

무선통신링크용 다중빔수신 능동위상배열 안테나 시스템 개발

조정일*, 정은태**¹, 이성주**², 황찬호***¹, 주태환***², 정재수***³

Development of Multibeam Receive Active Phased Array Antenna System for Wireless Communication Link

Jung-Il Cho*, Eun-Tae Jung**¹, Seong-Ju Lee**², Chan-Ho Hwang***¹, Tae-Hwan Joo***², and Jae-Soo Jung***³

이 논문은 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (UC180006ED)

요약

본 논문에서는 하이브리드 빔 형성 기능을 갖는 송수신 타일을 적용하여 개발된 다중빔수신 능동위상배열 안테나 시스템에 대해 설명하였다. 개발된 시스템은 다수의 송수신 타일, 추적모듈, 수냉을 위한 방열구성품등이 집적된 원통형상으로 개발되었으며 방위각 전 방향에 대해서 4개 빔을 형성하여 무선통신링크구성을 지원한다. 본 논문에서는 안테나 시스템 수신부에 대한 내용을 주로 기술하였다. 안테나 근접전계 시험과 수신잡음 온도 측정을 통해 시스템 G/T(Gain to noise Temperature ratio)는 -6dB/K이상의 결과를 얻었으며 야외시험에서는 전 방향에 대해서 1° 이내의 빔 탐색 및 추적성능을 검증하였고 이를 통해 통신용 다중빔 능동위상배열 안테나 시스템의 다양한 무기체계 적용 가능성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a multi-beam active phased array antenna system comprised of transmitting(Tx)/receiving(Rx) tiles with a hybrid beam forming capability is described. The system was developed in a cylindrical shape in which a number of transmit and receive tiles, a tracking module and heat dissipation components for water cooling were integrated. It supports wireless communication link configuration by forming four beams for all azimuth directions. In this paper, the receive antenna system is mainly explained. Through the antenna near field test and receiver noise temperature measurement, we observed the system G/T(Gain to noise Temperature ratio) of -6dB/K. The outdoor test result showed the beam searching and tracking error less than 1 degree for all directions. These test results supports the developed antenna system can be a potential candidate for various weapon systems.

Keywords

wireless communication link, multi-beam, active phased array antenna, hybrid beamforming, gain to noise temperature ratio

* 연세대학교 우주국방융합협동과정 박사과정(교신저자) · Received: Aug. 29, 2023, Revised: Sep. 13, 2023, Accepted: Sep. 16, 2023
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9539-111X> · Corresponding Author: Jung-Il Cho
** 한화시스템 미래정보통신연구소 · Dept. of Integrated Space Defense, Yonsei University, Seoul, Korea
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0003-1607-6360> · Hanwha Systmes Co., Ltd., Seongnam Korea
- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0002-4614-9030> · Tel.: +82-31-8091-7315, Email: jungil01.cho@yonsei.ac.kr
*** 국방과학연구소 위성체계개발단 4팀
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0001-8807-7210>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-8750-9779>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0001-7094-7476>

1. 서 론

미래 전장은 초연결, 기동화를 바탕으로 네트워크 중심 다계층 영역에서의 작전능력을 요구하고 있다. 특히, 네트워크 중심 작전환경에서 기동하는 다수 노드와의 통신에 대한 중요성이 강조되며 이를 위한 고속 빔 조향 안테나 기술의 필요성이 부각되고 있다. 기존 대부분의 무기체계는 단일안테나를 활용하여 1:1형태의 무선링크를 구성한다. 다수 노드와의 무선링크 확장을 위해 다수의 단일안테나를 고려하는 경우, 설치 공간 등의 제약사항을 발생시킨다. 이를 극복하기 위해 다수의 전자적 빔 조향이 가능한 다중빔 능동위상배열 안테나가 필요하다. 또한, 넓은 커버리지에서의 빠른 탐색과 추적을 통한 무선링크구성을 위해 동시에 다중빔 형성이 가능한 디지털 빔 형성 방식이 효과적이다. 안테나가 이상적인 디지털 빔 형성방식으로 동작하기 위해서는 모든 복사소자 별로 ADC(Analog to Digital Converter)를 적용하여야 하나 이러한 전 디지털 빔 형성 구성은 SWaP(Size, Weight and Power)과 비용 측면에서 불리하다. 이러한 단점을 완화하기 위해 일부 복사소자의 신호를 아날로그 부배열로 구성하여 부배열 단위로 ADC를 적용하는 하이브리드 빔 형성 방식을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 다중빔 형성을 위해 하이브리드 빔 형성 방식을 적용하였으며 Grating Lobe가 발생하지 않는 범위에서 빔 조향을 수행하도록 다수의 송수신 타일이 다각형태로 배치된 안테나 시스템을 구성하였다. 일반적으로 전 이중(Full duplex) 양방향 통신은 latency를 줄이고 스펙트럼 효율을 증가시키는 장점이 있어 3GPP NR Rel. 15~17에서도 관련 연구가 진행되었다[1]. 그러나 전 이중 방식은 자기신호간섭(SI, Self-Interference)에 의한 시스템 성능 열화 가능성이 있으므로, 이를 억제할 필요가 있다[2]-[4]. 전 방향에 대한 전자적 빔 조향을 하는 것을 목적으로 하는 본 시스템에서는 송수신 간 안테나 이격을 통해 시스템에서 요구하는 격리도를 확보하여 SI영향을 최소화하고자 하였으며, 이 때 시스템의 크기 증가를 최소화하기 위해 안테나 간 간격을 최소화하는 방안을 적용하고 검증하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 다중빔 위상배열안테나 시스템의 구성과 설계

목표성능, 시제를 구성하는 기본단위인 수신타일의 형상, 타일을 구성하는 주요 구성품 별 설계 내용을 기술하였다. III장에서는 시스템 제작과 근접전계를 통한 안테나 성능시험 결과를 제시하였고, IV장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 다중빔 위상배열안테나 시스템 설계

다중빔 위상배열안테나 시스템은 크게 레이돔, 송수신타일, 추적모듈, 기준신호발생모듈, 전원모듈, 냉각모듈로 구성되는데 본 논문에서는 수신부에 대한 내용을 주로 기술하였다. 레이돔은 송수신 간 격리도 성능을 위한 격리구조부를 기준으로 위아래로 분리되어 있다. 송수신타일은 배열안테나, 배열RF반, 변환반 및 디지털 빔 처리를 위한 빔 형성부를 포함한다. 기준 신호발생부와 전원부는 시제의 중앙에 위치하며 방사형태로 배치되어 있는 송수신타일과의 신호 및 전원연동이 원활하도록 구성된다. 시제 하부로 주입된 냉각수는 송수신타일 내 방열판을 지나게 하여 내부구성품에서 발생하는 열을 배출하여 구성품의 온도를 낮추는 역할을 수행한다. 시스템의 주요목표 성능은 표 1과 같다. 해당 목표 성능은 통신 노드간 통달거리를 50km 이상 확보하는 것을 목표로 산정하였다.

