

Ka 대역 위성 출력 전력 제어 기술 연구

신동환*, 윤소현*, 문성모*, 이홍열*, 엄만석*, 염인복*

A Study on the Ka-Band Satellite Output Power Control Technology

Dong-hwan Shin*, So-hyeun Yun*, Seong-mo Moon*, Hong-yeol Lee*, Man-seok Eom*, In-bok Yom*

요약

Ka 대역 위성통신 시스템에서 강우 감쇠 보상을 위해서는 위성 탑재체에서 강우 지역의 출력 전력을 높일 수 있는 시스템이 요구된다. Ka 대역 출력 전력 제어 기술은 위성 탑재체에서 하향 링크(19.8 ~ 22.2 GHz)의 출력 전력 조절을 가능하게 한다. 본 논문에서는 다중 빔 안테나와 다중 입출력 증폭기를 이용한 Ka 대역 위성 출력 전력 제어 기술에 대하여 소개한다. 한반도 상에 8개의 빔을 형성하기 위해 배열 급전 소자와 반사판으로 구성된 다중 빔 안테나가 설계되었다. 빔 당 목표 EIRP는 59 dBW 이상이며, 강우 감쇠 보상을 위한 전력 제어 기능은 강우 지역에 비 강우 지역 대비 최대 6 dB의 EIRP 상승이 가능하도록 설계하였다. 다중 입출력 증폭기는 다중 빔 안테나와 함께 구성될 때 위성 출력 전력 제어를 위해 효과적으로 사용될 수 있다. 4x4 다중 입출력 증폭기가 기술 검증을 위해 제작되었으며 Ka 대역 위성 송신 주파수 대역에서 24 dB 이상의 격리도 성능을 나타낸다.

Key Words : Flexible payload, Satellite EIRP, Multi-beam antenna, Multi-port amplifier

ABSTRACT

For Ka-band satellite communication system, a new flexible payload technologies which can compensate rain attenuation have to be developed. The Ka-band satellite output power control technology enables to adjust downlink output power of satellite payload in Ka-band (19.8 ~ 22.2 GHz). In this paper, we introduce multi-beam antenna with multi-port amplifiers for Ka-band flexible output power allocation system. We have designed multi-beam antenna with array-fed reflector to form 8 beams on the Korean Peninsula. The target EIRP per beam is more than 59 dBW. The system is designed to present 6 dB boost beams for rainfall areas. Individual beams were optimized by the excited amplitude and phase of feed elements of the feed cluster. The multi-port amplifier(MPA) is one of effective approaches for flexible power allocation in combination with multi-beam antenna. In case of using MPA in multi-beam system, the inter-port isolation characteristic of MPA is important parameter to avoid interference among the output ports. In this paper, we propose a new MPA structure that consists of two 4x4 Butler matrixes and phase/amplitude controllable power amplifier modules.

I. 서론

위성을 이용한 통신 및 방송 시스템에서 지금까지는 주로 S 대역이나 Ku 대역이 주로 이용되었다.

그러나 가용 주파수 대역의 포화로 인해 최근에는 Ka 대역이 점차 활용되는 추세이다. 2010년 6월에 발사된 천리안 위성은 국내 기술로 제작된 Ka 대역 통신 방송 탑재체를 통해 Ka 대역의 위성 통신 및

* 본 연구는 방송통신위원회 방송통신 기술개발사업(전파방송원천기술개발사업) 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

♦ 주저자 겸 교신저자 : 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부 무선RF·탑재기술연구팀, dh-shin@etri.re.kr, 정희원

* 한국전자통신연구원 무선RF·탑재기술연구팀, yunsh@etri.re.kr, smmoon@etri.re.kr, hylees@etri.re.kr, msuhm@etri.re.kr, ibyom@etri.re.kr

논문번호 : KICS2012-09-432, 접수일자 : 2012년 9월 13일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 14일

방송 기술 검증 시험을 수행하고 있다. S 대역이나 Ku 대역에 비해 Ka 대역 시스템은 더 넓은 주파수 대역폭을 이용할 수 있어 채널 적응형 고화질 위성 방송이나 초고선명TV(UHDTV)와 같은 광대역 서비스 제공이 가능하다^{1,2)}. 그러나 Ka 대역 주파수는 우천 시 신호의 크기가 감소되는 강우 감쇠의 영향을 많이 받는다. 특히 하향 링크 신호의 경우 위성에 탑재되어 있는 전력증폭기의 최대 출력 전력에 의해 송신 EIRP(Effective Isotropic Radiated Power)가 제한되므로 유연성있는 출력제어 시스템이 없을 경우 강우 감쇠에 대처하기 어렵다. 강우 감쇠의 영향을 보상하기 위해서는 위성 탑재체에서 강우 지역의 출력 전력을 높일 수 있는 시스템이 요구된다.

본 논문에서는 현재 개발중인 Ka 대역 위성 출력 전력 제어 기술에 대하여 소개하고자 한다. 위성 출력 전력 제어 기술을 적용하면 강우 감쇠 보상뿐만 아니라 전력 요구가 적은 채널(또는 서비스 지역)의 전력을 전력 요구가 많은 채널에 제공 가능하여 위성 통신 시스템에서 전력 사용 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 본 논문의 제 2장에서는 Ka 대역 위성 출력 전력 제어 기술의 개요를 기술하고 제 3장에서는 시스템을 구성하는 다중 빔 안테나와 다중 입출력 증폭기의 설계에 대하여 기술한다.

II. 위성 출력 전력 제어 시스템

Ka 대역 위성통신 시스템에서는 물리적인 특성으로 인해 강우 시 위성으로부터 지상으로 보내지는 신호의 크기가 급격히 감소된다. 이러한 강우 감쇠를 보상하기 위해 위성 탑재 시스템에서는 그림 1의 개념도에서와 같이 특정 강우 지역의 EIRP를 높여 감쇠를 상쇄시킬 수 있다. 특정 지역의 EIRP를 높이기 위해서는 그 지역에 한해 위성 탑재체의 출력 전력과 안테나의 이득을 상승시켜야 하며, 이를 위해 위성 탑재체를 전력 분배가 가능한 고효율 증폭기로 구동되는 다중 빔 안테나 시스템으로 구성한다.

