능동위상배열안테나용 수신 빔 성형모듈 설계

The Design of Beam Forming Module for Active Phased Array Antenna System

정영배 · 엄순영 · 전순익 · 채종석

Young-Bae Jung · Soon-Young Eom · Soon-Ick Jeon · Jong-Suk Chae

요 약

본 논문은 이동 위성통신을 위한 능동위상배열 안테나 시스템의 주요 부품 중의 하나인 빔 성형모듈 설계에 관하여 서술한다. 본 모듈은 주 신호 및 추적신호를 위한 두 개의 모듈로 구성되어 있다. 이중, 주 신호블록은 위상배열 안테나로부터 입력된 신호전력을 추적신호 블록으로 전송하는 역할을 수행하며, 추적신호 블록은 능동위상배열 안테나 시스템의 주요 기능인 추적신호의 빔 성형과 전자적 빔 제어기능을 수행한다. 또한, 본 모듈은 위상특성 및 선형이득 등의 시스템에서 요구되는 전기적 사양을 만족하며, 해당 성능의 보다 면밀한 검증을 위하여, 제작된 빔 성형모듈을 장착한 능동위상배열 안테나 시스템을 이용하여 야외구동시험을 수행하였다.

Abstract

This paper is concerned with the design of the beam forming module that is a key unit of the active phased array antenna(APAA) system for mobile satellite communications. This module includes two blocks for main signal and tracking signal. Main signal block has the role of transmitting input signal from phased array antenna to tracking signal block. And, tracking signal block executes main roles, beam forming of tracking signal and electronic beam control. The several electrical performances of this module, phase characteristics and linear gain, etc., agreed with specifications needed for APAA, and for more clear verification of the performances, the satellite communication test of the APAA including the modules was accomplished in the outdoors.

Key words : Antenna, Phased Array, Beam Forming, Tracking

Ⅰ. 서 론

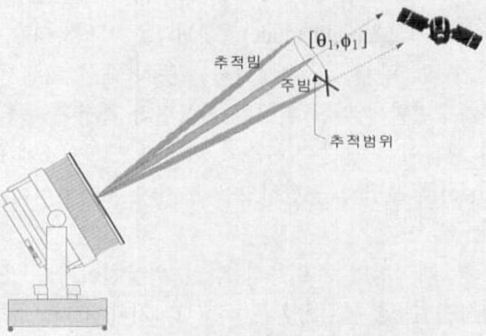
위성통신은 지리적으로 넓은 서비스영역과 우주 궤도 상에 존재하는 위성과의 직접교신으로 통신장애가 적다는 전파환경상의 장점 등으로 근래에 들어 널리 서비스되고 있다. 또한, 이러한 위성통신은 고정형에서 점차적으로 진보하여 이동체에 탑재할 수 있는 형태로 발전하게 되었으며, 이동체에서의 원활한 통신을 위하여 이동체의 움직임에 따른 위성의 위치변화를 파악할 수 있는 능동위상배열 안테나의 개발이 전 세계적으로 이루어지고 있는 실정이다.

본 논문에서는 한국전자통신연구원에서 개발한 선박용 광대역 능동위상배열안테나 시스템에 채용되는 수신 빔 성형블록에 대하여 서술한다. 본 시스템은 정지궤도에 존재하는 무궁화위성과의 양방향 통신을 수행하며, 위상천이기를 이용하여 송수신 주 빔의 조향각을 변화시키는 전자식으로 설계되어 있다. 또한, 통신을 수행하는 주 빔 이외에 위성의 위

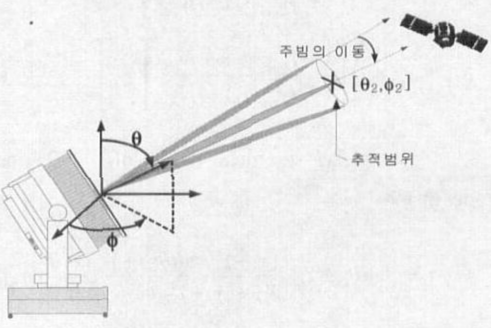
한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)
· 논 문 번 호 : 20021102-10S
· 수정완료일자 : 2002년 12월 13일

