

Ku 대역 위성통신용 형상적응형 수신위상배열 안테나시스템의 설계

Design of a Conformal Rx Phased Array Antenna System for Ku-Band Satellite Communications

주태환 · 김기철 · 김영담 · 황찬호 · 서종우

Taehwan Joo · Kichul Kim · Youngdam Kim · Chanho Hwang · Jongwoo Seo

요 약

본 논문에서는 Ku 대역 위성 통신을 위한 타일 안테나로 구성된 수신 형상적응형 위상 배열안테나 시스템을 제안하고, 이의 설계, 제작 및 성능시험 결과에 대해 기술하였다. 본 수신 위상 배열안테나는 64개의 타일형 위상배열안테나로 구성되고, 이는 16개의 단위로 섹터부로 연결되며, 최종 처리를 위하여 BSU(Beam steering unit)에 의해 제어 및 신호처리된다. 수신 위상배열 안테나의 성능시험 결과, 10 dB/K 이상의 G/T를 확보하였으며, 운용대역에서 약 0.3° 수준의 빔 지향정확도를 갖는다. 본 안테나를 응용하면 외부 형상에 돌출된 구조가 없는 광대역 광각의 빔 편이오차가 최소화된 위성통신용 형상 적응형 안테나의 비행체 적용이 가능할 것이다.

Abstract

In this paper, we describe the design, manufacture, and performance test results of a highly integrated Rx conformal phased array antenna for Ku band satellite communication. The proposed Rx phased array antenna comprises 64 tile phased array antennas and is connected to a sector unit in 16 tiles. Additionally, SES are connected to a beam steering unit for controls and signal processing. The results of the performance test of the Rx antenna system revealed that a G/T of 10 dB/K and beam pointing accuracy of 0.3° were achieved. Therefore, the Rx system can be applied as a conformal antenna for satellite communications with a wide beam steering at a low beam squint.

Key words: Rx System, Phased Array Antenna, Conformal Antenna, Satellite Communications

I. 서 론

최근 비행체에서 방향 탐지, 통신, 이착륙 제어 및 감시 정찰용 레이더를 위하여 외부로 돌출된 안테나 구조를 주로 사용한다. 따라서 비행체의 항력을 감소시켜 비행

능력을 향상시키고, 저피탐 기능 증대를 위하여 형상적응형 안테나의 요구가 증가하여 이의 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[1]~[8]}.

과거부터 위상배열안테나의 연구는 많이 진행되었지만, 대부분 위성통신과 같은 대형 안테나는 송수신 모듈

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

· Manuscript received April, 6, 2020 ; Revised May, 13, 2020 ; Accepted May, 22, 2020. (ID No. 20200406-030)

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

형태를 사용한 브릭 형태의 안테나 형상으로 대부분 설계가 이루어졌다. 하지만 브릭 형상은 신호의 증폭 및 처리를 위한 송수신 모듈의 크기로 인해 장착 플랫폼의 곡률 구조와 외형선이 일치하는 형상적응형 안테나를 구성하기에는 어려움이 있다⁹⁾.

형상적응형 안테나 시스템을 구성하기 위해서는 안테나를 타일구조로 구현하는 것이 효과적이다. 타일 구조는 여러 층의 평면형 다층기판으로 이루어져 있으며, 기판위에 각각의 집적회로를 배치하는 형태이다. 따라서 타일 구조는 기본 구성되는 안테나의 수를 쉽게 조절할 수 있고, 집적회로 기술을 이용하여 안테나 높이를 낮출 수 있다. 따라서 항공기 외형에 맞게 재구성이 가능하며, 장착 플랫폼 곡률에 맞도록 조정이 가능하다.

하지만 일반적으로 타일형 안테나는 브릭형 구조에 비해 구현 집적도가 높아서 복잡도가 매우 높고, 이로 인한 심각한 열문제가 발생한다. 따라서 타일 구조는 보통 작은 안테나 구조물이나 낮은 전력을 소모하는 시스템에 많이 사용된다. 따라서 위성통신과 같이 높은 전력과 대형 안테나를 타일형상의 구현을 위해 구성 및 설계에 많은 고려가 필요하다¹⁰⁾.

또한 일반적인 위상천이기를 사용하는 배열안테나 시스템은 특정 제어가 이루어지는 중심주파수에서만 정확한 빔 조향이 가능하고, 그 외의 주파수에서는 빔 조향 방향이 틀어지는 빔 스캔트 문제가 발생한다. 특히 광대역 주파수를 사용하는 경우, 빔 스캔트 문제는 매우 심각해진다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 TTD(true time delay) 소자를 위상천이기와 결합하여 사용하여 빔 스캔트 문제 및 빔 편이오차를 최소화하고, 실제 시스템의 구현효율성도 보존하는 방법을 제안하고자 한다.

본 논문에서는 64개의 타일로 구성된 위성 통신용 형상적응형 안테나 시스템을 제시하였으며, 구현시 고려한 사항, 제작 성능시험 결과를 기술하였다. 제 2장에서는 위성 통신용 수신 안테나 시스템의 링크버짓 분석을 통해 설계 파라미터를 분석 기술하였다. 제 3장에서는 수신 안테나 시스템의 설계에 대해 기술하였다. 4장에서는 제작 및 성능시험 결과에 대해 기술하고, 5장에서 결과를 분석하였다.

II. 수신 안테나 시스템 분석

2-1 수신안테나 시스템 링크버짓

위성 데이터링크 시스템을 위한 안테나 설계를 위해서 링크 버짓을 기초로 설계 주요 파라미터를 산출하는 것은 필수적이다. 그림 1에서 항공기 탑재 수신용의 위성 데이터링크 개념도를 나타내었다. 지상국에서 송출된 TC (tele-command) 신호가 위성을 거쳐 비행체 탑재 안테나로 수신되는 신호의 사용자 데이터속도는 약 0.2 Mbps 수준이며, 전체 데이터링크 시스템의 요구 C/N(carrier to noise ratio)은 약 -2 dB이다. 일반적으로 지상국과 위성 탑재용 데이터링크 안테나 시스템은 충분한 C/N 성능을 갖도록 설계된다. 따라서 위성 데이터링크 시스템의 C/N은 소형 경량화가 요구되는 비행체 탑재 안테나 성능에 의해 주로 결정된다. 시스템 요구 C/N에서 약 0.6 dB의 여유를 고려할 때, 설계되는 탑재 수신안테나 시스템의 요구 C/N은 약 -1.4 dB이다. 이를 기준으로 비행체 탑재 수신안테나 시스템의 요구 G/T 산출을 표 1에 나타내었다.

2-2 탑재용 수신안테나 시스템 설계 파라미터

비행체 탑재용 수신 안테나 시스템은 10 dB/K 이상의 G/T가 요구되며, 이를 본 시스템의 설계 목표로 설정하였

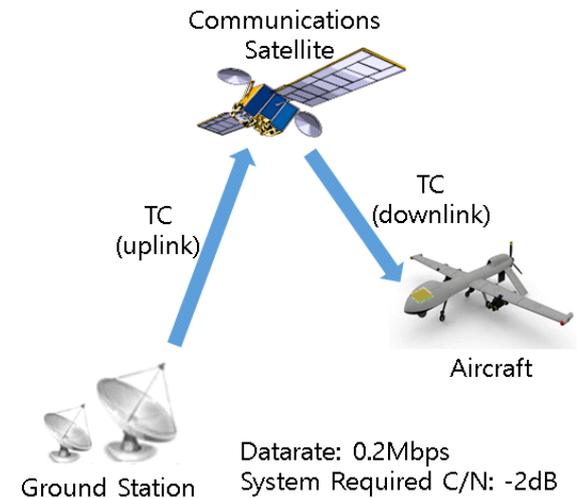


그림 1. 위성 데이터링크 개념도
Fig. 1. Concept diagram for satellite datalink.

표 1. 수신 탑재형 위상 배열 안테나의 요구 G/T 산출
Table 1. Required G/T calculation of Rx array antenna.

