

요 약

위성 통신의 수요가 증가하고 있고, 무궁화 위성 등 우리 위성이 발사되면서 위성 탑재체의 국내 개발이 꾸준히 진행되고 있다. 위성 탑재체의 채널 성능은 채널 필터와 입출력 멀티플렉서의 주파수 특성에 의해 크게 좌우된다. 이 글에서는 채널 필터와 멀티플렉서의 구성과 설계에서의 고려 사항에 대해 검토하겠다. 채널 필터를 포함하는 멀티플렉서는 전기적 설계뿐만 아니라 기계적, 열적 설계에서도 까다로운 사양을 요구하고 있다. 채널필터는 소형 경량화의 요구에 따라 주로 이중 모드(dual mode) 필터로 설계되고 있고, 최근에는 HTS 필터에 의한 설계도 시도되고 있다. 입력 멀티플렉서는 채널 사이의 간섭을 방지하기 위해 써큘레이터를 이용하여 구성하고, 출력 멀티플렉서는 손실을 최소화하기 위하여 매니폴드(manifold)를 이용하여 채널필터를 결합한다. 이 글은 Kunes와 Kudsia의 논문을 주로 참조하였다^{[1],[2]}.

I. 서 론

통신위성의 발전은 1960년대 Intelsat I, II, III의 발사에서 시작되었다고 할 수 있다. 1971년에 발사된 Intelsat IV는 위성 통신의 상업적 이용 가능성을 열었다. 1990년대에는 글로벌스타, 이리듐 프로젝트와 같은 저궤도(LEO) 위성을 이용한 이동통신 사업이 시작되었다. 국내에서는 1995년 무궁화 1호 위성이 발사된 이래 위성 통신에 대한 연구 개발이 지속

되어 2006년에는 상업·군사위성인 무궁화5호가 발사될 예정이고, 위성 탑재체의 국내 개발도 꾸준히 진행되어 많은 성과를 얻고 있다.

통신 위성 시스템에서 주파수 스펙트럼의 할당은 최우선의 과제이다. HPA나 TWTA와 같은 전력 증폭기의 비선형성 때문에 할당된 주파수 대역을 몇 개의 채널로 나누는 채널화가 필요하다. 모든 위성 탑재체는 대역을 한정하고 채널을 분리하거나 결합하기 위해 그리고 외부 전파원이나 인접채널의 간섭을 제거하기 위해 많은 수의 채널필터와 멀티플렉서를 요구한다. 방송용 위성은 20에서 100채널을 갖기도 한다. 입력 멀티플렉서(IMUX)는 2~8채널의 디멀티플렉서 블록으로 배열되고 출력 멀티플렉서(OMUX)는 4~16채널의 멀티플렉서 블록으로 구성된다. 위성 탑재체는 수신안테나, 광대역 필터, 수신기, 입력 멀티플렉서, 스위칭 회로, 고출력 증폭기, 출력 멀티플렉서, 송신안테나로 구성된다. 안테나, 광대역 필터, 수신기, 스위칭 회로, 고출력 증폭기는 비교적 쉽게 광대역 특성을 구현할 수 있어, 채널 특성에 큰 영향을 미치지 않는다. 입출력 멀티플렉서를 구성하는 채널 필터는 3% 이하의 상대적으로 좁은 대역폭을 갖고 있어 전체 채널 성능을 좌우한다. 따라서, 위성 탑재체의 설계에서 멀티플렉서 특성의 최적화와 소형, 경량화에 많은 노력을 기울이고 있다. 이런 이유로 통신위성용 마이크로파 필터 및 멀티플렉서 기술은 지난 40년간 많은 발전을 이루었다.

위성 탑재체의 필터와 멀티플렉서는 위성의 수명, 발사 비용 등의 이유 때문에 무게와 크기의 제

한을 받게 된다. 무게를 줄이기 위한 방법으로 Invar, GFRP(graphite fiber reinforced plastic) 등의 소재를 사용하였다. 1970년 Williams에 의해 제시된 이중모드 필터^[3]는 하나의 물리적 공진기에서 2개의 공진 모드를 형성시켜 고성능의 타원함수 필터를 구현함으로써 채널 필터를 소형화하는데 중요한 전기를 마련했다. 이후 유전체 공진기를 이용한 이중 모드 필터가 제시되었고^[4], 최근에는 HTS 필터를 멀티플렉서에 적용하기 위한 연구도 진행되고 있다^{[5][6]}.

II. 위성 탑재체의 구성

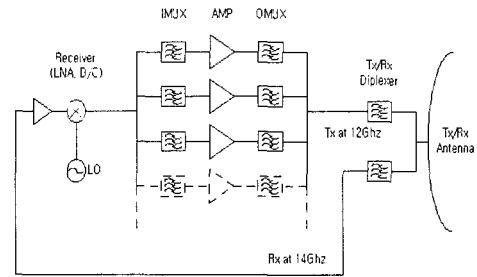
2-1 동작원리

위성 탑재체는 궤도 위성을 통해 신호를 증계하여 수평선 너머 통신하고자 하는 의도에 의해 시작되었다. 변복조, 기저대역 신호처리가 없고 송수신 안테나를 같이 사용하는 대표적인 위성 탑재체의 간단한 구성도는 [그림 1]과 같다. 실제의 탑재체 구성은 많은 기능이 중복되어 있고, 이상이 생겼을 때 중복된 장치를 연결하기 위한 복잡한 스위치 배열 갖는다.

