

공중 통신용 송신 다중빔 능동 위상배열 안테나 시스템의 설계

Design of Tx Multi-Beam Active Phased Array Antenna System for Aerial Communications

주태환 · 김영담 · 황찬호 · 김기철 · 정재수

Taehwan Joo · Youngdam Kim · Chanhoo Hwang · Kichul Kim · Jaesoo Jeong

요 약

본 논문에서는 공중 통신을 위한 송신 다중빔 능동위상배열 안테나 시스템의 설계, 제작 및 성능검증 결과를 나타낸다. 본 논문에서 다중빔 송신 배열안테나는 3개의 타일형 능동위상배열 안테나로 구성되며, 각 타일은 안테나부, RF부 및 디지털 빔포밍부로 구성된다. 성능검증 결과, 4개의 동시 독립적 빔형성이 가능함을 확인하였고, 각 빔당 약 21 dBW 수준의 EIRP를 나타내었으며, 0.4° 이하의 빔 지향정확도를 나타내었다. 본 다중빔 안테나를 응용하면 공중 통신이 필요한 데이터링크 분야에서 활용이 가능할 것이다.

Abstract

In this paper, we describe the design, manufacture, and performance test results of a highly integrated Tx multi-beam active phased array antenna for aerial communications. The proposed Tx phased array antenna is composed of three tile phased array antennas, which consist of an array antenna, RF, and beamforming units. In the performance test of the Tx antenna system, an EIRP of 21 dBW and a beam pointing accuracy of less than 0.4° were achieved with four independently operable multi-beams. It is expected that the Tx multi-beam antenna system can be applied to common data link (CDL) communications for aerial networks.

Key words: Multi-Beam, Active Phased Array, Digital Beamforming, Tx, Aerial Communication

I. 서 론

최근 네트워크 중심 작전환경(NCOE, network centric operational environment) 구축의 중요성이 강조됨에 따라 고용량의 감시 정찰 정보를 고속으로 전송할 수 있는 기술의 필요성이 증대되고 있다. 이를 위해 일반적으로 지형적 제약을 받는 전술 통신망과 날씨 및 재밍의 영향을 많이 받는 위성통신망의 단점을 극복하기 위해 지상 전술통신망 대비 가시선 확보가 용이하고, 위성 통신망 대

비 전송속도 증대가 용이한 공중 통신망 개발이 요구되고 있다. 이를 위하여 단일 중계용 비행체를 통해 다수의 임무용 비행체와 통신할 수 있는 통신 중계용 다중빔 안테나의 개발이 필요하다.

통신 중계용 다중빔 안테나의 개발을 위해 현재 사용 중인 반사판 안테나 기반의 1:1 통신 장비를 다수 적용하여 n:1 중계 통신을 가능하게 할 수 있지만, 이는 중계용 비행체에 n개의 안테나 및 RF부가 요구되어 크기, 무게, 소모전력 등의 탑재 환경을 고려할 때 적합하지 못하다.

국방과학연구소 제2기술연구본부(The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 6, 2021 ; Revised February 10, 2021 ; Accepted February 15, 2021. (ID No.20210106-001)

· Corresponding Author: Taehwan Joo (e-mail: jooth01@gmail.com)

따라서 기존의 시스템을 개선할 수 있는 능동위상배열안테나 기반의 다중빔 안테나의 설계가 요구된다^{[1]~[8]}.

또한 공중 통신 환경을 고려할 때 각 중계기 및 임무기로 구성된 통신 노드의 고속 이동성을 고려해야 하므로 다중빔 안테나 설계를 위해 아날로그 다중빔 빔포밍 방식과 디지털 다중빔 빔포밍 방식으로 설계할 수 있다. 그림 1에서 2개 다중빔 구현을 위한 안테나 2개의 빔포밍 구조도를 나타내었다^[9].

아날로그 빔포밍을 통한 다중빔 형성을 위해 RF부에서의 위상천이 방식을 그림 1(a)에 나타내었다. 송신 다중빔 형성을 위해 생성하고자 하는 다중빔 수와 안테나 수를 고려한 위상천이기를 통하여 다양한 지향 방향을 갖는 다중빔을 생성할 수 있다. 본 아날로그 방식은 디지털부의 구성이 간편하고 소모전력이 낮은 장점이 있지만, RF부에서 다중빔 형성을 위한 고주파 신호의 분리 및 결합으로 인한 경로 손실과 아날로그 위상천이기의 구현 오차로 인해 세밀한 분해능을 갖기 어려우며, 이로 인한 빔 지향 오차와 운용 환경의 영향을 많이 받는 단점이 있다^{[10]~[12]}.

