

위성통신 단말용 X 대역 송수신 필터

곽창수*, 엄만석*, 진봉철**, 서학금**, 서준석***, 염인복* 정회원

X-band Tx and Rx Filters of Earth Terminals for Satellite Communications

Changsoo Kwak*, Manseok Uhm*, Bongcheol Jin**, Hakkeum Seo**, Joonsuk Suh***, Inbok Yom*, *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 위성 통신 단말용 X 대역 송신 필터와 수신 필터를 설계하고 제작 및 시험한 결과를 보인다. 송신 필터는 7.9 ~ 8.4 GHz, 수신 필터는 7.25 ~ 7.75 GHz의 대역을 가지며 두 필터 모두 상호 인접 주파수에서 매우 높은 차단 특성을 요구하는 필터이다. 이러한 필터를 인라인(in-line) 형태로 제작하기 위해 비공진 노드 기법을 사용하였으며 비공진 노드에는 E-평면 접합이 사용되었다. 회로 모델 설계 및 전자기 모델 설계 등의 단계적 설계 절차에 대해 기술하였다. 제작 및 튜닝 결과 두 필터 공히 온도 변화를 고려한 모든 요구조건을 만족하였으며 기존의 국내 상용품 대비 크기 및 무게를 30 ~ 40 % 줄일 수 있었다.

Key Words : satellite communications, Rx filter, TX filter, X-band, non-resonating node

ABSTRACT

In this paper, designs and test results of X-band Tx and Rx filters for satellite communications are presented. The passbands are 7.9 ~ 8.4 GHz and 7.25 ~ 7.75 GHz for the Tx filter and the Rx filter respectively. Both of the filters require very high rejection performance between the two passbands. In order to make these filters in an in-line type, non-resonating node method was adopted and E-plane junction was used for the non-resonating node. Design procedures of circuit model design and full-wave electromagnetic model design are described. The test results show that all the performances meet requirements including temperature variations and the sizes are smaller than those of domestic commercial filters by about 30 ~ 40 %.

I. 서 론

2007년 아나시스 위성의 성공적인 발사를 시작으로 우리나라에도 본격적인 군 위성통신이 가능하게 되었다. 우리나라뿐만 아니라 대부분의 군 통신위성에서 장착하고 있는 X 대역 통신 탑재체를 이용한 통신이 이루어지기 위해서는 고성능의 지상 단말용 부품이 필요하다. 상용 위성에서 사용되는 Ku 대역 및 Ka 대역과는 달리 군위성통신용 X 대역은 하향링크 주파수 대역이 7.25 ~ 7.75 GHz 그리고 상향 링크 대역이 7.9 ~ 8.4 GHz로 서로 매우 가깝기 때문에 상호 간섭이 발생하지 않도록 주의해야 한다.

지상 단말에서 필수적으로 사용되는 부품이 안테나와 바로 연결되는 고성능 수신 및 송신 필터이다. 수신 필터는 고전력의 송신 신호를 제거하기 위해서 필요하고, 송신 필터는

고전력 처리가 가능하면서 수신 대역에 신호가 인가되지 않도록 해야 한다. 이를 위해서는 매우 높은 차단 특성을 지녀야 한다. 또한 안테나에 바로 연결되는 송신 및 수신 필터의 삽입 손실 특성은 시스템 성능에 직접적으로 영향을 주기 때문에 매우 우수한 특성을 지녀야 한다. 이를 위해 위성통신용 입력 및 출력 필터는 삽입 손실 특성이 우수하고 고출력 신호 처리에 유리한 도파관 필터가 사용된다. 도파관 공진기를 이용하면서 인접 대역 차단 특성을 높이기 위해 인라인 구조에서 전달 영점을 가질 수 있는 비공진 노드(non-resonating node)를 이용한 필터가 최근에 많이 개발되었고 [1]-[3], H-평면 T 접합을 이용한 고성능 X 대역 필터가 구현되었다.[1]