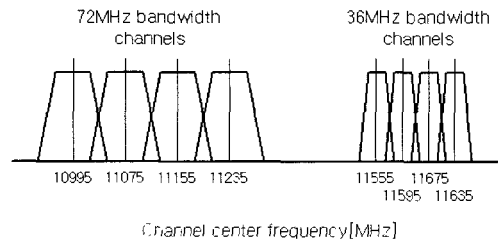
[그림 2]는 Ku 대역 위성의 채널 주파수 할당의 예이다. 여기서는 복합 대역폭, 채널 간격이 매우 좁은 인접(contiguous) 채널, 큰 폭으로 분리된 채널 बैं크를 보여준다. 이런 특성은 일반적인 요구사항이 되었고 특히 OMUX 설계에 있어 요구되고 있다. 초기의 OMUX는 비인접(noncontiguous) 채널로 구성되었고 동일한 대역폭과 고정된 채널 간격을 갖고 있었다.

2-2 증폭과 주파수 변환

입출력 사이에서 120 dB 정도의 증폭이 요구되고 그래야 지상국 수신기가 적절한 S/N비를 만족시킬 수 있다. 수 pW의 수신 신호와 수백 W의 송신



[그림 1] 위성 탑재체의 개략적인 구성도

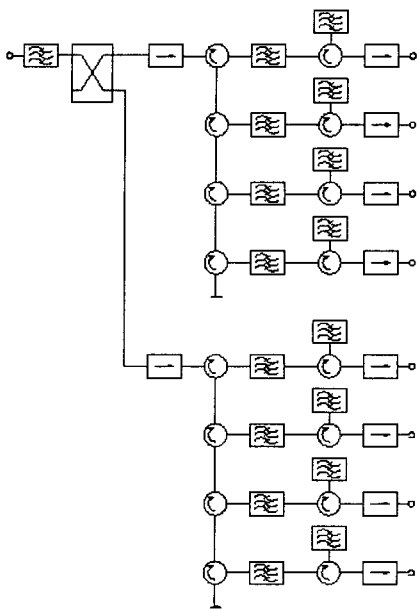


[그림 2] 채널 주파수 할당

신호의 간섭을 없애기 위해 송수신 주파수가 분리되어 있다. [그림 1]의 예는 14 GHz의 수신 신호를 고출력 증폭과 재전송에 앞서 12 GHz로 변환시킨다.

2-3 입력 멀티플렉서(IMUX)

위성에서 출력 효율을 최대화하기 위해서는 증폭기를 포화 영역 근방에서 동작시켜야 한다. 이는 비선형 특성의 동작을 야기하므로 채널 사이의 혼변조를 방지하기 위해 입력 멀티플렉서를 이용하여 채널 신호를 주파수축 상에서 분리하고 개별적으로 증폭한다. IMUX는 신호의 왜곡 없이 인접한 채널을 분리하는 매우 복잡한 필터 조합으로 구성된다. 수신 신호는 먼저 하이브리드 커플러에 의해 분리된 후 채널 사이의 간섭을 방지하기 위해 싸플레이터를 거쳐 IMUX 채널 필터에 결합된다. 채널 드로핑(dropping) 테크닉으로 알려진 이 방법은 [그림 3]

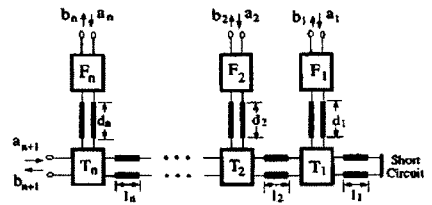


[그림 3] 채널 드로핑 멀티플렉서

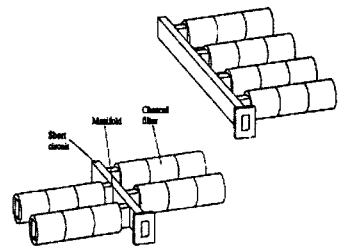
에서 보여주고 있다. 필요에 따라 추가적인 커플러가 채널 균지연 등화기(equalizer)를 포함하는데 사용되고 아이솔레이터는 출력에서 광대역의 임피던스 정합을 얻기 위해 사용된다.

2-4 출력 멀티플렉서(OMUX)

채널신호는 IMUX에서 분리된 후 몇 단계의 증폭을 거치고 출력 멀티플렉서에서 다시 결합되어 안테나 시스템으로 보내진다. OOMUX 채널필터는 IMUX 필터보다 덜 복잡하지만 손실을 최소화하기 위해 도파관 매니폴드(manifold)로 결합된다. 채널 사이의 영향이 크게 나타나고 5단 필터로 된 13 채널 OOMUX는 회로망의 관점에서는 T-접합의 회로 모델을 제외하고도 14 포트의 65단의 회로가 된다. 복잡한 설계와 튜닝 절차가 채널 필터 사이에서 발생하는 상호작용을 조절하기 위해 필요하다. [그림 4]는 매니폴드 멀티플렉서의 구성도와 원형 cavity를 채널필터에 사용한 구조를 보여주고 있다.



(a)



(b)

[그림 4] 매니폴드 멀티플렉서

지난 수년간의 위성 탑재체 OOMUX 개발 경험은 채널 수가 증가하고, 큰 출력을 요구하고 있다. 대표적인 OOMUX의 경우, 각 120 W 이상의 12~16 채널로 구성되어 있다. 따라서 손실과 PIM에 의한 신호 왜곡을 최소화하고 진공의 고출력 상태에서 발생할 수 있는 RF 항복 현상인 multipaction을 방지하는 것이 강조되고 있다.