치추적에 이용되는 추적 빔이 존재하여 탐색대상인 위성의 좌우 ±0.2°와 상하 ±0.3° 범위에서 위치탐색을 수행한다. 그림 1의 (a)는 추적 빔을 이용하는 전자식 안테나 시스템의 주 빔이 위성을 향하여 [θ_1,Φ_1] 방향을 지향하고 있는 상황에서 시스템과 위성의 상대적 위치가 변화한 상태를 도식하고 있다. 이때, 추적 빔에 의한 위성의 위치탐색이 수행되며, 그림 1의 (b)와 같이, 탐색된 위치로 주 빔의 지향각이 변화하게 된다.

이와 같은 방식으로 동작하는 전자식 안테나 시스템의 수신 빔 성형모듈은 시스템의 입력단에 위치한 위상배열 안테나로부터 수신된 신호전력을 결합하여 하위 단말부로 보내는 주 신호블록과 포개진 하이브리드 브랜치라인 결합기(Hybrid Branch-line Coupler)를 기본소자로 하는 4개의 소형 디지털 위상천이기를 이용하여 보조 빔의 위성추적기능을 수행하도록 설계된 추적신호블록로 구성되어 있으며, 추적신호 제어부에 의해서 해당기능이 통제된다.



(a) 안테나 시스템의 위성 초기지향
(a) Initial beam pointing to satellite of antenna system.



(b) 안테나 시스템의 추적 빔에 의한 주 빔의 이동
(b) Main beam steering by operating tracking beam of antenna system.

그림 1. 전자식 안테나 시스템의 위성추적 개념도
Fig. 1. Fundamental notion diagram for satellite tracking of antenna system.

Ⅱ. 본 론

서론에 언급한 선박용 능동위상배열 안테나 시스템에 채용되는 빔 성형모듈의 요구사양은 아래의 표 1과 같다.

2-1 주 신호블록 설계 및 측정

주 신호블록은 4개의 입력단으로 들어온 수신전력을 저잡음 증폭한 뒤, 4:8로 전력분배하여 단말부와 추적신호블록에 공급하는 역할을 수행한다. 또

표 1. 빔 성형모듈의 전기적 요구사양
Table 1. Electrical specifications for beam forming module.

항 목	전기적 요구사양	
	주 신호블록	추적 신호블록
동작주파수	7.25~7.75 GHz	
채널당 선형이득	42 dB 이상	38 dB 이상
선형이득 평탄도	±0.5 dB 이하	±1.0 dB 이하
채널간 선형이득 오차	±1.0 dB 이하	±1.0 dB 이하
채널간 초기위상 오차	-	±20 ° 이하
위상제어량	-	4 Bit(Δ=22.5 °)
위상제어 오차	-	±11.25 ° 이하
위상제어에 따른 이득 변화량	-	±1.5 dB 이하
입출력반사손실	-	14 dB 이상

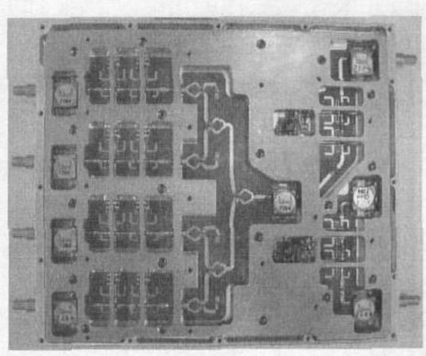


그림 2. 제작된 주 신호블록의 실물사진
Fig. 2. Photo of manufactured main signal block.

한, 시스템 내부에 존재하는 송신용 고출력증폭기와 안테나시스템이 운용될 외부환경에 의한 동작온도 변화와 그에 따른 성능저하를 방지하기 위하여 DC 공급회로를 통한 공급전압의 안정화와 온도에 따른 이득보상을 고려하였다.