강우 감쇠 보상을 위한 다중 빔 위성출력 제어 시스템은 한반도 전역에 59 dBW 이상의 EIRP를 제공할 수 있도록 설계되었다. 강우 감쇠 보상을 위한 전력 제어 기능은 강우 지역에 비 강우 지역 대비 최대 6 dB의 EIRP 상승이 이루어지도록 한다. 시스템 설계 주파수 대역은 19.8 ~ 22.2 GHz로 Ka 대역 통신 및 방송 하향 링크 주파수 대역 전체를 커버할 수 있도록 설정하였다. 이러한 시스템은 앞서 기술한 바와

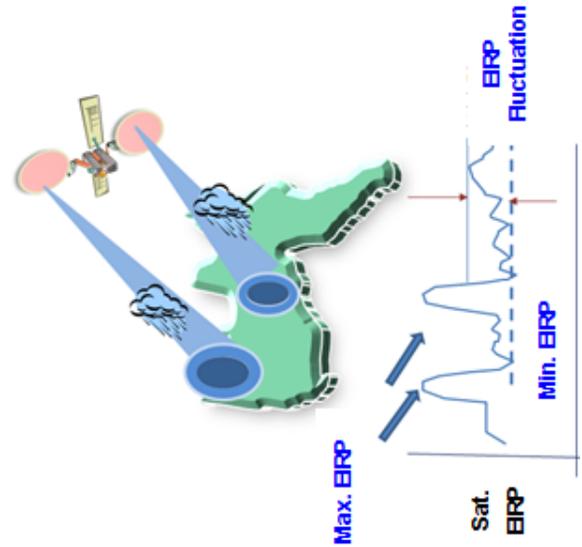


그림 1. 위성 출력 전력 제어기술 개념도
Fig. 1. Conceptual diagram of Satellite Output Power Control Technology

방송 하향 링크 주파수 대역 전체를 커버할 수 있도록 설정하였다. 이러한 시스템은 앞서 기술한 바와 같이 전력 분배가 가능한 고효율 증폭기로 구동되는 다중 빔 안테나로 구현될 수 있다. 본 논문에서는 다중 급전 다중 빔 안테나와 다중 입출력 증폭기로 구성된 다중 빔 위성 출력 제어 시스템에 대하여 기술한다.

다중 빔 출력 제어 시스템은 한반도 상에 8개의 다중 빔을 구성하여 빔 별로 출력 전력을 제어할 수 있도록 구성한다. 그림 2에 다중 빔 출력제어 시스템의 구성도를 나타냈다. 다중 빔 출력제어 시스템은 41개의 급전 소자로 구성된 다중 빔 안테나와 11개의 4개의 입력포트와 4개의 출력포트를 지닌 4x4 다중 입출력 증폭기로 구성된다. 각 빔은 7 또는 8개의 급전 소자를 이용하여 형성된다. 다중 빔 안테나의 최적 설계를 위해서는 41개 급전 소자에 입력되는 신호의 위상과 진폭을 다양하게 설정해 주어야 한다. 또한 위성 출력 전력을 변동시키려면 신호의 위상과 진폭 역시 변동되어야 한다.

위성의 태양전지로부터 공급되는 한정된 전력 자원을 고려하면, 일반적인 고효율 증폭기를 이용하여 시스템을 구성할 경우 빔별 출력전력을 변동할 때 전력 자원 이용 효율이 낮아지게 된다. 위성 탑재체 시스템에서 고효율증폭기로 다중 입출력 증폭기를 이용할 경우 적절한 출력 전력 배분을 통해 고효율증폭기의 최대 효율을 유지하면서 급전 소자로 입력되는 신호의 진폭 변동이 가능하여 위성 전력 자원 이용 효율의 열화 없이 위성 출력 전력 제어 시스템을 구성하는 것

이 가능하다. 각각의 다중 입출력 증폭기의 4개의 출력 단자에서의 전력의 합은 전력 효율을 위해 $15\text{ W} \pm 2\text{ W}$ 가 되도록 한다.

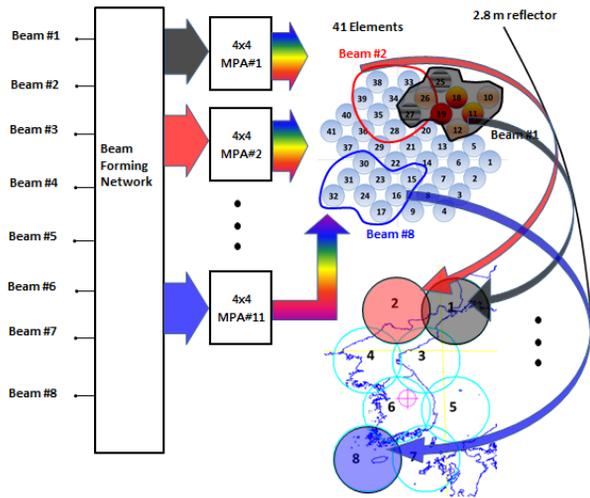


그림 2. 다중 빔 출력 제어 시스템 구성도
Fig. 2. Configuration of multi-beam output power control system

III. 다중 빔 안테나 및 다중 입출력 증폭기 설계

3.1. 다중 빔 안테나 설계

Ka 대역 위성 출력 제어 시스템의 설계에서 고 이득 다중 빔 안테나의 설계는 주요한 부분이다. 다중 빔 안테나 시스템은 주파수 재사용(Frequency reuse)을 통해 할당된 주파수 대역을 여러 빔에 분배하여 사용함으로써 통신 용량을 증대시킬 수 있다. 위상 배열 소자에 의해 급전되는 반사판 안테나는 빔 주사(scanning)와 성형(shaping)이 가능하다³⁾. 다중 빔 안테나 시스템은 단일 급전 (Single Feed per Beam; SFPB)안테나 또는 다중 급전 (Multi Feed per Beam; MFPB) 안테나로 구현된다. 단일 급전 안테나는 구성이 간단하고 반사판 전체를 이용할 수 있는 장점이 있으나, cross-over 손실이 크고 EOC(Edge of coverage) 이득이 낮다. 반면에 다중 급전 안테나는 구성이 복잡하지만 급전 소자들로의 입력 신호의 위상과 진폭을 적절히 조절함으로써 spill-over 손실과 cross-over 손실을 줄일 수 있다. 다중 빔 안테나의 구조 선정을 위해 그림 3에서와 같이 안테나 시스템의 성능과 구현 가능성 등을 고려하여 직경 2.8 m의 반사판 안테나를 설계하였다.