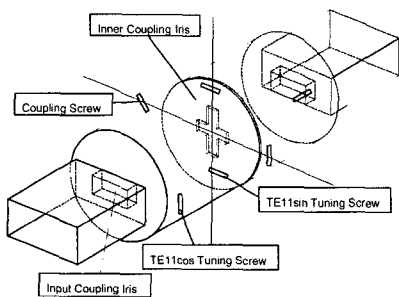
Ⅲ. 채널 필터

3-1 이중 모드(Dual mode) 필터

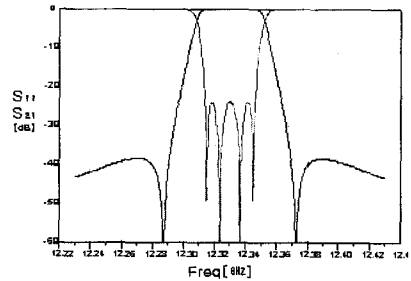
마이크로파 공진기는 도파관과 같이 높은 전기 전도도의 도체로 일정한 공간을 형성하여 만들 수 있다. 여기에는 무한한 전자계 모드가 형성된다. 1951년 Lin은 하나의 공진기에서 동일한 공진 주파수를 갖는 축퇴(degenerate) 모드를 이용하는 다중모드 필터를 제안하였다⁷⁾. 1969년 이후 COMSAT에서는 이중 모드 필터에 대한 연구 결과를 발표하고,

설계이론을 제시하였다^{[3],[8]}. 이중 모드 도파관 필터의 설계는 Atia와 William 등의 논문에서 기술한 방법에 기초하고 있다^{[9]~[11]}.

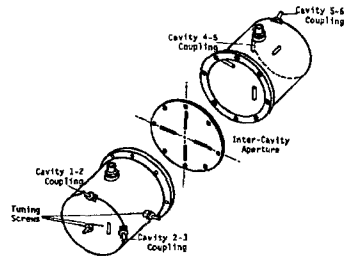
전형적인 이중모드 필터는 [그림 5]에서와 같이 원형 도파관으로 구현된다. 정방향 도파관이나 원형 도파관은 대칭성을 가지므로 수직, 수평의 두 방향 최저차 모드를 갖는다. 따라서 하나의 cavity에서 2개의 공진기를 만들 수 있다. 두 모드 사이의 45° 위치에서 결합 스크류로 결합량을 조절한다. cavity와 cavity 사이의 십자형 iris가 각 공진 모드 사이의 결합량을 조절한다. 그러나 구형 도파관 필터와 비교할 때, 넓은 대역에서 많은 스푸리어스(spurious) 모드가 발생하여 설계를 복잡하게 한다. 이중모드 필터는 인접하지 않는 공진기 사이의 결합(cross coupling)을 만들어 줌으로써 전달 함수의 영점(transmission zero)을 만들어 타원(elliptic), 유사 타원(quasi-elliptic), 선형 위상(linear phase) 응답특성을 갖는 필터를 구현할 수 있다. 따라서, 채널 특성을 최적화시킬 수 있어 주파수 사용 효율을 증가시키고, 중량을 줄일 수 있다. 이중 모드 필터의 결합 행렬(coupling matrix)과 공진기 배열은 입출력 포트를 필터의 한 쪽 끝에 두는 canonical 구조, 입출력 포트를 양 끝단에 두는 in-line 구조로 구분된다. 각 경우의 결합 행렬은 회로망 합성이나 최적화를 통해 구할 수 있다.



[그림 5] 이중 모드 필터



[그림 6] 이중 모드 필터 주파수 특성

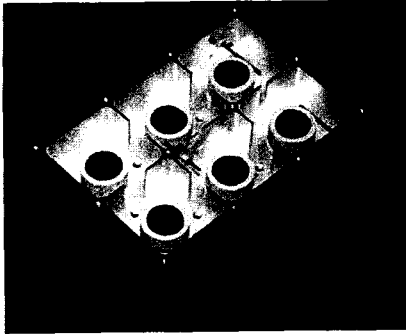


[그림 7] 3중 모드 필터

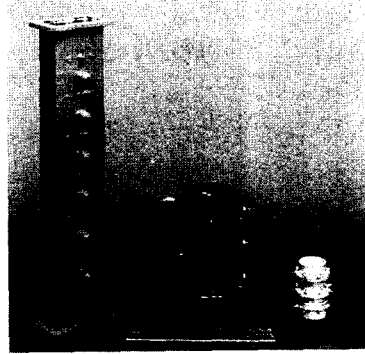
지난 수년간 Ku 대역의 IMUX의 설계에서 [그림 5]에서 보여주는 TE113 모드를 사용하는 원형 도파관 이중 모드 필터가 널리 사용되고 있다. TE113 이중 모드 필터는 높은 Q 값과 소형화에 대한 요구, 우수한 spurious 특성에 대한 요구를 적절히 만족시키고 있다. [그림 6]은 Ku 대역의 TE113 이중모드 필터 주파수 특성을 보여주고 있다. 중량과 부피를 더 줄이기 위해 3중(triple) 모드, 4중(quaduple) 모드 필터가 제시되었다^{[12],[13]}. 이 경우, 복수의 공진 모드사이의 결합량과 cavity 사이의 결합량을 조절하는 것은 더욱 복잡한 문제가 된다. [그림 7]은 3중 모드 필터의 구조와 결합 iris, 결합 스크류를 보여주고 있다.