표 1. 다중빔수신 능동위상배열안테나 목표성능
Table 1. Requirements of multibeam antenna system

Item	Design target
Frequency	Ku-band
Number of beam	4
Gain to noise temperature ratio	> -12dB/K / beam
Beam point loss	< 1dB
Beam search range	360° (azimuth)

2.1 송수신타일

그림 1은 수신타일의 하이브리드 빔형성 구조를, 그림 2는 송수신타일의 분해형상을 보인다. 다중빔 안테나 시스템은 하이브리드 디지털 빔포밍 방식으로 4개의 빔을 생성하며, 동시에 전 방위각 방향에서의 고속의 빔 탐색 및 추적기능을 가지도록 설계되었다.

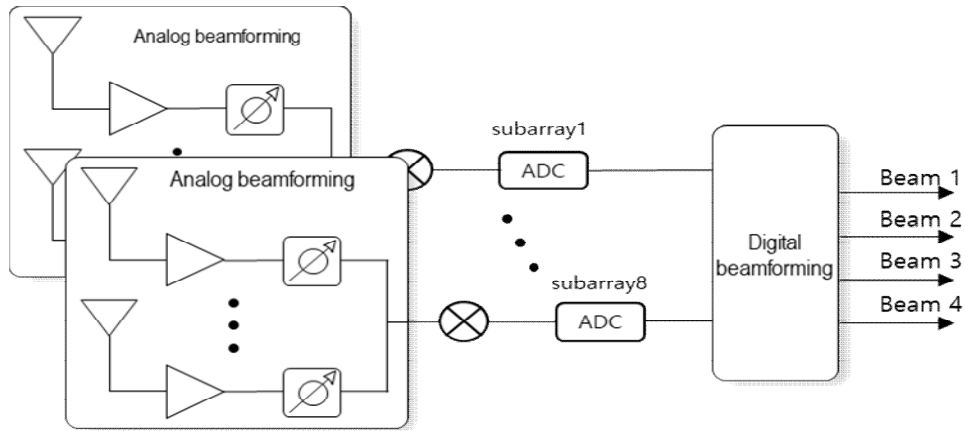


그림 1. 하이브리드 빔 형성 구조
Fig. 1. Hybrid beamforming structure

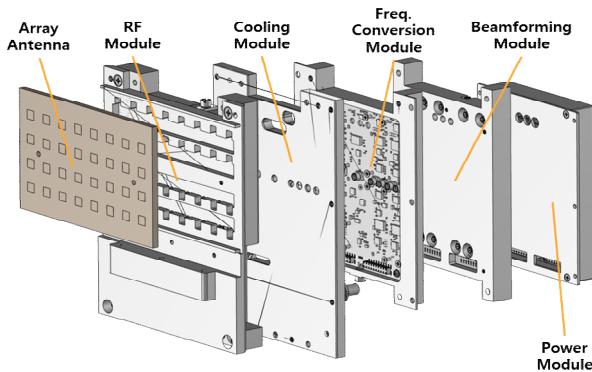


그림 2. 송수신타일 형상
Fig. 2. Tx/Rx tile

각 타일의 안테나는 4x8 배열구조로, 4개의 소자로 아날로그 빔 형성을 수행하고 8채널 부배열신호로 디지털 빔 형성을 수행한다.

2.2 송수신안테나

다중빔 안테나는 수신 다중빔 안테나와 송신 다중빔 안테나 그리고 송/수신 격리부 구조체로 구성된다. 그림 3은 수신 다중빔 안테나의 기본구성품인 수신타일 안테나 설계형상이다. 수신타일 안테나는 4x8배열구조로 구성되며 3개의 수신타일을 연동하여 빔을 생성한다. 안테나의 단일 복사소자는 H형 개구면 커플링 구조로 광대역 특성과 원형 편파 특성을 위해 Wilkinson분배회로를 적용하여 설계하였다. 시뮬레이션 결과, 운용주파수에서 단일 복사소자 안테나 이득은 약 7dBic 이상, 1개 타일 안테나 이득은 약 22dBic 이상 성능을 확인하였다.

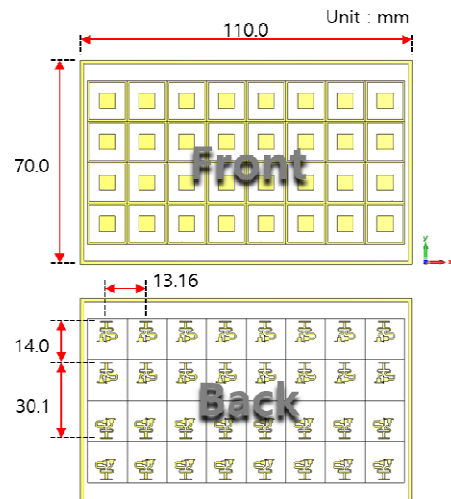


그림 3. 1개 타일 안테나 형상
Fig. 3. 1-tile Rx array antenna

그림 4는 3개 타일 안테나의 빔 조향 분석 결과이다. 3개 타일 안테나는 1개 타일 안테나를 36°씩 회전 배치하여 방위각 방향으로 ±18° 최대 빔 조향 범위의 성능을 확인하였다. 3개 타일이 연동된 수신 안테나의 방위각 빔 조향 0°~18° 범위에서 시뮬레이션 분석 결과, 안테나 이득은 25dBi 이상, 방위각 빔폭은 3.4°, 고각 빔폭은 18°의 설계 결과를 확인하였다.