Item	Value
EIRP of satellite	28.1 dBW
Space loss(36,000 km)	-206.1 dB
Rain loss	0 dB
1/Boltzman constant	228.6 K/Watt/Hz
1/Noise bandwidth	-62.04 dB
Required system C/N	-1.44 dB
Required G/T of Rx antenna	10 dB/K

다. 이를 만족하기 위해 본 논문에서 고려한 위상배열안테나 시스템 G/T 설계 파라미터를 표 2에 나타내었다.

10 dB/K 이상의 G/T를 얻기 위한 수신안테나 시스템의 개별 패치안테나 이득이 4 dB 수준일 때, 개별 안테나 4,000개의 연속적인 배열을 통하여 38 dB 이상의 수신 안테나 이득을 얻을 수 있다. 본 시스템의 수신 안테나는 개별 패치안테나의 64개(8×8)로 구성된 타일 안테나로 구성되어 있으므로, 각 타일 안테나 64개(8×8) 배열로 탑재용 수신 안테나 시스템을 구성할 수 있다⁸⁾. 또한, 본 시스템의 타일 안테나의 연속배열로 인한 인접타일 안테나간

표 2. 수신 탑재형 위상 배열 안테나 G/T 설계 파라미터
Table 2. Design parameter of Rx array antenna.

Item	Value
Number of array antenna (calculated array gain)	4,096 EA (36.12 dB)
Unit antenna gain	4 dB
Integration loss	2 dB
Beam squint and point loss	2 dB
Antenna noise temperature	50 K
Antenna feeding loss	1 dB
Active return loss	1 dB
Rx noise figure	2.5 dB
Design target G/T of Rx antenna	>10 dB/K

간섭 또는 기계적 배열간격 공정오차 등의 타일 통합에 의한 성능열화로 약 2 dB 손실을 고려하였다.

위성 데이터링크 시스템에서는 Ku 대역에서 500 MHz 대역폭의 주파수를 갖는다. 따라서 광대역 주파수에 따른 빔 스캔트 현상 및 위상배열안테나 자체의 지향정확도 오류 등을 고려하여 각 1 dB의 설계 여유를 두었다. 탑재용 수신 위상배열안테나에서는 개별 패치안테나에서 수신 저잡음 증폭기로의 안테나보드와 RF보드의 보드 손실 및 피딩 손실을 1 dB 및 보드 및 칩의 공정오차로 발생하는 active return loss를 1 dB 고려하였다. 수신시스템의 잡음지수는 저잡음 증폭기의 잡음지수와 이득 및 수신기 손실 등을 고려하여 2.5 dB로 설계 목표를 정하였다.

따라서 탑재용 수신안테나 시스템에서 산출되는 배열 안테나 이득은 약 36 dB이며, 잡음 온도는 약 25 dBK이다. 따라서 본 설계 파라미터를 통한 수신 안테나 시스템의 G/T 약 11 dB/K 수준이며, 목표대비 1 dB의 설계마진을 갖는다.

III. 수신 안테나 시스템 설계

3-1 설계 목표

탑재용 수신 형상 적응형 안테나의 설계 목표치를 표 3에 나타내었다. 위성통신을 위하여 Ku 대역의 500 MHz 대역을 지원해야 하며, 선형편파와 원형편파 모두 적용할

표 3. 수신 탑재형 위상 배열 안테나 설계 목표
Table 3. Design target of Rx array antenna.

Item	Design target
Operating frequency f_c : center frequency f_L : lower frequency f_H : upper frequency	Ku (BW: 500 MHz) $f_L = f_c - 250$ MHz $f_H = f_c + 250$ MHz
Polarization	Dual LP & CP
Beam steering angle on phi-plane	360°
Beam steering angle on theta-plane	60°
Beam pointing error	<0.5°
G/T	>10 dB/K

수 있어야 한다. 또한 비행체의 기동간 위성과 끊임없는 통신 연결성을 보장하기 위하여 방위각 방향은 360° 지향이 가능하며, 양각으로는 60° 이상의 지향이 가능해야 한다. 또한 빔 지향정확도는 동작주파수에서 0.5° 이하를 유지해야 한다.

3.2 형상적응형 안테나 시스템 안테나부 설계

탑재용 수신안테나 구조도를 그림 2에 나타내었다. 수신안테나는 64개(8×8)의 연속적인 배열의 수신 타일안테나로 구성되며, 이는 세부적으로 16개(4×4) 타일 배열을 갖는 섹터부 4개로 구성된다. 형상 적응형 배열 구성을 위하여 예상 적용 항공기 외형선을 고려하여 x축으로는 평면배열을 가지며, y축으로는 곡면을 갖는 1차 곡면 구조로 안테나를 설계하였다. 본 안테나는 배열 축에 따라 원형구조와 평면구조를 동시에 갖게 되므로, 타일간의 x, y 축간 간격차이가 발생한다.

형상 적응형 배열안테나에 설계에 있어 안테나 지지구조의 제작과 관련된 공차 및 조립시 발생할 수 있는 오차와 운용중 비행체 변형과 관련하여 발생하는 구조왜곡에 의하여 변형될 수 있다. 안테나 타일간의 충돌에 의한 손상을 방지하고, 운용성능을 유지하기 위해 안테나 타일간의 적절한 간격을 선택해야 한다. 그러나 넓은 간격을 확보하게 되면 안테나의 부엽레벨을 전체적으로 상승시키게 된다. 이를 고려하여 x축(선형배열)은 약 1 mm의 타일 간 간격, y축(원형배열)은 약 2 mm의 타일간격을 갖도록 설계하였다.

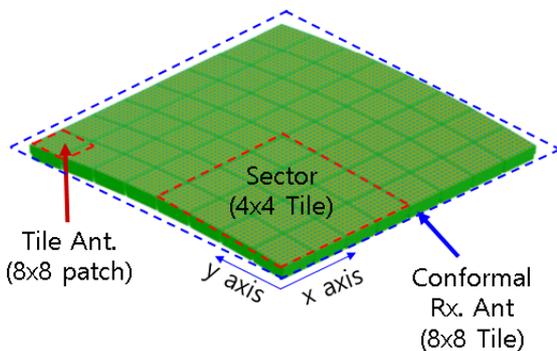
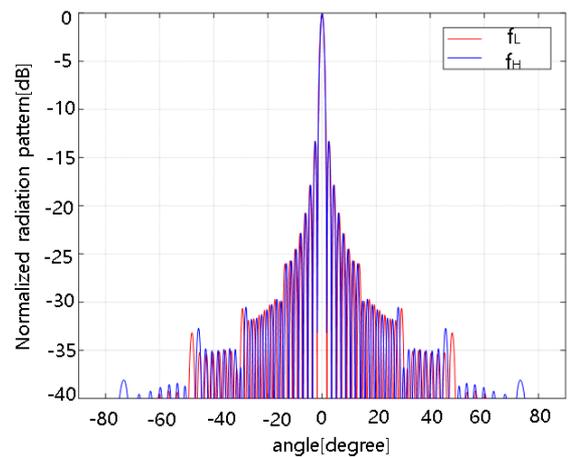
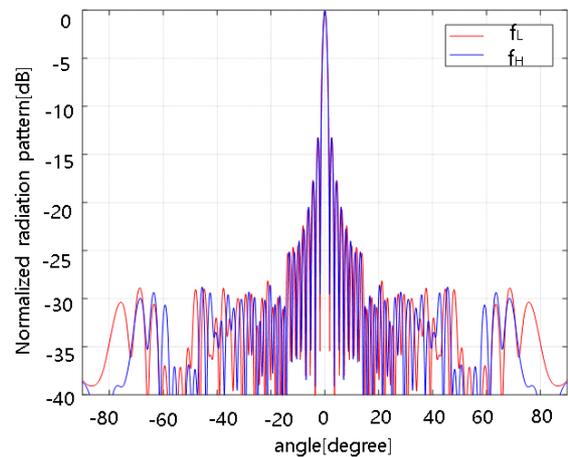


그림 2. 탑재용 수신안테나 구조도
Fig. 2. Block diagram of Rx tile phased array antenna.