3-2 유전체 공진기(Dielectric resonator) 필터

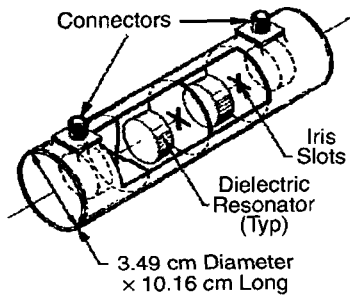
높은 유전율의 유전체 공진기를 사용하면 기존의



[그림 8] 유전체 공진기 필터



[그림 10] 채널 필터의 크기 비교



[그림 9] 이중모드 유전체 공진기 필터

도파관 필터와 비교하여 매우 작은 크기와 중량의 필터를 만들 수 있다. 위성 탑재체에서 사용할 수 있는 높은 Q와 온도 안정성, 고유전율의 유전체 공진기를 채널 필터에 적용하기 시작한 것은 1970년대 후반이다. 감쇠 모드(*evanescent mode*) 도파관에 유전체 공진기를 삽입한 구조로 만들어지고, [그림 8]과 같이 공진기의 배열을 조정하여 비근접 공진기 사이의 결합을 만들어 타원 함수 필터를 만들 수 있다.

1982년 Fiedziuszko에 의해 [그림 9]의 C 대역 이중모드 유전체 공진기 필터가 제안되었다^[2]. 8단의 C 대역 필터의 무게가 80 g으로 Invar 필터의 18~25%, GFRP 필터의 20~30% 정도이었다. 기존의 이중 모드 필터와 거의 동등한 성능을 갖고, 크기를

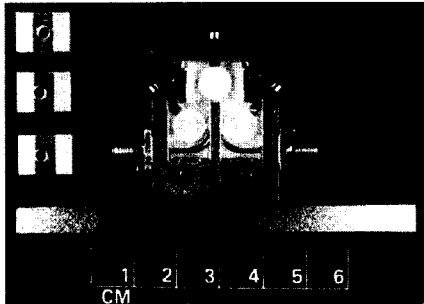
줄일 수 있어서 많은 위성 탑재체에 채용되었다.

[그림 10]에서는 구형 도파관 필터와 이중모드 cavity 필터, 이중모드 DR 필터의 크기를 비교하고 있다. 이중모드 DR 필터는 구형 도파관 필터보다 중량을 1/5 이하, 부피는 1/20 이하로 감소시켰다. 필터 통과대역 특성과 더불어 중요하게 고려해야 될 것은 온도 특성이다. 대부분의 전자계가 DR에 집중되기 때문에 필터의 온도 특성은 유전체의 특성에 의해 결정된다. 요구되는 온도 팽창 계수(TCE)는 1 ppm/°C 정도이다.

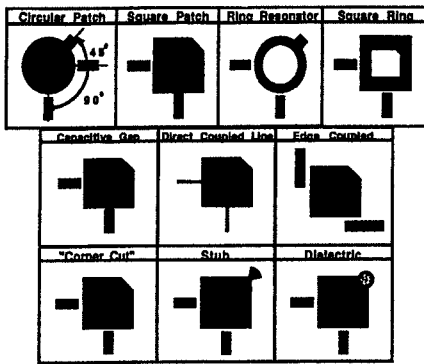
3-3 HTS 필터

최근의 HTS(*high-temperature superconductor*) 기술의 발전에 따라 소형, 경량화가 요구되는 위성 탑재체에 HTS 필터를 적용하고 있다. 무게와 크기를 1/10 정도로 줄일 수 있지만 부가적인 극저온 냉각기(*cryocooler*)를 필요로 한다. HTS는 도체손실을 제거할 수 있어 유전체 공진기 필터에 적용되었다. 유전체 공진기 필터의 도체 벽을 HTS로 만들면 유전체와 직접 접촉하더라도 공진기의 높은 Q를 유지하며 소형화할 수 있게 한다. [그림 11]은 3단의 하이브리드 DR/HTS 필터로 20,000 이상의 공진기 Q를 얻을 수 있다^[14].

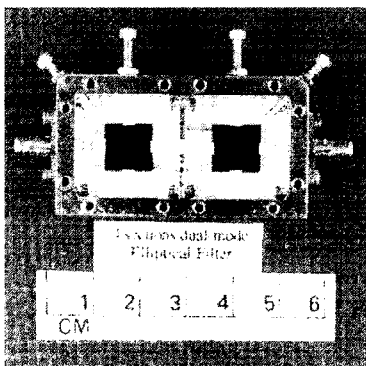
1994년 Mansour가 단일 모드, 이중 모드로 동작



[그림 11] 하이브리드 DR/HTS 필터



[그림 12] 이중모드 평면형 공진기



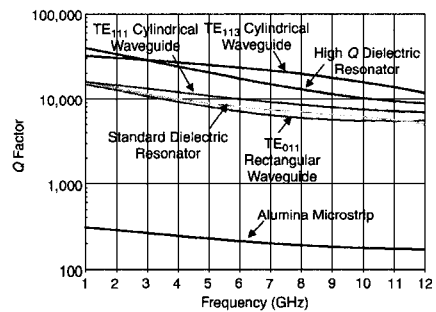
[그림 13] 이중모드 평면형 HTS 필터

하는 평면형 박막 HTS 필터를 멀티플렉서 설계에 적용한^[15] 이후, [그림 12]와 같은 다양한 형태의 이중모드 박막 HTS 공진기가 제시되었다. [그림 13]

은 제작된 4단 이중모드 타원함수 필터이다^[16].

IV. 멀티플렉서

Ku 대역 IMUX와 OMUX의 대표적인 설계 사양은 <표 1>과 같다. IMUX와 OMUX에 대해 모두 12,000 이상의 높은 Q값이 요구되고, 그렇지 않으면 통과대역에서 주파수에 대한 삽입손실의 변화가 요구사항을 벗어나게 된다. 높은 Q에 대한 요구에 의해 LC, 스트립라인, suspended substrate와 동축선 기술과 같은 수백 정도의 Q를 갖는 많은 기술은 적용이 불가능하고, 수천 이상의 Q를 갖는 도파관이나 유전체 공진기 기술이 채용되고 있다. [그림 14]는 입출력 멀티플렉서에 사용이 가능한 다양한 마이크로파 공진기의 Q를 보여주고 있다^[14].