본 논문에서 X 대역 위성통신 단말에 적용될 수 있는 도파관 필터를 구현하였다. 인라인 형상을 취하면서, 인접한 송

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신방송연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [10048213, 차기위성 Flexible 통신방송 탑재체 핵심기술 개발]

*한국전자통신연구원 방송통신미디어 연구소 위성무선융합연구부 위성무선RF기술연구실 (cswak@etri.re.kr, msuhm@etri.re.kr, ibyom@etri.re.kr)

국방과학연구소 (bchjin@add.re.kr, do4son@naver.com), *엠프리시스 (suhaurora@empal.com)

접수일자 : 2014년 5월 8일, 수정완료일자: 2014년 6월 25일, 최종계재확정일자 : 2014년 6월 25일

수신 대역에서 높은 차단 특성을 갖기 위해 비공진 노드 방법이 적용되었다. 빔 공진 노드를 연결할 때 기존에 사용되었던 H-평면 접합 대신 우수한 성능을 구현할 수 있는 E-평면 접합을 사용하였다. 접합부를 E-평면으로 할 경우 필터를 부분품으로 가공할 때 표면 전류가 낮은 지역에서 절단면을 형성할 수 있는 장점이 있다. 설계 및 시험 결과, 송신 및 수신 필터 모두 공히 온도 변화를 고려한 모든 목표성능을 만족하였으며 기존의 국내 상용품 대비 크기 및 무게가 30 ~ 40% 감소된 것을 확인하였다.

II. 필터의 설계

1. 필터의 목표 성능

본 연구에서 제작하고자 하는 송신 및 수신 필터의 목표 성능을 표 1에서 보이고 있다. 표 1에서 괄호 안의 값은 도파관 필터의 운용 온도 변화(총 90도 범위)를 고려한 목표 성능이다. 계산에 의하면, WR112 표준 구형도파관 형태의 알루미늄 공진기를 사용하고, 온도 변화가 ±45도이며, 중심주파수가 7.5 GHz인 경우, 계산된 온도 변화에 의한 주파수 이동은 ±8.1 MHz이다. 하지만 본 연구에서는 설계 및 제작 오차에 의한 영향을 고려하여 충분한 여유를 갖도록 ±14 MHz를 온도 변화에 의한 주파수 이동으로 설정하고 설계를 수행하였다. 이러한 온도 변화에 의해 주파수가 이동한 경우에도 차단특성이나 통과대역이 목표 성능을 만족해야 하므로, 실제 설계 시에는 좀 더 넓은 통과대역과 좀 더 기울기가 급한 차단 특성을 가져야 한다.

표 1. X대역 송수신 필터 요구 사항

항목	송신 필터	수신 필터
형태	인라인(in-line)	인라인(in-line)
주파수 [GHz]	7.90 ~ 8.40 (7.886 ~ 8.414)	7.25 ~ 7.75 (7.236 ~ 7.764)
삽입손실	0.5 dB	0.5 dB
반사손실	22 dB	22 dB
차단 특성	70 dB @ 7.750 GHz (@ 7.764 GHz)	85 dB @ 7.900 GHz (@ 7.886 GHz)
길이	< 280 mm	< 320 mm

2. 필터의 구조

표 1에서 보이는 바와 같이 송신 필터는 통과대역의 좌측 경계 주파수에서 매우 가까운 곳에, 수신 필터는 통과대역의 우측 경계 주파수에서 매우 가까운 곳에 높은 차단 특성을 요구하고 있다. 이와 같은 경우 하나 이상의 전달영점이 필요하고 이는 일반적으로 교차 결합(cross coupling) 또는 비공진 노드를 이용하여 구현된다. 본 연구에서는 인라인 형태

구현의 장점이 있는 비공진 노드를 사용하여 그림 1과 그림 2에서 보이는 바와 같은 필터 구조를 선택하였다. 그림 1과 그림 2에서 N_1 과 N_2 가 비공진 노드를 나타내고 있으며 Source(S)와 Load(L)에 직접 연결되어 있다. 그림 3에서는 비공진 노드 N_1 이 주변 공진기와 E-평면 T 접합 형태로 결합되어 있는 것을 보이고 있다. 그림 3과 달리, 1번 공진기가 비공진 노드 N_1 의 옆면에 붙으면 H-평면 T 접합 형태가 되는데, 그 경우 설계 결과에 의하면 N_1 의 길이가 비현실적으로 작아져야 하기 때문에 E-평면 T 접합을 사용하였다.

