

드론 탐지 레이더용 위상배열안테나 설계 및 구현

The Fabrication of Compact Active Array Antenna for Drone Detection Radar

임재환^{*}, 진형석^{*}, 이종현^{**}

Jae-Hwan Lim^{*}, Hyoung-Suk Jin^{*}, Jong-Hyun Lee^{**}

Abstract

As drone technology advances, the risks of drones are increasing, then technology to detect drones is becoming important. In this thesis, it was verified that miniaturized and lightweighted active array antenna could be used for radar system to detect drones in reality. The transmit-receive module was designed in the form of tile-type to simplify interconnections between devices. The waveform generation module and the down conversion module were miniaturized to include in one body too. As a result of verifying the detection performance through test, it was confirmed that the detection range was over 3.7Km.

요약

드론 기술이 발전함에 따라 무인 항공체에 대한 위험이 증가하고 있으며 이로 인한 위협을 방어하기 위해 드론을 탐지해 내는 기술이 중요해지고 있다. 본 논문에서는 레이더의 위상배열안테나 하드웨어를 소형화하고 경량화하여 드론을 탐지하는 기능을 구현할 수 있는지 확인하였다. 레이더 신호의 송수신을 위한 안테나장치는 능동위상배열 방식으로 구현하였다. 송수신모듈은 타일형태로 제작하여 인터페이스와 구조를 간소화하였고, 집적화된 소자를 사용하여 회로를 단순화하였다. 레이더 파형과 기준신호를 생성하고 처리장치와 통신을 수행하는 파형발생모듈과 다채널의 수신신호를 IF 신호로 변환하는 하향변환모듈도 소형화하여 전체 송수신 기능 및 안테나 기능이 소형화된 구조물 내에 배치될 수 있게 하였다. 처리장치와 통합하여 시험을 통해 드론탐지 성능을 확인한 결과 RCS 0.01m² 목표물 기준으로 약 3.7Km 이상의 탐지거리를 확인할 수 있었다.

Key words : Active Array Antenna, Drone, Detection, Radar, Tile-type TRM

1. 서론

근래에 드론으로 불리워지는 무인항공기, 무인비행체 등은 다양한 활용분야와 기술의 발전을 통해 점차 사용 범위가 확대되고 있다[1]. 군사용으로는 정찰 및 공격 임무에 사용되고 있으며, 실제로 이

로 인한 위협이 함께 증가하고 있는 상황이다. 폭발물을 탑재한 드론으로 공격이 가능하고, 폭발물이 없다고 하더라도 무분별한 드론의 운행으로 인해 중요 시설의 무단 촬영, 충돌에 의한 피해가 있을 수 있다. 이에 따라 드론을 미리 탐지하고 방어하는 기술의 필요성이 급격히 대두되고 있다[2]. 드

* Radar R&D, LIG Nex1

** RFCore

★ Corresponding author

E-mail : jaehwan.lim@lignex1.com, Tel : +82-31-288-9336

※ Acknowledgment

Manuscript received Nov. 17, 2021; revised Dec. 8, 2021; accepted Dec. 28, 2021.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

론을 방어하기 위해서는 우선 이를 감시하는 기능이 구현되어야 한다. 드론이 사용하는 신호의 방향을 탐지하는 방법, 영상센서를 이용하는 방법, 레이더를 이용하는 방법 등이 있으며 이 중 레이더를 사용하면 날씨, 온도, 주야간 상태와 무관하게 탐지가 가능하고 다른 방식에 비해 탐지거리가 길다는 장점이 있다[3]. 실제로 해외의 경우 다양한 드론 탐지용 레이더가 연구되고 있다. 영국의 예를 들면 Blighter사의 A400의 경우 FMCW 방식으로 RCS 0.01m² 표적 기준 약 2.4Km를 탐지하는 수준이며 다른 사례들에서는 대략 3Km 내외의 탐지성능을 보여주고 있다[2][4][5]. 본 연구에서는 해외 사례 대비 동등 이상의 성능을 만족하기 위해 약 3.5Km 거리 이상의 드론 탐지 성능을 가지도록 위상배열 안테나를 소형, 경량화하여 설계하고자 하였다. 이러한 설계 구성이 위상배열안테나를 고성능, 고가의 시스템으로 구현하지 않더라도 드론을 탐지하는 기능에 최적화할 수 있는지 확인하였다. 그리고 처리장치와 통합하여 드론을 표적으로 운행하며 실제 표적 탐지 시험 시 충분한 탐지성능을 확보할 수 있는지 확인하고자 하였다.