[그림 14] 마이크로파 공진기의 Q

<표 1> Ku 대역 입출력 멀티플렉서 설계 사양의 예

항 목	IMUX	OMUX
주파수 대역	12 GHz	12 GHz
채널 대역폭	54 MHz	54 MHz
삽입손실	11 dB	0.45 dB
리플($f_0 \pm 27$ MHz)	< 0.75 dB	< 1.1 dB
군지연($f_0 \pm 27$ MHz)	< 15 ns	< 45 ns
저지대역 감쇠($f_0 \pm 36$ MHz)	> 35 dB	> 25 dB
출력	-	120 W/채널

4-1 IMUX 설계

가용 주파수 대역폭을 최대한 효율적으로 사용하기 위해 시스템 설계자는 <표 1>에서와 같이 매우 빠듯한 사양을 IMUX 채널 필터에 요구한다. 매우 날카로운 감쇠 특성이 요구되고, 각 채널은 최대한 가깝게 설정되지만 신호의 왜곡을 방지하기 위해 대역 내에서의 특성은 충분히 유지되어야 한다. IMUX는 LNA의 다음 단계에 연결되기 때문에 OMUX에서와는 달리 삽입손실의 절대값이 중요한 요소는 아니지만 통과대역 내의 삽입손실을 가능한 평탄하게 유지하기 위해 높은 Q값이 요구된다. 낮은 Q값은 통과대역 끝의 삽입손실 특성을 둥글게 만든다.

<표 1>의 IMUX 사양을 만족시키기 위해서는 유한한 주파수에서 전달 영점을 갖는 10단의 self-equalized 필터가 요구된다. 이는 5개의 cavity로 된 이중 모드 필터로 구현할 수 있다. 각 cavity는 2개의 공진 모드를 형성한다. 전달 영점을 만드는데 필요한 신호의 상쇄를 위해 인접하지 않는 공진기 사이의 결합을 가질 수 있게 배열한다.

IMUX는 큰 출력 레벨을 요구하지 않기 때문에 높은 Q를 갖고 크기를 더 소형화 할 수 있는 이중 모드 DR 필터를 많이 사용하고 있다. 최근의 손실이 적고 주파수 안정도가 뛰어난 고유전율($\epsilon_r \approx 30$)의 유전체 개발은 유전체 공진기 필터를 더욱 작고 가볍게 만들 수 있게 한다. [그림 15]는 $TE_{01\delta}$ 모드로 동작하는 유전체 공진기를 사용한 9채널 IMUX를 보여 주고 있다. 여기서 δ 는 1보다 작은 값으로 공진 시에 1/2 파장 이하의 전자계 변화를 표현한다. 이중모드 도파관 필터에서와 달리 물리적인 공진기가 전기적 공진의 숫자와 같더라도 이 멀티플렉서의 크기는 동등한 특성의 도파관 IMUX의 1/4 보다 작다. 이 경우에도 전달 영점을 만들기 위해 다중 결합이 가능하게 공진기를 배열한다.



[그림 15] 9 채널 IMUX

4-2 OMUX 설계

채널 드로핑 멀티플렉서가 각 채널 사이의 간섭을 제거할 수는 있어도, 삽입손실과 증량, 부피가 크고 사용 전력 레벨이 낮아 OMUX에는 적당하지 않다. 출력 멀티플렉서는 제한된 DC 전력으로 최적의 효율을 얻기 위해 가능한 낮은 삽입손실을 요구하고, 채널 증폭기 출력단의 높은 전력 레벨을 감당할 수 있어야 하며, 위성 탑재체의 발사비용을 줄이기 위해서 소형, 경량화가 요구된다. 따라서 하이브리드 커플러나 써큘레이터와 채널 필터로 구성된 채널 드로핑 멀티플렉서는 이런 설계 목표에는 적절하지 않고 매니폴드 멀티플렉서가 OMUX 설계에 많이 적용되고 있다.

OMUX은 증폭된 채널 신호를 재결합하는데 사용된다. 여기서의 탑재체 출력 레벨은 100 W 이상으로 손실을 최소로 유지해야 한다. 지난 수십 년에 걸쳐 OMUX의 크기를 줄이기 위해 많은 시도가 이루어 졌다. 3중, 4중 모드 공진기에 대한 실험이 이루어졌으나, 현재 Ku 대역 OMUX에 가장 널리 사용되고 있는 필터는 E-면 혹은 H-면 T-결합을 갖는 구형 도파관 매니폴드로 결합되는 TE_{113} 이중 모드 필터이다. Q값 13,500 정도는 쉽게 얻을 수 있고 12 GHz에서 54 MHz 대역폭의 채널 필터의 경우 0.5 dB 정도의 삽입손실을 얻을 수 있다. <표 1>의 사양을 만족시키기 위해서는 유한 주파수에서 전달 영

점을 갖도록 배열된 3개의 물리적 공진기를 갖는 6단의 이중 모드 필터가 요구된다.

[그림 16]은 Ku 대역 12채널 OMUX의 설계 결과를 보여 준다. 안쪽의 채널 필터에서 바깥쪽의 채널 필터보다 간섭을 줄이기 위한 감쇠 특성이 더 크게 설계된 것을 볼 수 있다. [그림 17]은 제작된 OMUX의 외형이다.