2.3 송수신배열RF반

RF부는 송신RF부와 수신RF부로 분리설계되며 송신RF부는 변환반 및 배열RF반으로 구성된다.[5] 본 논문에서는 수신RF부에 대해 기술하였다.

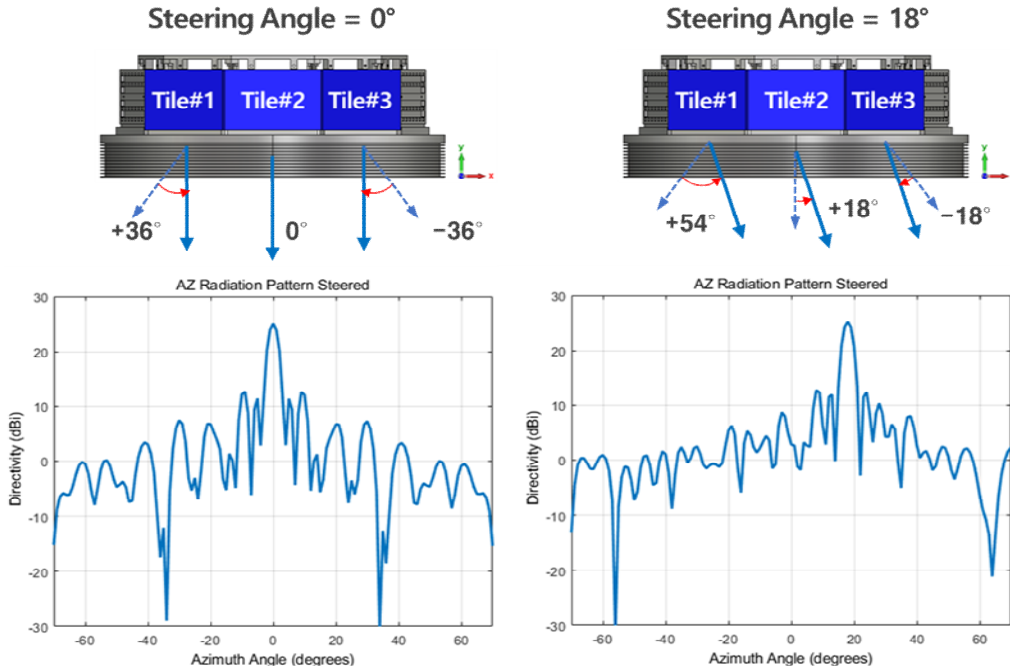


그림 4. 3개 타일 안테나 빔 조향 결과
Fig. 4. Beam steering results of 3-tile array antenna

수신RF부는 우수한 채널 선택성능과 하드웨어 구조의 간소화를 고려하여 2nd IF 대역통과 샘플링 (BPS) 구조로 설계하였다. 안테나로부터 입력된 수신 Ku대역 신호를 1차 LO신호를 통하여 1차 IF로 내리고, 2차 LO를 사용하여 주파수 변환기를 통해 2차 IF로 하향 변환한 후, ADC를 사용하여 나이퀴스트(Nyquist rate)보다 작게 샘플링하여 디지털 신호를 얻고 이 디지털 신호의 불요신호를 필터링하고 디지털 하향변환을 통해 원하는 신호를 얻는 구조이다[6]. 본 시스템에서는 최대 40MHz의 수신 신호 대역폭을 갖는 통신 변조신호를 기저대역신호로 하향 변환하기 위한 BPS구조에 필요한 파라미터를 결정하였다. BPS구조에서 디지털 하향 변환 시 decimator 구현을 간단하게 하기위해 식 (1)을 만족시키는 샘플링주파수(f_s)를 선택하고 또한, 샘플링된 디지털 신호의 이미지들이 서로 aliasing을 일으키지 않도록 식 (2)와 (3)을 동시에 만족시키는 2차 IF주파수(f_c)와 샘플링주파수(f_s)를 결정하였다. 여기에서 f_{sym_rate} 는 신호의 심볼율이며 BW는 신호대역폭이다. 수신RF부 구현을 위한 신호대역폭과 심볼율은 각각 40MHz, 32Mbps기준, 샘플링주파수(f_s)는 96MHz, 2차 IF주파수(f_c)는 120MHz로 결정하였다.

$$f_s = k f_{sym_rate} \tag{1}$$

$$f_s \geq 2BW \tag{2}$$

$$f_c = \frac{(2N-1)f_s}{4}, N \geq 3 \tag{3}$$

배열RF반은 송신용 및 수신용으로 구분되는데 수신배열RF반은 5dB이하의 수신잡음성능을 갖도록 설계하였다. 수신배열RF반에는 4채널 RFIC와 보정 회로를 포함하고 있는데 RFIC내의 위상천이기와 가변감쇠기를 통해 초기 안테나 시스템 정렬을 수행하며 이를 위해 RFIC에서 커플링된 신호들은 보정 회로와 연결되도록 설계하였다. 4개의 Ku대역 수신 신호는 1개의 RFIC내부에서 결합분배되어 아날로그 빔을 형성한다. 수신배열RF반은 8개의 수신 부배열로 구성되어 각 부배열 신호는 변환반에서 2nd IF 주파수로 변환된 후 디지털 빔형성과 연동한다. 수신RF부의 이득은 단일빔 기준 감도레벨 최대입력 레벨까지 수신이 가능하도록 약 22~80dB의 범위를 가지도록 설계하였다.

그림 5와 같이 동일한 타일 또는 동일 수신RF경로로 다수의 수신신호가 입력되는 상황을 가정하여 약 56dB이상의 SFDR을 가지도록 RF수신부의 경로이득은 약 45dB가 되도록 설계하였으며 그림 6은 수신RF경로 버짓결과를 나타낸다. 최소수신레벨과 요구 신호대잡음비 및 1:4 아날로그 빔 포밍 수신구조를 고려하여 수신RF경로의 선형성(IIP3)은 -18dBm이상이 되도록 설계하였다. ADC입력단에서의 신호대잡음비(CNR)는 약 1.3dB수준이나 8개의 부배열 채널과 3개의 타일 간 디지털 수신빔 합성을 통한 10dB 이상의 배열이득을 얻게 되므로 시스템 요구 신호대잡음비를 만족할 수 있다.

