

# Ka 대역 위성 중계기용 출력 멀티플렉서에 관한 연구

## A Study on Output Multiplexer for Ka-Band Satellite Transponder

이주섭 · 엄만석 · 박상준\* · 이필용\* · 염인복 · 박종흥

Juseop Lee · Man-Seok Uhm · Sang-Jun Park\* · Pil-Yong Lee\* · In-Bok Yom · Jong-Heung Park

### 요 약

본 논문에서는 Ka 대역 위성 중계기용 출력 멀티플렉서의 설계 및 제작에 대하여 언급하였다. 출력 멀티플렉서는 저역통과필터, 채널필터, 매니폴드(Manifold)로 구성되어 있으며, 위성 중계기의 무게와 부피를 최소화하기 위하여 채널필터는 이중모드로 설계하였다. 채널별 주파수 선택도를 높이기 위하여 채널필터는 4차 타원 응답형으로 설계하였으며, 저역통과필터는 13차 corrugated형으로 설계하였다. 채널필터와 매니폴드의 초기 설계 후 최적화 과정에 있어서 모든 설계 변수를 최적화시키는 대신 일부의 설계 변수만을 최적화 시킴으로써 용이하게 최적화 설계할 수 있음을 확인하였다. 제작한 Ka 대역 위성 중계기용 출력 멀티플렉서의 측정결과는 설계결과와 동일한 특성을 나타내었다.

### Abstract

This paper presents the design technique of output multiplexer(OMUX) for the Ka-band satellite transponder. Output multiplexer consists of low-pass filter(LPF), channel filter and manifold. Channel filters adopt dual-mode technique in design for mass and volume reduction and frequency response of channel filters is 4-pole elliptic response for high frequency selectivity. Low-pass filters are designed to be of 13th order corrugated type for high rejection characteristic over reception band of satellite transponder. After initial design of channel filters and manifold, we optimized only a few design parameters for fast and easy optimization instead of optimizing all the design parameter. Measured results of a realized output multiplexer for Ka-band satellite transponder show good agreement with the computed ones.

Key words : Satellite Transponder, Output Multiplexer, Channel Filter, Manifold

### I. 서 론

통신위성 중계기의 고출력 증폭기를 통해서 증폭된 각 채널 신호는 출력 멀티플렉서(Output Multiplexer)에 의해서 합쳐진 후 지상으로 송신된다. 초기의 출력 멀티플렉서는 circulator를 이용한 channel dropping 방식과 2개의 하이브리드를 이용한 신호 결합방식을 이용하였으나, 각각 고출력용 circulator와 하이브리드를 사용함에 따라 부피가 크고 무게가 무겁다는 단점이 있었다<sup>[1]</sup>. 70년대 이후 circulator와 하

이브리드를 사용하지 않음으로써 무게와 크기를 줄이고 전력 손실을 최소화할 수 있는 매니폴드(manifold) 형태의 출력 멀티플렉서가 널리 사용되고 있다<sup>[2],[3]</sup>. 또한 출력 멀티플렉서의 부피와 무게를 최소화하고 우수한 주파수 선택도 특성을 나타내기 위하여 각 채널필터는 주로 이중모드 타원 응답형<sup>[4]~[7]</sup>으로 설계한다.

위성 중계기의 입력 멀티플렉서의 경우에는 일반적으로 circulator dropping 방식을 사용하여 채널을 분리하기 때문에 각 채널필터는 서로 영향을 주지

한국전자통신연구원 통신위성연구그룹(Communication Satellite Development Group, ETRI)

\*링스웨이브(Linxwave Inc.)

· 논문 번호 : 20040507-062

· 수정완료일자 : 2004년 6월 23일

않는다. 따라서 각 채널 필터는 독립적인 설계 및 튜닝이 가능하다<sup>[2],[8]</sup>. 그러나 매니폴드형 출력 멀티플렉서의 경우 각 채널간에 서로 영향을 미치기 때문에 독립적인 설계가 불가능하며 따라서 채널 필터와 매니폴드의 초기 설계 후 최적화 과정이 필수적이다.