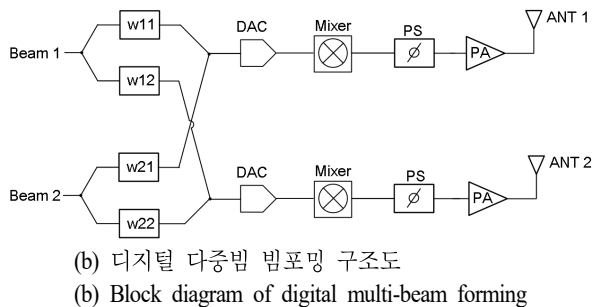
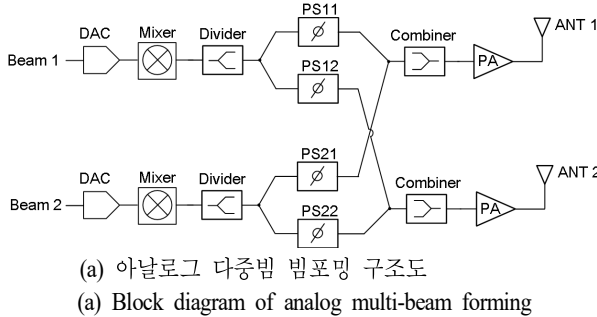


그림 1. 송신 타일의 안테나부 설계
Fig. 1. Design of array antenna in Tx tile.

디지털 빔포밍 기반 다중빔 형성 구조를 그림 1(b)에 나타내었다. 송신 다중빔 형성을 위해 DAC(digital to analog converter) 이전의 디지털부에서 빔포밍 계수를 연산하고, 신호를 합성하는 방식으로 구성된다. 이 방식은 디지털 연산이 복잡하며, 다수의 DAC와 신호처리부의 연산복잡도로 인한 복잡도와 소모 전력 등의 단점이 있지만, 환경의 변화의 영향에 대한 성능 변동을 최소화하여 빔형성을 할 수 있으며, 운용 환경 변화에 대응하여 재구성할 수 있으므로 공중 통신을 위한 비행체 탑재 환경에 적합하다고 할 수 있다^{[13]~[17]}.

본 논문에서는 이를 고려하여 비행체 탑재 가능한 소형 경량화된 다중빔 안테나를 구현하기 위하여 디지털 빔포밍을 적용하였다. 기존의 다중빔 안테나 시스템은 그 구현의 어려움으로 크기 무게가 매우 커서 탑재체로 활용하기에 어렵거나, 구현의 편이성을 위해 능동 위상배열 안테나로 구성되지 않고 Butler Matrix, Rotman Lens 등을 활용하여 구현된 사례가 많다^{[18]~[22]}. 하지만 본 안테나 시스템은 탑재가 가능하기 위해 소형 경량화하여 구성하였으며, 디지털 빔포밍 방식을 활용하여 빔 지향 정확도가 아주 높으며, 원하는 방향의 지향이 가능한 안테나를 구현하였다. 또한 본 논문에서 제시한 통신용 송신 다중빔 안테나에서 제시한 타일의 연속 배열을 활용하여 전방위각 방향으로 연속적인 빔 지향이 동작이 가능하며, 타일형 능동위상배열안테나로 구성되어 원하는 안테나로 재구성이 가능한 우수성이 있다.

2장에서는 송신용 다중빔 위상배열안테나의 설계 사항을 기술하였으며, 3장은 송신용 다중빔 위상배열 안테나의 제작 및 성능시험 결과에 대해 기술하였다.

II. 송신 다중빔 위상배열 안테나의 설계

2-1 송신 다중빔 위상배열 안테나 설계 목표

장거리 고속 공중 통신을 위해 50 km 통달거리 및 16 Mbps의 전송속도를 고려할 때 송신 다중빔 안테나는 빔당 19 dBW 이상의 EIRP(effective isotropic radiated power)가 요구된다. 이를 위한 송신 다중빔 안테나 성능 설계 목표를 표 1에 나타내었다.

본 다중빔 안테나는 Ku 대역 약 15 GHz의 40 MHz를

표 1. 송신 다중빔 위상 배열 안테나의 설계 목표

Table 1. Design specification of Tx multi-beam forming array antenna.

Item	Design target
Operating frequency	Ku band Tx band(4 ch): 40 MHz
EIRP	≥ 19 dBW
Num. of multi beam	4 ea
Antenna gain	≥ 21 dBi
Beam steering angle (ϕ)	$-18^\circ \sim 18^\circ$
Beam pointing error	$\leq 1^\circ$

송신 대역으로 사용하며, 4채널 신호(Ch1, Ch2, Ch3, Ch4)를 동시 전송하기 위해 채널당 10 MHz의 대역폭으로 주파수 분할한다.

2-2 다중빔 송신 위상배열 안테나 구성도

본 논문의 송신 다중빔 안테나의 간략한 구성도를 그림 2에 나타낸다. 4개 빔의 동시 독립적 지향을 위해 디지털 빔포밍 방식으로 설계하였다. 4개의 신호를 8개의 송신 경로로 분배한 후 신호별 빔 지향각도에 맞게 위상 가중치 벡터를 연산한다.