평판 타일을 단일 곡면인 원통형 곡면에 따라 형상적응형으로 구성된 경우에 대한 복사패턴을 브로드사이드 방향에서 시뮬레이션한 결과를 그림 3에 나타내었다. 수신대역인 f_L , f_H 주파수에서 빔폭은 약 1.5°이며, 첫 번째 부엽레벨은 약 -13.5 dB 수준이다. 선형배열 방향의 어레이 팩터와 곡면 배열방향의 어레이 팩터간 복사패턴은 20° 이상의 영역에서 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 선형방향과 곡면방향에서 타일간 간격 차이로 인해 부엽레벨이 낮아지는 부분에서 상이한 패턴이 합성



(a) 선형축(x) 시뮬레이션 결과
(a) Simulated result of linear axis(x)



(b) 원형축(y) 시뮬레이션 결과
(b) Simulated result of cylindrical axis(x)

그림 3. 수신배열안테나의 브로드사이드 어레이 팩터
Fig. 3. Broadside array factor of Rx array antenna.

되어 나타나는 현상으로 분석할 수 있다.

타일간 간격이 x축(선형배열)은 약 2 mm의 타일 간 간격, y축(원형배열)은 약 4 mm로 증가할 때는 첫 번째 부엽레벨이 약 1 dB 수준 증가하였으며, 다른 각도의 부엽레벨이 크게 증가하여 방사 패턴이 변형되는 것을 확인하였다.

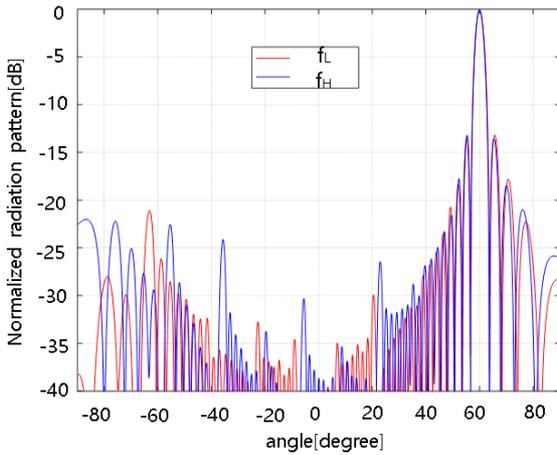
지향 성능을 확인하기 위하여 약각 60° 방향에 대한 복사패턴을 평면방향과 원형방향에서 검증한 결과를 그림 4에 나타내었다. 수신대역인 f_L , f_H 주파수에서 빔폭은 약

3°이며, 첫 번째 부엽레벨은 약 -13 dB 수준이다. 약각 60° 지향시 빔 지향은 59.9°를 지향하며 오차는 약 0.1° 수준으로 분석되었다.

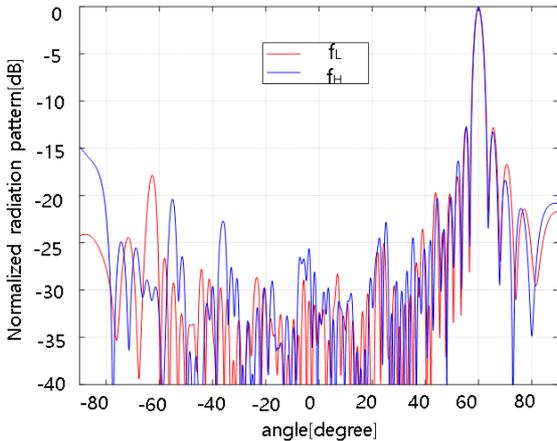
개별 수신 타일 안테나 및 패치 안테나는 슬롯 커플링 급전을 통해 Ku 대역 주파수에 적합한 광대역 특성을 확보하였고, 수직/수평 편파 및 원형 편파 특성을 위하여 두 개의 급전 구조를 가지도록 설계하였다. 이의 세부설계사항은 선행 논문에서 확인할 수 있다^[8].

3.3 형상적응형 안테나 시스템 RF-IF부 설계

형상적응형 안테나 시스템의 신호 흐름도 및 수신부 구조도를 그림 5에 나타내었다. 전체 배열된 안테나 개수

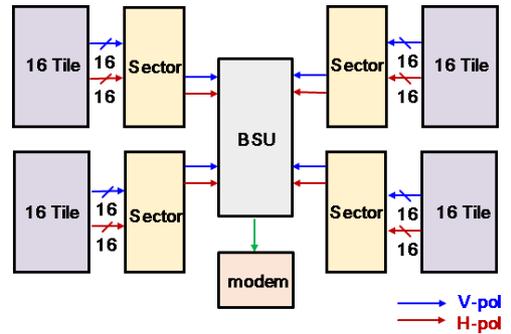


(a) 선형축(x) 시뮬레이션 결과
(a) Simulated result of linear axis(x)

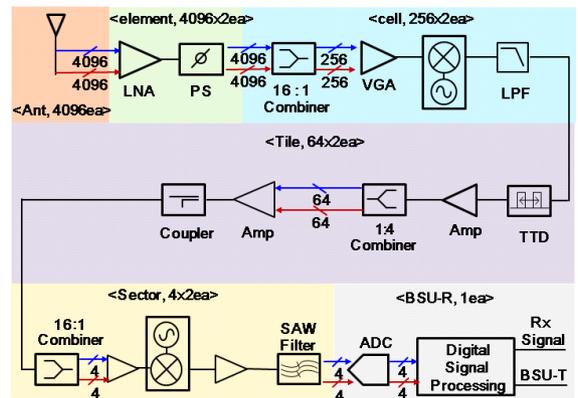


(b) 원형축(y) 시뮬레이션 결과
(b) Simulated result of cylindrical axis(x)

그림 4. 수신배열안테나의 60° 지향시 어레이 팩터
Fig. 4. 60° beam steering array factor of Rx array antenna.



(a) 수신 시스템 신호 흐름도
(a) Signal flow diagram of Rx antenna system



(b) 수신 시스템 구성도
(b) Block diagram of Rx conformal antenna

그림 5. 안테나 시스템 수신부 구조도
Fig. 5. Block diagram of Rx conformal antenna.

는 4,096개이며, 안테나의 선형, 원형편파를 모두 운용가능하게 하기 위해 수직, 수평 편파 각 2개의 입력이 연결된다. 따라서 저잡음 증폭기와 위상천이기는 8,192개의 엘리먼트로 구성된다. 16:1 신호결합기를 거쳐 수직, 수평 편파 256개의 셀레벨 신호를 전달한다. 셀레벨에서 Ku 대역 신호를 L 대역으로 주파수 변환한다. 수신 안테나에 512개의 주파수변환모듈이 사용되며, 주파수 변환모듈간 위상 동기화를 위해서 동일한 25 MHz의 기준신호를 인가하여 주었다.

Ku 대역 500 MHz 광대역에서 빔 스캔트를 최소화 하기 위하여 TTD를 이용하여 시간지연을 수행하였다^{[11][12]}. TTD는 100 ps, 200 ps, 400 ps, 800 ps, 1,600 ps의 5 bit 분해능을 갖도록 설계하였다. TTD 소자의 시간지연은 각각 TTD 소자 전후에 위치하는 RF 스위치를 제어하여 이루어진다. 모든 RF switch가 단락되면 TTD를 우회하는 경로를 통해 시간지연이 발생하지 않도록 설계하였다^[8].

타일 안테나의 출력에 커플러를 통하여 타일별 신호 품질을 확인할 수 있도록 구성하였다. 커플링 포트의 출력에 전력 검출기를 연결하여 타일단위의 출력을 동작시 지속적으로 확인할 수 있도록 설계하였다. 이 출력을 통해 안테나에 이상동작이 발생한 경우, 타일단위 출력을 점검하여 정비가 가능하다. 해당 설계까지가 타일안테나의 구성이며, 64개 타일 안테나의 수직 및 수평편파에 해당되는 128개 출력은 섹터부로 연결된다.