그림 2와 같이, 주 신호블록은 5개의 2단 저잡음 증폭기를 포함한다. 증폭기는 이득과 잡음특성을 고려하여 NEC사의 Hetero Junction FET를 사용하였으며, 회로시뮬레이터인 ADS(Advanced Design System)를 통하여 각 단의 이득이 12 dB가 되도록 설계되었다. 제작기판은 Taconic사의 TLY시리즈를 사용하였으며, *HP8510C* 회로망 분석기(Network Analyzer)를 통하여 전기적 특성을 확인하였다.

각 채널의 선형이득은 그림 3과 같다. 4개의 입력 채널과 주 신호블록의 출력을 통하여 측정된 최소 이득은 43.2 dB이며, ±0.3 dB의 선형이득 평탄도와 ±0.7 dB의 채널간 선형이득 오차를 확인할 수 있다.

2-2 추적 신호블록 설계 및 측정

추적 신호블록은 주 신호블록과는 달리 빔 성형블록의 주요 기능인 추적신호 빔 성형 및 전자적 빔 제어기능을 수행한다. 빔 성형 및 제어는 주 신호블록으로부터 입력된 4개의 채널에 병렬로 위치한 4개의 위상천이기로 수행된다. 본 위상천이기는 포개진 브랜치라인 하이브리드(Branch-line hybrid)를 기본소자

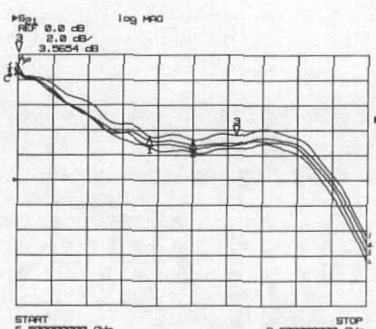


그림 3. 주 신호블록의 선형이득특성(측정)

Fig. 3. *Linear gain characteristic of main signal block.*

*회로망 분석기의 입력에 41 dB 감쇄기를 사용함

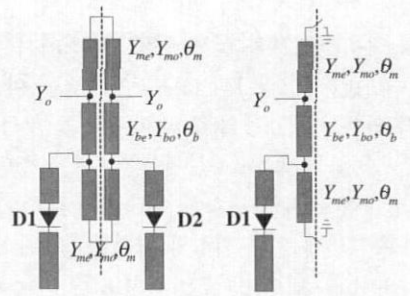


그림 4. 포개진 하이브리드 위상천이기의 기본구조

Fig. 4. Fundamental structure of the folded hybrid coupled phase shifter.

로 하는 반사형 위상천이기 구조를 취하고 있으며, 결합구조로 인한 점유면적이 기존의 위상천이기모델에 비하여 50 % 이상 축소된다는 장점을 갖는다[1].

그림 4는 단일 비트 위상천이기의 기본구조를 보여주고 있으며, 본 구조의 해석은 우모드(Even mode) 기모드(Odd mode)해석법[2]을 이용하여 수행할 수 있다. 단, 본 설계에서는 동작 대역 내에서의 주파수변화에 따른 일정한 위상변화 특성을 구현하기 위하여 포개진 기본소자 이외에 스위칭소자(Pin diode)를 포함하는 반사망을 동시에 고려하여야 한다.

본 해석방법을 이용한 단일 위상천이기 구조의 반사손실 및 삽입손실은 식 (1), (2)와 같다.