4-2-1 최적화 설계

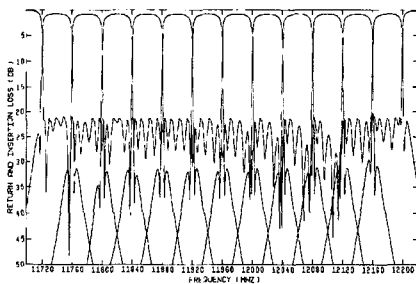
매니폴드 멀티플렉서는 매우 복잡한 구조를 갖는다. 예를 들어 6단 타원함수 필터를 사용하는 10 채널 멀티플렉서는 170개의 등가회로 패러미터를 120개의 주파수에 대해 최적화해야 한다. 단일 모드 도파관 필터의 경우 모드 정합법을 멀티플렉서 설계에 적용할 수 있다. 그러나 구조를 나타내는 치수가 너무 많아 등가회로 모델에 비해 더 많은 계산 시간

을 소모한다. 다중모드 도파관 필터의 경우 FEM에 의해 해석할 수 있으나, 최적화에 의한 설계가 불가능하다.

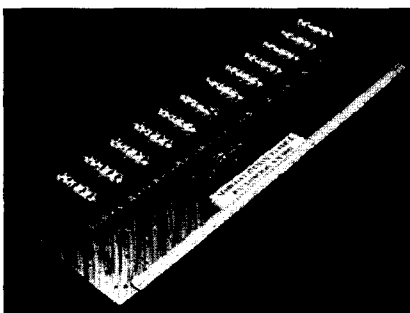
따라서 송신 대역 20 % 이내에서 2 % 이하의 채널 폭을 갖는 필터를 결합하는 매니폴드 멀티플렉서의 경우, 각 채널 필터를 등가 회로 모델로 모델링하고, 매니폴드는 전자계 모델을 사용하여 결합하는 설계 방법을 적용하고 있다. 이 같은 접근 방법은 짧은 최적화 시간을 소모하여 20 % 이내의 주파수 대역폭을 갖는 매니폴드 멀티플렉서의 물리적 구조와 출력 특성에 대한 정확한 결과를 얻을 수 있다. 매니폴드 멀티플렉서의 최적화 설계 과정은 다음의 단계를 거쳐 수행된다^[17].

- 채널 필터 설계
 - 채널필터 등가회로 초기값 설정
(멀티플렉서의 협대역 모델링만이 필요한 구조)
 - 채널 필터 동작 모드 선정
(unloaded Q, size, spurious 모드 고려)
- 광대역 구조의 모델링 및 초기값 설정
 - 매니폴드 소자 및 매니폴드-필터 결합 등
- 최적화 설계
 - 채널 필터 및 매니폴드 패러미터

경제적인 주파수 사용을 위해 최근의 통신 시스템에서는 송신 채널 수를 가능한 늘리려고 한다. 따라서 인접 채널 사이의 보호 대역(guard band)을 10 % 정도까지 줄인다. 이와 같은 멀티플렉서를 contiguous 멀티플렉서라 한다. 따라서 통과대역에서의 리액턴스는 일정하지만 보호 대역에서의 리액턴스 변화가 심한 채널 필터는 contiguous 멀티플렉서에 적절하지 않다. 따라서 통과대역에서의 리액턴스 변화는 크지만 보호 대역에서의 리액턴스 변화가 적은 단일 종단 필터가 보통 사용된다. 통과대역의 리액턴스 변화는 인접(adjacent) 채널 필터의 리액턴스로 보상할 수 있다. 이 같은 이유에서 단일 종단 필터가 매니폴드 멀티플렉서 최적화 설계에서 등가회



[그림 16] Ku 대역 OMUX의 특성



[그림 17] 12 채널 OMUX

로 모델의 초기값 선정에 유용하다.

매니폴드-필터 결합은 앞에서 언급한 바와 같이 멀티플렉서의 광대역 부분과 각 채널필터로 구성된 협대역 부분을 연결시켜 준다. 6 % 이하의 협대역 멀티플렉서의 경우, 주파수에 따라 변화하지 않는 인버터를 채널 필터에 사용하더라도 전체 등가회로 특성을 정확히 설계할 수 있다. 그러나 20 % 이상의 광대역 멀티플렉서의 경우, 멀티플렉서의 전체 동작대역에서 결합 iris의 주파수에 따라 변화하는 특성을 고려하는 등가회로로 임피던스 인버터를 모델링하여야 한다. 이 경우, 결합 iris의 정확한 광대역 등가회로는 몇 개의 소자로 구성된다.

4-2-2 Multipaction

열 손실과 더불어 OMUX 설계에서 고려해야 하는 또 하나의 문제가 multipaction이다. 이는 진공 상태에서 자유전자가 RF 필드에 의해 가속되어 도관 벽에 충돌하여 발생할 수 있는 RF 항복 현상이다. 에너지가 하나 이상의 전자에서 각 충돌 전자로 방출될 때 발생한다. multipaction은 전자가 가속되는 갭의 크기, 주파수, RF 필드의 세기와 지속시간, 도체 벽의 일함수, 초기 에너지, 전자의 현재 수를 포함하는 많은 요인에 관계된다.