본 논문에서는 Ka 대역 위성 중계기용 출력 멀티플렉서의 설계 방법에 대하여 다루었다. 위성 중계기의 구성 및 채널 할당에 따라서 두 개의 인접하지 않은 채널을 합치도록 설계하였으며, 저역통과필터(LPF), 채널필터, 매니폴드로 이루어져 있다. 또한, 채널필터와 매니폴드는 최적의 성능을 위해서 최적화 기법을 적용하여 설계하였다. 일반적으로 인접하는 채널을 합치는 기능을 하는 출력 멀티플렉서의 최적화 과정에 있어서는 최적화 변수가 많기 때문에 최적화 시간이 많이 소요되고 원하는 최적화 결과를 얻기가 용이하지 않다. 따라서 본 논문에서는 인접하지 않는 채널을 합치는 기능을 하는 출력 멀티플렉서를 설계하는데 있어서 인접하는 채널을 합치는 기능을 하는 출력 멀티플렉서의 최적화 설계와 달리 빠르고 용이하게 최적화 설계를 하는 방법에 대하여 주로 언급한다.

## II. 출력 멀티플렉서 설계

그림 1과 그림 2는 각각 매니폴드형 Ka 대역 출력 멀티플렉서의 블록 구성도와 3차원 형상을 나타내고 있다. 매니폴드 구조를 이용하여 각 채널이 합쳐지도록 되어 있으며, 각 채널 신호는 저역통과필터, 채널필터를 통과한 후 매니폴드를 통해서 지상으로 송신되도록 구성되어 있다.

표 1은 출력 멀티플렉서의 설계 목표치를 나타내고 있다. 본 논문에서 다루는 출력 멀티플렉서가 적

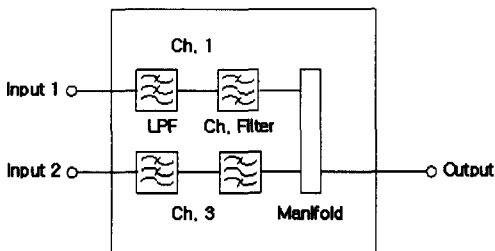


그림 1. 출력 멀티플렉서의 블록 구성도  
Fig. 1. Block diagram of the output multiplexer.

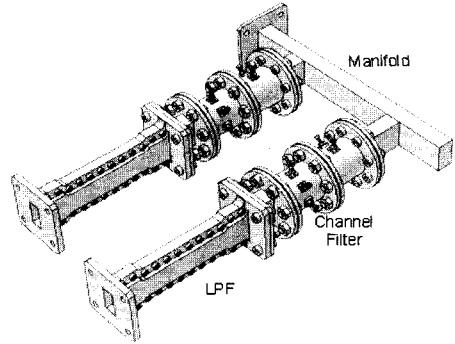


그림 2. 출력 멀티플렉서의 3차원 형상  
Fig. 2. 3D structure of output multiplexer.

표 1. 출력 멀티플렉서의 주요 설계 목표치  
Table 1. Design target for the output multiplexer.

중심주파수(fc)	Ch. 1: 19.97 GHz Ch. 3: 20.23 GHz
대역폭(BW)	100 MHz
삽입손실	Ch. 1: 3 dB @ fc Ch. 3: 3 dB @ fc
반사계수	-20 dB
차단특성	8.5 dB(fc±80 MHz) 15 dB(fc±130 MHz) 80 dB(수신대역: 29.6 GHz~30.0 GHz)

용되는 위성 중계기의 채널 2번(중심 주파수: 20.10 GHz)은 독립적으로 지상으로 송신되기 때문에 본 논문에서는 인접하지 않는 채널인 채널 1번과 3번의 신호를 합치도록 설계한다. 수신대역에서의 차단특성을 제외한 나머지 특성은 채널 필터와 매니폴드의 설계 시 고려되어야 하는 특성이며 수신대역에서의 차단 특성은 저역 통과 필터를 이용하여 80 dB 이상의 차단 특성을 갖도록 설계하여야 한다.

