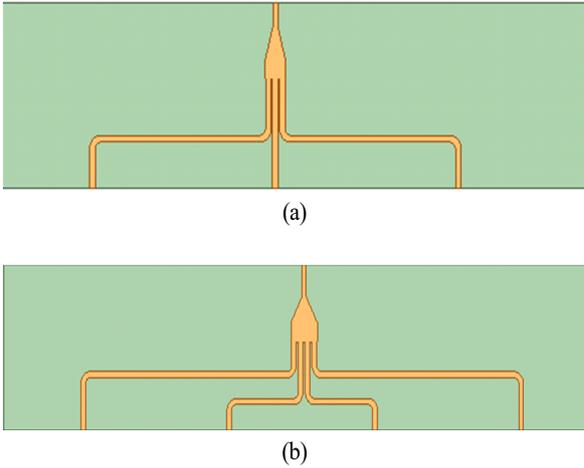


그림 6. (a) 3포트 마이크로스트립 전력 분배기 모델, (b) 4포트 마이크로스트립 전력 분배기 모델
Fig. 6. (a) 3-port microstrip power divider model, (b) 4-port microstrip power divider model.

력 분배기 모델이다.

3-3 게이트 전압 조절을 위한 전압 가산 회로 설계

모든 전력증폭기를 동시에 동작시킬 수도 있지만 고각 정보를 획득하기 위해 전력증폭기를 스위칭하여 각 안테나의 빔을 순차적으로 송신한다. 섹터별 빔의 고각 범위보다 정확한 양각 정보는 수직 2채널 수신기를 사용해 추정할 예정이다. 순차적 빔 조향을 위해서 스위치 대신 전력증폭기를 직접 스위칭하는 방식을 선택하였다. 스위치를 사용하는 경우, 전력증폭기를 하나만 사용해도 되는 장점이 있으나, 스위치에서 전력 제한이 생겨 대전력 구동이 힘들다. 스위치와 안테나 사이에 전력증폭기를 두면 구동 전력을 키울 수 있으나, 스위치와 전력증폭기를 동시에 on-off 시켜야 하며, 스위치 및 추가 선로에 의한 손실이 큰 것으로 확인되었다. 아울러, 24 GHz에서 스위치는 대부분 bare die 형태로 제공되어 제작의 용이성이 떨어져, 전력증폭기를 직접 스위칭하는 방식을 선택하였다. 대전력 증폭기는 on-off 시에 입력 임피던스를 Anritsu 사의 MS4647A VNA로 측정결과, off-state일 때 54.34 Ω으로 변화가 크지 않음이 실험적으로 확인되었기 때문에 구동 증폭단의 전력은 on-off에 관계 없이 분배 채널 수만큼 감쇄되어 전력증폭기에 공급되게 된다. 따라서, 전력분배기에서 감쇄

는 감안하여 전체 송신단의 이득을 구현하였다.

대전력 증폭기는 화합물 반도체로 구현되었기 때문에 정상 동작상태에서는 -0.8 V , 차단 상태에서는 -2.5 V 를 번갈아 인가해야 한다. 이 전압은 음전압 레귤레이터와 OP AMP를 이용한 전압 가산 회로를 구성하여 구현하였으며, 제어신호는 FPGA를 사용해 구현하였다.

그림 7은 전압 가산 회로이다. $V_{in(1)}$ 쪽에 -1.7 V 와 0 V 를 번갈아 인가 해주고, $V_{in(2)}$ 쪽에는 -0.8 V 를 고정으로 인가하여 최종 V_{out} 은 식 (2)에 의해서 결정된다. 이를 이용하여 게이트 전압을 -0.8 V 와 -2.5 V 로 조절하였다.

$$V_{out} = -R3 \left(\frac{V_{in(1)}}{R1} + \frac{V_{in(2)}}{R2} \right) \quad (2)$$