이후 인접 채널의 간섭을 최소화하기 위하여 채널별 대역폭 10 MHz에 적합한 채널 필터를 통과 후 4채널 신

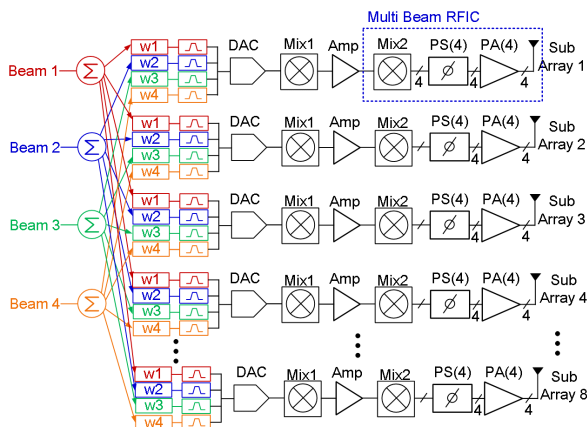


그림 2. 송신 다중빔 위상배열안테나 구조도

Fig. 2. Block diagram of Tx multi-beam phased array antenna.

호를 결합하여 디지털-아날로그 변환기에서 100 MHz 대역의 아날로그 신호로 변환한다. 출력 신호를 주파수 변환반을 통하여 L대역으로 1차 변환 및 증폭하며, RF통합반에서 Ku 대역으로 변환 및 증폭하여 안테나부로 송신 신호를 전달한다. RF 통합반의 최종단은 4경로의 신호를 처리할 수 있는 RF 통합칩으로 구성되어 있으며, 각 다중빔 RF통합칩(multi beam RFIC)은 주파수 변환 이후 4개의 위상천이기 및 전력증폭기로 구성된다. RF 통합칩 내부의 위상천이기는 경로 보정을 위해 활용되며, 다중빔의 지향에 적용하지 않는다.

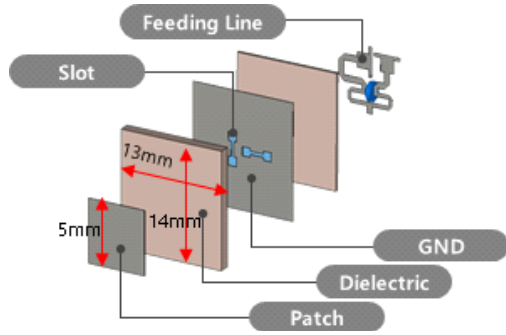
2-3 배열 안테나부 설계

송신 다중빔 안테나는 패치 안테나 구조로 슬롯 커플링 급전을 통해 Ku대역 주파수에 적합한 광대역 특성을 확보하였고, 원형 편파 특성을 위하여 두 개의 급전 구조를 가지도록 설계하였다. 마이크로스트립 패치안테나가 존재하는 기판은 저유전율의 Teflon 재질($\epsilon=2.2$)을 사용하였다. 시뮬레이션 결과, 단일 안테나는 약 7 dBi 이상의 이득을 나타내었으며, 빔폭은 수평, 수직 각 75° 이상을 갖는다. 위상배열안테나 구성을 위해 단일 안테나를 4×8 배열하였다. 공중중계 다중빔 안테나의 운용개념을 고려할 때 양각으로는 빔폭을 넓게 설계하여 임무용 비행체의 고도차에 의한 빔 지향각 변화를 최소화하고, 방위각 방향으로로는 빔폭을 좁게 설계하여 유사한 위치에 있는 임무용 비행체를 구분하도록 설계하는 것이 유리하다. 따라서 4×8 배열안테나의 세로 방향 4개를 부배열로 구성하였다. 시뮬레이션으로 확인한 배열안테나의 이득은 약 22 dBi이며, 이때 빔폭은 수평 9.5° 및 수직 18° 수준이다 (그림 3).

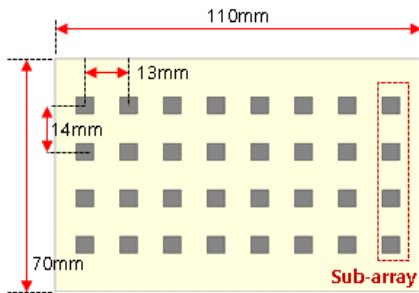
빔 이득을 추가 향상하고 지향정확도를 개선하기 위하여 본 송신 다중빔 안테나에서는 그림 4와 같이 인접타일 3개를 연동하여 동작한다. 시뮬레이션으로 확인한 배열안테나의 이득은 약 25 dBi이며, 이때 빔폭은 수평 3.5° 및 수직 18° 수준이다.

2-4 RF부 설계

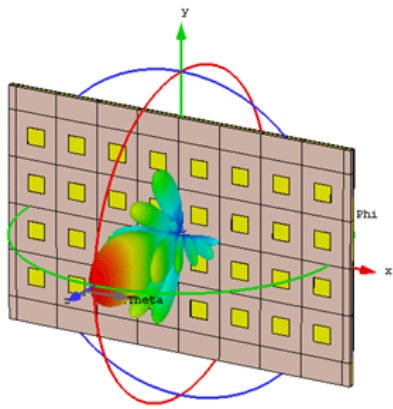
RF 부는 RF 통합반과 주파수 변환반으로 구성된다.