### 2-1 채널필터 및 매니폴드 설계

일반적으로 매니폴드형 출력 멀티플렉서의 설계에 있어서 채널 필터와 매니폴드는 초기 설계 후 최적화 과정을 통해서 최종 설계값을 결정한다. 그림 3은 매니폴드형 멀티플렉서의 설계 과정을 나타내고 있다<sup>[1]</sup>. 협대역 부품인 채널 필터와 광대역 부품인 매니폴드의 초기 설계 후 규격을 만족하도록 최적화 과정을 통해서 설계가 완료되면 구현을 한다. 채널 필터의 초기 설계에 있어서 채널이 서로 인

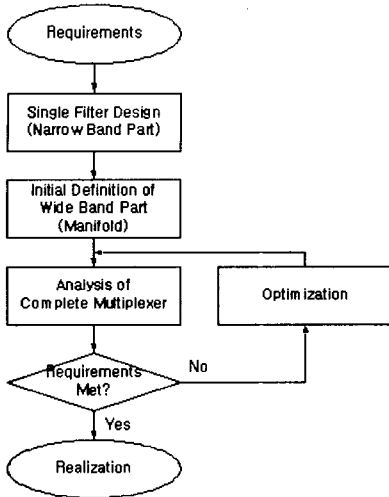


그림 3. 매니폴드형 멀티플렉서 설계 흐름도  
Fig. 3. Design process of manifold multiplexer.

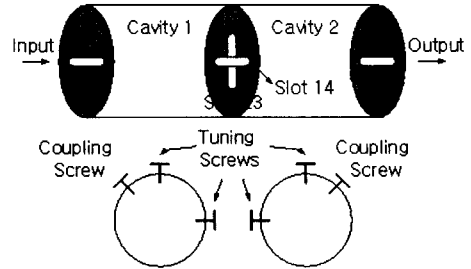
접하는 경우에는 채널 필터를 단일중단형<sup>[9],[10]</sup>으로 설계하지만 본 논문의 주요 설계 목표값에서와 같이 채널이 인접하지 않는 경우에는 채널 필터를 이중중단형으로 초기 설계를 한 후 매니폴드와의 최적화 과정을 거치는 것이 유리하다. 이중중단형 필터의 회로망 파라미터를 구하는 방법은 여러 가지가 있으나 참고문헌 [8]에 비교적 용이한 방법이 제시되어 있다.

필터의 차단 특성을 고려하여 필터의 응답 특성은 4차 타원응답형으로 설계하였으며, 4차 이중모드 필터의 구조와 신호 흐름도는 그림 4와 같다. 신호 흐름도에서 직선은 순차결합을 나타내고 점선은 타원응답형 필터 구현에 필수적인 교차결합을 나타낸다. [8]에서 제시한 방법을 이용하여 전달영점  $\pm j1.8$ 이고 반사손실이 23.6 dB인 필터의 회로망 파라미터인 상호 결합행렬( $M$ )과 입출력 결합계수( $R_1, R_2$ )를 구하면 다음과 같다.

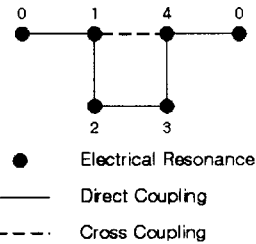
$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.9203 & 0 & -0.2845 \\ 0.9203 & 0 & 0.8467 & 0 \\ 0 & 0.8467 & 0 & 0.9203 \\ -0.2845 & 0 & 0.9203 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_1 = R_2 = 1.2033 \quad (1)$$

식 (1)의 회로망 파라미터를 갖는 필터의 주파수 응답 특성을 나타내면 그림 5와 같다.



(a) 4차 이중모드 필터 구조  
(a) Structure



(b) 4차 이중모드 필터의 신호 흐름도  
(b) Signal flow

그림 4. 4차 이중모드 필터의 구조 및 신호 흐름도  
Fig. 4. Structure and signal flow of a 4-pole dual-mode filter.

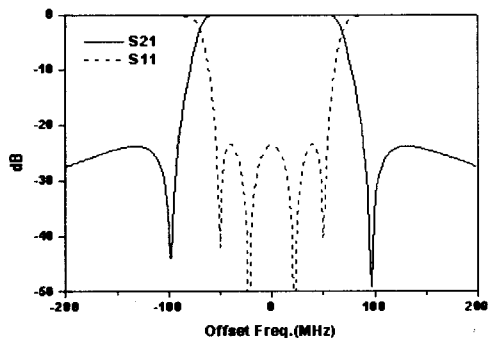


그림 5. 채널필터의 초기 설계 결과  
Fig. 5. Initial design result of channel filter.