II. 본론

1. 위상배열안테나 설계 및 구현

가. 위상배열안테나 구성

위상배열안테나는 소형 표적인 드론을 탐지하기 위해 펄스 도플러, 능동위상배열 방식으로 설계하였다. 휴대가 가능하도록 소형이면서 적은 무게를 가지도록 하였다. 이를 위해 송수신모듈, 파형발생모듈, 하향변환모듈 등 RF 송수신 기능을 하는 블록을 한 몸체에 배치하였으며, 인터페이스의 수를 최소화하였다. 배열소자의 개수는 가로 12개, 세로 8개로 총 96개이며, 그레이팅로브를 최소화하기 위해 삼각배열로 배치하였다. 위상배열안테나의 목표 성능은 표 1과 같다. 안테나 크기를 소형화하고 소형 표적인 드론의 탐지에 최적화하기 위해 주파수를 X대역으로 설계하였으며 거리 분해능 7.5m를 만족하기 위해 순신호대역폭은 최대 20MHz로 하였다. 채널 당 최대송신출력은 3W 이상, 수신감도잡음지수는 4dB 이하를 설정하여 RCS 0.01m²의 표적에 대해 최대탐지거리 3.5Km 이상이 되도록 설계하였다.

Table 1. The target specification of array antenna.

표 1. 목표 성능

Num.	Item	Design Goal
1	Operation Frequency	X-band (9.5~10GHz)
2	Signal Bandwidth	< 20MHz
3	Beam Coverage	EL: ± 45°, Az: ± 45°
4	Transmit Power	> 3W per channel
5	Noise Figure	< 4dB
6	Channel Gain	48dB ± 1dB
7	Power Consumption	< 400W

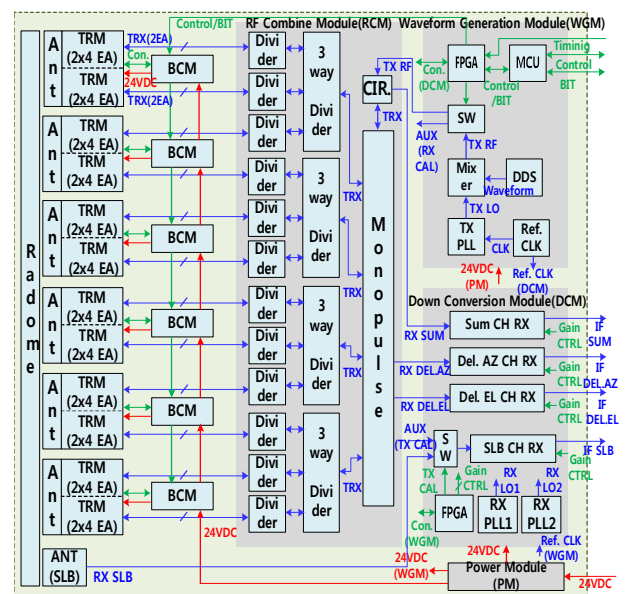


Fig. 1. The block diagram of array antenna.

그림 1. 구성도

그림 1의 구성도에서 보는 바와 같이 파형발생모듈에서 발생한 펄스 송신신호는 X대역으로 상향변환하여 모노펄스분배기 등을 거쳐 송수신모듈로 인가된다. 송수신모듈에서 송신 타이밍에 맞추어 각 소자별로 약 3W 이상으로 증폭된 신호가 발생하며 빔조향 제어에 맞추어 각 채널 별로 위상을 조절하여 송신한다. 수신인 경우에는 배열소자를 통해 수신된 신호가 송수신모듈의 수신경로를 거쳐 저잡음 증폭된 후 모노펄스분배기를 거쳐 합채널, 방위각 차채널, 고각 차채널로 분리된다. 각 채널 수신신호는 하향변환모듈에서 국부신호와 합성하여 3개의 IF(Intermediate Frequency)신호로 변환된다. 위상배열안테나의 설계 형상은 그림 2와 같다. 배열소자 96개의 외곽의 소자는 위상배열성능의 열화를 최소화하기 위해 배치하였다. 또한 그

중 1개 소자는 Sidelobe Blanking(SLB) 기능을 구현하기 위해 배치하였다. 안테나의 거치대는 고각 방향의 빔조향 범위를 확장하기 위해 20°까지 기울임각을 줄 수 있게 하였다. 전체 크기는 폭 27cm, 높이가 36cm, 깊이가 12cm로 최대한 소형으로 설계하였다.