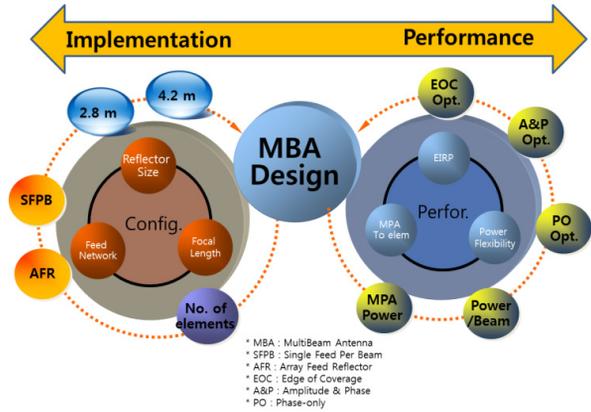


그림 3. 다중 빔 안테나 설계 고려사항
Fig. 3. Considerations for multi-beam antenna design

서비스 커버리지는 그림 4에서와 같이 한반도 상에 8개의 빔을 형성하도록 설계하였다. 다중 빔 안테나는 전기적 성능을 만족하도록 반사판의 크기, 급전 소자 수, 급전 소자 배치, 그리고 급전 여기 계수 등을 최적 설계하였다. 설계 목표는 안테나의 구성과 크기를 최소화하면서 최대 EOC 이득을 갖도록 하는 것이다.

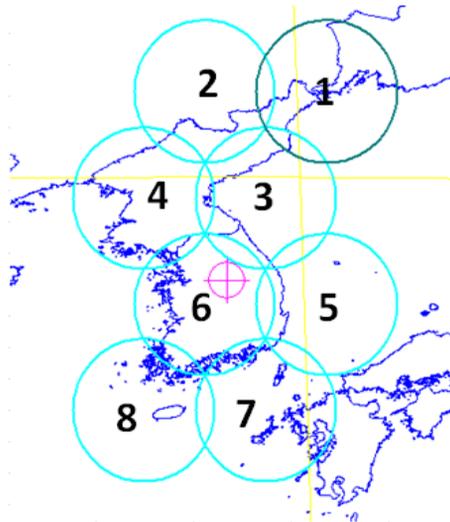
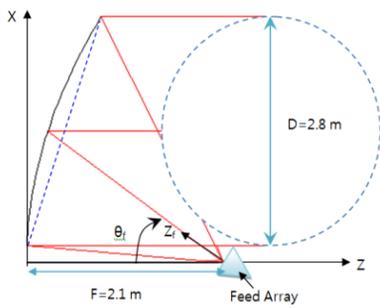


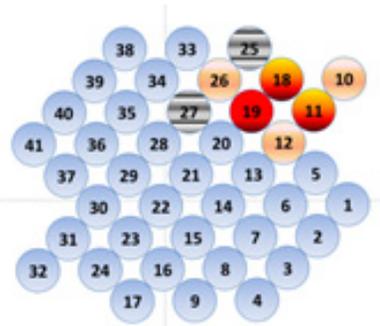
그림 4. 다중 빔 안테나 서비스 커버리지
Fig. 4. Multi-beam service coverage

안테나 설계 시 급전 소자의 수는 광선 경로 (ray-path) 방법에 의해 결정된다. 광선 경로 방법은 설계 초기 단계에서 사용하기 적절하며 안테나가 수신 모드에 있을 때를 가정한다. 광선군이 포물면 축 방향과 평행하게 입사되면 광선군은 반사판을 거쳐 초점에 모이지만 광선군이 포물면 축에 대해 임의의 각도를 가지고 입사되면 광선군은 초점에서 벗어난 지역에 caustic면을 형성한다. 편향된 임의의 각이 빔 폭의 2-3배 이상이면 개구면에서의 위상오

차가 급격히 증가하여 이득과 부엽과 특성에 심각한 영향을 준다. 이를 피하기 위해 급전 소자의 위상 중심을 한 점이 아닌, 확장 분포된 평면으로 취급하면 된다. 확장 분포된 급전은 위상 배열 형태로 구현할 수 있고 배열의 개구면에서 준연속 필드 분포를 얻을 수 있다. 편향각이 커질수록 여기 영역은 위상 배열 개구면을 따라 이동하며 커진다. 결국 수신 모드의 광선은 반사판을 거쳐 초점 및 그 주변에 도착하며 광선이 도착한 곳이 급전 소자의 위치가 된다. 하나의 형성 빔은 다수의 급전 소자로 구성된 1 개의 클러스터(cluster)에 의해 형성된다. 인접한 빔들은 겹쳐 형성되고 이는 한 개의 급전 소자가 2개 또는 3개의 인접 빔의 형성에 관여하는 것을 의미한다. 광선 경로 방법으로 설계된 안테나의 구조는 그림 5에 나타나있다. 반사판은 직경 2.8 m, 초점 거리 2.1 m이고 급전 소자의 수는 41 개다.



(a) 다중 빔 안테나 형태



(b) 급전소자 배치

그림 5. 다중 빔 안테나 구조
Fig. 5. Antenna configuration for multibeam system

개별 급전 소자에 의한 안테나 패턴을 개별 빔 패턴(Gk)이라고 하고 개별 빔 패턴과 급전 소자의 여기 계수 (ak)에 의해 형성되는 안테나 패턴을 합성 빔 패턴(Gbl)이라고 한다. 각 서비스 영역 내 이득은 합성 빔으로부터 도출되며, 합성 빔은 식 (1)과 같이 개별 빔 패턴과 여기 계수에 의해 구해

진다. 따라서 여기 계수의 최적 설계는 서비스 영역 내 이득을 최대로 만들 수 있다. 여기 계수 최적화는 물리광학(Physical Optics)법에 의해 수행된다.

$$G_{bl}(az, el) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_c} |a_k|^2}} \sum_{k=1}^{N_c} a_k G_k(az, el) \tag{1}$$

여기 계수의 최적 설계는 여기 계수의 크기와 위상을 모두 최적화 시키는 방법 (A&P)과 위상만 최적화 (phase-only) 시키는 방법이 있다 [4]. A&P 최적화 기법은 최상의 EOC 이득을 얻을 수 있으나, 급전 여기 계수의 크기를 변화시키므로 급전 네트워크 전단의 고출력 증폭기 (HPA)의 다양한 출력 전력이 필요하다. 반면 phase-only 최적화 기법은 여기 계수의 크기가 제약되어 있기 때문에 EOC 이득은 다소 열화 되나, HPA 출력 전력의 종류를 최소화 시켜 경제적인 시스템 구현을 유도한다. 최적화 기법에 따라 소자에 요구되는 전력 변동 범위는 그림 6과 같다.