섹터부는 타일안테나 16개당 1개로 연결되며, 총 4개의 모듈로 구성된다. 섹터부의 역할은 타일 안테나에서 전달되는 수신신호를 결합하여 BSU(beam steering unit)에 전달하며, 수신 안테나 전체에서 사용하는 제어신호를 BSU로부터 인가받아 분배한다. 또한 신호 위상 및 제어 신호의 동기화를 위한 기준신호를 생성 및 분배하는 역할을 담당한다. 타일 안테나 출력인 128개의 신호를 16:1 결합하여 8개의 신호를 생성한다. 이를 주파수 변환반에서 L대역 70 MHz 대역의 IF 신호로 변경하며 SAW surface acoustic wave) 필터를 통하여 불요파를 제거한 후 BSU로 신호를 전달한다.

RF 수신단의 설계에 있어서 다음 사항을 주요하게 고려하였다. 첫 번째, 4,096개의 신호를 인가받아서 최종적으로 8개의 신호를 생성하므로 결합 신호의 생성을 원활

하게 하기 위한 경로 결합부 및 이득 설계의 신중한 고려가 필요하다. 안테나를 통한 8,096개의 인가신호중 임의의 경로에 포화 또는 오류가 발생하면 최종 수신안테나의 수신감도의 감소로 연결되므로 설계에 모든 경로의 동작상태의 점검을 고려해야 한다. 본 안테나는 위성신호를 인가받으므로 약 -145 dBm 수준의 안테나 입력에서 신호 결합을 거쳐 SAW 필터단에서 -20 dBm 수준의 출력을 얻을 수 있도록 구성하였으며, 시스템의 온도 및 동작 상태를 피드백하여 이득을 조정할 수 있도록 설계하였다.

두 번째, 본 수신 안테나 시스템의 각 64개 타일 및 4개의 섹터 구성품에서 주파수별 동위상으로 위상천이 및 시간지연의 동작이 이루어져야 하므로 구성품의 기준주파수의 동기화는 필수적이다. 따라서 시스템 전체에서 동일한 OCXO(oven controlled crystal oscillator)에서 생성된 25 MHz 신호를 타일, 섹터, BSU에서 사용하였으며, 각각 동일한 경로에 의한 시간지연을 갖도록 고려하였다.

세 번째, 본 수신 안테나는 실시간 추적 및 위상제어가 가능해야 하므로 타일과 섹터간의 고속 제어 인터페이스의 구성이 중요하다. RF 경로와 마찬가지로 16개의 제어 채널은 섹터의 FPGA를 통하여 통합되며, FPGA는 16개 채널의 데이터를 정렬하여 BSU-Rx과 4개의 데이터 버스를 통하여 통신하게 된다. 이때 사용된 타일과 BSU-Rx 간의 제어 인터페이스 구성도를 그림 6에 나타내었다. 제어 데이터의 안정적인 통신을 위하여 RS-422 또는

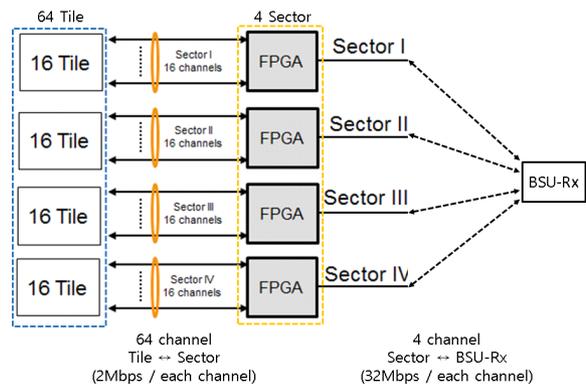


그림 6. 수신부 제어 인터페이스 구성도
Fig. 6. Block diagram of control interface in Rx.

RS-485의 통신속도는 2 Mbps로 제한하였다. 따라서 16:1로 FPGA에서 통합되어 BSU-R과 통신하는 데이터 버스는 최소 32 Mbps의 속도를 가져야 한다. 4비트로 구성되는 PS와 5 비트로 구성되는 TTD의 제어비트를 각각 1바이트로 가정하면 위상의 제어를 위해 필요한 데이터는 각 섹터당 2,048개의 코어칩과 128개의 TTD 소자이므로 총 17,408비트가 되고, 통신을 위해 부가적으로 필요한 제어데이터를 전체 통신데이터의 10% 정도라고 가정하면 대략 19,148비트가 필요하다. 이 정도의 데이터를 30 Mbps의 데이터버스로 통신하는 경우, 한 번의 제어데이터를 전송하는데 소요되는 시간은 약 638 μ sec이며, 통신간의 간격이나 제어데이터의 라우팅에 소모되는 시간을 고려하면 약 1 m/sec의 속도로 수신안테나 지향방향을 고속 제어할 수 있다.

3-4 형상적응형 안테나 시스템 빔처리부 설계

안테나 시스템의 빔처리부 인터페이스 및 구성도를 그림 7에 나타내었다. BSU-Rx에서 수행되는 주요 역할은 다음과 같다. 섹터부에서 전달되는 신호를 디지털화하여 빔 지향 및 편파의 방향을 판정하고 추적하고 전달되는 8개의 신호를 결합하여 최종 신호를 생성한다.

섹터부에서 BSU-Rx로는 수직/수평 편파 각각 4개의 70 MHz 아날로그 IF 신호가 전달되며, BSU-Rx에서는

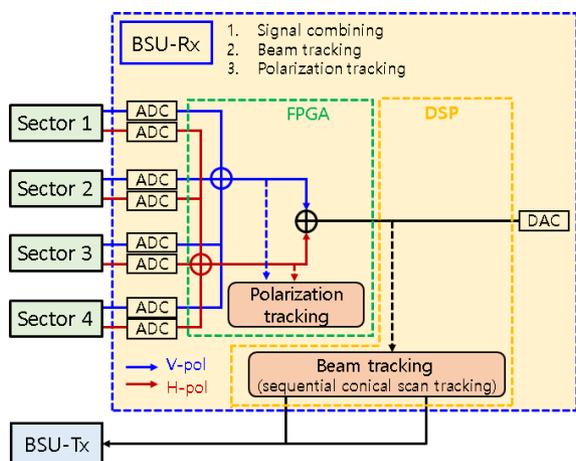


그림 7. 안테나 시스템 BSU 연결 구성도
Fig. 7. Block diagram of BSU interface.

ADC(analog to digital conversion)를 통하여 Digital 신호로 변환된 신호를 FPGA(field programmable gate array)로 전달한다. FPGA에 구현된 DDC(digital down conversion)와 DUC(digital up conversion)를 수행한다. 이를 통해 섹터부의 구현간 발생한 경로차이에 의한 신호를 보상하며, 필요한 수신신호인 위성의 비콘 신호 및 채널 신호만을 따로 추출한다. 각 편파별 4개의 섹터 신호는 수직 및 수평 편파로 각각 더해져 수평편파와 수직 편파 각 1개의 신호로 합성된다. 이후 편파간 신호의 세기를 비교하여 tangent 역 삼각함수를 통하여 편파간 각도를 산출하며, 이를 지속적으로 추적할 수 있도록 설계하였다.

이후 두 신호를 다시 합친 최종 수신신호를 생성하며, DSP(digital signal processor)로 전달하여 코니컬 스캔 추적 방식을 사용하여 수신 신호를 지속적으로 추적한다⁷⁾. 구현된 DSP는 빔 추적외에 시스템 전체의 데이터 및 제어 신호를 관리한다.