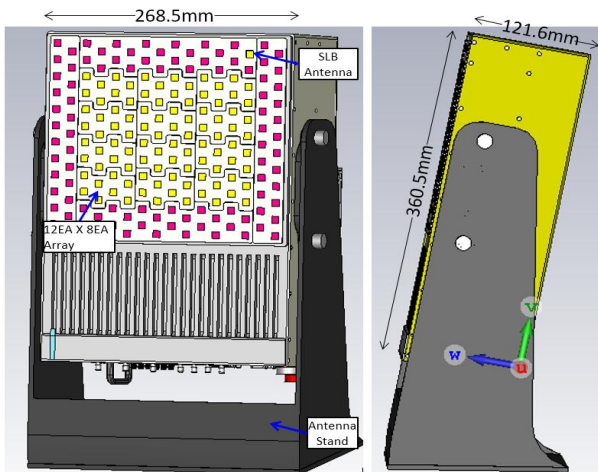


Fig. 2. The figure of array antenna.
그림 2. 설계 형태

나. 송수신모듈(Transmit-Receive Module)

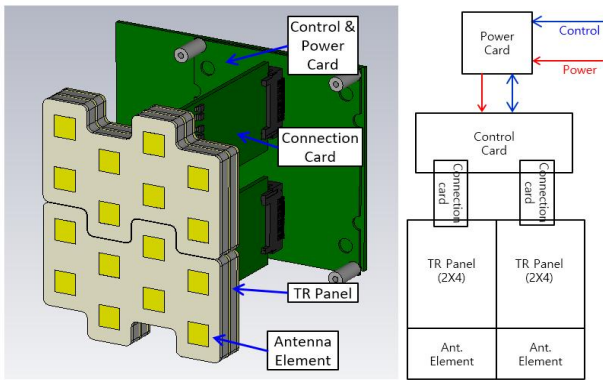


Fig. 3. The figure and block of transmit-receive module.
그림 3. 송수신모듈 구성

송수신모듈은 위상배열안테나의 크기를 최소화하기 위해 타일형으로 구성하였다. 그림 3과 같이 최상단에는 안테나 배열소자가 배치되고 패널 뒤에 바로 능동소자들이 배치된 TR패널(Transmit-Receive Panel)을 구성한다. TR패널은 배열소자 8개를 기준으로 기능블록을 구현하였다. TR패널에는 4개 채널의 송수신 경로와 위상제어가 가능한 코어칩 2개가 사용되었으며 각 채널 당 HPA(High Power Amplifier), LNA(Low Noise Amplifier), RF 스위치가 집적된 프론트엔드칩이 사용되어 단일소자로

구현했을 시 대비하여 복잡도를 낮추어 타일형 구현이 가능하게 하였다. 능동소자가 배치된 패널 내의 PCB는 기구하우징과 연결되어 TR패널의 하단면을 통해 방열이 가능하도록 하였다. 연결카드가 배치되어 있는 부분의 공간을 통해 안테나 하우징 하단의 팬으로부터 공기가 공급되어 방열을 수행한다. TR패널의 전원과 제어의 공급을 위해 연결카드를 보드 간 연결을 통해 제어카드, 파워카드와 접속한다. 위와 같은 구조의 송수신모듈 12개를 그림 2의 전면 뒤에 바로 배치하여 총 96개의 배열을 구현하였다.

다. 파형발생모듈(Waveform Generation Module)