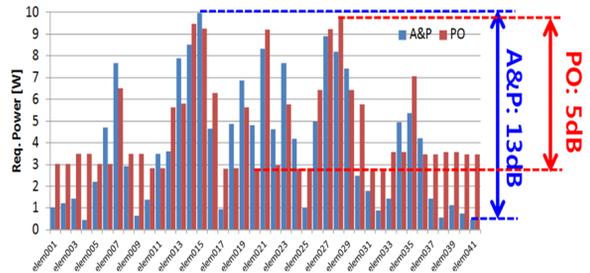
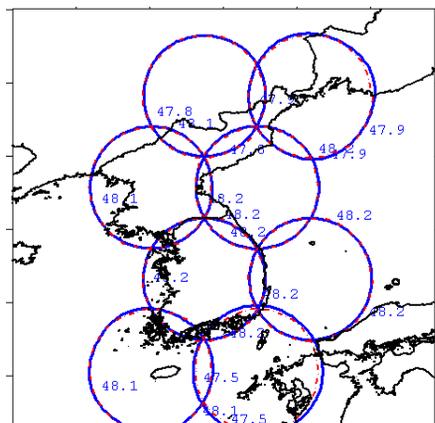
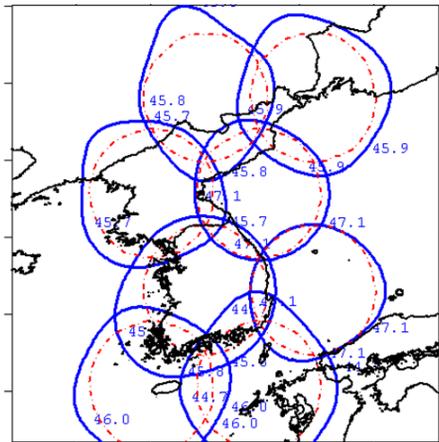


그림 6. 최적화 방법에 따른 소자에 요구되는 전력 변동 범위
Fig. 6. Required power for each element according to the optimization method



(a) A&P 최적화



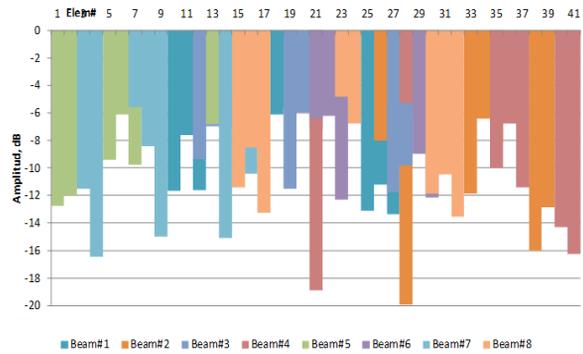
(b) Phase-only 최적화

그림 7. 최적화 방법에 따른 다중 빔 이득 패턴 비교
Fig. 7. Comparison of EOC gain according to the optimization method

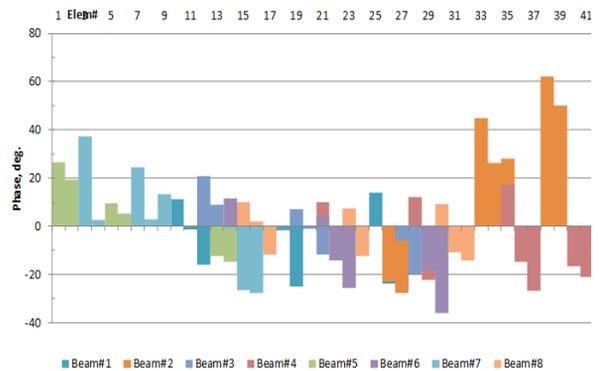
A&P 최적화 기법은 소자의 전력 변동 범위가 13 dB로 다양한 종류의 HPA 출력을 필요로 하고, phase-only 최적화 기법에 의한 소자의 전력 변동 범위는 5 dB이며 적은 종류의 HPA 출력으로 시스템 구현이 가능하다. EOC 이득 관점에서 안테나의 최적화 수행 결과를 비교해 보면, A&P 최적화에 의한 최저 EOC 이득은 phase-only 최적화 결과보다 1.2 dB 우수하며 이득 패턴은 그림 7에 보인 것과 같다.

이와 같은 성능 열화에도 불구하고 경제적인 시스템 구현을 위해 다중 빔 안테나의 여기 계수 최적화는 주로 phase-only 기법을 사용한다. 그러나 버틀러 매트릭스, 가변 위상 변위기와 HPA로 구성된 MPA는 위상 변위기 값에 따라 MPA 입출력 경로 변경이 가능하기 때문에, 안테나 설계에 있어 급전 여기 계수의 크기 성분을 제약할 필요가 없다. 각 합성 빔을 위한 여기 계수는 그림 8과 같이 최적화 되었다.

MPA를 효율적으로 사용하기 위해서는 MPA 출력 포트의 주파수 직교성이 필요하며 개별 MPA에 요구되는 전력은 서로 유사해야 한다. 즉, 합성 빔 형성에 사용되는 소자들은 서로 다른 MPA를 통해 신호를 전달받아야 한다. 41개 배열 소자와 11개 4x4 MPA 연결에 대한 최적 설계 결과, 개별 MPA 전력은 15 ± 2 W이며, 개별 소자에 요구되는 평균 전력은 5W이다. 이는 개별 빔의 EIRP가 59 dBW 이상이 되도록 한다.