4-2-3 PIM

수동 혼변조 왜곡(passive intermodulation distortion)은 OMUX 설계자가 부딪혀야 하는 고출력에 의한 두 번째 효과이다. 하나의 시스템에 두 개 이상의 캐리어가 동시에 존재할 때, 혼변조 성분은 어떤 비선형 특성에 의해 나타날 수 있다. 대부분의 수동 소자에서 이런 성분은 일반적으로 눈에 띄지 않지만 송수신 신호의 크기가 크게(>120 dB) 차이나는 위성 탑재체에서는 출력 멀티플렉서가 이 효과를 최소화하도록 설계되는 것이 중요하다. 그렇지 않을 경우, 송신기에서 발생된 혼변조 성분이 수신

대역에 영향을 미쳐 간섭을 발생시킬 수 있다. PIM 발생을 제거하기 위해 다음과 같은 기술이 적용된다.

- 도체와 도체의 접합, 특히 서로 다른 도체의 접합을 최소화한다.
- 볼트 결합의 수를 최소화하고 접합면을 70 MPa 이상의 고압으로 체결한다.
- 화학적으로 완전하게 청결을 유지한다.

4-3 기계적 설계

경량화 : 위성 탑재장비의 기계적 요구 사항의 중요한 두 가지는 중량을 가볍게 유지하는 것과 발사 또는 궤도상에서의 진동 및 극심한 온도 변화의 환경에서 견딜 수 있게 하는 것이다. 경량화를 위해 0.5 mm 정도의 매우 얇은 공진기를 사용하고, 온도 변화에 따른 심각한 주파수 변화를 방지하기 위해 Invar와 같은 매우 낮은 온도 팽창 계수의 물질이 요구된다. Invar는 전기 전도도와 열 전도도가 낮아 손실을 최소화하기 위해서는 모든 부품을 온도급해야 한다. advance finite element 모델링을 이용하여 높은 발사 능력과 궤도상에서의 큰 온도 변화를 극복하게 설계하지만, 각 유닛은 기계 조립을 검증하기 위한 진동시험과 열진공시험을 통과해야 한다.

열 방출 : 130 W의 송신출력은 각 채널에서 15 W 정도의 열 손실을 갖게 되고, 여러 부품의 서로 다른 온도팽창 계수에 의해 구조상의 스트레스를 야기할 수 있는 급격한 온도 상승 없이 이 열을 제거하기 위해 주의해야 한다. 우주 공간상에서 대부분의 열은 전도를 통해 방출되므로 mounting bracket의 최적화 설계에 많은 노력을 기울여야 한다.

V. 최근 동향

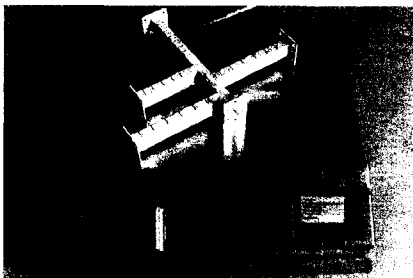
Invar는 2 ppm/°C 이하의 낮은 온도 팽창계수

(TCE) 때문에 좁은 대역폭의 마이크로파 필터에 널리 사용되고 있다. 그러나 낮은 전기 및 열 전도도 등의 단점이 있다. 철과 니켈과 같은 자성체를 포함하고 있어 민감한 장비를 오동작시킬 수도 있고, 기계 가공과 강도 특성이 나쁘다. Invar를 대체하는 새로운 시도로는 다음과 같은 것이 있다.

- 저밀도, 낮은 TCE와 뛰어난 기계적 특성을 갖는 도체 기반 복합재(metal matrix composites)
- 쉽게 성형, 도금할 수 있고 매우 낮은 TCE의 고온에서 견딜 수 있는 세라믹
- 고강도, 초저밀도, 0 이하의 TCE를 갖는 다이아몬드와 가까운 열 전도도의 탄소 섬유 강화 플라스틱(carbon fiber reinforced plastics)

[그림 18]은 Matra Marconi Space에서 자체 개발한 모드 해석 기술로 RF 설계한 튜닝 스크류가 없는 매니폴드 멀티플렉서이다. 총 중량 79 g의 OMUX는 기구 설계를 거쳐 온도급된 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP)으로 제작되었다.

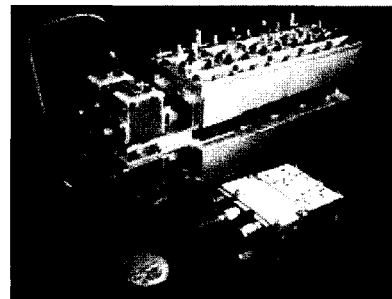
위의 물질은 전기 전도도가 떨어지므로 온도급해서 사용한다. 적절한 초전도체가 개발되면 공진기 벽을 코팅하여 손실까지 줄일 수 있다. 마이크로스트립 형태로 제작하여 크고 무거운 cavity 필터를 대신할 수 있는 평면 초전도 필터에 대한 연구가 지난 수년에 걸쳐 활발히 진행되고 있으나, 아직까지는 실용화에 어려움이 있다. 초전도체로 동작하기 위한 온도로 냉각시키기 위해서는 크고 무거운



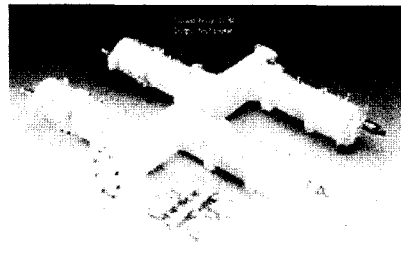
[그림 18] CFRP 매니폴드 멀티플렉서

cryocooler를 필요로 한다.