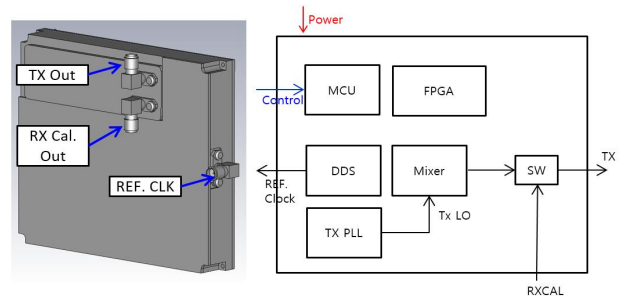


Fig. 4. The figure and block of waveform generation module.
그림 4. 파형발생모듈 구성

파형발생모듈도 부피를 최소화하기 위해 제어 및 전원은 보드 간 연결 방식으로 구현하였다. 하단면의 커넥터면을 통해 연결한다. 파형발생모듈의 형상은 그림 4와 같다. RF출력은 Tx Out 포트를 통해 X대역의 신호를 출력한다. 위상배열안테나의 수신 보정을 위한 경로를 제공하며 이 때 수신보정을 위한 테스트 신호는 송신신호 경로에서 제어를 통해 RX Cal. Out 포트에 걸체되어 출력된다. 송신파형은 DDS(Direct Digital Synthesizer) 소자를 통해 생성한다. 864MHz의 IF 송신신호를 생성하여 믹서를 통해 상향변환된 신호가 출력된다. 파형발생모듈에는 24MHz TCXO가 배치되어 시스템의 기준 클럭을 제공한다. 또한 이 신호를 이용하여 PLL(Phase Locked Loop) 회로를 통해 송신 LO(Local Oscillator)를 생성하고 상향변환에 사용한다.

파형발생모듈은 외부로부터 UART 및 타이밍 제어신호를 입력받는다. 자체 배치된 MCU, FPGA를 통해 제어신호를 해석하고, 각 모듈에 필요한 신호를 전달하는 역할을 수행한다. 위상배열안테나를 제어하는 중심역할을 하게 된다.

라. 하향변환모듈(Down Conversion Module)

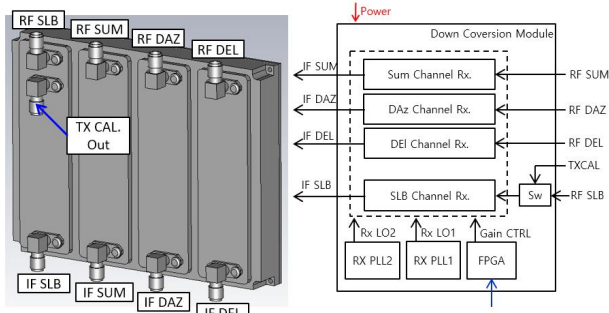


Fig. 5. The figure and block of down conversion module.
그림 5. 하향변환모듈 구성

하향변환모듈에서는 안테나배열에서 수신된 신호가 모노펄스 분배기를 거쳐 합채널, 방위각 차채널, 고각 차채널로 분리되어 수신 3개의 채널로 입력받는다. 또한 위상배열 면에 따로 배치되어 있는 Sidelobe Blanking(SLB) 채널의 수신 경로와 연결된 수신 1개 채널을 포함하여 총 4개의 수신채널을 보유하고 있다. 그림 5와 같이 하향변환모듈에서는 각 채널로 수신된 X대역의 신호를 헤테로다인 방식으로 하향변환하여 4개의 IF신호를 생성한다. 생성된 IF신호는 위상배열안테나 외부에 부착되는 처리장치의 ADC(Analog Digital Converter) 보드로 입력되어 디지털신호로 변환된다. 하향변환모듈은 파형발생모듈로부터 기준 신호인 24MHz를 입력받아 PLL회로를 통해 수신하향변환을 위한 LO(Local Oscillator) 신호를 생성한다. 각 수신채널에는 VGA(Variable Gain Amplifier)가 IF단에 배치되어 있어 최종 이득을 조절할 수 있다. 배열안테나의 배열소자별 송신신호의 정렬을 위해 SLB 채널은 RF 스위치를 통해 정렬용 채널로 사용할 수 있도록 설계하였다.

마. 제작

앞에서 설계된 각 부분을 제작하여 전체를 조립한 형상은 그림 6과 같다. 배열소자와 TR패널이 일체형으로 되어 있는 송수신모듈은 전면부를 통해 접근하여 조립하였다. 파형발생모듈, 하향변환모듈 등은 후면의 기판에 직접 부착하는 형태로 구성하여 전원과 제어신호가 연결되도록 하였다. 이렇게 각 구성품은 케이블의 사용을 최소화하도록 보드간 연결 구조를 적용하여 위상배열안테나의 부피를 최소화하였다. 모노펄스 분배기는 배열안테나를

4분면으로 나누어 결합된 신호를 입력받아 합신호, 방위각 차신호, 고각 차신호를 생성한다. SLB 수신신호와 함께 4개의 신호는 RF케이블을 통해 하향변환모듈에 연결되도록 하였다. 전체 통합된 위상배열안테나의 무게는 20.1Kg이고 처리장치와 결합시 약 24kg 이하로 사람에 의한 이동이 가능하다.