표 1에서 보이는 바와 같이 수신 필터의 차단 특성이 송신 필터의 차단 특성보다 더 엄격한 규격이 요구되므로 송신 필터는 8차 필터로, 수신 필터는 10차 필터로 설계하였다.

그림 4에서 보이는 바와 같이 입출력 포트는 WR112 구형도파관 형태를 사용하였으며 모든 공동(cavity)들의 단면도 WR112의 도파관 단면으로 설계하였다. 공동들의 공진 주파수는 공동들의 길이만을 조절하여 정해지도록 하였다. 공동들의 결합을 구현하는 아이리스(iris)의 높이는 WR112의 높이와 같게 하였고 열린 폭만을 조절하여 공진기 사이의 결합량을 조절하도록 하였다. 제작 및 설계 오차를 보정하기 위해서 그림 4에서 보이는 바와 같이 튜닝스크류를 1.5 mm 삽입한 상태에서 제작 후 양방향 튜닝(공진주파수의 증감, 결합량의 증감)이 가능하도록 하였다.

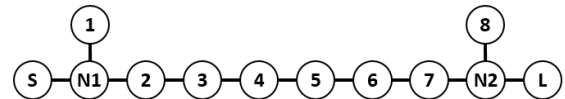


그림 1. X 대역 송신 필터의 결합 구조

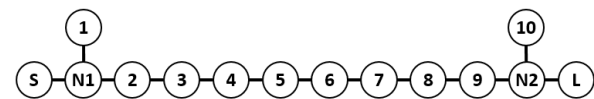


그림 2. X 대역 수신 필터의 결합 구조

3. 설계 방법

A. 회로설계

필터를 제작하기 위해서는 설계 단계의 최종 결과물로서 필터 각 부의 치수가 산출되어야 한다. 하지만 이를 위해 처음부터 전자기 해석을 수행하면 시간이 매우 많이 걸릴 뿐만 아니라 초기 값을 제대로 설정하지 못하면 원하는 결과를 얻지 못할 수 있다. 따라서 설계의 첫 단계로, 회로 모델을 구성하여 요구되는 필터의 성능을 구현하였다.

그림 5는 공진기와 아이리스의 회로모델[4]을 보이고 있다. 공진기 요소는 WR112 도파관 전송선로를 모델링한 것이고, 아이리스는 2 개의 직렬 인덕터, 각 한 개의 병렬 인덕터와 캐피시터로 모델링하였다.