(a) 단일 복사소자의 설계 개념도
(a) Design concept of unit radiating antenna



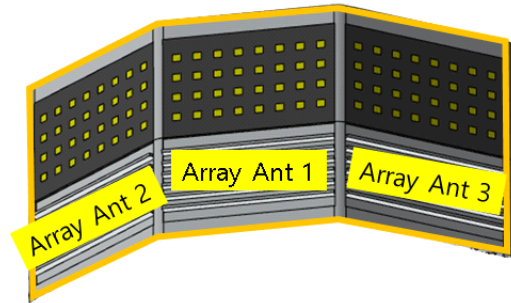
(b) 4×8 배열 안테나의 설계
(b) Design of 4×8 array antenna



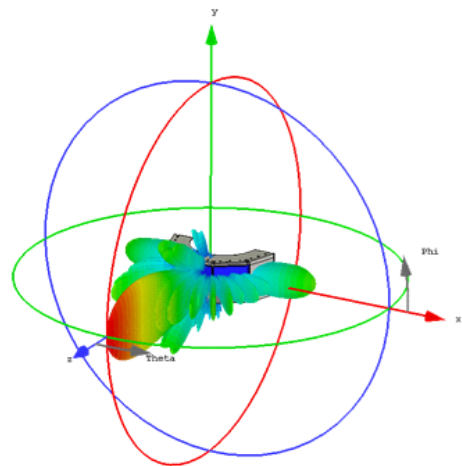
(c) 4×8 배열 안테나의 3D 방사패턴
(c) 3D pattern of array antenna

그림 3. 송신 다중빔 안테나부 설계
Fig. 3. Design of array antenna in Tx.

RF 통합반은 L 대역에서 Ku 대역으로의 변환 및 증폭부로 구성되며, 주파수 변환반은 100 MHz 신호를 L 대역으로의 변환을 담당한다.



(a) 3개 타일 연동 배열 안테나의 설계
(a) Design of 3 tile array antenna



(b) 3개 타일 연동 배열 안테나의 3D 방사패턴
(b) 3D pattern of 3 tile array antenna

그림 4. 3개 타일 연동송신 다중빔 안테나부 설계
Fig. 4. Design of 3 tile array antenna in Tx.

RF 통합반의 설계를 그림 5에 나타내었다. RF 통합반에는 8개의 RF 통합칩이 구성되며, L 대역 신호의 입력 후 Ku 대역으로 변환하며, 1:4 분배기를 통해 4개의 신호로 분배하며, 위상천이기 및 전력증폭기를 통해 안테나단으로 신호를 전달한다. 전력증폭기는 약 20 dBm 수준의 P_{1dB} 를 갖는다. RF 통합반의 송신이득은 23 dB 수준이다.

능동위상배열안테나에서 빔 지향 손실을 최소화하기 위하여 보정은 매우 중요하다. 이를 위해 본 다중빔 시스템에서는 최종단인 전력증폭기에서의 신호를 루프백하여 위상오차보정 및 진폭보정을 적용한다. 총 32개의 출력 중 인접한 전력증폭기 출력 2개를 결합하여 16개의 보정신호를 얻을 수 있으며, 보정회로 입력의 16:1 스위치

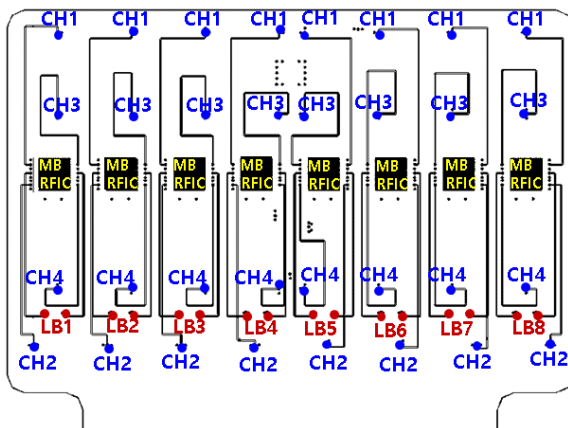
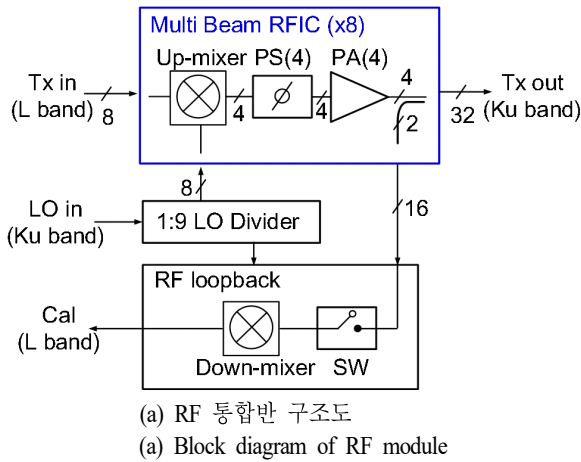


그림 5. 다중빔 RF 통합반 설계
Fig. 5. Design of Tx multi-beam RF module.

를 이용하여 원하는 경로의 신호를 L대역으로 변환할 수 있도록 설계하였다.

