

TE 모드 공통 결합 구조 기반 도파관 멀티플렉서 설계

최진우
승실대학교

chlwlsdn111@naver.com

A Design of Waveguide Multiplexer based on TE Mode Common Coupling Structure

Choi Jin Woo
Soongsil Univ.

요약

본 논문에서는 TE(Transverse Electric) 모드 공통 결합 구조를 적용하여 도파관 멀티플렉서를 설계하는 방법을 제안한다. 기존 매니폴드를 통해 도파관 멀티플렉서를 설계하는 방식은 파장과 위상에 따라 일정 거리를 이격시켜 필터를 배치해야 하여 물리적 길이에서 발생하는 전송손실이 필연적이었으며, 구조적으로 소형화가 힘든 단점이 있었다. 제안하는 방식을 통해 전송 손실이 개선됨을 확인하였으며 동일 규격의 매니폴드 멀티플렉서 대비 소형화가 이뤄질 수 있음을 시뮬레이션과 실제 제작을 통해 검증하였다.

I. 서론

최근 무선통신 시장은 지상 이동통신을 넘어 저궤도 군집 위성을 활용한 비저지상 네트워크까지 확장되고 있다. [1] 저궤도 군집 위성은 높은 주파수가 갖는 특징인 음영지역에 대한 문제점을 효과적으로 개선할 수 있으며 근거리에서 통신하기 때문에 정지궤도 위성과 비교하여 지연 시간 또한 짧다. [2] 이러한 장점들로 인해 저궤도 위성을 활용한 통신은 6G의 핵심기술이 될 것이라 전망되고 있다. 저궤도 위성 통신 시스템에서 통신위성은 높은 이득의 안테나를 비롯하여 낮은 전송 손실, 소형화, 경량화된 통신 부품 사용을 지향한다. [3] 그러나 기존 대부분의 위성에 탑재된 통신 부품인 매니폴드 타입 도파관 멀티플렉서는 불필요하게 긴 중심 전송 선로에서 많은 전송 손실이 발생한다. [4] 또한 다단 T 접합의 기본 구성 원리를 사용함에 따라 필터가 직렬로 배치되어야 하며, 도파관의 형상 및 파장에 따라 일정 간격을 유지한 채 자계가 형성되고 이에 수직 방향으로 전계가 형성되는 TM(Transverse Magnetic) 모드의 특성으로 필터를 일정 거리만큼 이격시켜 배치해야 하여 소형화 및 경량화가 어렵다. [5] 이러한 단점에도 불구하고 매니폴드 결합 방식은 높은 주파수 확장성과 다수의 사용 사례를 통한 통신 시스템 안정성 보장의 이유로 기존 저궤도 위성 통신 시스템에서 주로 사용이 되어 왔다. [6]

본 논문에서는 상기 단점을 개선한 TE 모드 공통 결합 방식을 적용한 도파관 멀티플렉서를 제안한다. TE 모드는 도파관의 수직방향으로 자계가 형성되며 형성된 자계 사이에 전계가 평행하게 발생한다. TE 모드 공통 결합 방식은 본래 낮은 주파수에서 유전체 공진기를 와이어를 통해 결합시키는 방식에서 PIMD(Passive Inter Modulation Distortion)를 감소시키기 위해 와이어를 배제하고 공용 폴을 사용하는 방식으로 사용되었으며 [7]

본 논문에서는 이를 응용하여 도파관 멀티플렉서를 구현하는 방법을 제시한다. 제안하는 멀티플렉서는 파장에 따라 필터 간 거리를 이격시킬 필요가 없어 공통의 구조로부터 초단 공진기를 자유롭게 배치할 수 있고 이를 통해 Notch 또한 구현이 가능하다. [8] 이후 결합된 필터는 밴딩 형태로 배치하여 추가로 소형화 하였다. [9] 본 논문에서는 Ka-Band의 주파수를 목표로 멀티플렉서를 구현하였으나 추후 기타 대역의 도파관 멀티플렉서에서도 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문의 2 장에는 제안하는 멀티플렉서의 설계 이론 및 세부 설계를 제시한다. 3 장에는 구현된 멀티플렉서의 성능을 측정하고 이를 기존 매니폴드 방식의 멀티플렉서와 비교하고, 4 장에서 결론을 제시한다.