(a) 여기 크기 최적화



(b) 여기 위상 최적화

그림 8. 다중 빔 여기계수 최적화
Fig. 8. Optimization results of feed excitation for multi-beam

3.2. 다중 입출력 증폭기 설계

최근의 위성 시스템에서는 강우 감쇠 보상이나 지상으로의 위성 출력 배분을 위해 위성 출력 전력을 유연하게 제어하는 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 다수의 입력과 출력 단자로 구성된 다중 입출력 증폭기(MPA; Multi-port Amplifier)는 기본적으로 전력을 분배할 수 있는 기능을 가지고 있어 다중 빔 안테나와 함께 사용되면 효율적이고 유연한 위성 출력 전력 분배가 가능하다. 다중 입출력 증폭기가 탑재된 위성으로는 ESA(European Space Agency)의 Artemis 위성, Inmarsat III, Inmarsat IV 위성 그리고 일본의 Kizuna(또는 WINDS) 위성 등이 있다⁵⁾.

일반적인 다중 입출력 증폭기는 그림 9에서 보는 것과 같이 입력된 전력을 n개의 고풍력 증폭기(HPA)에 전달하기 위한 입력 하이브리드 매트릭스(IHM), 위상 조절을 위한 위상천이기, 진폭 조절을 위한 이득 가변 증폭기(VGA) 또는 감쇠기, 전력

증폭을 위한 전력 증폭기 (PA), 그리고 특정 출력 단자로 내보내기 위한 출력 하이브리드 매트릭스 (OHM)로 구성된다^{6,7)}.

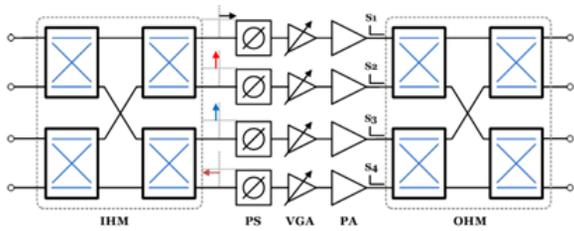


그림 9. 다중 입출력 증폭기의 블록 다이어그램
Fig. 9. Functional block diagram of MPA

입/출력 하이브리드 매트릭스는 다중 입출력 증폭기의 입력단과 출력단에 배치되는 수동 소자로 다수의 90도 하이브리드를 연결하여 구성된다. 이러한 하이브리드 매트릭스는 버틀러(Butler) 매트릭스로 불리며, 입/출력 단자 수는 $2n(2, 4, 8, \dots)$ 개로 확장이 가능하다. 이상적인 하이브리드 매트릭스에서는 하나의 단자로 입력된 신호는 4개의 출력 단자에 똑같은 크기로 나뉘어 나온다. 그림 1의 4x4 입력 매트릭스에서 입력 신호는 4개의 출력 단자로 각각 0도, 90도, 90도, 180도의 위상 차를 가지며 출력된다. 이 4개의 출력 신호를 출력 하이브리드 매트릭스에서 입력 신호로 받게 된다면, 버틀러 매트릭스의 특성 상 1, 2, 3번째 단자에서는 역 위상차를 갖는 신호들이 서로 상쇄되어 소멸되고 4번째 단자로만 입력 신호가 출력되게 된다.

그러나 실제의 다중 입출력 증폭기에서는 다중 입출력 증폭기를 구성하는 각각의 부품들에서 발생하는 위상 및 진폭의 차이 때문에 서로 동일 진폭과 역 위상차를 가져야 될 신호들이 진폭과 위상에서 차이를 나타내면서 상쇄되지 않고 신호가 출력단에 나타나게 된다. 다중 입출력 증폭기의 주요 성능 지표로 출력 단자와 나머지 미출력 단자 사이의 출력비인 단자 간 격리도 성능이 있으며, 이 단자 간 격리도는 25dB 이상을 유지하여야 한다.

2x2 다중 입출력 증폭기의 경우 두 출력 단자 간 격리도는 평형 증폭기의 영상 신호 제거비(IRR; Image Rejection Ratio)와 동일하다. 격리도 성능은 버틀러 매트릭스와 같은 수동 부품들에서 발생하는 정적 오차와 각 신호 경로의 증폭기와 같은 능동 부품들에서 발생하는 랜덤 오차에 의해 결정된다. 이미지 제거비는 두 출력 신호 경로의 진폭과 위상의 부정합으로 계산된다. 그림 10은 두 신호 경로

의 진폭과 위상 오차에 대한 영상 신호 제거비를 보여준다. 2x2 다중 입출력 증폭기에서 두 신호 경로 간 약 1 dB의 진폭 오차와 5도의 위상 오차가 발생하면 약 25 dB의 영상 신호 제거비 성능을 나타내게 된다.

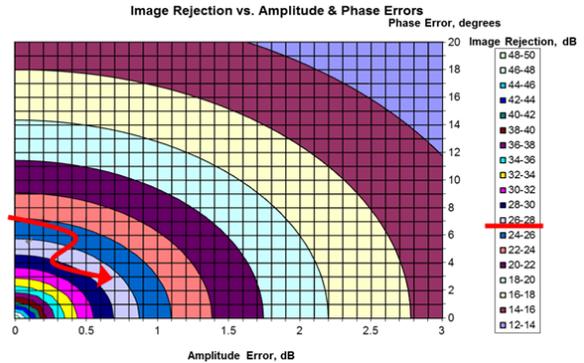


그림 10. 진폭 및 위상 오차에 의한 영상 신호 제거비
Fig. 10. IRR with respect to amplitude and phase errors

단자 간 격리도 성능을 개선하기 위해 다중입출력 증폭기는 신호의 크기와 위상을 조정할 수 있도록 위상천이기와 이득 가변 증폭기 또는 감쇠기를 포함하는 구조로 제작한다. 위상천이기와 감쇠기는 출력단의 전력 손실을 방지하기 위해 고전력 증폭기의 앞 단에 배치되며 다중입출력 증폭기 시스템의 출력 하이브리드 매트릭스에서 신호의 크기와 위상차를 이상적인 다중입출력 증폭기에서와 같이 유지하여 다중입출력 증폭기의 채널 간 격리도 성능을 향상시키는 역할을 한다. 위상천이기와 감쇠기의 위상과 크기의 조정값은 다중입출력 증폭기 시스템 구현 시 각 부품의 실제 성능을 포함하여 최적의 성능이 구현될 수 있도록 하는 값으로 정해진다. 그러나 부품 성능의 열화나 온도 변화 등의 환경 조건 변화에 의해 다중출력 증폭기의 구성 부품들의 성능에 변화가 생길 경우 다중입출력 증폭기의 성능을 최적 상태로 유지할 수 없게 된다.