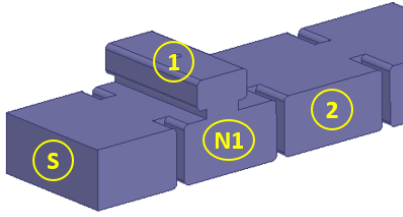


그림 3. E-평면 T 접합을 이용한 비공진 노드 구현

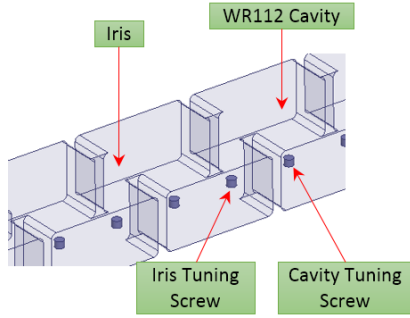


그림 4. 공동(cavity), 아이리스(iris) 및 튜닝 스크류

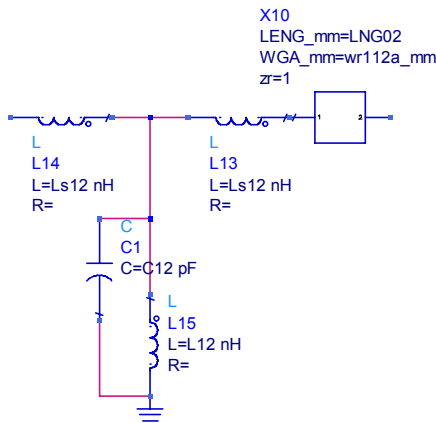


그림 5. 공진기와 아이리스의 회로모델

그림 5의 아이리스 모델에는 3개의 인덕턴스와 1개의 캐피시턴스가 변수로 되어 있다. 이 변수들은 실제 필터에서 하나의 변수인 아이리스의 폭에 의해 모두 결정된다. 따라서 아이리스의 회로모델의 4 개의 변수를 1 개의 변수인 아이리스 폭으로 매핑하는 과정이 필요하다. 이는 다음과 같은 과정으로 수행하였다. 그림 6에서 보이는 전자기 모델과 이를 표현하는 회로모델을 만든다. 회로모델에는 그림 6에서와 같이 하나의 공진기와 2 개의 아이리스, 두 개의 입출력 도파관이 포함된다. 전자기 모델을 해석하여 얻은 산란계수와 똑같은 산란계수가 되도록 최적화 기법을 사용하여 회로모델의 인덕턴스와 캐피시턴스 등을 조정한다. 그림 6의 아이리스 폭을 변화시켜 가며 이 과정을 반복 수행한다. 이 결과들을 정리하면 아이리스의 회로모델 변수들을 아이리스 폭의 함수로 만들 수 있다. 즉 아이리스의 4 개의 변수들이 아이리스

폭이 독립변수인 다항식으로 표현된다. 이렇게 하면 회로모델의 공진기와 아이리스는 각각 실제 필터에서 공진기의 길이와 아이리스의 폭이 독립변수인 함수가 된다. 이때 구해진 각 다항식의 차수는 3차로 하였으며, 다항식의 계수들은 소수점 아래 10자리까지 충분히 많게 하여 정확한 값을 표현할 수 있게 하였다.

위의 요소들을 이용하여 우선 전달영점이 존재하지 않는 Chebyshev 필터를 설계하였다. 그런 다음, Source(그림 1의 S)에 연결된 공진기1(노드1)을 비공진 노드(그림 1과 그림 2의 N_1)로 만들기 위해 반으로 나누고 그 사이에 T 접합 요소를 추가한 후, 그 T 접합에 새로운 노드 1을 결합하였다. 이때 N_1 에는 T 접합이 삽입되므로, T 접합의 폭만큼 N_1 의 길이를 줄여주어야 한다. E-평면 T 접합은 그림 7에서 보이는 바와 같은 전자기 모델을 해석하여 구한 3-포트 산란계수 데이터 파일로 만들어 회로모델에 사용하였다. (그림 7에서 보이는 바와 같이 3 개의 포트 위치를 이동하여 파선으로 표현된 부분만 산란계수로 나타나도록 하였다.) 이후 최적화를 수행하여 최대한 원하는 필터의 성능을 구현하였다. 이와 같은 과정을 비공진 노드 N_2 에 대해 동일하게 수행하여 표 1의 목표 성능을 만족시키도록 필터를 설계하였다.