송신 신호 보정을 위하여 본 다중빔 안테나 시스템에서는 독립적인 수신 경로를 고려하였다. L대역으로 변환된 하향신호를 주파수 변환반을 통하여 100 MHz 대역으로 변환하며, 이를 독립적 아날로그-디지털 변환기를 통해 디지털 빔 형성부로 전달한다. 디지털 변환된 송신보정신호의 경로별 진폭 및 위상값을 확인하여 16개 경로로 전달된 32개의 송신신호를 모두 균일하게 맞추는 것을 목표로 RF 통합칩의 위상과 이득을 제어한다.

송신 주파수 변환반은 100 MHz 신호를 L대역으로 변

환한다. 약 15 dB의 송신이득과 총 30 dB 송신이득범위를 0.5 dB 간격으로 제어되도록 설계하였다.

RF부의 성능유지를 위하여 방열구조 설계는 매우 중요하다. 타일형 구조의 안테나는 높은 집적도로 인해 열 문제가 심각하다. 이는 송신 출력 및 이득을 감소시키며, 소모 전력 증가 등의 성능 열화를 발생시킨다. 본 설계에서는 송신 RF 통합칩을 낮은 온도로 일정하게 유지시키는 것이 중요하여 수랭식 방열구조를 채택하였다. RF 통합반의 수랭식 방열구조 및 열해석 결과를 그림 6에 나타내었다. 송신 RF 통합반 모듈 하부에 열전도도가 높은 물질 및 통로를 배치하고, 수관을 만들어 8개 RF 통합칩 하

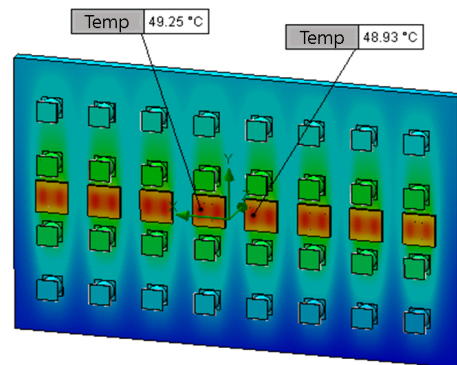
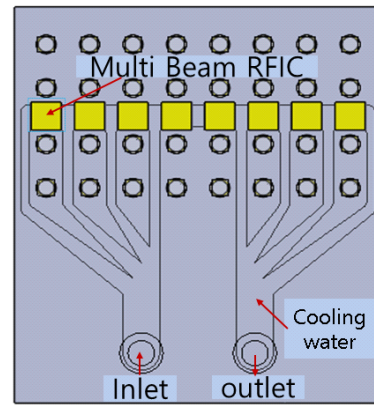


그림 6. RF 통합반 수랭식 구조 설계
Fig. 6. Design of water cooling for RF module.

부를 관통하여 지나갈 수 있도록 설계하였다. 열해석 결과, 수랭식 구조를 적용하지 않았을 때 약 80℃ 이상의 발열이 발생하였지만, 본 수랭식 방열 구조로 RF 통합반의 8개 RF 통합칩이 5℃ 이하로 일정하게 유지된다.

2-5 송신 다중빔 형성부의 설계

송신 다중빔 형성부의 구성도를 그림 7에 나타내었다. 다중빔을 형성하기 위해 모뎀부로부터 생성된 4개의 송신신호를 입력받아 1:8 분배기를 통해 경로별로 전달될 4개의 신호를 분배하여 32개의 신호로 분배한다. 송신 다중빔 지향각은 수신 다중빔 지향각과 동일하게 형성되어야 하므로, 수신 다중빔 형성부에서 빔 지향신호를 전달받아 32개의 분배된 신호에 위상 벡터를 연산하여 준다. 위상 연산이 된 32개의 신호를 경로별 8개의 신호로 합성한 후 디지털-아날로그 변환기로 전달한다.

Ⅲ. 송신 다중빔 위상배열 안테나의 제작 및 측정

3-1 타일형 송신 위상배열 안테나 제작

제작된 타일형 송신 위상배열안테나를 그림 8에 나타내었다. 본 송신 안테나는 환경 영향성 등을 고려하기 위하여 보드 적층형 타일형상이 아닌 모듈 기능별 하우스징을 하였으며, 이를 적층 구성하였다. 본 송신 다중빔 안테나는 위에서 볼 때 사다리꼴 형상을 갖도록 설계하여 공중중계용 전방향 통신을 위한 다각형 배열이 가능하다.

본 다중빔 안테나는 송신 및 수신 배열안테나를 동시에 보유하고 있다. 높은 송신 신호로 인해 수신 배열안테나가 포화될 수 있으므로 이를 방지하기 위한 이격구조