그림 6은 매니폴드와 채널 필터의 등가회로를 나타내고 있다. 본 논문에서는 매니폴드의 접합부분을 E-plane T-junction으로 설계하기 때문에 매니폴드의 초기 설계값은 다음과 같이 결정할 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$d_{M3} = \frac{n\lambda_{g3}}{2} - \frac{b}{2}, \quad d_{M1} = \frac{n\lambda_{g1}}{2} - b$$

$$d_{F1} = \frac{n\lambda_{g1}}{2} - \frac{b}{2}, \quad d_{F3} = \frac{n\lambda_{g3}}{2} - \frac{b}{2} \quad (r=1, 2, \dots)$$

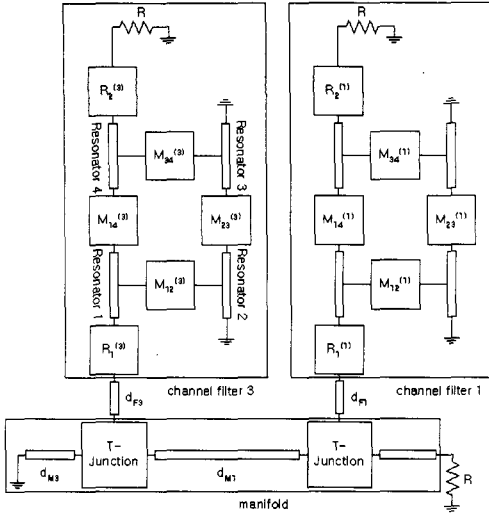


그림 6. 매니폴드와 채널필터의 등가회로  
Fig. 6. Equivalent circuit of manifold and channel filters.

이때,  $\lambda_{gk}$ 는 채널  $k$ 의 중심 주파수에서의 관내 파장(guided wavelength)이며  $b$ 는 구형 도파관의 높이이다.

일반적인 채널 분포가 연속적인 매니폴드형 출력 멀티플렉서의 경우 채널이 인접하여 채널간 서로 영향을 많이 주기 때문에 채널 필터의 초기 설계를 단일 종단형으로 설계한 후 최적화 과정에 있어서 매니폴드의 각 부분별 길이, 채널 필터의 모든 결합 계수, 그리고 모든 공기진 길이를 최적화 변수로 설정하여 최적화시킨다. 그러나 본 논문에서와 같이 채널 분포가 연속적이지 않은 매니폴드 멀티플렉서의 경우에는 채널 분포가 연속적인 경우보다는 채널간 영향이 적기 때문에 모든 설계 변수를 최적화 변수로 설정하는 것은 비효율적이다. 따라서 일부의 설계 변수만을 최적화 대상 설계 변수로 설정하여 최적화하는 것이 최적화 시간을 줄일 수 있다. 설계 변수 중 각 채널의 특성 변화에 많은 영향을 미치는 변수가 매니폴드의 각 부분별 길이( $d_{M1}$ ,  $d_{M2}$ ,  $d_{F1}$ ,  $d_{F2}$ )와 각 채널필터의 입력 결합계수( $R_1^{(1)}$ ,  $R_1^{(3)}$ )이므로 이 설계 변수들만 최적화 대상 설계 변수로 설정하여 최적화하였다. 최적화 과정에 있어서 최적화 목표값은 각 채널 대역 내에서 반사계수를  $-22$  dB 이하로 설정하였고 최적화 방법은 gradient type으로 하였다. 표 2는 초기설계 결과와 최적화 과정 후의 설계 변수를 비교한 것을 나타내고 있다. 각 채널 필터의 입

표 2. 최적화 변수  
Table 2. Optimization parameter.

	최적화 변수	초기 설계값	최적화 설계값
매니폴드	$d_{M1}$	58.00 mm	57.85 mm
	$d_{M2}$	23.86 mm	25.65 mm
	$d_{F1}$	24.39 mm	16.79 mm
	$d_{F2}$	23.86 mm	25.80 mm
채널필터 1	$R_1^{(1)}$	1.2033	2.4805
채널필터 3	$R_1^{(3)}$	1.2033	2.3556

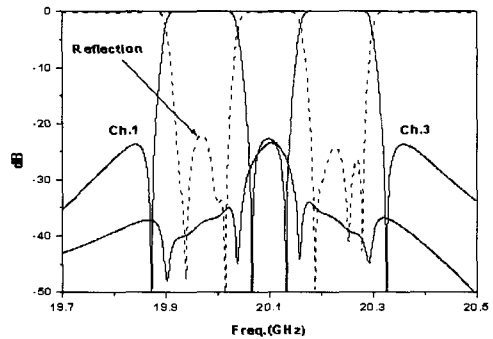


그림 7. 매니폴드와 채널필터의 최적화 결과  
Fig. 7. Optimized result of manifold and channel filter.