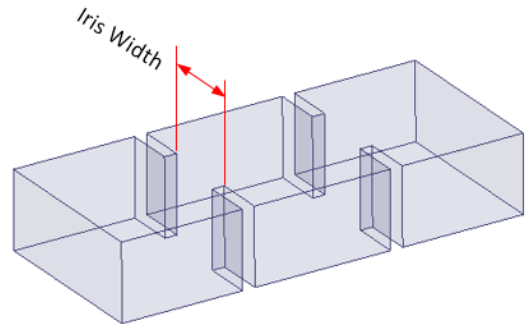


그림 6. 아이리스 매핑을 위한 전자기 모델

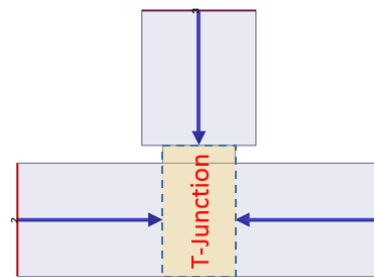


그림 7. E-평면 T 접합 모델링

이와 같은 방법으로 설계된 두 필터의 회로 모델 설계 결과를 그림 10과 그림 11 (검은 색 실선으로 표시)에서 보이고 있다.

B. 전자기 해석을 이용한 설계

앞에서 사용한 회로모델에는 공진기의 길이와 아이리스

의 길이가 독립 변수로 되어 있으므로 회로 설계 결과를 이용하여 바로 전자기 해석 모델을 생성할 수 있다. 하지만 lumped 요소를 사용한 회로 모델과 frequency-dispersion이 존재하는 전자기 모델 사이의 차이 때문에 정확한 필터 성능이 구현되지는 못한다. 따라서 다음과 같은 파라미터 추출법(parameter extraction method)으로 전자기 해석을 이용하여 최종 필터 설계를 수행하였다.

회로 모델의 설계 결과를 이용하여 그림 8과 그림 9와 같은 전자기 모델을 생성한다. 전자기 해석을 수행하고 그 결과인 산란계수를 회로 모델로 가져와 이와 동일한 산란계수가 구해지도록 최적화 기법을 통해 회로 모델의 변수를 조정(curve fitting)하여 공진기 길이와 아이리스의 폭을 추출한다. 추출된 공진기의 길이와 아이리스의 폭은 전자기 모델에 사용된 값과 다를 수 있으며, 이는 회로모델이 인지하는 값이다. 앞서 회로 모델 설계에서 구한 공진기 길이, 아이리스 폭과 이 값들을 비교하여 그 차이가 0이 되도록 전자기 해석 모델의 치수들을 수정한다. 원하는 수준까지 필터의 성능이 구현되도록 이와 같은 과정을 반복한다.

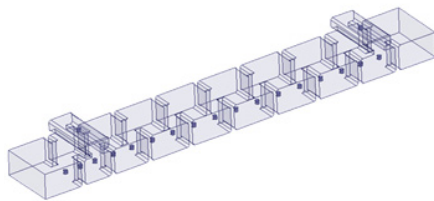


그림 8. X 대역 송신 필터 전자기 모델

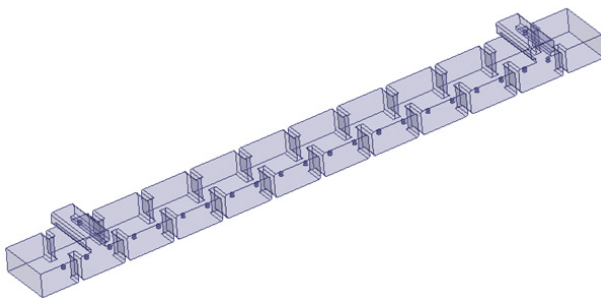


그림 9. X 대역 수신 필터 전자기 모델

이와 같은 방법을 사용함에 있어 중요한 점은 전자기 모델 해석 결과를 회로모델로 curve fitting하는 것이 매우 정확해야 한다는 것이다. 본 연구에서는 S_{11} 과 S_{21} 의 크기, 및 S_{21} 의 위상을 목적함수로 설정하고 최적화 기법으로 파라미터 추출을 수행하였다. 또한 이들 목적함수에는 상황에 따라 적절한 가중치가 주어져야 한다. 회로모델 curve fitting으로 치수를 추출할 때 완벽한 curve fitting은 있을 수 없고, 어느 정도 허용 오차가 있어야 하는데, 이 허용 오차에 따라 매우 많은 추출 값들의 조합이 존재할 수 있다. 이로 인해 잘못된 수정 지시를 내리게 되어 목표 성능에 도달하지 못할 수도

있다. 이러한 문제는 대역폭이 넓을수록, 필터의 차수가 높을수록, 주파수가 높을수록 심해진다. 수치 해석의 오류, 제작 오차 등의 문제로 인해 완벽한 설계는 의미가 없으므로, 어느 정도 필터의 성능이 만족되면 제작 후 튜닝을 통해 성능을 구현하는 것이 바람직하다.