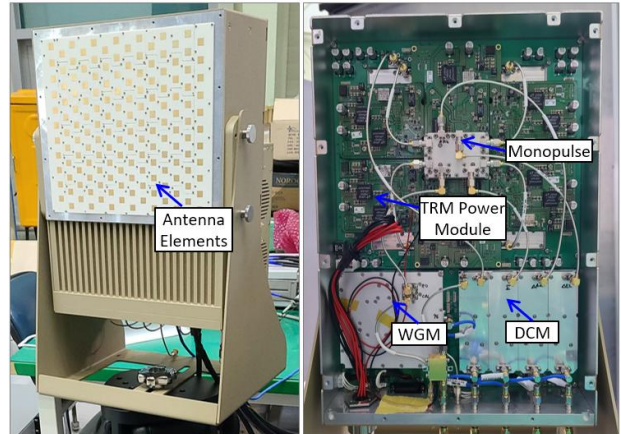


Fig. 6. The fabrication figure of array antenna.
그림 6. 제작형상

2. 위상배열안테나 시험 결과

가. 위상배열안테나 시험 결과

위상배열안테나를 제작 후 시험한 결과의 요약은 표 2와 같다. 채널 별 송신출력의 크기는 목표한 최대 듀티비인 10%에서 전 채널 3.27W 이상이다. 또한 잡음 지수도 전 채널 3.01dB 이하로 목표한 성능을 만족하였다. 안테나를 제외한 전체 경로의 수신이득은 총 48.8dB로 설계범위 내에서 측정되었다. 최대 듀티비에서의 소모전력은 260W로 휴대용 발전기 등을 사용할 경우 무리없이 운용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table. 2. The measurement result of array antenna.

표 2 위상배열안테나 측정 결과

Num.	Item	Measurement Result
1	Signal Bandwidth	20MHz
2	Beam Coverage	EL: ± 45°, Az: ± 45°
3	Transmit Power	>35.15dBm (3.27W) (min.)
4	Noise Figure	< 3.01dB (max.)
5	Channel Gain	48.8dB (max.)
6	Duty Cycle	10% (max.)
7	Power Consumption	260W (@ max. duty)

배열안테나의 송신 및 수신 빔패턴을 측정 한 결과는 그림 7과 같다. 빔패턴은 근접전계 시설을 이용하여 측정하였다. 송수신 빔패턴을 측정하기 전 각 배열소자를 개별로 하나씩 동작시켜 합 출력을 기준으로 위상을 측정하고 그중 하나의 소자를 기준으로 위상을 정렬하기 위한 테이블을 추출하였다. 추출한 테이블은 배열안테나 제어기에 장입 하여 매번 전원 인가 시 동일한 정렬데이터를 적용 할 수 있도록 하였다.

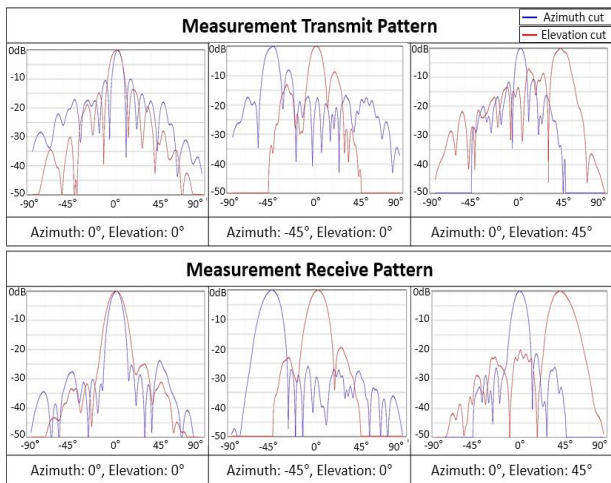


Fig. 7. The measurement result of array antenna beam pattern.

그림 7. 빔패턴 측정 결과

송신 시 각 배열소자의 가중치는 uniform을 적용 하였으며 이때 방위각, 고각 방향으로 송신빔이 최대 $\pm 45^\circ$ 조향이 됨을 확인하였다. 수신 시 각 배열 소자의 가중치는 방위각 방향으로 Taylor 30dB를 적용하였다. 이때 방위각, 고각 방향으로 수신빔이 최대 $\pm 45^\circ$ 조향이 됨을 확인할 수 있었다.