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{2}\left[\frac{1-j\bar{y}_{oei}}{1+j\bar{y}_{oei}} + \frac{1-j\bar{y}_{ooi}}{1+j\bar{y}_{ooi}}\right] \quad (1)$$

$$S_{21} = S_{12} = \frac{1}{2}\left[\frac{1-j\bar{y}_{oei}}{1+j\bar{y}_{oei}} - \frac{1-j\bar{y}_{ooi}}{1+j\bar{y}_{ooi}}\right] \quad (2)$$

여기서, $i=1,2(i=1$, ideal diode off, $i=2$: ideal diode on),

$$\bar{y}_{oei} = \bar{Y}_{me}\tan\theta_m + \bar{Y}_{be}\left\{\frac{(\bar{y}_i + \bar{Y}_{me}\tan\theta_m) + \bar{Y}_{be}\tan\theta_b}{\bar{Y}_{be} - (\bar{y}_i + \bar{Y}_{me}\tan\theta_m)\tan\theta_b}\right\} \quad (3)$$

$$\bar{y}_{ooi} = -\bar{Y}_{mo}\cot\theta_m + \bar{Y}_{bo}\left\{\frac{(\bar{y}_i - \bar{Y}_{mo}\cot\theta_m) + \bar{Y}_{bo}\tan\theta_b}{\bar{Y}_{bo} - (\bar{y}_i - \bar{Y}_{mo}\tan\theta_m)\tan\theta_b}\right\} \quad (4)$$

$$\bar{y}_1 = j\bar{Y}_1\tan\theta_1 \quad (5)$$

$$\bar{y}_2 = -j\bar{Y}_1\left\{\frac{\bar{Y}_2 + \bar{Y}_1\cot\theta_2\tan\theta_1}{\bar{Y}_2\tan\theta_1 - \bar{Y}_1\cot\theta_2}\right\} \quad (6)$$

여기서, Y_0는 특성임피던스 Z_0로 정규화 되었음을 나타내며, 첨자 e와 o는 우모드와 기모드 특성을 표시하고 있다. 또한, 본 결합기를 통한 상대적인 위상천이량은 식 (2)의 위상표현을 정리함으로써 식 (7)과 같이 얻을 수 있으며, 위상천이기 회로가 중심주파수 f_0에서 $S_{11}=0$, $S_{21}=1$을 만족하는 각 결합 전송선들의 매개변수조건은 식 (8)과 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_T = Tan^{-1}\left\{\frac{1-\bar{y}_{oe2}\bar{y}_{oo2}}{\bar{y}_{oe2}+\bar{y}_{oo2}}\right\} - Tan^{-1}\left\{\frac{1-\bar{y}_{oe1}\bar{y}_{oo1}}{\bar{y}_{oe1}+\bar{y}_{oo1}}\right\} \quad (7)$$

$$\bar{Y}_{me}\bar{Y}_{mo}=1,\ \theta_m = Tan^{-1}\left\{\sqrt{\frac{\bar{Y}_{mo}}{\bar{Y}_{me}}}\right\} \quad (8)$$

$$\bar{Y}_{be}\bar{Y}_{bo}=2,\ \theta_b = Tan^{-1}\left\{\frac{2}{\bar{Y}_{bo}-\bar{Y}_{be}}\right\} \quad (9)$$

그리고, 식 (8)과 (9)를 만족하는 최적의 우모드, 기모드 특성임피던스를 산출하여야 하며, 그 중, 구현 가능한 파라미터를 선택함으로써 실질적인 제작을 도모할 수 있다.

설계된 4비트 위상천이기를 이용하여 제작한 추적 신호블록는 그림 4와 같으며, 추적신호블록의 선형이득특성은 그림 6과 같다. 입력된 4개 채널의 최소이득은 38.5 dB이며, ±0.5 dB 이내의 이득평탄도와 ±0.8 dB 이내의 채널간 선형이득오차를 보인다.

그림 7은 채널간 초기위상특성을 보이고 있다. 최대 초기위상 오차량은 ±7°이며, 채널 1번을 기준위상(Reference, 0°)으로 설정한 뒤, 나머지 채널의

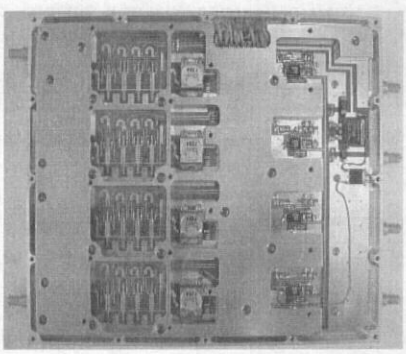


그림 5. 제작된 추적 신호블록의 실물사진
Fig. 5. Photo of manufactured tracking signal block.