본 논문에서는 다중입출력 증폭기를 구성하는 입/출력 하이브리드 매트릭스와 위상/진폭 제어 모듈의 설계와 이를 이용한 4x4 다중 입출력 증폭기의 단자 간 격리도 성능에 대하여 기술한다.

3.2.1. 하이브리드 매트릭스

하이브리드 매트릭스는 그림 11에서와 같이 3 dB 90도 하이브리드 4개가 연결된 구조를 갖는다¹⁸⁾. 하이브리드 매트릭스의 신호 분배 성능은 다중 입출력 증폭기에서 기본적으로 단자 간 격리도를

좌우한다. 그림 11은 평면 형태의 4x4 입출력 매트릭스에 대한 블록도이다. 3dB 하이브리드 4개, 교차되는 전송선로를 전기적으로 분리해 주기 위한 0dB 교차 결합기 3개, 그리고 각각의 하이브리드를 연결해 주기 위한 전송 선로로 구성되어 있다. 교차 결합기는 3dB 하이브리드 2개를 직렬로 연결하여 구현할 수 있다. 입력 단자 ①로 입사된 전력은 첫 번째 하이브리드에 의해 서로 90도 위상 차이를 갖고 전력이 반으로 나누어져서 두 개의 출력 단자로 진행된다. 이렇게 분배된 신호는 각각 그 뒤에 위치한 3dB 하이브리드의 입력 신호로 인가되어 모든 출력 단자 ⑤~⑧로 전송되며 그 크기는 모두 같고 위상은 서로 단자 ⑤를 기준으로 90도, 90도 180도의 위상차를 갖게 된다. 다른 입력 단자로 입사된 신호도 동일한 과정으로 모든 출력 단자의 출력 신호로 전송되게 된다.

그림 12는 그림 11의 블록도를 앞서 설계한 이항식 6-슬롯 3dB 하이브리드와 0dB 교차 결합기를 이용하여 구현한 평면 형태의 4x4 하이브리드 매트릭스 제작 형상이다. 제작된 4x4 하이브리드 매트릭스의 크기는 151 x 175 x 27 mm³ 이다. 그림 13은 측정 결과로써 중심 주파수에서 단자 간 불균형 정도는 대략 0.3 dB를 나타내고 있으며, 반사손실과 격리도 특성은 대역 내에서 29 dB 이상의 특성을 나타낸다.

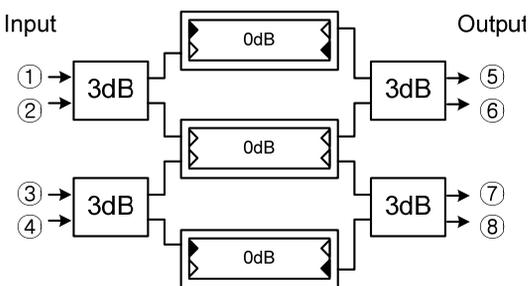


그림 11. 평면형 4x4 하이브리드 매트릭스의 블록 다이어그램
Fig. 11. Functional block diagram of planar 4x4 hybrid matrix

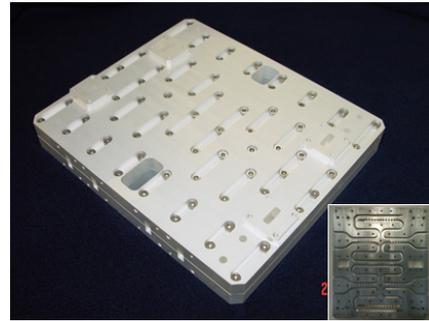


그림 12. 제작된 4x4 하이브리드 매트릭스
Fig. 12. Photograph of the fabricated 4x4 hybrid matrix

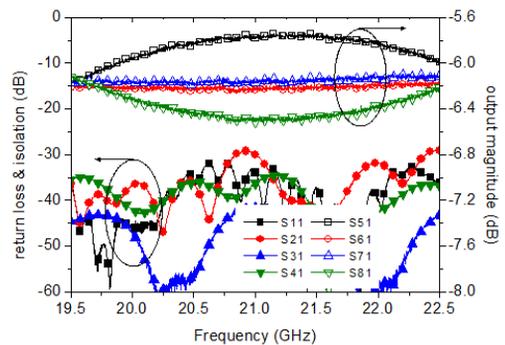


그림 13. 4x4 하이브리드 매트릭스 측정 결과
Fig. 13. Measured results of 4x4 hybrid matrix

3.2.2. 위상/진폭 제어 모듈

다중 입출력 증폭기에서 각 경로를 통과하는 신호들이 정확한 위상차와 같은 크기를 가져야만 통과 경로를 제외한 나머지 단자에서 신호의 상쇄에 의해 신호 성분이 출력되지 않게 된다. 다중 입출력 증폭기에서 신호의 크기와 위상차를 이상적인 다중 입출력 증폭기에서와 같이 보상하기 위해서는 위상 천이기와 전압 가변 감쇠기로 구성된 위상/진폭 제어 모듈이 필요하다. 다중 입출력 증폭기와 같이 신호의 위상과 크기를 동시에 조정해야 하는 시스템에서 위상천이기는 위상 변동 시 삽입 손실의 변화가 작아야 하며, 감쇠기는 감쇠량 변동 시 전달 위상의 변화가 작아야 한다. 또한 위상/진폭 제어 모듈을 구성하는 부품들은 반사 손실 성능이 우수하여야 한다. 반사 손실 성능이 우수하지 않으면 각 부품들의 동작 시 서로 영향을 미쳐 위상이나 진폭 조정 시 오차가 발생하게 된다. 이러한 요구 조건을 만족시키는 위상/진폭 제어 모듈 제작을 위해 위상 천이기와 전압 가변 감쇠기를 GaAs 공정을 이용하여 MMIC로 제작하였다. 위상천이기와 전압 가변 감쇠기 MMIC는 우수한 반사 손실 성능을 위해 Lange Coupler를 이용하여 반사형 구조로 설계하였

다. 제작된 위상천이기와 전압 가변 감쇠기 MMIC의 사진을 그림 14와 그림 15에 나타냈다.