력 결합계수( $R_1^{(1)}$ ,  $R_1^{(3)}$ )의 최적화 설계값이 초기 설계값보다 많이 증가한 것을 알 수 있다. 이는 각 채널 필터의 입력 결합계수가 증가하면 단일 종단형 필터의 특성과 유사한 특성을 가지게 되어 채널 서로간의 영향이 감소하기 때문이다. 그림 7은 최적화에 의한 설계 결과를 나타내고 있다. 모든 설계 변수를 최적화 대상 변수로 설정하지 않아도 원하는 주파수 응답 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

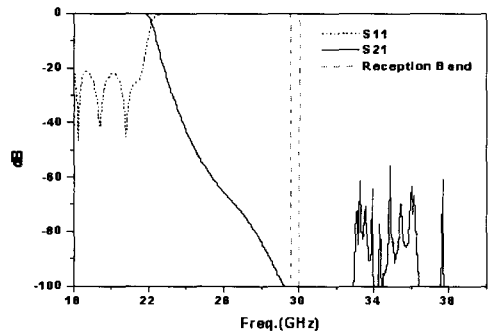


그림 8. 저역통과필터 설계 결과  
Fig. 8. Design result of low-pass filter.

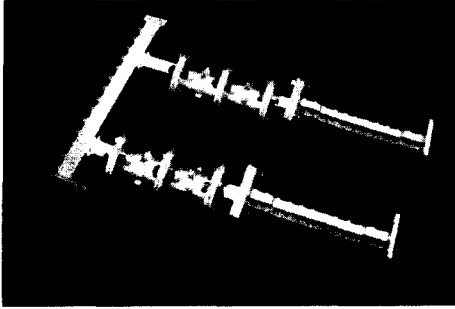
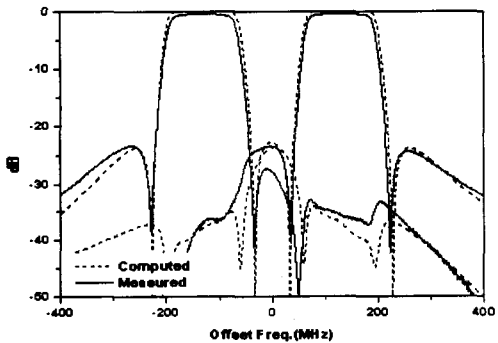


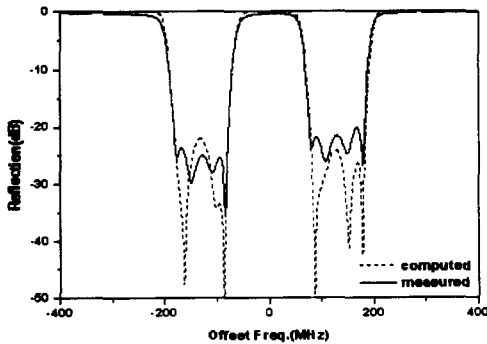
그림 9. 제작한 Ka 대역 위성 중계기용 출력 멀티플렉서  
 Fig. 9. Photo of a realized output multiplexer for Ka-band satellite transponder.

2-2 저역 통과 필터

도파관 저역 통과 필터의 설계 방법은 여러 문헌 [11]-[13]에 자세히 설명되어 있으므로 본 논문에서는 간



(a) 전달특성  
 (a) Transmission characteristic



(b) 반사특성  
 (b) Reflection characteristic

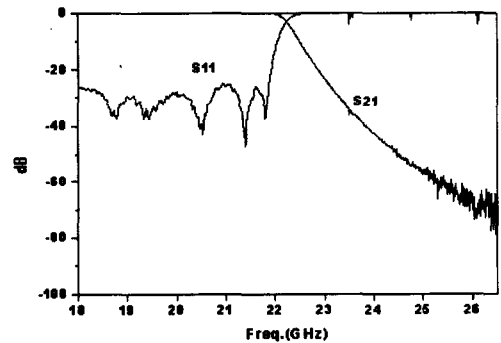
그림 10. 제작한 출력 멀티플렉서의 측정 결과  
 Fig. 10. Measured results of a realized output multiplexer.