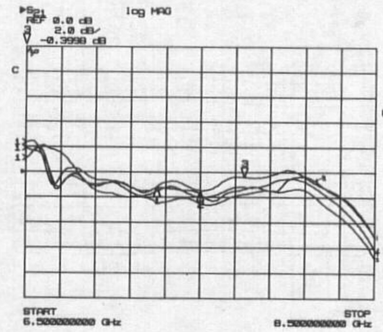


그림 6. 추적 신호블록의 선형이득특성(측정)
Fig. 6. Linear gain characteristic of tracking signal block.
*단, 회로망분석기의 입력에 41 dB 감쇄기가 사용됨.

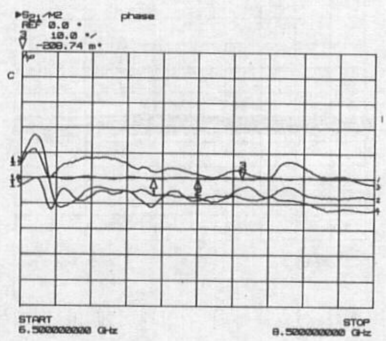


그림 7. 추적 신호블록의 채널간 초기위상오차(측정)
Fig. 7. Phase difference characteristic among input channels of tracking signal block.

위상을 상대적으로 측정한 결과이다.

전술한 바와 같이, 추적신호 채널에 사용되는 4비트 위상천이기의 위상제어량은 22.5°이며, 최대 위상제어 오차량은 ±11.25°이다. 그림 8과 9에서는 빔 성형모듈 외부에 위치하는 추적신호제어기를 통하여 구동된 위상천이기의 위상제어량과 위상천이기의 구동에 따른 선형이득변화량을 나타낸다. 측정된 결과와 같이, 위상천이기는 최대 위상제어 오차량을 만족하고 있으며, 이에 따른 이득변화량은 최대 ±1.2 dB, 최소 18 dB와 23 dB의 입출력 반사손실 특성을 보인다. 또한, 본 논문에서는 4개의 채널 중, 각각 임의의 한 개 채널의 측정결과만을 도식하였음을 밝히는 바이다.

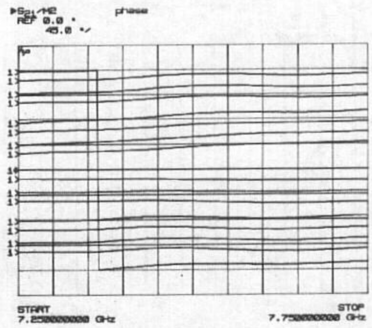


그림 8. 추적 신호블록의 4비트 위상제어(측정)
Fig. 8. 4-bit phase control of tracking signal block.

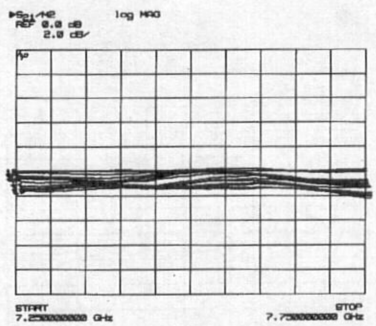


그림 9. 추적 신호블록의 위상제어에 따른 이득변화량(측정)
Fig. 9. Gain variance of tracking signal block by phase control.

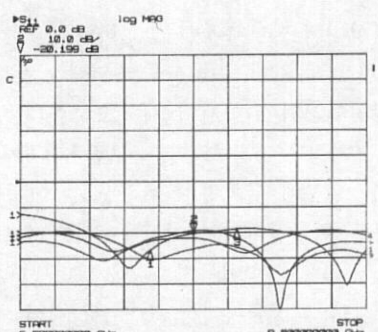


그림 10. 추적 신호블록의 입력반사손실(측정)
Fig. 10. Input return loss of tracking signal block.