제작된 위상천이기 MMIC는 On-wafer Test 성능 시험을 수행하였으며, 50도 이상의 가변 위상 범위와 3.3 dB의 삽입 손실, 20 dB 이상의 반사손실 성능을 갖는다. 그리고 위상 변동 시 삽입 손실은 0.5 dB 이내로 변동한다.

전압 가변 감쇠기 MMIC 역시 On-wafer Test 성능 시험을 수행하였으며, 11 dB의 가변 감쇠 범위와 1.8 dB의 삽입 손실, 25 dB 이상의 반사손실 성능을 갖는다. 그리고 감쇠 동작 시 전달 위상은 약 6도 이내로 변동한다.

구동증폭기 MMIC은 참고문헌 [9]에서 발표한 20 GHz 2W SSPA에서 이미 검증된 구동 증폭기 MMIC를 이용하였다.

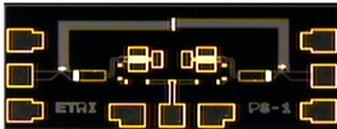


그림 14. 위상천이기 MMIC 사진
Fig. 14. Photograph of the phase shifter MMIC

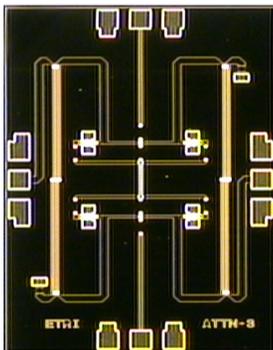


그림 15. 감쇠기 MMIC 사진
Fig. 15. Photograph of the attenuator MMIC

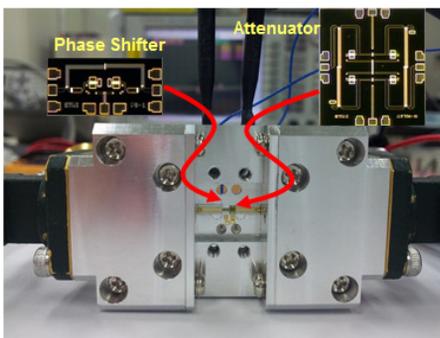


그림 16. 위상/진폭 제어 모듈의 사진
Fig. 16. Photograph of the phase/amplitude control module

위상/진폭 제어 모듈은 도파관 인터페이스를 위해 마이크로스트립-도파관 변환기와 위상천이기 MMIC, 전압 가변 감쇠기 MMIC, 구동증폭기 MMIC로 구성된다. 그림 16은 제작된 위상/진폭 제어 모듈의 사진이며, 크기는 8 x 2.3 x 3.3 mm³이다. 위상/진폭 제어 모듈의 위상 변동 범위와 감쇠 범위는 개별 MMIC 측정 결과와 동일하게 50도와 11 dB이며, 이득은 10 dB이다.

3.2.3. 4x4 다중 입출력 증폭기

4x4 다중 입출력 증폭기는 입력 하이브리드 매트릭스, 4개의 위상/진폭 제어모듈, 4개의 출력 커플러, 출력 하이브리드 매트릭스로 구성된다. 그림 17은 제작된 Ka 대역 4x4 다중 입출력 증폭기의 사진이다. 각 부품의 조립 시 발생할 수 있는 위상 및 진폭 오차를 최소화하기 위해 모든 부품은 WR-42 도파관 인터페이스로 설계, 제작하였다.

출력 하이브리드 앞의 출력 커플러는 다중 입출력 증폭기의 위상과 진폭 오차를 검출하기 위한 것이다. 각 신호 경로의 오차 보정은 출력 커플러에서 추출한 신호의 위상과 크기를 측정 후, 서로 같은 크기와 정확한 위상차를 갖도록 위상/진폭 제어 모듈을 조정한다.

그림 18은 제작된 Ka대역 위성용 4x4 다중 입출력 증폭기의 격리도 성능을 보여준다. 각각의 경로에 배치된 출력 커플러로부터 추출한 22 GHz 신호의 위상과 진폭을 측정하여 위상 및 진폭 오차를 보정한 후 하나의 출력 단자와 나머지 출력 신호가 발생하지 않아야 하는 단자들과의 이득의 차이인 격리도 성능을 측정하였다. 격리도 성능은 오차 보정 구간인 22.5 GHz ± 500 MHz 구간에서는 28 dB 이상을 나타낸다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Ka 대역 위성 통신 시스템에서 강우 감쇠를 극복하기 위한 기술로 위성 출력전력 제어 기술에 대하여 소개하였다. Ka 대역 위성 출력전력 제어 기술은 다중 빔 안테나와 다중 입출력 증폭기로 구성되며 19.8 ~ 22.2 GHz의 주파수 대역에서 59 dBW 이상의 EIRP를 제공할 수 있도록 설계되었다. 그리고 강우 감쇠 보상을 위한 전력 제어 기능은 강우 지역에 비 강우 지역 대비 최대 6 dB의 EIRP 상승이 가능하도록 설계하였다.

다중 급전 방식의 다중 빔 안테나는 여기 계수

최적화 설계를 통해 한반도 전역을 8개의 빔으로 커버할 수 있도록 설계하였다. 또한 위성 출력 전력 제어 시 시스템의 효율을 높이기 위해 각각의 다중 입출력 증폭기가 15 ± 2 W의 균일한 출력 전력을 갖도록 설계하였다.

4x4 다중 입출력 증폭기가 기술 검증을 위해 제작되었으며 Ka 대역 위성 송신 주파수 대역에서 24 dB 이상의 격리도 성능을 나타냈다. 다중 입출력 증폭기에서는 위상 및 진폭 오차 보정을 통한 격리도 성능 개선이 필수적인데, 출력 커플러에서 추출한 신호로부터 위상과 진폭 오차를 계산하여 보정을 하는 다중 입출력 증폭기 기술이 현재 개발중에 있다. 이 자동 오차 보정 기술이 적용된 다중 입출력 증폭기는 궤도상에서도 오차 보정이 가능하여 경년 변화에 따른 증폭기의 성능 열화에 대처할 수 있어 향후 위성통신 탑재체에 적극 활용이 될 것으로 사료된다.