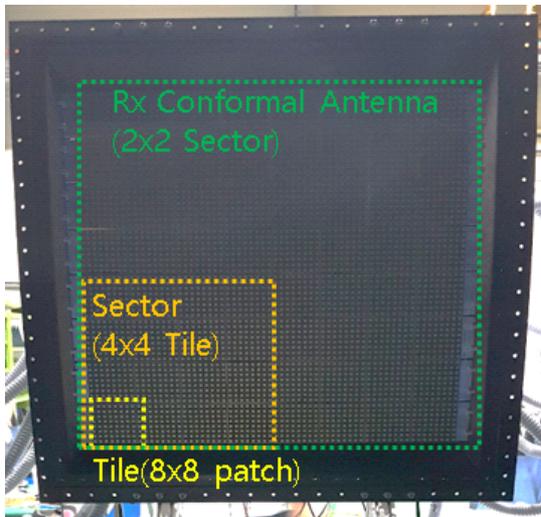
빔의 편파방향 및 지향방향이 결정되면 BSU-Rx에서 BSU-Tx로 편파 및 지향정보를 송신배열안테나로 전달하며, 수신 배열안테나와 동일방향의 빔 지향을 하며 수직 방향의 편파를 사용한다. 최종 수신신호를 모뎀부에 전달하여 수신 성능 분석이 가능하다.

IV. 수신 안테나 시스템 구현 및 성능시험

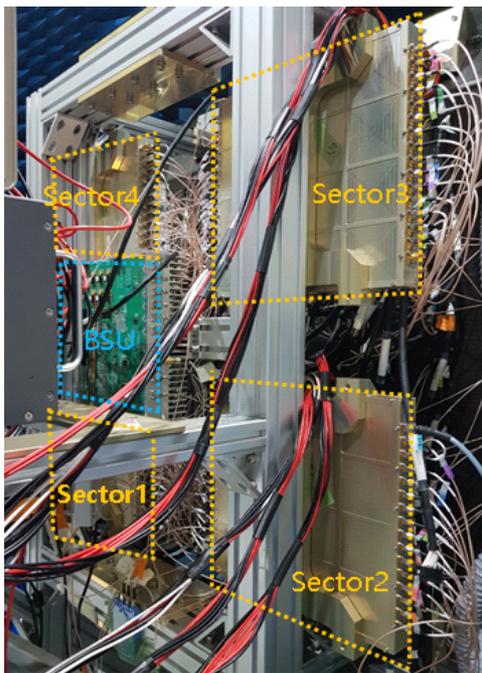
4-1 안테나 시스템 구현

수신 안테나 시스템은 107×102×45 cm³의 크기와 약 40 kg 무게(시험용 장착 치구 제외, 포함시 65 kg 수준)로 구현되었다. 안테나 동작을 위하여 5.5 V, 3.3 V, 0.5 V, -3 V의 전원이 사용되며, 총 소모 전력은 1,800 W 수준이다. 구현된 수신 형상적응형 안테나 시스템을 그림 8에 나타내었다. 안테나 전면부에 64개의 타일안테나를 타일 결합 구조를 이용하여 장착하였으며, 후면부에 4개의 섹터부와 BSU를 배치하였다.

수신 안테나 시스템은 높은 집적도로 인해 발열 문제가 심각하다. 이를 고려하지 않으면 수신 잡음이 증가하고 수신 이득이 감소하며, 소모 전력이 증가하여 안테나의 목표 성능 만족이 어려워지며, 심각한 경우, 능동소자가 복구 불가능한 손상을 받을 수 있다. 이를 해결하기 위해



(a) 수신 안테나 시스템, 전면
(a) Rx antenna system, front view



(b) 수신 안테나 시스템, 후면
(b) Rx antenna system, rear view

그림 8. 수신 안테나 시스템 구현사진
Fig. 8. Manufactured Rx antenna system.

본 안테나에서는 공랭식 방열을 적용하였다. 개별 수신 타일 외부에 적용된 12개의 공기 인입 및 배출을 위한 구

조를 통해 타일의 연속적인 배열시 공기인입이 가능한 통로가 형성되도록 설계하였다^[8]. 외부 에어컨에서 형성된 10°C 수준의 공기를 장착치구의 에어 덕트를 통해 주입 및 배기하여 안테나 방열을 하였다.

방열구조를 적용하지 않았을 때는 높은 내부 온도로 안테나의 정상 동작이 이루어지지 않았지만, 방열구조 적용 시 수신 타일 안테나의 외부 동작온도를 40°C 수준으로 유지하며 정상동작한다.

4.2 안테나 시스템 성능시험 구성

수신 안테나 시스템의 성능시험을 위해서는 Ku 대역 안테나 스캐너, 입출력 신호분석기(network analyzer) 및 전원 공급이 필요하다. 또한, 설계된 수신 시스템의 안테나 패턴을 측정하기 위해 섹터부에서 출력되는 L대역 신호를 결합하여 측정하였다. BSU의 출력은 디지털 변환된 신호 후의 신호이므로 network analyzer로의 시험구성이 어렵다. 성능시험을 위한 BSU는 제어 컴퓨터의 입력을 처리하여 각 섹터부로 전달하는 역할을 담당한다.

안테나 패턴 측정을 위해서 타일형 안테나의 면적 4배 이상의 근접전계를 측정할 수 있는 포지셔너 및 스캐너를 사용하였다. 안테나 성능시험 구성도를 그림 9에 나타내었다. 성능시험시 사용한 네트워크 분석기 및 신호발생기는 keysight의 E8363B와 E8257D를 사용하였다. 안테나 스캐너 및 2D, 3D 빔패턴 측정 프로그램은 (주)엠티지의 VWNF 장비를 사용하였다. 해당 장비는 측정하고자 안테

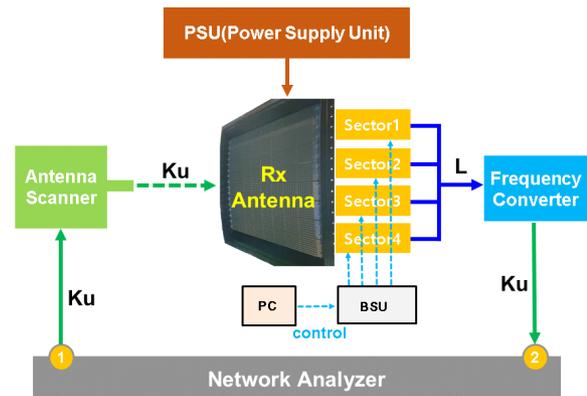


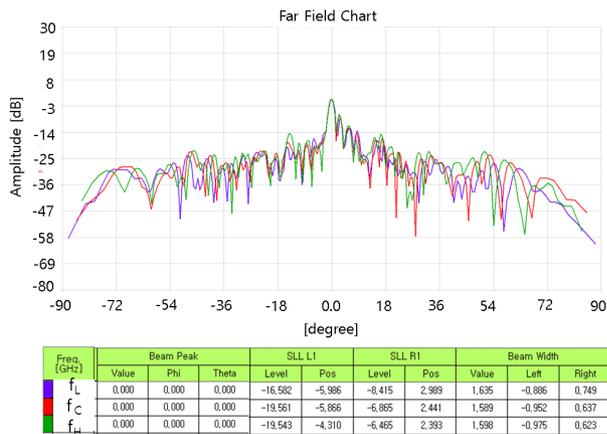
그림 9. 수신 안테나 시스템 성능시험 구성도
Fig. 9. Measurement set-up of Rx antenna.

나 위의 평면 그리드상에 근접전계를 측정 후 획득된 근전계의 푸리에 변환을 통해 원전계로 변환하여 안테나의 성능을 측정하는 장비이다.