Ⅲ. 결 론

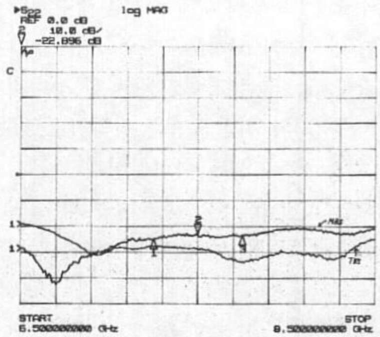


그림 11. 추적 신호블록의 출력반사손실(측정)
Fig. 11. Output return loss of tracking signal block.

그림 12. 능동위상배열 안테나 시스템의 통신시험전경
Fig. 12. Photo of satellite communication test by using active phased array antenna system.

그림 12는 본 논문에서 서술한 수신 빔 성형모듈을 장착한 선박용 능동위상배열 안테나 시스템의 위성통신 시험전경을 보여주고 있다. 여기서, 사진의 좌측하단의 TV영상은 파라볼라안테나를 이용하여 직접 수신된 위성방송화면을 나타내며, 우측하단은 안테나 시스템의 신호연동을 통한 방송화면을 나타낸다. 본론에서 서술한 바와 같이, 제안된 구조의 소형 디지털 위상천이기를 적용하여 제작된 빔 성형모듈은 안테나시스템의 수신신호처리 및 위성추적기능에 요구되는 전기적사양을 만족함으로써

이동체의 움직임에 따른 위성의 상대적 위치파악을 가능케 하고, 위치정보를 기반으로 주 빔의 지향방향을 결정하도록 한다. 따라서, 이동체와 위성 사이의 지향오차를 최소함으로써 양질의 통신서비스가 가능하며, 전자적 구동방식으로 인하여 기계식에 비해 위성과의 상대적 위치변화에 대한 대응시간이 최소화 됨으로서 통신의 안정성을 꾀할 수 있다.

이러한 통신시험의 결과에 따라서, 제작된 빔 성형모듈은 단일부품으로서의 전기적성능 뿐만이 아니라, 시스템 차원에서도 성공적으로 동작하는 것이 확인되었으며, 본 시스템 이외에도 다양한 통신환경에 적용할 수 있으리라 확신하는 바이다.

참 고 문 헌

[1] Soon-Young Eum, et al., "X-band Compact Digital Phase Shifter Design", *The Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 13, no. 7, pp. 907-915, Oct. 2002.

[2] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Willy & Son, Inc., 1998.

[3] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers: Analysis and Design*, Prentice Hall, Inc., 1997.

[4] S. I. Jeon, J. I. Choi, Ch. S. Yim, S. P. Lee and A. V. Shishlov, "Vehicular Active Antenna System with Combined Electronical and Mechanical Beam steering for Reception from DBS in Ku-band", *XXVII Moscow ICATT IEEE AP-S*, pp. 72-77, Sept. 1998.

[5] K. Fujimoto, J. R. James, *Mobile Antenna Systems Handbook*, Artech House, 1994.

정 영 배

1999년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2001년 2월: 한국정보통신대학원 전자공학부 (공학석사)
2001년 2월~현재: 한국전자통신연구원 연구원
[주 관심분야] 초고주파 수동 및 능동부품설계, 위상배열 안테나시스템 설계

엄 순 영

1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
1997년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학부 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 수동 및 능동부품설계, 위성통신 RF시스템 설계, 위상배열 안테나시스템 설계

전 순 익

1984년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
1990년 9월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
[주 관심분야] 초고주파 수동 및 능동 부품 설계, 위성통신 RF 시스템 설계, 위상배열 안테나시스템 설계

채 종 석

1977년 2월: 항공대학교 전자공학과 (공학사)
1979년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1985년 2월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
[주 관심분야] 위성 지구국, 디지털 위성방송, 전파방송, 비동기 방식 시스템