4. 설계 결과

그림 10과 그림 11은 각 필터의 회로 모델 설계 결과와 전자기 모델 설계 결과를 비교하여 보이고 있다. 전자기 모델 설계 결과는 표 1의 요구 사항을 모두 만족시키지는 않고 있으나, 앞에서 언급한 바와 같이 전자기 해석 모델을 완벽하게 설계할 필요 없으며 튜닝으로 조정이 가능한 범위에 있다고 판단되면 설계를 더 이상 진행하지 않는다.

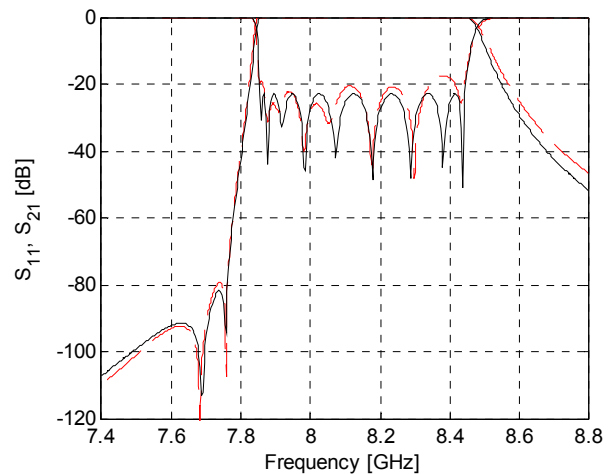


그림 10. X 대역 송신 필터의 회로 모델 설계 결과와 전자기 모델 설계 결과 비교 (실선: 회로 모델; 파선: 전자기 모델)

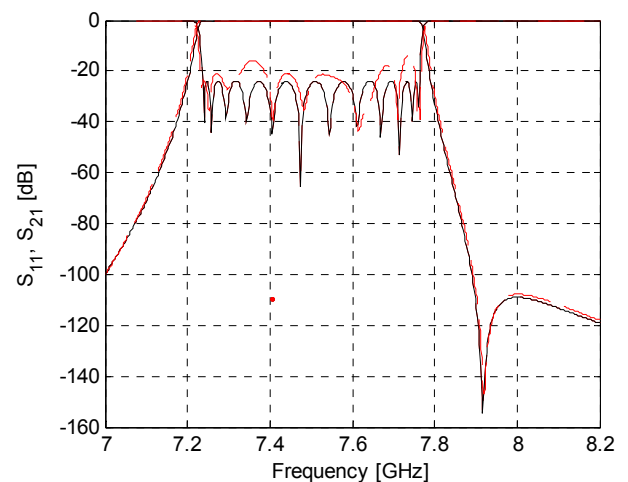


그림 11. X 대역 수신 필터의 회로 모델 설계 결과와 전자기 모델 설계 결과 비교 (실선: 회로 모델; 파선: 전자기 모델)

Ⅲ. 제작 및 조립/시험

1. 제작

각 필터는 그림 8과 그림 9에서 보이는 바와 같이 WR112의 긴 변 방향으로 공구가 들어가는 것으로 정하고 이에 따라 공구에 의한 round가 생성되도록 하였다. 따라서 그림 10과 그림 11의 필터 형상을 WR112의 긴 변에 수직인 평면으로 나누되, 중앙 면에는 튜닝스크류가 존재하므로 이를 피하여 나누어진 형상으로 가공한 후, 조립하였다.