시스템 SFDR은 주로 ADC성능에 의해 결정되므로 ADC입력조건에 따른 불요과특성을 모의시험을 통해 사전 확인하였고 그림 7의 결과에 따라 ADC의 최대입력레벨은 -6dBFS로 결정하였다.

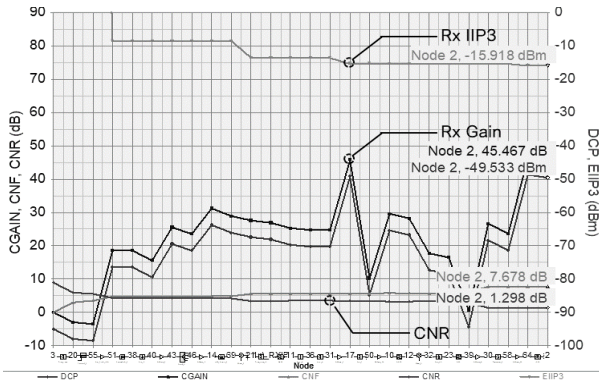


그림 6. 수신RF부 경로 버짓
Fig. 6. Receive RF path budget

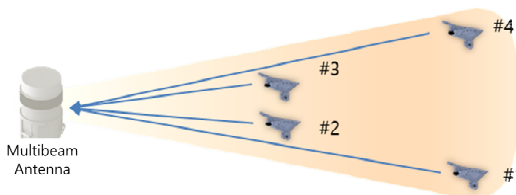


그림 5. 동일 수신 경로내 다중빔 수신개념
Fig. 5. Concept of multichannel receiving in same Rx path

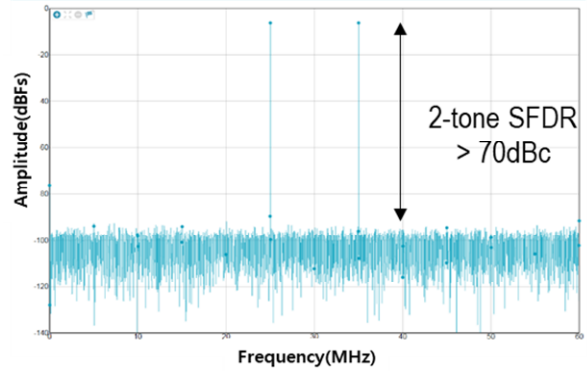
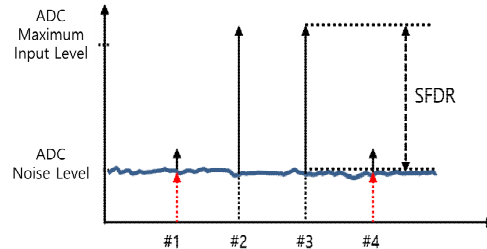


그림 7. ADC Spur성능 모의시험결과
Fig. 7. Spur result of ADC

2.4 빔형성모듈

빔형성모듈은 수신RF부에서 2nd IF주파수로 하향변환된 후 전달되는 다수의 부배열 신호를 기저대역 신호로 하향 변환 및 디지털필터링하는 기능을 수행한다. 또한 다중빔 신호의 탐색을 수행하여 탐색처리 결과는 추적모듈로 전달된다. 내부회로는 96MHz 기준클럭으로 동작하며 8채널 ADC와 보정을 위한 DAC, 그리고 1개의 Xilinx社 FPGA 디바이스로 구성된다.

그림 8은 수신 빔형성모듈의 내부블럭도이다. 8개의 수신 2nd IF 포트를 통해 40MHz 대역폭 신호가 동시에 ADC로 입력되고 ADC를 통과한 16bit 디지털 데이터는 FPGA내에서 40MHz 대역폭신호를 각 빔별 신호대역폭 10MHz 단위로 채널화한다. 10MHz 단위로 채널화된 각 수신 빔 신호는 DDC(Digital Down Conversion)를 거쳐서 기저대역 신호로 하향 변환되고, 각 빔은 독립적으로 수신 빔 조향 벡터와의 곱셈 연산을 통해 수신 빔 조향을 수행한다.



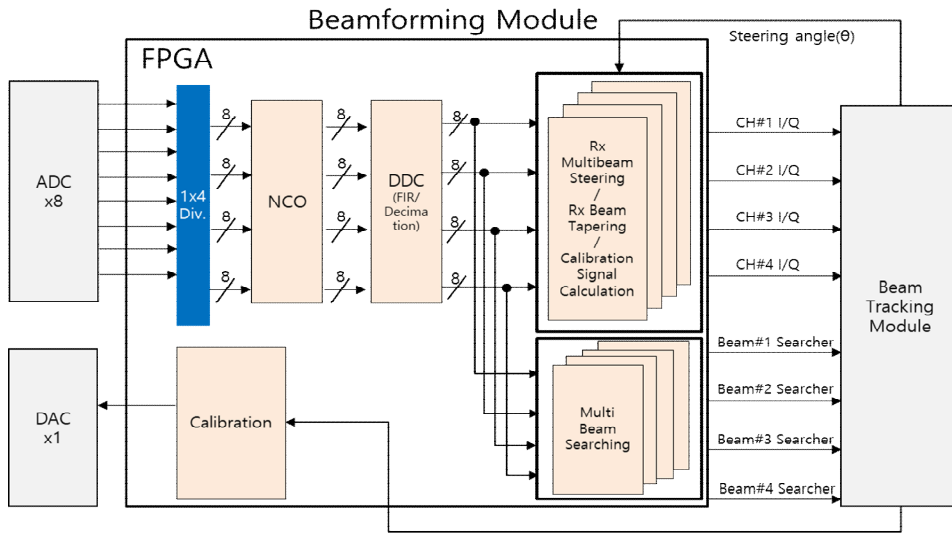


그림 8. 디지털 빔형성모듈 블록도
Fig. 8. Block diagram of digital beamforming module

기저대역 디지털 I/Q신호는 추적모듈과 고속 시리얼 인터페이스로 연결되어 수 Gbps의 전송율로 데이터를 전송하게 된다. 빔 형성반은 빔별 수신신호의 각도를 위상비교모노펄스 알고리즘을 이용하여 추출하고, 빔별 수신 전력정보와 함께 추적모듈에 전달하는 기능을 가진다[7]. 그림 9는 위상비교모노펄스 알고리즘에 대한 개념을 나타낸다.