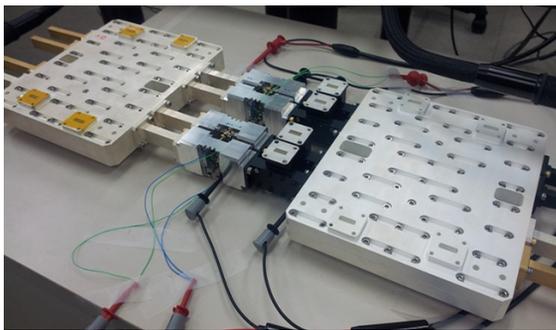


그림 17. 4x4다중 입출력 증폭기의 사진
Fig. 17. Photograph of the 4x4 Multiport Amplifier

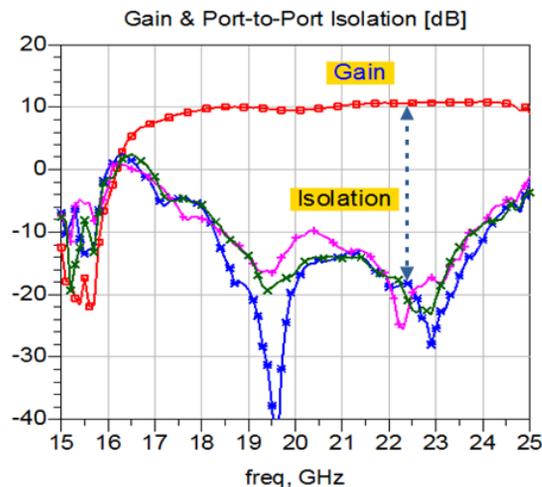


그림 18. 4x4다중 입출력 증폭기의 격리도 성능
Fig. 18. Isolation Performance of the 4x4 Multiport Amplifier

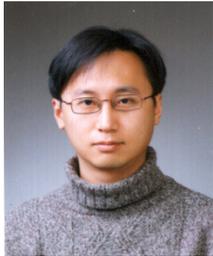
References

- [1] S. Lee, J. Jo, M. You, J. Choi, "Development Technology and Utilization of Communication Payload of COMS," *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 22, no. 3, pp. 3-16, 2011.
- [2] D. Chang, D. Oh, "Satellite Communications and Broadcasting Service Using COMS Communication Payload" *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 22, no. 3, pp. 17-30, 2011.
- [3] Shunichiro Egami and Makoto Kawai, "An Adaptive Multiple Beam System Concept", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. SAC-5, no. 4, May. 1987.
- [4] P.Gabellini, N.Gatti, "Advanced Optimization Techniques for Satellite MultiBeam and Reconfigurable Antenna and Payload Systems", *Antennas and Propagation, 2007. EuCAP 2007. The Second European Conference*, pp. 1-6, Nov. 2007.
- [5] P. Angeletti, M. Lisi, "A Survey of Multiport Power Amplifiers Applications for Flexible Satellite Antennas and Payloads", *Proceedings of the 14th Ka and Broadband Communications Conference*, Matera, Italy, 24-26 Sep. 2008.
- [6] A. Mallet, A. Anakabe, J. Sombrin, R. Rodriguez, F. Coromina, "Multi-Port Amplifier Operation for Ka-band Space Telecommunication Applications", *IEEE MTT-S International Symposium*, pp 1518-1521. June 2006.
- [7] I. Hosoda, T. Kuroda, Y. Ogawa, M. Shimada, "Ka-Band High Power Multi-Port Amplifier (MPA) Configured with TWTA for Winds Satellite", *IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC '07*, 15-17 May 2007.
- [8] B. Piovano, L. Accatino, A. Angelucci, T. Jones, P. Capece, and M. Votta, "Design and breadboarding of wideband NxN Butler

matrices for multiport amplifiers,” *SBMO Int. Microw. Conf.*, Aug. 1993, vol. 1, pp. 175 - 180.

- [9] Kyung-Wan Yu, Man-Seok Eom, Jae-Hyun Lee, and Jae-Moung Kim, “20GHz 2Watts MMIC SSPA,” *SBMO Int. Microw. Conf.*, Aug. 1993, vol. 1, pp. 175 - 180.(수정)

신 동 환 (Dong-hwan Shin)



1996년 6월 충남대학교 전자공학과 졸업
 1999년 2월 충남대학교 전자공학과 석사
 1999년 4월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 <관심분야> 위성 통신 탑재체 시스템, RF 능동회로, MMIC 설계

윤 소 현 (So-hyeun Yun)



1998년 충북대학교 전자공학과 졸업
 2000년 충북대학교 전자공학과 석사
 2000년~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 <관심분야> 위성탐재용 안테나, 위성추적 안테나, 수동소자 개발

문 성 모 (Seong-mo Moon)



2003년 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업
 2005년 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사
 2010년 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 박사
 2010년 9월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 <관심분야> RFIC/MMIC, 마이크로파 및 밀리미터파 시스템 및 부품 설계

이 흥 열 (Hong-yeol Lee)



1999년 2월 충북대학교 전자공학과 졸업
 2001년 2월 충북대학교 전자공학과 석사
 2005년 2월 충북대학교 전자공학과 박사
 2000년 10월~현재 한국전자통신연구원 무선RF탐재기술연구팀 선임연구원
 <관심분야> 위성 탑재체, RF 수동소자, RF 필터, 안테나

엄 만 석 (Man-seok Eom)



1987년 중앙대학교 전자공학과 졸업
 1989년 중앙대학교 전자공학과 석사
 2007년 중앙대학교 전자공학과 박사
 1992년~현재 한국전자통신연구원 무선RF탐재기술연구팀 책임연구원
 <관심분야> 위성시스템, 위성 탑재체, 능동소자, MMIC, 수동소자, 안테나 개발

염 인 복 (In-bok Yom)



1990년 한양대학교 전자공학과 졸업
 2004년 충남대학교 전자공학과 석사
 2007년 충남대학교 전자공학과 박사
 1990년~현재 한국전자통신연구원 무선RF탐재기술연구팀 팀장.
 <관심분야> 위성시스템, 위성 탑재체, 능동소자, MMIC, 수동소자, 안테나 개발