필터의 몸체는 알루미늄으로 제작되었고, 삽입손실을 최소화 하기 위해 제작된 필터의 표면에는 은도금을 하였다. 튜닝이 끝난 후에는 튜닝스크류에 이를 고정하기 위한 접착제를 도포하였으며, 표면에는 검은 색 페인팅을 하였다. 그림 12와 그림 13은 최종 조립 및 튜닝이 완료된 필터의 모습을 보이고 있다.



그림 12. 제작된 X 대역 송신 필터 (길이 : 215mm)

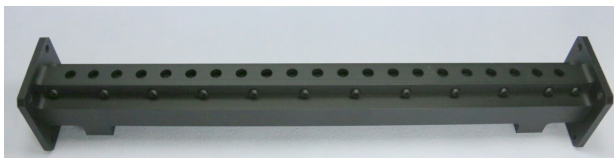


그림 13. 제작된 X 대역 수신 필터 (길이 : 308mm)

2. 튜닝 및 측정 결과

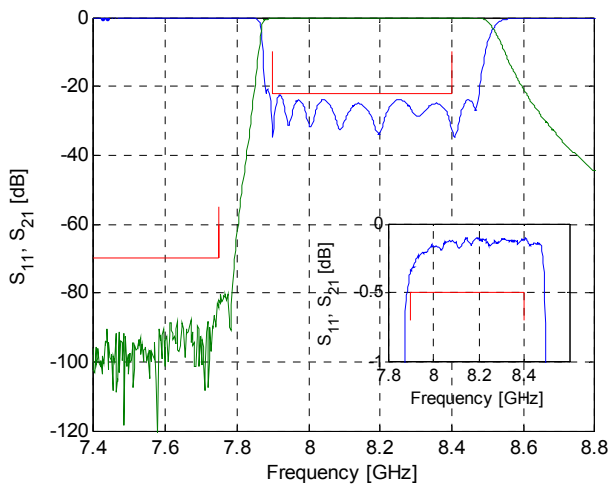


그림 14. X 대역 송신필터의 측정 결과(삽입 그림: 삽입손실)

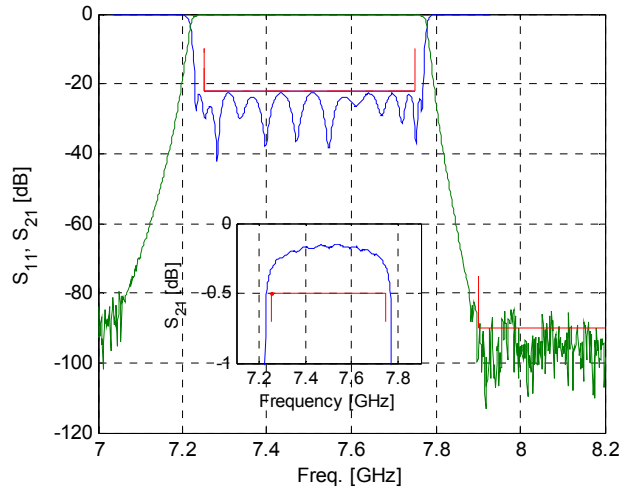


그림 15. X 대역 수신필터의 측정 결과(삽입 그림: 삽입손실)

그림 14와 그림 15는 튜닝 완료 후 측정된 산란계수를 보이고 있다. 각 측정 그래프 안의 삽입 그래프는 통과대역의 삽입손실 특성을 확대하여 보이고 있다. 그림 15에서 X 대역 수신 필터의 차단 특성이 잡음 특성으로 인해 85 dB 정도로 보이고 있으나 측정 장비의 오차 범위 내에 있는 것으로 판단된다. 측정 결과 목표 성능을 모두 만족하고 있음을 확인하였다. 그림에서 빨간색의 직선으로 표현된 것은 요구 성능을 나타내고 있다.