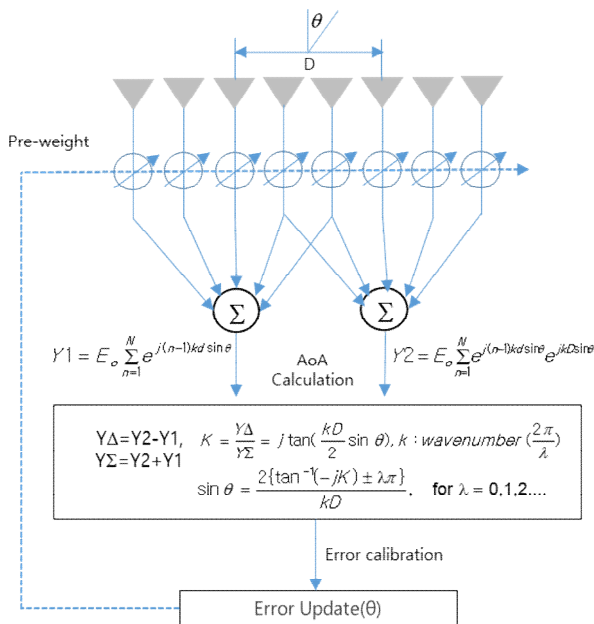


그림 9. 위상비교모노펄스 알고리즘
Fig. 9. Phase comparison monopulse algorithm

8개의 IF 인터페이스를 통해 수신한 신호를 입력으로 해서 신호의 도래각을 연산하고, 오차값 업데이트를 통해 탐색 정확도를 유지하는 특성을 가지고 있다. 해당 알고리즘의 M&S 결과는 그림 10과 같다.

초기에 오차가 임의로 발생한 환경을 모사하기 위해 초기 설정각도를 78°로 설정하였으며 이후 정상적인 신호 각도(72°) 탐색을 통해 탐색각도가 수렴하는지 여부를 확인하였다. 세부 M&S 환경은 표 2와 같으며, 시험 결과 ±0.2° 이내로 신호 수신각도를 정상적으로 탐색할 수 있었다. 추적모듈에서는 빔형성모듈에서 탐색한 신호 도래각 정보를 기준으로 최종 빔 조향각도 정보를 결정한다.

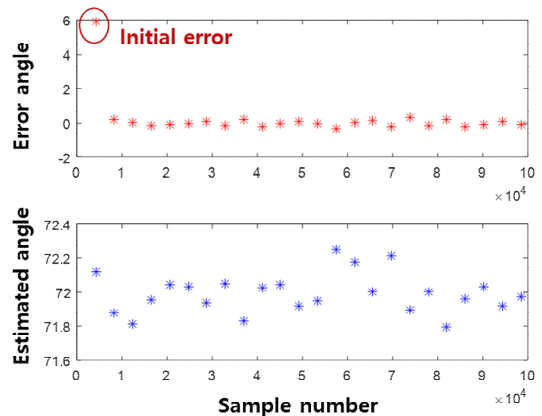


그림 10. 신호 각도 탐색 M&S 결과
Fig. 10. M&S result of AoA searching

표 2. 신호 탐색 M&S 파라미터

Table 2. M&S parameter of signal AoA searching

Parameter	Value
Rx signal angle	72°
Initial Rx signal angle	78°
Rx signal CNR	5dB CNR input per antenna element
Sampling rate	Fs = 100Msps
Channel model	AWGN

2.5 추적모듈

추적모듈은 빔형성모듈과 디지털 I/Q데이터 연동, 모뎀과 빔 별 기저대역 디지털 I/Q 연동 및 신호품질 정보 교환, 제어 SW 연동을 통한 다중빔 능동위상배열 안테나 시스템 전체 제어를 담당한다. 빔형성모듈과 마찬가지로 외부 96MHz 클럭으로 동작하고 다수의 고속 시리얼 인터페이스 간 동기부를 포함한다. 전 방위각 방향에서의 다중빔 형성 및 추적을 위해 다수의 빔형성모듈로부터 빔 탐색 결과를 수신하고 유효 타일 선정 및 빔 별 조향각을 산정한다. 수신 빔의 순간현상을 최소화하는 빔 추적 알고리즘을 적용하였다. 다수의 빔형성반모듈로부터 수신한 디지털 I/Q신호를 모뎀에 전달하고, 모뎀에서는 해당 I/Q신호를 분석하여 유효신호 유/무를 판단한 후 결과를 추적모듈에 피드백한다. 추적모듈에서는 피드백 정보를 기반으로 수신을 담당하는 타일의 인덱스 값을 결정하게 된다.

III. 위상배열안테나 시스템 제작 및 시험결과

3.1 수신타일 및 안테나 시스템 제작

그림 11은 수신타일 제작형상이다. 방열판을 포함하여 안테나보드부터 전원모듈까지 적층되어 조립되며 방열판은 가장 높은 발열이 예상되는 배열 RF반과 변환반 간에 배치하여 냉각수를 통해 모듈 내부 온도를 최소화하고 성능을 안정화하도록 하였다. 빔형성모듈과 전원모듈의 열은 다른 구성품과의 기구전도를 통해 방열판까지 열이 전달되어 배출되게 하였으며 RFIC의 성능변화를 최소화하기 위해 보드의 온도를 30도 이내로 유지하도록 냉각수 온도를 설정하였다.