C 대역의 60 채널 IMUX의 경우, 이중모드 DR 멀티플렉서에 비해 중량과 부피를 50 % 이하로 줄인 HTS 멀티플렉서가 개발되었다^[5]. [그림 19]는 여기에 사용된 10단의 HTS 평면형 필터와 DR 필터를 비교한 것이다. C 대역 OMUX의 경우는 [그림 20]에서 보여주는 것처럼 멀티플렉서 자체만으로는 DR/HTS 멀티플렉서가 중량과 부피를 5 % 이하로 줄일 수 있으나, 극저온 냉각기와 DC 전력 공급기를 포함할 때는 중량과 부피가 더 커지게 된다. 또한 냉각기의 DC 전력 소모도 가중된다^[6]. 최근의 HTS 필터와 멀티플렉서 기술은 채널 수가 많은 C 대역의 멀티플렉서에 적용되고 있으나, Ku 대역이나 Ka 대역에서는 기존의 이중모드 cavity 멀티플렉서나 이중모드 DR 멀티플렉서의 성능에 미치지 못하고 있다.



[그림 19] HTS 평면형 필터와 DR 필터 비교



[그림 20] HTS/DR OMUX와 DR OMUX 비교

VI. 결 론

지난 40여 년간 위성 탑재체용 마이크로파 필터와 멀티플렉서 기술은 지속적인 발전을 이룩하였다. 탑재체의 중량과 부피를 줄이고, 주파수 스펙트럼을 효율적으로 사용하고, 보다 높은 EIRP를 전송하기 위해 채널성능을 향상시킴으로써 위성 채널의 비용을 줄일 수 있게 되었다. 이중모드 cavity 필터, 이중모드 DR 필터, HTS 필터 등 설계기술의 발전과 Invar, GFRP, CFRP 등의 소재의 발전은 채널 당 중량을 1/10 이하로 줄일 수 있었다. 그러나 아직도 해결해야 할 과제가 많이 있는 것이 현실이다. 그 중의 하나가 OMUX의 최적화 설계에 대한 연구이다. 채널 수가 늘어나고 요구사항이 더 강화됨에 따라 최적화 과정은 더 많은 시간을 필요로 하게 된다.

통신위성용 마이크로파 필터 및 멀티플렉서 설계 및 제작 기술의 발전은 앞으로도 끊임없이 계속될 것이고, 위성 통신의 수요 또한 지속적으로 증가할 것이다. 위성 통신 산업의 경쟁력을 확보하기 위해 통신위성용 마이크로파 필터 및 멀티플렉서 기술의 발전에 보다 더 많은 연구와 적극적인 투자가 요구되고 있다.

참 고 문 헌

[1] M. Kunes, "Microwave multiplexers for space applications", *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 29-35, Feb. 1998.

[2] C. Kudsia, R. Cameron and W.-C. Tang, "Innovations in microwave filters and multiplexing networks for communications satellite systems", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 6, pp. 1133-1149, June 1992.

[3] Albert E. Williams, "A Four-Cavity Elliptic

Waveguide Filter", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-18, no. 12, pp. 1109-1114, Dec. 1970.

- [4] S. J. Fiedziuszko, "Dual mode dielectric resonator loaded cavity filters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 30, no. 9, pp. 1311-1316, Sept. 1982.
- [5] R. Mansour, "A 60-channel superconductive input multiplexer integrated with pulse-tube cryocoolers", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 7, pp. 1171-1180, July 2000.
- [6] R. R. Mansour, "Feasibility and commercial viability issues for high-power output multiplexers for space applications", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 7, pp. 1199-1208, July 2000.
- [7] W. G. Lin, "Microwave filters employing a single cavity excited in more than one mode", *J. Appl. Phys.*, vol. 22, Aug. 1951.
- [8] B. L. Blacier, A. R. Champeau, "Dual-mode circular and/or square waveguide filters", U. S. Patent 3 697 898, Oct. 1972.
- [9] Ali E. Atia, Albert E. Williams, "New types of waveguide bandpass filters for satellite transponders," *Comsat Technical Review*, vol. 1, no. 1, pp. 21-43, Fall 1971.
- [10] Ali E. Atia, Albert E. Williams, "Narrow-Bandpass Waveguide Filters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-20, no. 4, pp. 258-265, Apr. 1970.
- [11] Ali E. Atia, Albert E. Williams and R. W. Newcomb, "Narrow-Band Multiple-Coupled Cavity Synthesis", *IEEE Trans., Circuit and Systems*, vol. CAS-21, pp. 649-655, Sep. 1974.

-
- [12] W. C. Tang, S. K. Chaudhuri, "A true elliptic-function filters using triple-mode degenerate cavities", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Boston, MA, May 1983.
- [13] R. R. Bonetti, A. E. Williams, "Application of dual TM-modes to triple and quadruple mode filters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-35. no. 12, pp. 1143-1149, Dec. 1987.
- [14] S. J. Fiedziuszko, "Dielectric resonators raise your high-Q", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 51-60, Sept. 2001.
- [15] R. R. Mansour, "Design of superconductive multiplexers using single-mode and dual mode filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 1411-1418, July 1994.
- [16] S. J. Fiedziuszko, J. A. Curtis and S. C. Holme, "Low-loss multiplexers with planar dual-mode HTS resonators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 1248-1257, July 1996.
- [17] J. Uher, J. Boremann and U. Rosenberg, *Waveguide Components for Antenna Feed Systems Theory and CAD*, Boston, Artech House, pp. 264-278, 1993.

≡ 필자소개 ≡

성 규 제



1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

1988년 2월~1993년 7월: 국방과학연구소 연구원

1998년 2월: 서강대학교 전자공학과

(공학박사)

1998년 3월~현재: 한경대학교 전자공학과 조교수

2000년 2월~현재: (주) KFM 기술고문

[주 관심분야] 마이크로파 필드해석 및 회로 설계