그림 8(a)는 게이트 전압과 전력증폭기의 24 GHz 출력을 오실로스코프로 측정한 결과이고, 그림 8(b)는 게이트 전압과 전력증폭기 출력의 시작 지점을 확대하여 측정한 결과이다. 게이트 전압을 $30\ \mu\text{s}$ 보다 짧게 변화시키면, 전력증폭기 출력에서 채터링 현상이 일어나게 되어 이를 방지하기 위하여 직렬 저항으로 댄핑 상수를 조절하였다. 이상적으로는 게이트를 더 빠르게 스위칭할 수 있으나, 증폭기의 안정성을 위해 게이트에 필요한 바이패스 용량 때문에 스위칭 속도에 제한이 있다. 본 연구에서는 게이트 바이패스 용량을 감소시키며, 안정성과 스위칭 타임을 최적화하였다.

IV. 송신기 제작 및 측정 결과

그림 9(a)는 제작된 송신 안테나보드이다. 상하위 포트

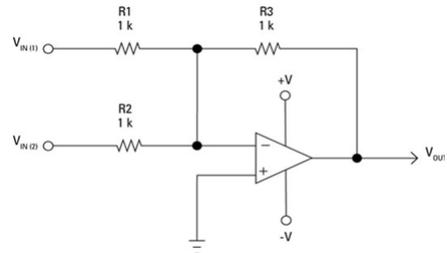
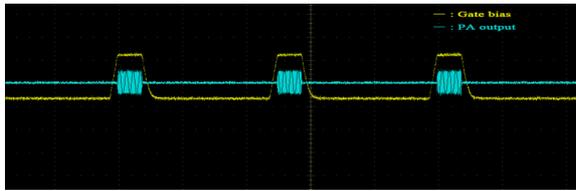
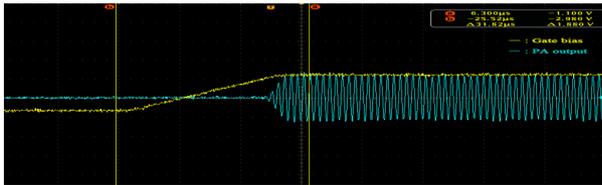


그림 7. 전압 가산 회로
Fig. 7. Voltage summing circuit.



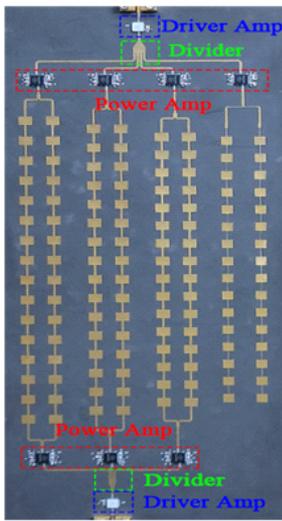
(a)



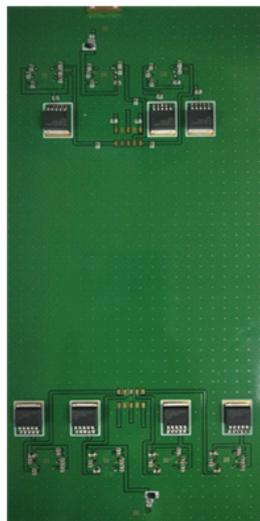
(b)

그림 8. (a) 전압 가산 회로를 이용한 전력증폭기의 출력 파형, (b) 켜지는 스위칭 시점에서 게이트 전압과 전력증폭기 출력

Fig. 8. (a) Output waveform of power amplifier switched by voltage summing circuit, (b) Output waveform of power amplifier in turn-on sequence.



(a)



(b)

그림 9. (a) 제작된 송신 안테나 보드, (b) 제작된 전력증폭기 제어 보드

Fig. 9. (a) Manufactured transmitting antenna board, (b) Manufactured power amplifier control board.

에서 구동증폭기가 마이크로스트립 분배기의 손실을 보상하고, 전력증폭기를 구동하여 안테나로 대전력 신호를

생성한다. 그림 9(b)는 안테나 보드 후면으로 게이트 스위칭 회로와 각종 레귤레이터가 위치한 FR-4 보드이다. 듀로이드 기판과 FR-4 기판은 연구실에서 예폭시로 접합한 후, 비아홀핀을 통해 전력증폭기 바이어스를 공급하였다.