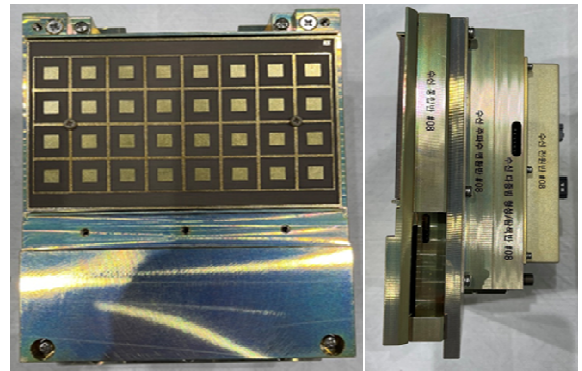


그림 11. 수신타일 제작형상
Fig. 11. Manufactured receiving tile

3.2 위상배열안테나시스템 성능시험

근접전계를 통한 안테나 성능 측정을 위해 무반사실 내 그림 12와 같이 시험을 구성하였다.

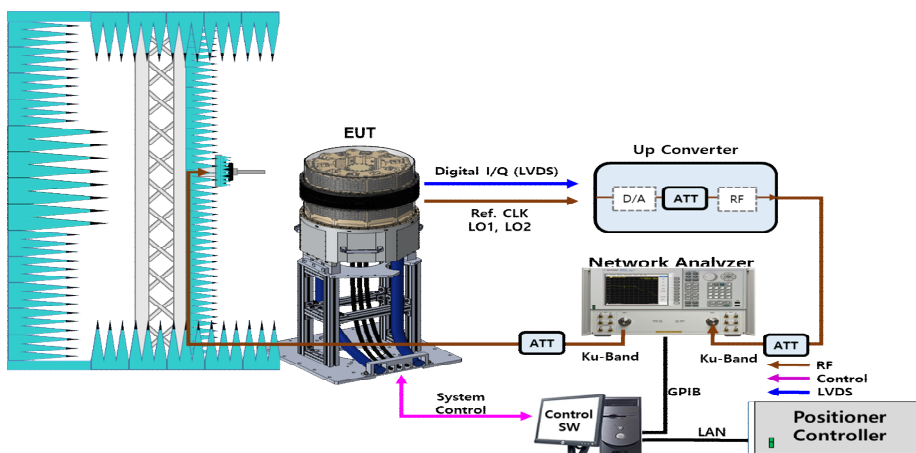
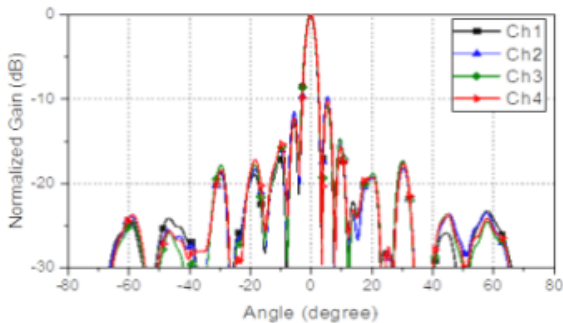


그림 12. 다중빔 안테나 시스템 시험구성도
Fig. 12. Test configuration of multibeam antenna system

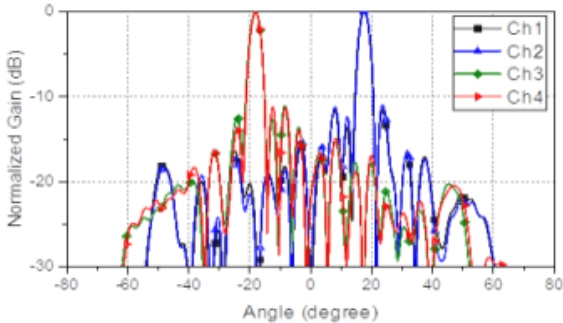
안테나 시스템의 수신 성능 측정 시 시스템의 수신출력 신호는 디지털 I/Q형태이므로 회로망 분석기와의 연동을 위해 I/Q신호를 RF신호로 변환하는 연동시험치구를 사용하여 측정을 수행하였다. 연동 시험치구는 측정결과에 왜곡이 발생하지 않도록 선형적으로 동작하도록 설계하여 적용하였다.

3.2.1 안테나 시험결과

그림 13은 4개의 수신 빔에 대한 패턴측정결과를 나타내었다. 그림 13(a)는 수신 3개 타일 기준 정면 방향인 빔 조향 0°의 방사패턴 측정 결과이며 안테나 이득은 약 24.5dBi, 빔폭 약 3.3°의 성능을 보인다. 중심 타일 기준의 10개 방향에서의 수신 안테나 이득 측정결과는 표 3과 같다. 그림 13(b)는 수신 3개 타일 기준으로 채널 1~2는 빔 조향 +18°, 채널 3~4는 빔 조향 -18°를 셋업하여 측정한 방사패턴 결과이다. 전 방위각 방향 내에서 지향 오차는 0.5°이 내로 확인되었다.



(a) 빔조향 0°
(a) Beam steering : 0°



(b) 빔조향 ±18°
(b) Beam steering : ±18°

그림 13. 수신 다중빔 안테나 방사패턴 측정결과
Fig. 13. Measured radiation pattern of multi-beam antenna

표 3. 수신안테나 이득 측정결과
Table 3. Results of Rx antenna gain

Tile no.	1	2	3	4	5
Gain (dBi)	24.44	24.46	24.54	24.57	24.55
Tile no.	6	7	8	9	10
Gain (dBi)	24.55	24.56	24.52	24.52	24.43

3.2.2 수신잡음온도 및 G/T 시험결과

위상배열안테나의 수신 G/T는 수신안테나의 이득과 수신잡음온도를 각각 측정하여 식 (4)를 통해 산정하였다. (Gant : 3타일 안테나이득, Tsys : 시스템수신잡음온도, Fsys : 수신기잡음온도)

$$\frac{G}{T} = \frac{G_{ant}}{T_{ant} + T_{sys}} = \frac{G_{ant}}{T_{ant} + T_o(F_{sys} - 1)} \quad (4)$$

($T_o = 290K, T_{ant} = 300K$)

수신RFIC는 수신잡음온도성능을 결정하는 주요 소자이며 내부에는 위상가변회로를 포함하는 4채널 수신경로와 RF신호결합 및 주파수변환회로를 포함한다. 수신배열RF반과 2nd IF 변환반을 포함하는 수신경로의 수신잡음온도를 측정하기 위해서 그림 14와 같이 시험구성하였으며 4개의 RF입력에 동시에 잡음원을 인가하여 4채널 기준 수신RF부에 대한 잡음온도측정을 수행하였다. 10개의 수신타일로 구성되는 수신 안테나는 각 타일을 중심으로 좌,우 타일을 포함하는 3개 타일로 수신 빔이 형성되므로 다중 타일 기준의 잡음온도를 산정하여야 한다. 이를 위해 모든 방향에 대한 40개 수신 RF채널에 대한 잡음온도를 측정한 후 24개 수신 RF채널에 대한 잡음온도의 RMS값을 각 타일의 잡음온도로 반영하였다.