위상배열안테나를 통해 초기에 설계한 대로 제한된 공간과 무게 내에 빔조향이 가능한 능동위상배열안테나의 기능을 구현하였다.

나. 야외 시험 결과

기능과 성능이 검증된 위상배열안테나는 최종 시스템 통합 후 야외시험을 수행하였다. 드론 표적을 이용한 시험을 수행하여 본 논문에서 설계 및 제작된 위상배열안테나를 적용하여 레이더의 성능이 만족하는지를 확인하고자 하였다.

위상배열안테나의 각 설계 목표치는 드론을 타겟

으로 하여 약 3.5Km 이상에서 레이더 탐지를 목표로 하여 설정되었다. 시험을 위한 타겟은 DJI사의 Phantom4 드론을 대상으로 하였다. 위 그림8에서 해당 드론을 확인할 수 있다. 시험장소는 영월 드론전용시험장에서 수행하였으며, 주변 지형은 위상배열안테나를 중심으로 약 2km 지점부터 약 100m 높이의 작은 산이 많이 있는 환경이다. 해당 시험은 드론의 운용 시 안테나의 가시거리를 확보할 수 있는 경로로 수행하였다. 시험장소에 그림 8과 같이 위상배열안테나를 설치하고 드론은 안테나가 설치된 위치로부터 멀어지는 방향으로 운용하였다. 드론의 고도는 약 150m를 유지하고 안테나 위치로부터 약 2.5Kkm 지점부터 4Km 지점까지 이동하였다.

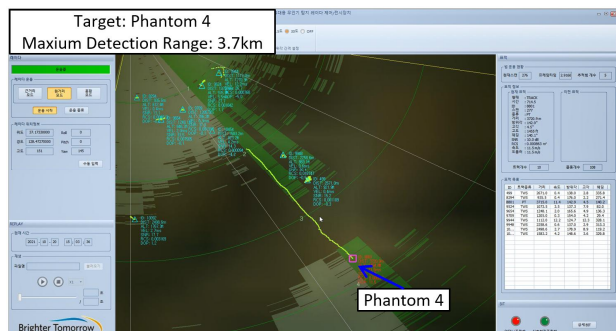
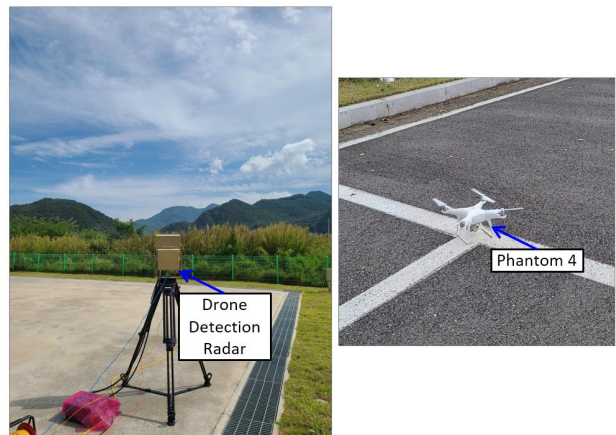


Fig. 8. The detection test result of drone radar included array antenna.

그림 8. 야외시험 장면 및 결과

그림 8의 아래 그림은 레이더 전시화면을 표시하였다. 사각형 박스로 표시된 레이더에 탐지된 드론을 나타내며 TWS(Track While Scan)로 3.7Km 위치까지 탐지됨을 확인할 수가 있었다. 위상배열안테나의 빔스캔 기능을 이용하여 탐지영역을 약 2초에 걸쳐 갱신하게 되는데, 그 동안 사각형 박스 뒤 꼬리표지가 유지되며 탐지 시작 후 추적이 계속 이

루어지고 있음을 확인하였다. 크기가 소형이고 기능과 성능이 제한적이지만 능동위상배열 방식으로 구현한 위상배열안테나를 통해 레이더 탐지, 추적을 위한 센서로 동작하고 있음을 확인할 수 있었다.

Table. 3. The specification comparison between several drone detection radars.