그림 10은 레이더 송신 보드이며, 아날로그 디바이스사의 ADF4159 PLL 칩과 ADF5901 레이더 송신 칩을 사용하여 Ro5880 15 mil 기판과 FR-4 기판을 접합해 제작하였다. 동작 주파수 범위는 24~24.25 GHz이고, 7 dBm의 송신 출력을 구동 증폭기에 전달한다.

그림 11은 안테나 패턴 측정 환경이다. 측정에는 송신 안테나의 각도를 조절하는 회전 포지셔너를 사용하였다. 회전 포지셔너에 측정 대상인 안테나를 장착하고, 1.15 m가 떨어진 지점에 20 dBi의 이득을 가진 표준 혼 안테나를 배치하여 비교하는 방법으로 측정하였다. Keysight사의 N8488A 파워 센서와 N1914A 파워미터를 사용하여 표준 혼 안테나의 수신 전력을 확인하였고, 제작된 안테나에는 송신 보드를 이용하여 24 GHz 7 dBm의 고주파 신호

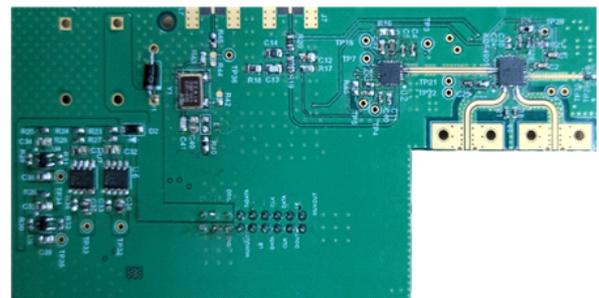


그림 10. 제작된 레이더 송신 보드

Fig. 10. Manufactured radar transmitting board.

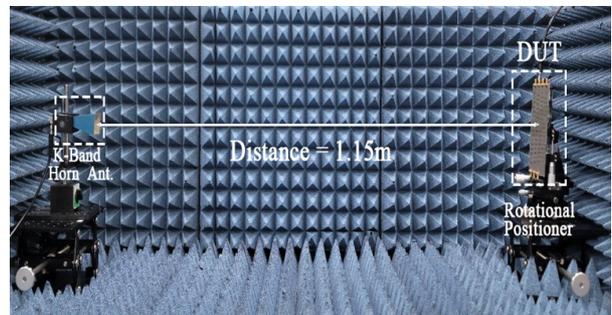


그림 11. 안테나 패턴 측정 환경

Fig. 11. Antenna pattern measurement environment.

호를 송신하였으며, 수신 전력은 Friis transmission equation을 통하여 계산을 하였다. 이를 통하여 EIRP를 계산하면 -10° 안테나에서 가장 높은 48.511 dBm 이 측정되었다. 그림 12는 전체 안테나의 EIRP 측정 결과이며, 그림 13은 전체 안테나의 정규화된 이득이다.

V. 결 론

본 논문은 큰 EIRP를 갖는 팬빔 스위칭 24 GHz FMCW 레이다 송신기를 제안하였다. 송신기의 EIRP는 $-15^\circ \sim +15^\circ$ 사이에서 약 4° 간격으로 48~49 dBm으로 측정되었

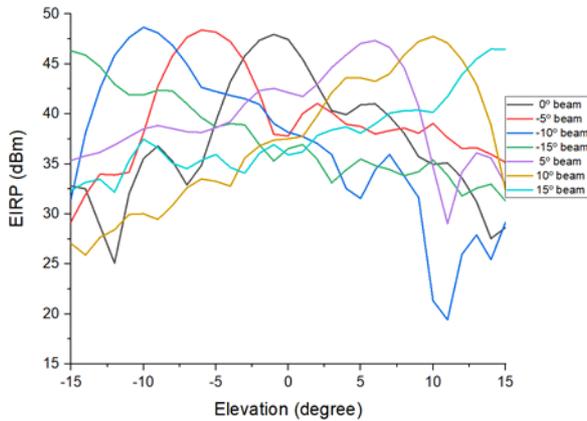


그림 12. 제작된 송신기의 EIRP 측정 결과
Fig. 12. Manufactured Transmitter EIRP measurement result.