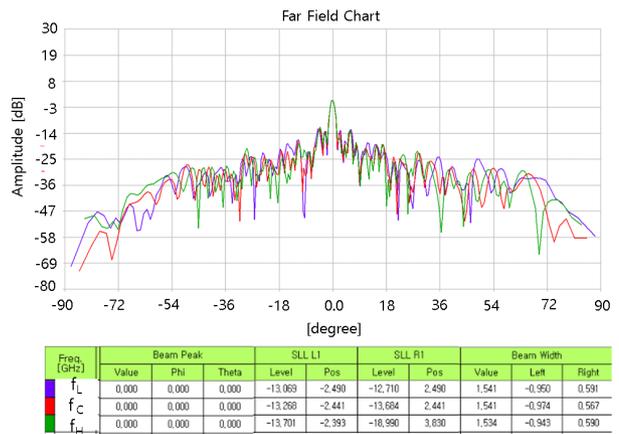
4-3 안테나 시스템 빔 지향 성능시험 결과

수신 안테나 시스템 V&H-pol의 bore-sight 지향 성능을 확인하기 위하여 V&H-pol 각각의 bore-sight 및 theta 30° 일 때 phi 각도를 90도씩 이동하며 4회 측정하였으며,

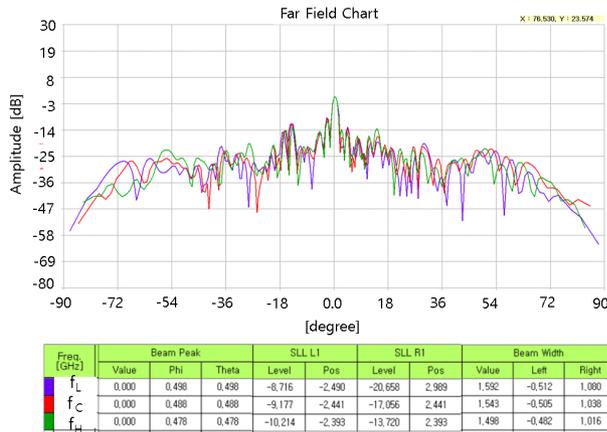
theta 60°일 때, phi 각도를 90도씩 이동하며 4회 측정하였다. 본 장에는 그 측정 결과 중 일부를 기술하고자 하며, bore-sight 측정 결과를 그림 10에 나타낸다. 수신 안테나는 다양한 능동소자로 구성되어 있으므로 network analyzer에서 측정되는 이득을 통한 분석보다 빔폭을 이용한 안테나 성능 분석이 타당하다. Bore-sight 지향시 중심주파수에서 안테나 빔폭은 H-pol 1.5°, V-pol 1.5°로 각각 측정되었다. 빔 지향정확도는 H-pol 0°, V-pol 0.5° 수준의 오차를 나타낸다. 빔 지향정확도는 안테나 보정을 통해



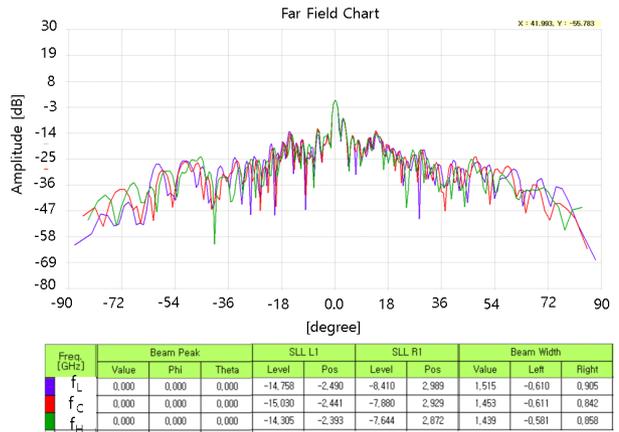
(a) H-pol, bore-sight(원형축) 측정 결과
(a) Measured result in H-pol, bore-sight(cylindrical)



(b) H-pol, bore-sight(선형축) 측정 결과
(b) Measured result in H-pol, bore-sight(linear)

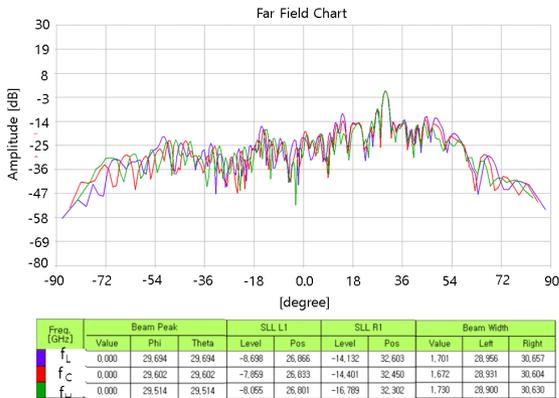


(c) V-pol, bore-sight(원형축) 측정 결과
(c) Measured result in V-pol, bore-sight(cylindrical)

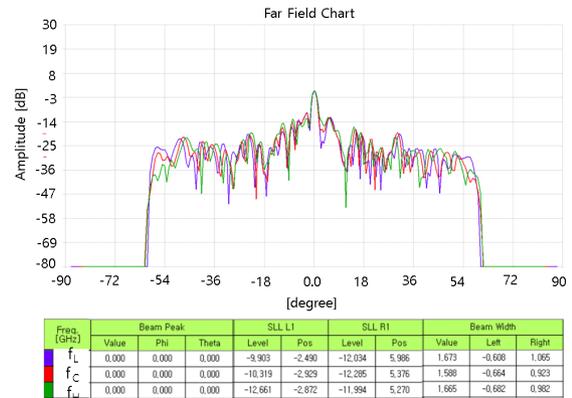


(d) V-pol, bore-sight(선형축) 측정 결과
(d) Measured result in V-pol, bore-sight(linear)

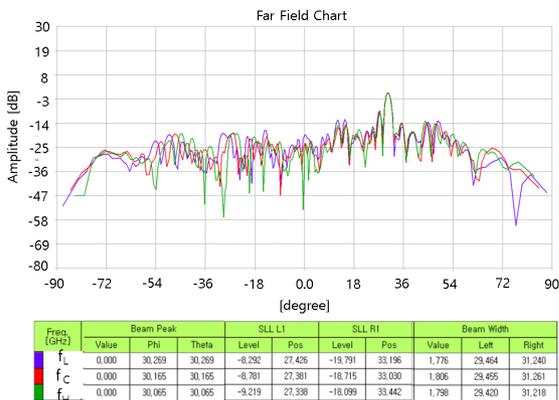
그림 10. 수신 안테나 측정 결과(bore-sight)
Fig. 10. Measured results of Rx antenna(bore-sight).



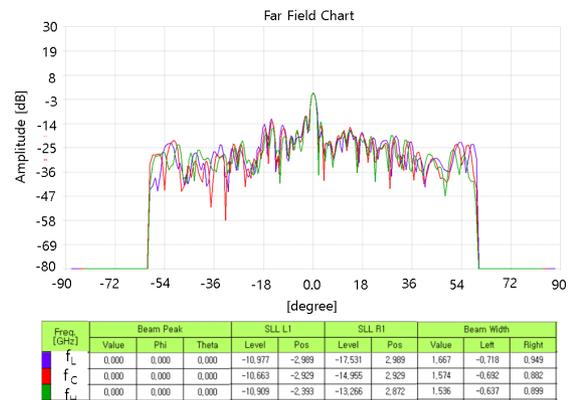
(a) H-pol, phi 180°, theta 30° 측정 결과(원형축)
 (a) Measured result in H-pol, phi 180°, theta 30°(cylindrical)



(b) H-pol, phi 180°, theta 30° 측정 결과(선형축)
 (b) Measured result in H-pol, phi 180°, theta 30°(linear)



(c) V-pol, phi 180°, theta 30° 측정 결과(원형축)
 (c) Measured result in V-pol, phi 180°, theta 30°(cylindrical)



(d) V-pol, phi 180°, theta 30° 측정 결과(선형축)
 (d) Measured result in V-pol, phi 180°, theta 30°(linear)

그림 11. 수신 안테나 측정 결과(phi 180°, theta 30°)
 Fig. 11. Measured results of Rx antenna(phi 180°, theta 30°).

추가 개선이 가능하다.