표 4는 각 수신타일 별 수신잡음온도와 수신 G/T 측정결과를 나타낸다. 수신 G/T 산정을 위한 수신 안테나 이득은 3.2.1의 결과를 참조하였다. 시험 결과 표 1의 목표 G/T 성능인 -12dB/K 이상을 충족함을 확인할 수 있었고 통신 노드간 50km 이상의 통달거리를 만족하는 시험 결과를 얻을 수 있었다.

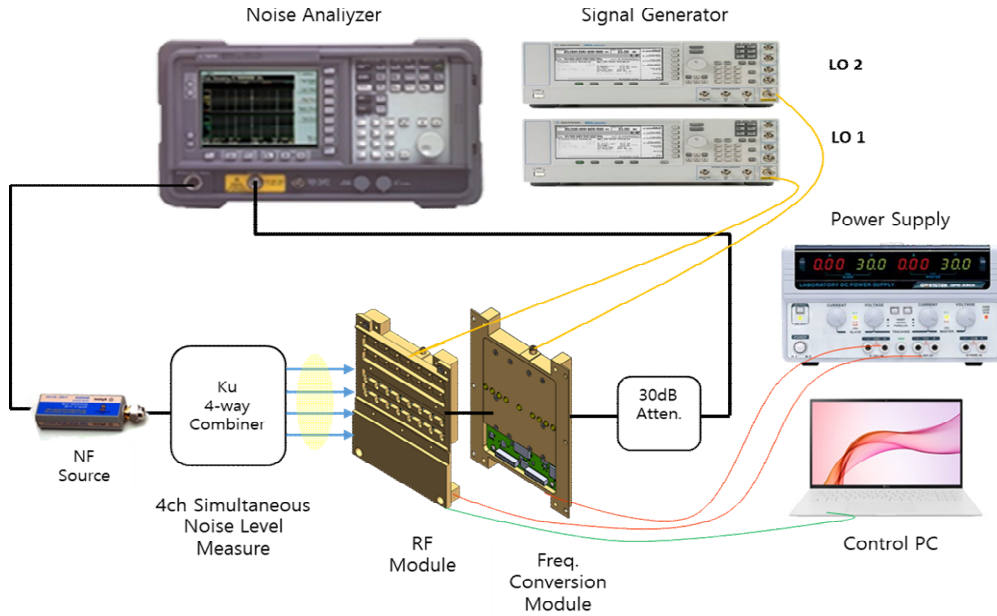


그림 14. 수신RF부 잡음온도 시험구성도
Fig. 14. Test configuration of RF receiver noise temperature

표 4. 수신 G/T 측정결과
Table 4. Results of receiver G/T

Tile no.	1	2	3	4	5
Noise temperature (K)	872.2	880.3	880.2	871.7	841.7
G/T (dB/K)	-5.2	-5.2	-5.1	-5.1	-5.2
Tile no.	6	7	8	9	10
Noise temperature (K)	879.5	899.3	914.9	889.5	872.2
G/T (dB/K)	-5.2	-5.2	-5.3	-5.2	-5.2

3.2.3 추적 및 탐색시험결과

빔 별 탐색 및 추적성능시험을 위해 야외에 그림 15와 같이 시험장비를 구성하였다. 빔 1,2 신호를 송신하는 안테나와 빔 3,4 신호 송신안테나를 준비하고 두 안테나 간 각도는 약 13°가 되도록 배치하였으며 송신안테나와 다중빔 안테나와의 거리는 약 30m가 되도록 하였다. 다중빔 안테나 시제를 회전치구 상단에 설치하고 초당 1°의 속도로 회전치구를 360° 회전시키면서 빔 1~4 신호의 독립적인 탐색 및 추적결과를 확인하였다. 수신신호의 순단조건 모사를 위해 빔 1~4의 송신신호는 펄스형태로 설정하였다. 그림 16은 다중빔 탐색 및 추적 시험결과를 나타낸다. 시험은 0~360° 전방향에 대해 진행하였으나, 본 논문에서는 일부 방위각 범위에 대한 탐색

및 추적결과만을 나타내었다. 신호가 없는 상황에서의 탐색결과는 -10°로 기록하였다. 안테나 시제의 회전과 동시에 수신신호의 끊김현상이 있는 상황에서 빠른 탐색 및 추적성능을 확인하였고 전방향에 대한 빔 별 RMS 추적 오차는 1°이하이다.

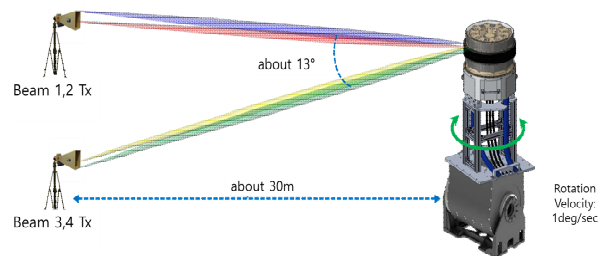


그림 15. 다중빔 탐색 및 추적시험구성도
Fig. 15. Multibeam searching & tracking test configuration