표 3. 드론탐지레이더 사양 비교[2]

Item	This thesis	Blighter A400	EIVIRA	LADD
Nation	Korea LIGnex1	UK	Netherland	Korea ETRI
Modulation	Pulse Doppler	FMCW	FMCW	FMCW
Frequency	X	Ku	X	Ku
Detection Range (RCS 0.01m ²)	3.7Km	2.4Km	3Km	3Km
Range Resolution	7.5m	10m	1.5m	5m
Size (W×H×Dcm ³)	27×36×12	67×51×13	90(Dia)×8	56×67×13
Weight(Kg)	24/panel	27/panel	83	27/panel

현재까지 사양이 알려져 있는 크기가 유사한 일부 드론탐지 레이더와 비교한 결과는 표 1과 같다. 본 연구에서 제시한 위상배열안테나를 적용한 레이더는 타 레이더 대비 약 30% 이상 소형이며 탐지거리는 3.7km로 동등 이상임을 확인하였다. 펄스도플러 방식의 능동위상배열안테나 구조가 드론을 탐지하는 레이더에 유용하게 활용될 수 있다고 할 수 있겠다.

III. 결론

근래에 들어 드론에 의한 위협이 증가하고 있으며, 드론의 접근을 미리 탐지하고자 하는 요구 역시 증가하고 있다. 이를 위해 본 논문에서는 드론을 탐지하는 소형 레이더에 적용이 가능한 위상배열안테나의 설계 및 구현 내용을 제시하였다.

소형, 경량으로 구현하기 위해 구성품은 최대한 일체형이 가능한 방식으로 설계하였으며 소자의 개수를 최소화하고자 하였다. 이를 위해 송수신모듈은 FEM(Front End Module)과 코어칩만을 적용하여 복잡도와 면적을 최소화했고 타일형태로 설계하였다. 레이더 파형을 생성하는 파형발생모듈 내

에 기준신호발생기능, 제어기능, RF신호 생성 기능을 모두 통합하였다. 하향변환모듈에서는 수신 4개 채널 및 하향변환변환에 필요한 국부신호를 생성하는 기능을 통합하였다. 각 모듈은 모체기판에 보드 결합 방식의 커넥터를 사용하여 별도의 제어, 전원 케이블을 사용하지 않도록 인터페이스를 간소화하였다.

해당 위상배열안테나를 적용하여 실제 표적인 드론(Phantom4)을 탐지하는 시험을 수행하여 본 연구의 위상배열안테나를 통해 소형 표적의 탐지가 가능함을 증명할 수 있었다. 또한 필요한 장소에 인력에 의해 이동이 가능한 레이더 센서의 구조를 제시할 수 있었다.

추후에는 제시된 구조를 기본형태로 배열의 크기를 증가시키고 면의 개수를 확장하여 성능 개선하여 응용 범위를 확대하고자 한다.

References

- [1] So Dae-seop, "Anti-Drone Needs Countermeasures for Threats and Side Effects of Drones," *KISTI market report*, 2016.
- [2] Choi Sang-hyeok, Chae Jong-seok, Cha Ji-hoon, Ahn Jae-young, "Anti-Drone Technology Trends," *ETRI 2018 Electronics and Telecommunications Trends*, pp.78-88, 2018.
- [3] A. Coluccia, G Parisi, A. Fascista, "Detection and Classification of Multirotor Drones in Radar Sensor Networks: A Review," *Sensors 2020*, vol.20, no.4172, 2020.
- [4] Koo Bon-tae, Han Seon-ho, Choi Jang-hong, Kim Ki-soo, Baek Young-seok, Kim Deok-hwan, Eo Ik-soo, Lee Ja-yeol, Park Min, "Implementation of AESA-based intelligent radar system for small drone detection," *Korean Society of Electronic Engineering Conference*, pp.1466-1467, 2019.
- [5] Álvaro Duque De Quevedo; Fernando Ibañez Urzaiz; Javier Gismero Menoyo; Alberto Asensio López, "Drone Detection and RCS Measurements with Ubiquitous Radar," *2018 International Conference on Radar*, 2018.

BIOGRAPHY

Jae-Hwan Lim (Member)

2006 : MS degree in Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University.
2006~2008 : Research Engineer, Samsung Electronics.
2008~2021 : Research Engineer, LIG Nex1.

Hyung-Suk Jin (Member)

2000 : MS degree in Electromagnetics Engineering, Kwangwoon University.
2000~2021 : Research Engineer, LIG Nex1.

Jong-Hyun Lee (Member)

1999 : MS degree in Electromagnetics Engineering, KAIST.
2005 : PhD degree in Electromagnetics Engineering, KAIST
2005~2018 : Research Engineer, LIG Nex1.
2018~2021 : Research Engineer, RFCore.