Ⅳ. 결론

X 대역 송신 필터와 수신 필터를 비공진 노드 기법을 사용하여 설계 과정 및 제작/시험한 결과를 제시하였다. 온도 변화를 고려하여 더욱 어려운 요구 성능을 목표로 하여 설계하였고 이를 만족시키는 필터를 구현하였다. 기존 국내 업체에서 생산하고 있는 필터와 비교하여 길이를 30~40% 이상 줄일 수 있었다. 본 연구 결과를 이용하여 외국의 선진 업체와의 경쟁 시 동등하거나 유리한 위치를 점할 수 있으리라 생각된다.

참고 문헌

- [1] J. R. Montejo-Garai, J. A. Ruiz-Cruz, J. M. Rebollar, M. J. Padilla-Cruz, A. Onoro-Navarro and I. Hidalgo-Carpintero, "Synthesis and Design of In-Line N-Order Filters With N Real Transmission Zeros by Means of Extracted Poles Implemented in Low-Cost Rectangular H-Plane Waveguide", IEEE Trans. on MTT, vol 53, no. 5, pp 1636-1642, May 2005.
- [2] S. Cogollos, R. J. Cameron, R. R. Mansour, M. Yu and V. E. Boria, "Synthesis and Design Procedure for High

Performance Waveguide Filters Based on Nonresonating Nodes”, IEEE MTT-S, June 2007.

- [3] G. Macchiarella, M. Politi, “Use of Generalized Coupling Coefficients in the Design of Extracted-Poles Waveguide Filters with Non-Resonating Nodes”, IEEE MTT-S, June 2009.
- [4] M. S. Uhm, J. S. Lee, J. H. Park and J. P. Kim, “An efficient optimization design of a manifold multiplexer using an accurate equivalent circuit model of coupling irises of channel filters”, IEEE MTT-S, June, 2005.

저자

곽 창 수 (Changsoo Kwak)

정회원

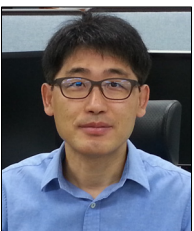


- 1996년 2월 : 연세대학교 기계공학과 학사 졸업
- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 석사 졸업
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업
- 1998년 2월~2000년 8월 : 삼성항공(주)

· 2000년 9월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
 <관심분야> : 초고주파 필터, 출력멀티플렉서, 필터 자동 튜닝, 구조해석 및 열해석

엄 만 석 (Manseok Uhm)

정회원



- 1987년 2월 : 중앙대학교 전자공학 학사 졸업
- 1989년 2월 : 중앙대학교 전자공학 석사 졸업
- 2007년 2월 : 중앙대학교 전자공학 박사 졸업
- 1992년~현재 : 한국전자통신연구원

책임연구원

<관심분야> 위성시스템, 탑재체, 능동소자, 수동소자, 안테나

진 봉 철 (Bongcheol Jin)

정회원



- 1989년 2월 : 강원대학교 전기공학과 학사 졸업
- 1992년 2월 : 강원대학교 전기공학과 석사 졸업
- 1989년~현재 : 국방과학연구소

<관심분야> : 위성통신, 이동통신, 신호처리

서 학 금 (Hakkeum Seo)

정회원



- 1989년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 학사 졸업
- 1991년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 석사 졸업
- 1991년~현재 : 국방과학연구소

<관심분야> : 위성통신, 이동통신

서 준 석 (Joonsuk Suh)

정회원



- 1987년 2월 : 광운대학교 전자통신 학사 졸업
- 1995년 3월 : 전기통신대학 전자공학 석사 졸업
- 1995년~2006년 : 텔웨이브
- 2006년~현재 : 엠쓰리시스

<관심분야> : 위성시스템, 탑재체, 능동소자, 수동소자, 안테나

염 인 복 (Inbok Yom)

정회원



- 1990년 2월 : 한양대학교 전자공학 학사 졸업
- 2004년 2월 : 충남대학교 전자공학 석사 졸업
- 2007년 8월 : 충남대학교 전자공학 박사 졸업

· 1990년~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> : 위성시스템, 탑재체, 능동소자, 수동소자, 안테나