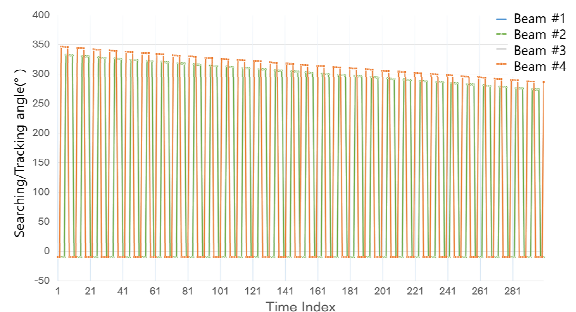


그림 16. 빔 별 탐색 및 추적시험결과
Fig. 16. Multibeam searching & tracking test result

IV. 결 론

본 논문에서는 향후 다양한 군 통신분야에 요구 될 것으로 예상되는 통신용 다중빔 위상배열안테나 시스템의 설계, 제작, 시험 결과를 기술하였으며, 특히 수신 시스템 성능과 관련하여, 실내 시험 구성을 통한 안테나 성능과 야외 시험 구성을 통한 동시 4 개 다중빔의 독립적 고속 빔 탐색 및 추적 성능을 제시하였다. 시험 결과 빔 지향 오차성능은 10개 타 일 기준 0.5° 이내를 달성하였고, 빔 별 탐색 및 추 적 시험결과 360° 전방향에 대해서 빔 별 RMS 추 적 오차 1° 이내를 달성하였다. 본 시스템에서 확보 된 기술은 공중 중계 통신뿐 아니라 지상, 우주 등 다계층 분야의 다양한 시나리오에 적용될 수 있다. 특히, 송수신 타일을 기반으로 구현된 하이브리드 빔 포밍 구조는 다양한 플랫폼에 유연하게 적용이 가능할 것으로 예상된다.

References

- [1] R. Askar, et al., "Interference handling challenges toward full duplex evolution in 5G and beyond cellular networks", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 28, No. 1, pp. 51-59, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000228>.
- [2] A. Sahai, G. Patel, and A. Sabharwal, "Asynchronous full-duplex wireless", 4th International Conference on Communication Systems and Networks, International Conference on Communication Systems and Networks, pp. 1-9, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1109/COMSNETS.2012.6151328>.
- [3] C. R. Anderson, et al., "Antenna isolation, wideband multipath propagation measurements, and interference mitigation for on-frequency repeaters", in Proc. 2004 IEEE SoutheastCon, Greensboro, NC, USA, pp. 110-114, Mar. 2004. <https://doi.org/10.1109/SECON.2004.1287906>.
- [4] K. Haneda, E. Kahra, S. Wyne, C. Icheln, and P. Vainikainen, "Measurement of loop-back interference channels for outdoor-to-indoor full-duplex radio relays", in Proc. 4th European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, pp. 1-5, Apr. 2010.
- [5] T. Joo, Y. Kim, C. Hwang, K. Kim, and J. Jeong, "Design of Tx multi-beam phased array antenna system for aerial communications", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 334-343, Feb. 2021. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.4.334>.
- [6] J. Bae and J. Park, "A searching algorithm for minimum bandpass sampling frequency in simultaneous down-conversion of multiple RF signals", *Journal of Communications and Networks*, Vol. 10, No. 1, pp. 55-62, Mar. 2008. <https://doi.org/10.1109/JCN.2008.6388328>.
- [7] C.-H. Hwang, T.-H. Joo, J.-M. Park, K. Kim, and J.-S. Jung, "Fast digital multi-beam search method for active phased array antenna system with full azimuth beam steering", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 36, No. 4, pp. 579-596, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1977184>.
- [8] Y.-D. Kim, T. Joo, C.-H. Hwang, K. Kim, and J.-S. Jung, "Antenna isolation method using sub-array structure with soft-surface for Tx/Rx separated FDD hybrid beamforming system", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 35, No. 5, pp. 620-633, Nov. 2021. <https://doi.org/10.1080/09205071.2020.1848642>.
- [9] T. Joo, C.-H. Hwang, J.-M. Park, K. C. Kim, and J.-S. Jung, "Design of a Tile-Type Rx Multi-Beam Digital Active Phased Array Antenna System", *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 12-20, Jan. 2022. <https://doi.org/10.26866/jees.2022.1.r.55>.

저자소개

조 정 일 (Jung-Il Cho)



2009년 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2011년 : 인하대학교 무선통신공학 (공학석사)
2011년 ~ 현재 : 한화시스템
미래정보통신연구소 전문연구원
2022년 ~현재 : 연세대학교

우주국방융합과정 박사과정
관심분야 : 능동위상배열안테나, 저궤도 위성통신

정 은 태 (Eun-Tae Jung)



2011년 : 광운대학교
전파공학과(공학석사)
2011년 ~ 2016년 : (주)에이스안테나
선임연구원
2016년 ~ 현재 : 한화시스템
미래정보통신연구소 전문연구원

관심분야 : 능동위상배열안테나, 컨포멀 안테나

이 성 주 (Seong-Ju Lee)



2002년 : 경남대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 : 경남대학교
정보통신공학과(공학석사)
2003년 ~ 2005년 : 고등기술연구원
플라즈마센터 주임연구원
2005년 ~ 현재 : 한화시스템

미래정보통신연구소 수석연구원
관심분야 : 능동위상배열안테나, 저궤도 위성통신

황 찬 호 (Chan-Ho Hwang)



2013년 : 한국해양대학교
전파공학과(공학사)
2015년 : 한국해양대학교
전파공학화(공학석사)
2016년 ~ 현재 : 국방과학연구소
선임연구원
관심분야 : 무선통신시스템,

디지털신호처리

주 태 환 (Tae-Hwan Joo)



2008년 : 부산대학교 전기 및
전자공학부(공학사)
2010년 : 한국과학기술원
전기전자공학과(공학석사)
2014년 : 한국과학기술원
전기전자공학과(공학박사)
2016년 ~ 현재 : 국방과학연구소

선임연구원
관심분야 : RF Transceiver, 데이터링크 시스템

정 재 수 (Jae-Soo Jung)



1988년 : 동아대학교 컴퓨터공학과
(공학사)
1990년 : 경북대학교 컴퓨터공학과
(공학석사)
1990년 ~ 현재 : 국방과학연구소
책임연구원
관심분야 : 네트워크 Protocol,

Data Structure