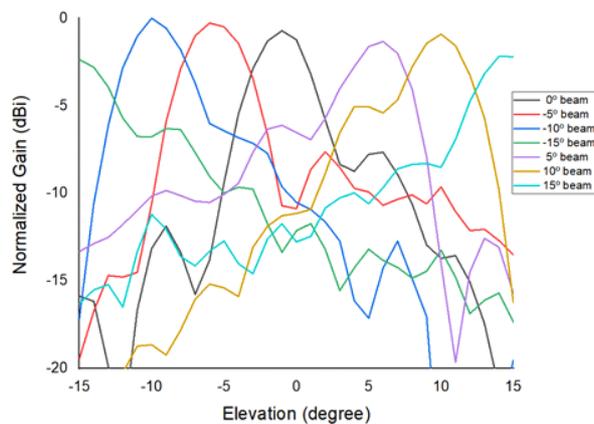


그림 13. 제작된 안테나의 정규화된 이득
Fig. 13. Manufactured antenna normalized gain.

다. 현재 설계 진행하고 있는 수신기와, 제한한 송신기를 사용하면, 레이다 방정식인 식 (3)에 의해서 약 2 km까지 소형 비행체의 3차원 비행정보를 탐지할 수 있을 것으로 예측된다.

$$(R_{\max})^4 = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \delta}{(4\pi)^3 k T_0 B F_n (S/N)_{\min}} \quad (3)$$

안테나 시뮬레이션 결과와 전력증폭기의 데이터 시트를 바탕으로 추정해 본 이상적 EIRP 대비 실측치가 약 3~4 dB 정도의 차이를 보임을 확인하였으며, 이 오차 발생 요인 해석과 스위칭 시간을 $30 \mu s$ 보다 더 줄일 수 있는 추가 연구가 필요하다.

References

- [1] B. G. Choi, D. G. Oh, S. W. Kim, J. W. Chong, and Y. C. Li, "Long-range drone detection of 24G FMCW radar with E-plane sectoral horn array," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4171, Nov. 2018.
- [2] M. Moubadir, M. Bayjja, N. A. Touhami, M. Aghoutane, and A. Tazon, "Design and implementation of a technology planar 8×8 Butler matrix with square truncated edge-fed array antenna for WLAN networks application," in *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications(WINCOM)*, Marrakech, Oct. 2015, pp. 1-5.
- [3] A. Hamdoun, M. Himdi, O. Lafond, and L. Roy, "Switched beam patch array antenna using SPDT GaN HEMT switches," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 7, pp. 1558-1562, May. 2017.
- [4] J. I. Lee, J. Yeo, G. K. Kim, and S. Y. Rhee, "Design of a dual-fed microstrip patch antenna," in *Korean Institute of Information and Communication Sciences Conference*, Busan, May. 2016, pp. 79-80.
- [5] L. Li, K. Wu, "Integrated planar spatial power combiner," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 4, pp. 1470-1476, Apr. 2006.

이 재 은 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5929-7097>



2020년 2월: 강남대학교 전자공학과 (공학사)
2020년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기 컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] RFIC 레이다 시스템

송 립 [성균관대학교/연구교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7088-1777>



1997년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
2006년 8월: 미국 USC 전기공학부 (공학박사)
2013년 5월~현재: 성균관대학교 정보통신

대학 연구교수
[주 관심분야] 밀리미터파 회로, 안테나 및 시스템

윤 정 배 [성균관대학교/석박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6213-7569>



2021년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)
2021년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기 컴퓨터공학과 석박사통합과정
[주 관심분야] RFIC 안테나 설계

김 병 성 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3084-6499>



1989년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 3월~현재: 성균관대학교 정보통신

대학 교수
[주 관심분야] RFIC 설계, RF 소자모델링

김 동 휘 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0136-8144>



2021년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터과 (공학사)
2021년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기 컴퓨터공학과 석사과정
[주 관심분야] RFIC 레이다 신호처리