략히 설계 결과에 대해서만 언급하기로 한다. 저역 통과 필터는 일반적으로 위성 중계기의 수신대역 차단하기 위하여 대역 저지용 필터로 사용된다. 위성 중계기용 도파관 저역 통과 필터는 corrugated 구조와 waffle-iron 구조가 있으며, 본 논문에서는 13차 corrugated 구조로 설계하였다.

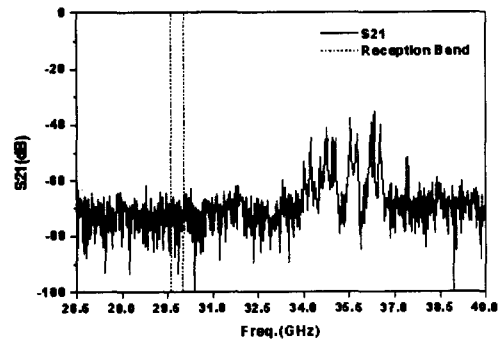
그림 8은 저역통과필터의 Ansoft HFSS에 의한 설계 결과를 나타내고 있다. 차단 주파수(cutoff frequency)가 22 GHz가 되도록 설계하여 채널 필터와 매니폴드의 채널 신호에 영향을 주지 않으면서 위성 중계기의 수신대역에서 100 dB 이상의 차단 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

III. 출력 멀티플렉서의 제작 및 측정 결과

그림 9는 제작한 출력 멀티플렉서를 나타내고 있다. 각 공동(cavity)은 TE113 모드의 수직, 수평 편파



(a) Near-band 차단특성  
 (a) Near-band rejection characteristics



(b) Far-band 차단특성  
 (b) Far-band rejection characteristics

그림 11. 저역통과필터 측정 결과  
 Fig. 11. Measured results of lowpass filter.

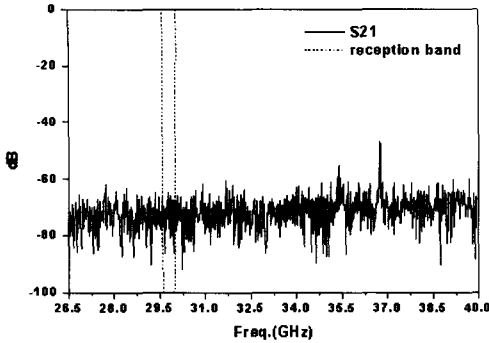


그림 12. 출력 멀티플렉서의 수신대역 특성  
Fig. 12. Measured results of reception band rejection characteristic of output multiplexer.

를 이용하여 채널 필터를 이중모드로 구현하도록 제작하였으며, 각 슬롯의 크기는 최적화된 채널 필터의 회로망 파라미터에 부합하도록 제작하였다. 도체 손실에 의한 삽입손실을 최소화하기 위하여 내부에 은도금 처리를 하였으며, 입출력단은 모두 WR-51로 제작하였다.

그림 10은 제작한 출력 멀티플렉서의 측정 결과를 나타내고 있다. 측정 결과가 최적화된 설계 결과와 잘 일치함을 알 수 있으며, 반사계수의 경우 -20 dB 이하의 특성을 얻을 수 있도록 튜닝이 가능함을 할 수 있다. 그림 11은 저역 통과 필터의 특성을 측정 한 결과를 나타내고 있다. 저역 통과 필터는 채널 신호에 영향을 주지 않으면서 수신대역의 신호를 차단시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 그림 12는 출력 멀티플렉서 전체의 위성 중계기 수신대역에서의 차단 특성을 나타내고 있다. 저역 통과 필터에 의한 수신대역 차단이 이루어지는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 Ka 대역 위성 중계기용 매니폴드형 출력 멀티플렉서를 설계 및 제작하였다. 2개의 비인접 채널을 합치는 기능을 하며 무게와 부피를 줄이기 위하여 이중모드 기법을 사용하여 4차 채널 필터를 설계하였다. 매니폴드와 채널필터의 초기 설계 후 최적화 과정에 있어서 모든 설계 파라미터를 최적화 시키는 대신 일부의 설계 파라미터만 최적화 시킴으로써 용이하게 최적화 할 수 있음을 확인하였다. 제작한 출력 멀티플렉서의 측정결과는 설계 결

과와 거의 동일한 특성을 나타내어 위성 중계기에 적용 가능한 성능임을 알 수 있다.