수신 안테나 시스템 V&H-pol의 phi 180°, theta 30° 빔 지향 성능시험 결과를 그림 11에 나타낸다. Phi 180°, theta 30° 지향시 중심주파수에서 안테나 빔폭은 H-pol 1.7°, V-pol 1.8°로 각각 측정되었다. 빔 지향정확도는 H-pol 0.4°, V-pol 0.2° 수준의 오차를 나타낸다.

수신 안테나 시스템 수직 및 수평 편파의 phi 270°, theta 60°에서의 빔지향 성능시험 결과를 그림 12에 나타낸다. Phi 270°, theta 60° 지향시 중심 주파수에서 안테나 빔폭은 H-pol 3.4°, V-pol 3.3°로 각각 측정되었다. 빔 지향

정확도는 H-pol 0.3°, V-pol 0.3° 수준의 오차를 나타낸다. 그림 13에서는 H-pol의 bore-sight 및 방위각에 따른 양각 30° 지향과 양각 60° 지향을 확인할 수 있는 안테나 3D 패턴 측정 결과를 나타내었다. Phi 및 theta 지향각에 따라 정상동작하는 것을 확인할 수 있다.

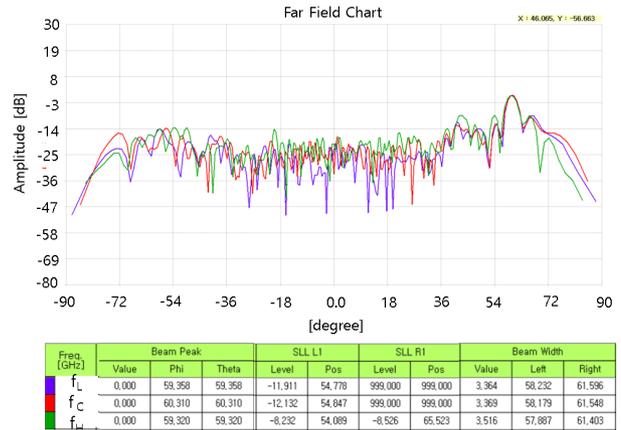
V. 수신 안테나 시스템 성능분석

5-1 안테나 시스템 빔지향 성능 분석

수신 타일 안테나 V&H-pol의 bore-sight 지향 성능을



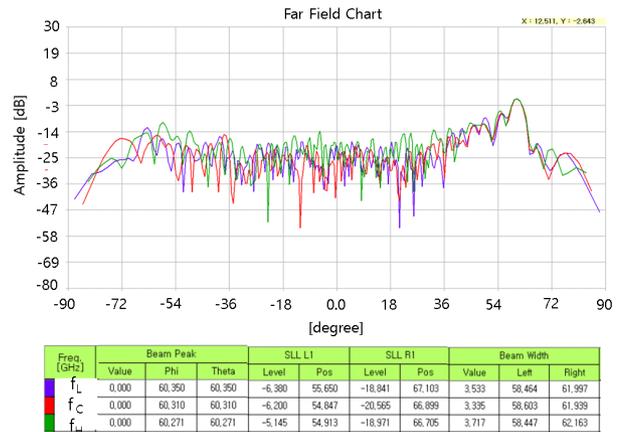
(a) H-pol, phi 270°, theta 60° 측정 결과(원형축)
 (a) Measured result in H-pol, phi 270°, theta 60°(Cylindrical)



(b) H-pol, phi 270°, theta 60° 측정 결과(선형축)
 (b) Measured result in H-pol, phi 270°, theta 60°(linear)



(c) V-pol, phi 270°, theta 60° 측정 결과(원형축)
 (c) Measured result in V-pol, phi 270°, theta 60° (Cylindrical)



(d) V-pol, phi 270°, theta 60° 측정 결과(선형축)
 (d) Measured result in V-pol, phi 270°, theta 60°(linear)

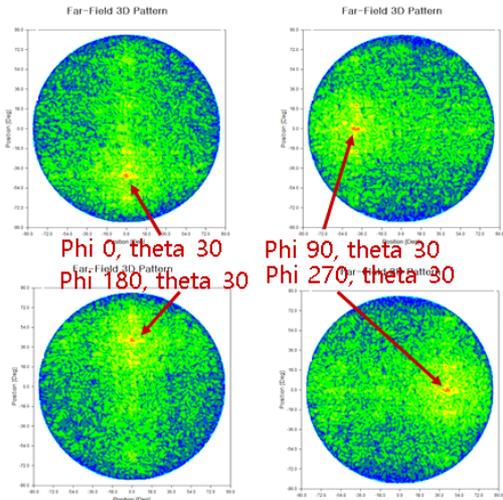
그림 12. 수신 안테나 측정 결과(phi 270°, theta 60°)
 Fig. 12. Measured results of Rx antenna(phi 270°, theta 60°).

확인하기 위하여 V&H-pol 각각의 theta 30°일 때 phi 각도를 90도씩 이동하며 4회 측정하였으며, theta 60°일 때 phi 각도를 90도씩 이동하며 4회 측정하였다. 빔 지향성능의 총 8회에 걸친 시험결과의 RMS값을 표 4에 나타내었다. 위상배열안테나에서 빔 지향성능은 지향정확도 및 주파수 편이오차의 항목을 통해 확인할 수 있다. 빔 지향정확도는 지향하고자 하는 목표 각도 대비 실제 형성되는 지향각의 차이를 나타내며, 주파수 편이오차는 광대역 주파

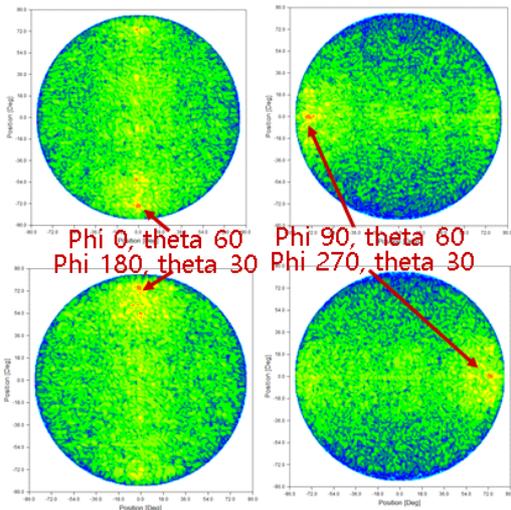
수 특성에 의한 지향각의 변화를 의미한다. V-pol, H-pol에서 지향정확도 및 주파수 편이오차의 설계 목표치인 0.5°를 모두 만족하는 성능시험 결과를 얻었으며, 정상동작을 확인하였다.

5-2 안테나 시스템 GT 성능 분석

수신 안테나 시스템의 GT는 측정 장비의 한계로 본 시스템에서는 분석을 통해 산출하였다. GT는 안테나이



(a) H-pol, theta 30° 측정 결과(3D)
(a) Measured result in theta 30°, H-pol(3D)



(b) V-pol, theta 60° 측정 결과
(b) Measured result in theta 60°, V-pol(3D)

그림 13. 수신 안테나 측정 결과(3D)
Fig. 13. Measured results of Rx antenna(3D).

득(dB)–시스템잡음온도(dB)로 산출할 수 있으며, 안테나 이득(G_{ANT})은 식 (1)을 통해 계산하였다.

$$G_{ANT} = G_{tile} - G_{core} + L_{combiner} + 10 \log_{10}(64) - 10 * \log_{10} \left(\frac{64 BW_{E_{Array}} BW_{H_{Array}}}{BW_{E_{tile}} BW_{H_{tile}}} \right) \quad (1)$$

표 4. 빔 지향정확도 및 주파수 편이오차 오차 측정결과
Table 4. Measured results of beam steering angle and beam squint error.