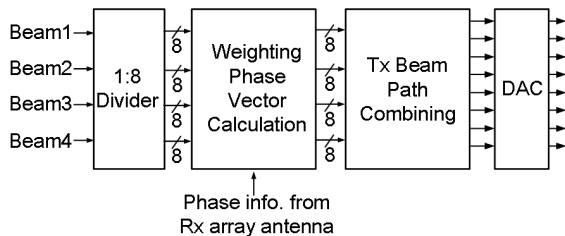
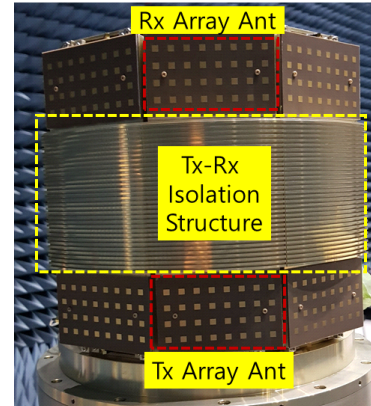
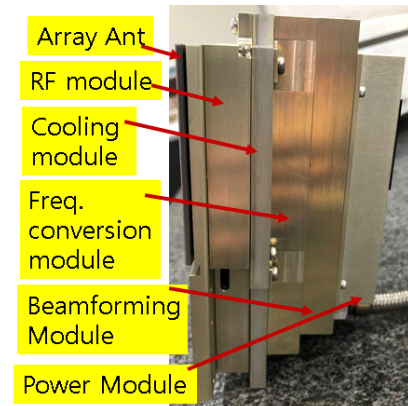


그림 7. 송신 다중빔 형성부 구성도
Fig. 7. Block diagram of Tx multi beamforming module.



(a) 송신 다중빔 안테나 제작 형상(전면)
(a) Tx multi-beam antenna (front view)



(b) 송신 다중빔 안테나 제작 형상(측면)
(b) Tx multi-beam antenna (side view)

그림 8. 송신 다중빔 위상배열 안테나
Fig. 8. Manufactured tile type Tx phased array antenna.

를 설계하여 주었다. 송수신 이격구조로 인한 송수신 대역 간섭은 약 -55 dB 수준이다.

3-2 타일형 송신 위상배열 안테나 성능시험 구성

송신 다중빔 위상배열안테나의 성능시험을 위해서는 Ku대역 안테나 스캐너, 입출력 신호분석기(network analyzer) 및 다중빔 안테나 제어부가 필요하다. 또한, 설계된 송신 다중빔 안테나는 디지털 I/Q 신호 입력과 Ku대역 출력이므로, 신호분석기로 검증하기 위해 출력인 Ku대역을 디지털 I/Q로 변환하는 모듈을 추가로 구성하였다. 정확한 안테나 패턴 측정을 위해서, 타일형 안테나의 면적 4

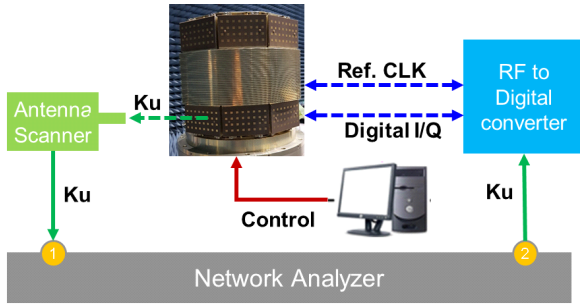


그림 9. 송신 다중빔 위상배열안테나 성능시험 구성
Fig. 9. Performance test configuration for Tx multi beam antenna.

배 이상의 근접 전계를 측정할 수 있는 포지셔너 및 스캐너를 사용하였다. 성능 시험 시 사용한 신호분석기 및 신호발생기는 keysight의 E8363B와 E8257D를 사용하였다. 안테나 스캐너 및 2D 빔패턴 측정 프로그램은 (주)엔티지의 VWNF 장비를 사용하였으며, 측정 구성도를 그림 9에 나타내었다. 정확한 근접전계 측정을 위해 본 성능시험은 무반향 챔버에서 수행하였다.

3-3 타일형 송신 위상배열 안테나 성능시험 결과

그림 10은 송신 다중빔 안테나 4개의 다중빔이 모두 bore-sight를 지향의 성능시험 결과를 나타낸다.

4채널 신호의 bore-sight에서의 빔 지향오차는 약 0.05° 수준이며, 빔폭은 약 3.4° 수준을 갖는다. 본 측정 구성에서 EIRP를 계산하기 위해 식 (1)의 방식으로 산출하였다.

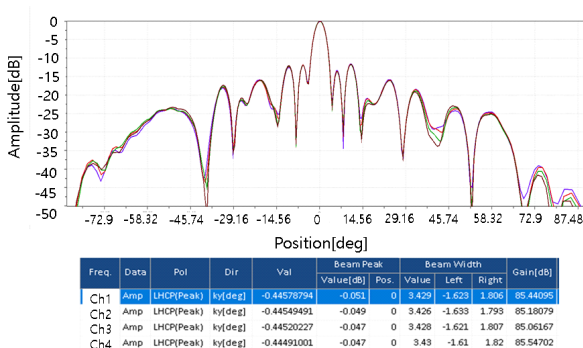


그림 10. 송신 다중빔 안테나 측정결과, bore-sight
Fig. 10. Measured result of Tx multi beam antenna, bore-sight.

$$EIRP_{dBW} = ANT_{Gain, dB} - P_{In, dBm} - 30 \text{ dB} \quad (1)$$

측정된 안테나 이득은 RF-디지털 변환부 이득과 다중빔 안테나의 능동 이득 및 다중빔 안테나부의 이득을 모두 포함하고 있다. 따라서 측정된 이득과 RF-디지털 변환부의 이득을 연산하면 다중빔 안테나 이득과 다중빔 안테나 출력신호 세기로 볼 수 있다. 다중빔 안테나의 EIRP 결과를 표 2에 나타내었다.