위성 중계기의 채널 신호는 고출력 증폭기에 의해서 증폭된 후 출력 멀티플렉서에 의해서 신호가 합쳐진 후 지상으로 송신되므로 출력 멀티플렉서에는 고전력의 신호가 통과하게 된다. 따라서 이로 인한 PIM(Passive Inter-modulation)과 multipaction 최소화를 위한 연구가 향후 진행될 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Uher, J. Bornemann and U. Rosenberg, *Waveguide Components for Antenna Feed Systems: Theory and CAD*, Artech House, 1993.
- [2] M. Kunes, "Microwave multiplexer for space applications", *Electronics & Communication Engineering Journal*, pp. 29-35, Feb. 1998.
- [3] M. H. Chen, F. Assal and C. Mahle, "A contiguous band multiplexer", *COMSAT Technical Review*, vol. 6, no. 2, pp. 285-307, Fall 1976.
- [4] A. E. Williams, "A four-cavity elliptic waveguide filter", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 18, no. 12, pp. 1109-1114, Dec. 1970.
- [5] A. E. Atia, A. E. Williams, "New types of waveguide bandpass filter for satellite transponder", *COMSAT Technical Review*, vol. 1, no. 1, pp. 21-43, 1971.
- [6] R. J. Cameron, J. D. Rhodes, "Asymmetric realizations for dual-mode bandpass filters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 29, no. 1, pp. 51-58, Jan. 1981.
- [7] A. E. Williams, A. E. Atia, "Dual-mode canonical waveguide filters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 25, no. 12, pp. 1021-1026, Dec. 1977.
- [8] 이주섭, 엄만석, 염인복, 이성팔, "Ku 대역 위성 중계기용 입력 멀티플렉서에 관한 연구", 한국전자과학기술회 논문지, 14(4), pp. 393-400, 2003년 4월.
- [9] M. H. Chen, "Singly terminated pseudo-elliptic function filter", *COMSAT Technical Review*, vol. 7, no. 2, 1977.
- [10] 염인복, 이주섭, 엄만석, 이성팔, "6차 단일종단

이중모드 타원응답 필터 합성에 관한 연구", 한국전자과학회 논문지, 14(5), pp. 506-512, 2003년 5월.

[11] L. Young, "Stepped-impedance transformers and filter prototypes", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 10, pp. 339-359, Sep. 1962.

[12] R. Levy, "Tables of element values for the distributed low-pass prototype filter", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 13, pp. 514-536, Sep. 1965.

[13] J. D. Rhodes, *Theory of Electrical Filter*, John Wiley & Sons.

이 주 섭



1997년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)  
 1999년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)  
 1999년 3월~2001년 4월: LG정보통신(주) 주임연구원  
 2001년 5월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성연구그룹 연구원

[주 관심분야] 위성통신, 위성 중계기, 위성용 RF 부품

이 필 용



1999년 2월: 순천향대학교 전기공학과 (공학사)  
 2001년 2월: 순천향대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2000년 7월~2004년 3월: (주)텔웨이브 무선기술사업부 대리  
 2004년 3월~현재: (주)링스웨이브 부설연구소 전임연구원

[주 관심분야] 우주항공용 RF 부품 및 모듈

엄 만 석



1987년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)  
 1989년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2002년 3월~현재: 중앙대학교 전자공학과 박사과정  
 1992년 8월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성연구그룹 선임연구원

[주 관심분야] 위성 중계기, 위성 안테나, 위성용 중계기 부품

엄 인 복



1990년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
 2004년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성연구그룹 선임연구원

1992년 9월~1995년 5월: 무궁화위성 현장교육 참여(영국 Matra Marconi사 등)

[주 관심분야] 위성 중계기, 위성 안테나, 위성 중계기 부품

박 상 준



1996년 2월: 조선대학교 정밀기계공학과 (공학사)  
 1997년 10월~2004년 3월: (주)텔웨이브 무선기술사업부 과장  
 2004년 3월~현재: (주)링스웨이브 부설연구소 선임연구원

[주 관심분야] 우주항공용 RF 부품

및 모듈

박 중 흥



1982년 2월: 한양대학교 기계공학과 (공학석사)  
 1997년 8월: 한양대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)  
 1982년 3월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성 RF기술연구팀장

1992년 9월~1995년 5월: 무궁화위성현장교육 참여(영국 Matra Marconi사 등)  
 [주 관심분야] 위성통신, 위성 안테나, 위성 중계기