Item		Design target	Test results (RMS)
V-pol	Beam steering angle	< 0.5°	0.248°
	Beam squint error	< 0.5°	0.222°
H-pol	Beam steering angle	< 0.5°	0.371°
	Beam squint error	< 0.5°	0.351°

타일 내부 구성은 안테나보드와 MLB(multi-layered board)로 구성된다. 따라서 안테나 자체의 이득을 구하기 위하여 MLB(multi-layered board) 이득을 제외한 타일 안테나 이득(G_{tile})에 안테나 보드에 실장된 코어칩의 이득(G_{core})과 16:1 신호결합기의 손실($L_{combiner}$)을 제거한다. 수신 안테나 시스템은 64개의 타일 안테나를 이용하여 구성하였으므로 배열에 의한 이득을 추가한다. 최종적으로 타일 이득을 전체 배열의 이득으로 환산함에 있어 누락된 통합 손실을 반영하기 위하여 수신 안테나의 E-plane과 H-plane의 빔폭과 64개 타일의 RMS된 E-plane과 H-plane의 빔폭을 이용하여 안테나 이득 계산에 반영하였다. 산출된 수신 안테나의 이득은 V-pol에서 37.2 dB, H-pol에서 38.1 dB를 나타낸다.

시스템 잡음온도(T_{system})는 식 (2)를 통해 계산한다.

$$T_{system}(K) = T_A + T_{rcv} = T_A + 290(10^{NF_{rcv}/10} - 1) \quad (2)$$

여기에서 T_A 는 안테나 잡음온도로서 50 K의 값이며, NF_{RCV} 는 수신 코어칩과 그 이후단의 수신 경로에 대한 잡음지수다. 산출된 수신 안테나의 잡음 온도는 V-pol에서 27 dBK, H-pol에서 26.9 dBK를 나타낸다. 최종 도출된 G/T의 결과를 표 5에 나타내었다.

표 5. 수신 안테나 시스템 G/T 분석 결과
Table 5. Analyzed results of G/T for Rx antenna system.

Item		Design target	Test results
G/T	V-pol	> 10 dB/K	10.2 dB/K
	H-pol		11.2 dB/K

5-3 안테나 시스템 TTD 성능 분석

본 논문에서 제시한 안테나 시스템은 주파수별 빔 편이 오차를 최소화하기 위하여 개별 타일에 L대역에서 동작 가능한 TTD 소자를 사용하여, 주파수에 무관한 시간 지연을 통한 빔 제어를 할 수 있도록 설계하였다. 이를 확인하기 위하여 수신 안테나 시스템 V-pol의 ϕ 180°, θ 30° 빔지향 성능시험 결과를 그림 14에 나타내었다. TTD를 사용하여 빔 제어하는 경우, 빔 편이 오차는 약 0.2° 수준이지만 TTD를 사용하지 않은 경우 빔 편이 오차가 약 1.3° 수준으로 증가하는 것을 확인하였다. 따라서

제안한 수신안테나의 TTD 구성은 통해 빔 편이오차를 크게 감소시키는 효과가 있음을 나타낸다.

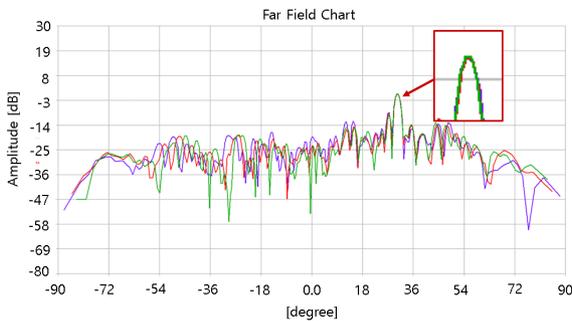
VI. 결 론

본 논문에서는 Ku 대역 위성 통신을 위한 수신 형상적응형 위상 배열안테나 시스템의 설계, 제작 및 성능시험 결과에 대해 기술하였다. 제작 및 성능시험을 통해 수직 편파에서 10.2 dB/K, 수평편파에서 11.2 dB/K의 G/T를 검증하였으며, 약 방위각 360°와 양각 60°까지의 지향시 0.3° 수준의 빔 지향정확도를 확인하였다. 이를 통해 제안한 수신 위상배열 안테나의 전기적 목표 성능을 모두 만족함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 형상적응형 안테나는 타일형 안테나로 구성되므로 다양한 항공기의 외형 형상에 적응할 수 있도록 응용 설계가 가능하다. 이는 외부 형상에 돌출된 구조가 없는 광대역 광각의 빔 편이오차가 최소화된 위성통신용 비행체 탑재용 형상적응형 안테나로 적용이 가능할 것이다.

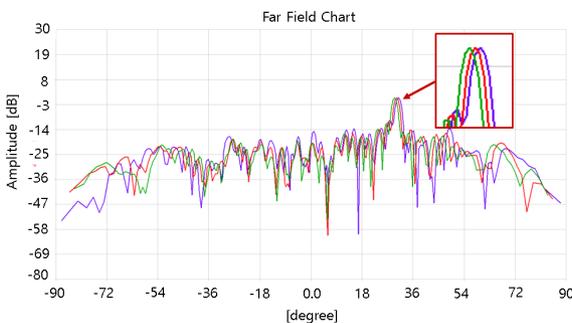
References

- [1] R. J. Mailloux, "Antenna array architecture," in *Proceedings of the IEEE*, Jan. 1992, vol. 80, no. 1, pp. 163-172.
- [2] 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. 2013.
- [3] 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, 2013, pp. 2963-2967.
- [4] M. van der Vossen, G. Voshaar, C. Roeloffzen, A. Hulzinga, and M. Iven, "Design of a highly integrated Ku-band planar broadband phased array receiver with dual polarization," in *2014 11th European Radar Conference*, Rome, 2014, pp. 392-395.
- [5] L. Josefsson, P. Persson, *Conformal Array Antenna Theo-*



Freq. (GHz)	Beam Peak			SLL L1		SLL R1		Beam Width		
	Value	Phi	Theta	Level	Pos	Level	Pos	Value	Left	Right
f _L	0.000	30.269	30.269	-8.292	27.426	-19.791	33.196	1.776	29.464	31.240
f _C	0.000	30.165	30.165	-8.781	27.381	-18.715	33.030	1.806	29.455	31.261
f _H	0.000	30.065	30.065	-9.219	27.338	-18.099	33.442	1.798	29.420	31.218

(a) TTD 적용, ϕ 180°, θ 30° 측정 결과
 (a) Measured result in ϕ 180°, θ 30° with TTD



Freq. (GHz)	Beam Peak			SLL L1		SLL R1		Beam Width		
	Value	Phi	Theta	Level	Pos	Level	Pos	Value	Left	Right
f _L	0.000	30.847	30.847	-9.795	27.988	-19.899	33.793	1.814	29.949	31.763
f _C	0.000	30.165	30.165	-10.806	27.381	-16.607	33.030	1.782	29.306	31.069
f _H	0.000	29.514	29.514	-11.541	26.901	-15.023	32.302	1.723	28.634	30.357

(b) TTD 미적용, ϕ 180°, θ 30° 측정 결과
 (b) Measured result in ϕ 180°, θ 30° without TTD

그림 14. 수신 안테나 TTD 적용비교 측정 결과
 Fig. 14. Measured results of Rx antenna w/ and w/o TTD.

ry and Design, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2006.

[6] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Norwood, MA, Artech House, 2007.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] M. Longbrake, "True time-delay beamsteering for radar," in *2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, Dayton, OH, 2012, pp. 246-249.

[12] J. G. Willms, A. Ouacha, L. de Boer, and F. E. van Vliet, "A wideband GaAs 6-bit true-time delay MMIC employing on-chip digital drivers," in *2000 30th European Microwave Conference*, Paris, 2000, pp. 1-4.

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 영 담 [국방과학연구소/선임연구원]

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



2011년 2월: 아주대학교 전자공학부 (학사)
 2013년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과(석사)
 2017년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과(박사)
 2019년 3월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 전자기파 수치해석, 능동 위상 배열안테나 신호처리

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~2008 11월: 삼성탈레스 연구원

2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] RF 회로 및 전력증폭기, 통신용 초고주파 기술

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

서 중 우 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6784-2745>



2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)

2002년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2017년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)

2002년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 널링 안테나, 패턴합성 알고리즘, 컨포멀 안테나