빔별 EIRP는 21 dBW 이상을 나타내는 것을 확인하였으며, 목표로 하였던 19 dBW 이상을 만족한다.

동시 독립적인 4개 빔 형성 및 빔 지향정확도를 확인하기 위하여 빔별 지향각을 독립적으로 인가하여 근접전계 시험을 통해 확인하였다. 성능검증 결과를 그림 11에 나타내었다.

빔 지향시험 결과, 4개의 독립적인 지향각을 갖는 빔 형성이 가능함을 확인하였다. 이때의 결과를 표 3에 나타내었다.

빔 지향시험 결과, 최대오차 0.4° 의 정확도로 독립적 빔 지향이 가능함을 확인하였다. 이 오차는 다중빔 안테나 시스템의 RF 및 아날로그 경로의 위상 및 진폭의 추가적인 정교한 보정을 통해 개선이 가능하다. 또한 $-18^\circ \sim 18^\circ$ 범위에서 4개 독립적 다중빔의 동시 형성 및 지향이 가능함을 확인하였다.

IV. 결 론

공중 중계 통신을 위해 탑재체의 소형, 경량화 및 운용 개념의 다양화를 위해서는 다중빔 안테나의 기술 개발이 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 디지털 빔포밍 기반의 4개의 다중빔이 동시 생성 가능한 송신 다중빔 위상배열안테나 기술을 제시하였다. 성능검증 결과, 4개의 동

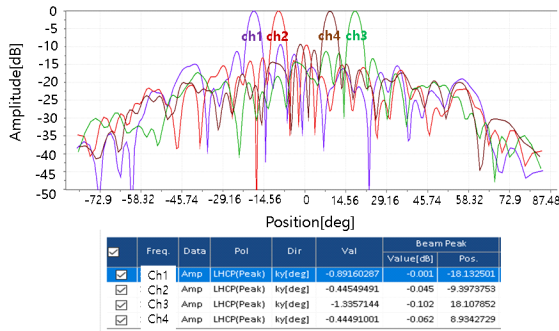
표 2. 송신 다중빔 안테나 EIRP 결과
Table 2. EIRP results of multi beam antenna.

	Beam 1 (Ch. 1)	Beam 2 (Ch. 2)	Beam 3 (Ch. 3)	Beam 4 (Ch. 4)
Pin (dBm)	-33.71	-33.61	-33.64	-33.55
Gain (dB)	85.44	85.18	85.06	85.55
EIRP (dBW)	21.73	21.57	21.42	22

용 송신 다중빔 안테나의 개발이 가능하다.

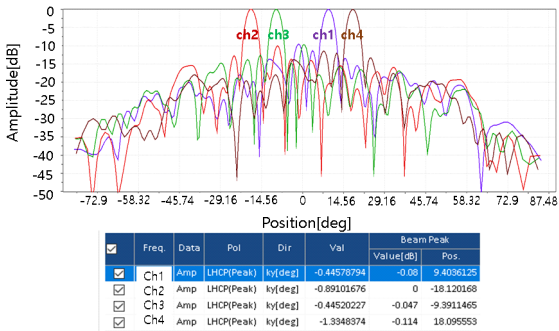
References

- [1] S. Panaretos, C. Shoda, R. Relatores, J. Gordon, P. Curtis, and D. Parker, "A broadband, low-sidelobe, dynamic weight three-channel receive, X-band active array," in *1996 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, San Francisco, CA, Jun. 1996, vol. 3, pp. 1573-1576.
- [2] R. Sturdivant, C. Ly, J. Benson, and M. Hauhe, "Design and performance of a high density 3D microwave module," in *1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Denver, CO, Jun. 1997, vol. 2, pp. 501-504.
- [3] R. J. Mailloux, "Antenna array architecture," in *Proceedings of the IEEE*, Jan. 1992, vol. 80, no. 1, pp. 163-172.
- [4] D. Parker, D. C. Zimmermann, "Phased arrays-Part I: Theory and architecture," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 3, pp. 678-687, Mar. 2002.
- [5] H. Schippers, J. Verpoorte, A. Hulzinga, C. Roeloffzen, and R. Baggen, "Towards structural integration of airborne Ku-band Satcom antenna," in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP)*, Gothenburg, Apr. 2013, pp. 2963-2967.
- [6] J. U. Jeong, J. H. Ryu, T. H. Joo, G. C. Kim, I. H. Park, and J. U. Seo, "Design technology of shape adaptive active phased array antenna for communication," *The Magazine of the IEIE*, vol. 44, no. 4, pp. 39-47, Apr. 2017.
- [7] T. Joo, K. Kim, and J. Seo, "Design of tile-type Rx phased array antenna for Ku-band satellite communications," *The Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 9, pp. 702-711, Sep. 2019.
- [8] T. Joo, K. Kim, M. Dong, and J. Seo, "Design of



(a) 빔 지향시험, 1차

(a) Beam steering test, Case 1



(b) 빔 지향시험, 2차

(b) Beam steering test, Case 2

그림 11. 송신 다중빔 안테나 빔 지향 측정결과

Fig. 11. Measured result of Tx multi beam antenna, steering.