II. 제안 멀티플렉서 설계

2.1 공통 결합 구조 도파관 멀티플렉서 이론

제안하는 공통 구조 결합 도파관 멀티플렉서는 그림 1 과 같이 S_T 에 해당하는 부분이 각 필터 초단 공진기의 공통 구조로써 동작하며 그림 1의 $l_{junc(1)}$, $l_{junc(2)}$, $l_{junc(3)}$ 이 공통 구조와 각 필터의 첫 번째 공진기 사이 아이리스에 해당한다.

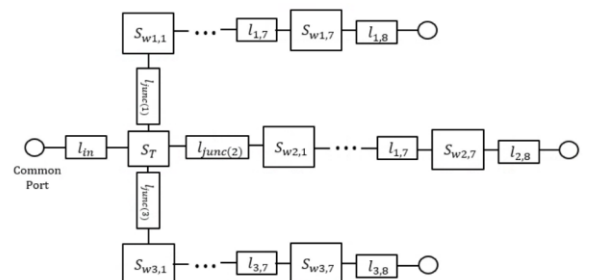


그림 1. 공통 결합 구조 도파관 멀티플렉서 블록도

$S_{w(1,1)}, S_{w(2,1)}, S_{w(3,1)}$ 는 각 필터의 차단 공진기에 해당하며 이들의 그룹 딜레이는 3D EM(Electro Magnetic) 시뮬레이션을 통해 확인하고 각 필터에서 요구하는 값으로 매칭시킨다. 이렇게 구현된 구조는 매니폴드 메인 전송선로의 TM 모드 필드 구조와는 달리 TE 모드 필드 구조를 가지며 공통 구조를 기준으로 필드가 분산됨에 따라 공진기를 직렬로 배치하지 않아도 된다.

2.2 공통 결합 구조 도파관 멀티플렉서 설계

본 논문에서 구현하고자 하는 각 필터의 대역은 Path1 (26.6~27.2[GHz]), Path2 (27.4~28.0[GHz]), Path3(28.2~28.8[GHz])으로 각각 600[MHz]의 대역폭을 가진다. 해당 대역은 Ka-Band 로 WR28 규격 Adaptor 사용에 적합한 주파수이다. 따라서 해당 규격에 적합한 도파관의 사이즈를 고정 변수로 하여 블록도에 맞는 초기 형상을 구현한다. 이때 각 공진기는 단일 공진 모드 시뮬레이션을 통해 3 개 대역의 중심 주파수를 구현하도록 설계한다. 이후, 가공 가능한 최소 곡률을 고려하고 각 공진기의 위치와 아이리스의 면적을 주요 가변 변수로 지정하여 그룹 딜레이 매칭을 시도한다. 결과적으로 그림 2 와 같이 1.1~1.4[ns]의 그룹 딜레이를 갖는 구조를 구현하였다.

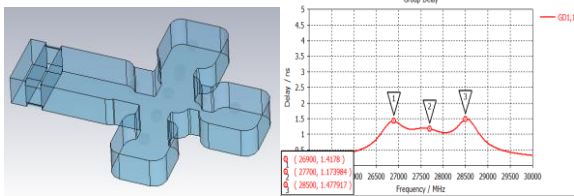


그림 2. (좌) 공통 결합구조, (우) 그룹 딜레이 매칭 결과

멀티플렉서의 설계는 설계된 공통 결합 구조를 기초로 각 차단 공진기에 밴딩 형태의 Band Pass Filter 를 이어 붙여 완성한다. 위 과정과 마찬가지로 단일 공진 모드 시뮬레이션을 통해 각 Path 의 중심 주파수에 해당하는 공진 구조를 구현하고 이를 그림 3 과 같이 소형화 컨셉에 맞게 배치한다. 이후, 아이리스 및 공진 구조의 크기를 가변 변수로 하여 목표하는 주파수 대역을 형성한다.