표 3. 송신 다중빔 빔 지향시험 결과

Table 3. Measured results of multi beam steering.

	Case 1			Case 2		
	Steering angle	Measured angle	Error	Steering angle	Measured angle	Error
Beam 1	-18°	-18.13°	0.13°	9°	9.4°	0.4°
Beam 2	-9°	-9.4°	0.4°	-18°	-18.12°	0.12°
Beam 3	18°	18.11°	0.11°	-9°	-9.4°	0.4°
Beam 4	9°	8.93°	0.07°	18°	18.1°	0.1°

시 독립적 빔형성이 가능하며, 각 빔당 약 21 dBW 수준의 EIRP 및 0.4° 이하 수준의 빔 지향정확도를 나타내었다. 본 다중빔 안테나를 응용하면 공중 통신 환경에 적합한 빔 지향정확도가 우수하며, 소형 경량화된 데이터링크

- tile-type Tx-phased array antenna for Ku-band satellite communications," *The Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 2, pp. 104-112, Feb. 2020.
- [9] W. Hong, Z. H. Jiang, C. Yu, J. Zhou, P. Chen, and Z. Yu, et al. "Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6231-6249, Dec. 2017.
- [10] A. Jacomb-Hood, E. Lier, "Multibeam active phased array for communication satellites," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 40-47, Dec. 2000.
- [11] E. Lier, D. Purdy, and K. Maalouf, "Study of deployed and modular active phased-array multibeam satellite antenna," *IEEE Antennas Propagation Magazine*, vol. 45, no. 5, pp. 34-45, Oct. 2003.
- [12] K. J. Maalouf, E. Lier, "Theoretical and experimental study of interference in multibeam active phased array transmit antenna for satellite communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 2, pp. 587-592. Feb. 2004.
- [13] H. Steykal, "Digital beamforming antennas: An introduction," *Microwave Journal*, vol. 30, no. 1, pp. 107-124, Jan. 1987.
- [14] J. Litva, *Digital Beamforming in Wireless Communications*, Boston, MA, Artech House, 1996.
- [15] J. D. Fredrick, Y. Wang, and T. Itoh, "A smart antenna receiver array using a single RF channel and digital beamforming," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 12, pp. 3052-3058, Dec. 2002.
- [16] J. Zang, W. Wu, and D. G. Fang, "Single RF channel digital beamforming multibeam antenna array based on time sequence phase weighting," *IEEE Antenna Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 514-516, May. 2011.
- [17] T. Nishio, T. Hsiao-Ping, Y. Wang, and T. Itoh, "A high-speed adaptive antenna array with simultaneous multibeam forming capability," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 12, pp. 2483-2494, Dec. 2003.
- [18] J. Vieira, S. Malkowsky, K. Nieman, Z. Miers, N. Kundargi, and L. Liu, "A flexible 100-antenna testbed for massive MIMO," in *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Austin, TX, 2014, pp. 287-293.
- [19] Y. Kozuki, H. Arai, "Layered butler matrix circuit for vertical multi beam of cellular base station antenna," in *2014 International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings*, Kaohsiung, Dec. 2014, pp. 561-562.
- [20] H. T. Chou, "An effective design procedure of multibeam phased array antennas for the applications of multistatellite/coverage communication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 10, pp. 4218-4227 Oct. 2016.
- [21] M. Gans, N. Amitay, "Narrow multibeam satellite ground station antenna employing a linear array with a geosynchronous arc coverage of 60°, part II: Antenna design," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, no. 6, pp. 966-972, Nov. 1983.
- [22] A. Ouacha, R. Gunnarsson, L. Pettersson, L. G. Huss, C. Samuelsson, and S. Lindstrom, et al., "Wideband multibeam antenna for integration in small platforms," in *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation*, Barcelona, 2010, pp. 1-5.

주 태 환 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8750-9779>



2008년 2월: 부산대학교 전기 및 전자공학부 (공학사)
2010년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
2014년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] RF Transceiver, 데이터링크 시스템

김 기 철 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1652-5576>



2007년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
2011년 2월: 광주과학기술원 (공학석사)
2016년 8월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
2007년 1월~2008년 11월: 삼성탈레스 연구원

2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] RF 회로 및 전력증폭기, 통신용 초고주파 기술

김 영 담 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3855-8902>



2011년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
2013년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
2017년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과(공학박사)
2019년 3월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 전자기파 수치해석, 능동 위상 배열안테나 신호처리

정 재 수 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7094-7476>



1988년 2월: 동아대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
1990년 2월: 경북대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
1990년 3월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
[주 관심분야] 네트워크 Protocol, Data Structure

황 찬 호 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8807-7210>



2013년 9월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2015년 9월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
2016년 3월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 무선통신시스템, 신호처리