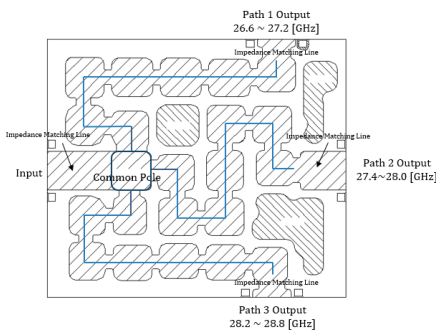


그림 3. Ka Band Triplexer 평면도 (WR28 규격)

III. 실험 결과

본 논문에서는 그림 4 와 같이 성능 측정을 위해 2 포트 계측기가 사용되었으며, 사용하지 않는 포트는 Termination 을 하여 각 출력 포트를 개별로 측정하였다.

또한 제작 공차를 감안하여 튜닝 포인트를 각 공진 구조와 아이리스의 중심에 배치하였다.

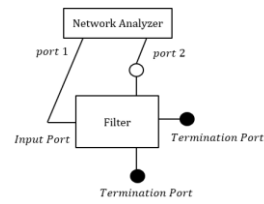


그림 4. 측정 블록 다이어그램

제안하는 설계 방식으로 구현한 멀티플렉서는 사용 대역 내에서 삽입손실 1.12[dB] 이하, 반사 손실 약 20[dB] 이하, 포트 격리도는 28.8[dB] 이하로 측정되었다. 삽입손실과 반사손실은 매니폴드 멀티플렉서 보다 상대적으로 우수함을 확인할 수 있으나 포트 격리도에 대한 특성은 기존 매니폴드 방식 대비 각 필터부가 상대적으로 가깝게 위치하여 다소 떨어짐을 확인할 수 있다.[10]

표 1. 제안하는 방식과 기존 방식의 특성 비교

Common Coupling Mux (n=7)

Pass Band Frequency Range	Insertion Loss	Return Loss	Port Isolation	
Path 1	26.6 ~ 27.2 [GHz]	1.10 [dB]	20.53 [dB]	28.80 [dB]
Path 2	27.4 ~ 28.0 [GHz]	0.95 [dB]	20.34 [dB]	35.12 [dB]
Path 3	28.2 ~ 28.8 [GHz]	1.12 [dB]	20.17 [dB]	36.39 [dB]

Manifold Mux (n=7)

Pass Band Frequency Range	Insertion Loss	Return Loss	Port Isolation	
Path 1	26.6 ~ 27.2 [GHz]	1.18 [dB]	20.74 [dB]	37.23 [dB]
Path 2	27.4 ~ 28.0 [GHz]	1.20 [dB]	17.85 [dB]	37.49 [dB]
Path 2	27.4 ~ 28.0 [GHz]	1.19 [dB]	18.85 [dB]	36.61 [dB]

두 멀티플렉서의 기구적 특성은 그림 5 와 같다. 본 논문에서 제안한 공통 결합 구조 멀티플렉서는 9,363.09[mm³]의 체적을 가지며 매니폴드 방식으로 설계된 멀티플렉서는 직사각형 기준 27,281.06[mm³] 체적을 가진다. 비교 군인 매니폴드 멀티플렉서는 각 Filter 부가 양방향으로 설계되었으며 단방향으로 설계 시 위상과 실제 제작을 고려하면 약 22,000[mm³]의 체적을 가진다.

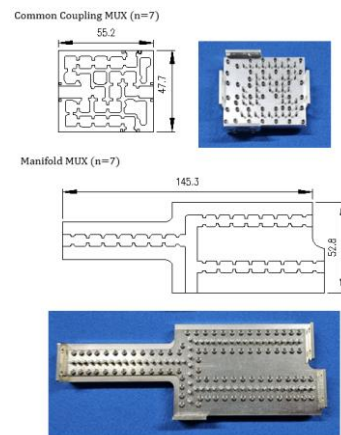


그림 5. 제안하는 멀티플렉서와 매니폴드 멀티플렉서 크기 비교

IV. 결론

본 논문에서는 공통 결합 구조와 밴딩 구조의 필터를 Ka-Band 에서 동작하는 멀티플렉서에 적용하였다. 그 결과 전송선로에서 발생하는 손실이 8~20%가량 개선되었으며 동일한 규격의 멀티플렉서 대비 1/2 에서 1/3 까지 소형화가 이뤄질 수 있음을 확인하였다. 비록, 포트 격리도 특성이 매니폴드 방식 대비 좋지 않지만 크로스 커플링 구현에 적합한 밴딩 형태의 필터는 격리도를 위한 Notch 구현이 용이하므로 쉽게 개선 가능한 사항이라고 사료된다.

제안하는 공통 결합 구조는 필터를 자유롭게 결합시킴으로써 설계자로 하여금 다양한 도파관 멀티플렉서를 설계할 수 있도록 하였다. 추후, Air 를 유전체로써 사용하는 도파관 멀티플렉서 뿐만 아닌 PCB 로 구현한 Interdigital 구조, 전력 분배기 구조에서도 통용될 수 있어 향후 무선 통신 부품 설계를 보다 다양한 관점에서 시도할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2023 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 글로벌 통신사업자 5G RF Component 개발을 목표로하며 소재 부품 기술 개발사업(141580216)의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 정해식, “저궤도(LEO) 위성통신산업 진화방향성 탐색”, 한국통신학회 하계종합학술발표회, June 2023.
- [2] H. S. Cha, “A Survey on Inter-Satellite Links for Low-Earth Orbit Satellite Networks”, The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 47, No. 10, pp. 1508-1518, Oct. 2022.
- [3] 조정현, 이예진, 장지연, 서예준, 이호섭, “독창성, 혁신성을 갖춘 저궤도 위성탑재 RF 부품 RRC 안테나 기술”, 한국통신학회 하계종합학술대회, June. 2022.
- [4] 박경식, “밀리미터용 도파관의 기하학적 오차가 전송특성에 미치는 영향”, 영남대학교 석사학위논문, Dec. 2013.
- [5] Y. Feng and B. Zhang, “A 200-225-GHz Manifold-Coupled Multiplexer Utilizing Metal Waveguides”, IEEE Transactions on Microwave theory and techniques, Vol. 69, No. 12, pp. 5327-5333, Dec. 2021.
- [6] J. W. Holloway, “220-to-330-GHz Manifold Triplexer with Wide Stopband Utilizing Ridged Substrate Integrated Waveguides”, IEEE Transactions on Microwave theory and techniques, Vol. 68, No. 8, pp. 3428-3438, Aug. 2020.
- [7] 김진면, “서로 다른 주파수 결합시 상호간섭을 최소화하기 위해 공용 폴 설계를 적용한 대역결합장치”, KR 10-2015-0039934, 대한민국특허청, Mar. 2015.
- [8] J. A. Ruiz-Cruz, C. Wang, and A. Zaki “Advances in Microwave Filter Design Techniques”, Microwave Journal, Vol. 51, No. 11, pp. 26-44, Nov. 2008
- [9] C. Carceller, P. Soto, V. Boria, and M. Guglielmi “Design of Compact Wideband Manifold-Coupled Multiplexers”, IEEE Transactions on Microwave theory and techniques, Vol. 63, No. 10, pp. 3398-3407, Oct. 2015.
- [10] I. Bae, “Waveguide Power Combiner Using E-Plane Signal Transition Structure and Resistive Septum for W-Band