

두 개의 통과대역을 갖는 위성 중계기용 이중모드 정규(Canonical) 구조 필터

A Dual-Mode Canonical Filter with Dual-Passband for Satellite Transponder

이주섭 · 엄만석 · 염인복 · 박종흥

Juseop Lee · Man Seok Uhm · In-Bok Yom · Jong-Heung Park

요 약

위성통신에서 있어서 주파수 할당 및 빔 커버리지가 다양해지고 복잡해짐에 따라 주파수상에서 인접하지 않은 여러 개의 채널 신호가 하나의 고출력 증폭기에 의해서 증폭되어져 안테나를 통하여 지상으로 송출되는 경우가 있다. 본 논문에서는, 이러한 위성통신 시스템에 적용이 가능한 두 개의 통과대역을 갖는 위성 중계기용 이중모드 정규(canonical) 구조 필터를 제시하였다. 필터의 무게와 부피를 줄이기 위하여 이중모드 설계기법을 사용하였으며, 최대한 많은 수의 전달영점 구현이 가능한 정규 구조로 필터를 설계하였다. 두 개의 통과대역을 갖는 Ka 대역 위성 중계기용(30/20 GHz) 6차 이중모드 정규 구조 필터의 구현을 통하여 설계기법을 검증하였다.

Abstract

Due to the complex arrangement of frequency plans and spatial coverages in modern satellite communications, channels that are non-contiguous in frequency may be amplified by a single power amplifier and transmitted to the ground through one beam. In this paper, a dual-mode canonical filter with dual-passband is presented. The filter adopts dual-mode technique for mass and volume reduction. Canonical structure is adopted for maximum transmission zero realization. To validate the design technique, a 6-pole dual-mode canonical dual-passband filter for Ka-band(30/20 GHz) satellite transponder is realized. The measured frequency response of the filter shows good agreement with the computed one.

Key words : Satellite Transponder, Filter, Dual-Mode, Dual-Passband, Canonical Structure

I. 서 론

일반적인 마이크로파 필터는 하나의 통과대역과 통과대역 양 옆에 차단대역이 존재하는 특성을 갖는다. 이러한 단일 통과대역 특성을 갖는 필터는 필터의 응답특성(response characteristic)에 따라서 버터워스(Butterworth) 응답 필터, 체비셰프(Chebyshev) 응답 필터, 타원(Elliptic) 응답 필터 등으로 분류되며, 이

러한 필터를 설계하는 방법은 여러 마이크로파 이론 및 필터 관련 문헌에 제시되어 있다^{[1],[2]}.

그러나 통신 시스템의 구성에 따라서는 하나의 통과대역이 아닌 여러 개의 통과대역을 갖는 필터가 필요한 경우가 있다. 특히, 위성통신 시스템에 있어서는 위성 안테나 커버리지와 채널 할당에 따라서 주파수 상에서 인접하지 않은 채널이 하나의 증폭기에 의해서 신호가 증폭된 후 하나의 빔(beam)을 통

한국전자통신연구원 통신위성연구그룹(Communications Satellite Development Group, Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI))

· 논 문 번 호 : 20031117-159

· 수정완료일자 : 2004년 1월 30일

해서 지상으로 전송되는 경우가 있기 때문에 이러한 통신 시스템에 있어서는 여러 개의 통과대역을 갖는 필터가 요구될 수 있다.

이러한 다중 통과대역 특성을 갖는 필터는 Holme에 의하여 설계 방법이 제시되었다^[3]. 전달 영점이 존재하고 우수한 주파수 선택도 특성을 갖도록 각 통과대역을 타원 응답형으로 설계하였으며, 구조상으로는 제작과 튜닝이 용이하고 무게와 부피를 줄일 수 있는 이중모드 인라인(in-line) 형태의 필터를 설계 및 제작하였다. 이러한 이중모드 인라인 구조 필터는 Williams^[4]에 의해서 처음으로 설계 및 구현된 이후 위성 중계기용으로 많은 연구와 설계가 이루어졌다^{[5],[6]}. 인라인 구조의 n 차(n : 짝수) 필터는 최대 $n/2$ 개의 전달 영점을 구현할 수 있고 정규(canonical) 구조의 필터는 최대 $n-2$ 개의 전달 영점을 구현할 수 있다. 즉, 4차 이상의 고차 필터의 경우에는 필터의 성능을 향상시키는 전달 영점의 구현 가능한 개수가 정규 구조 필터가 더 많다. 예를 들어, 8차 필터에 있어서 전달 영점을 6개 구현하여야 하는 경우 정규 구조로는 구현이 가능하나 인라인 구조로는 구현이 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 [3]에서 제시한 여러 개의 통과대역을 갖는 인라인 구조 필터의 단점을 보완할 수 있는 여러 개의 통과대역을 갖는 정규 구조 필터를 설계 및 구현하는 방법에 대해서 기술하였다. 본 논문에서 제시한 설계 및 구현방법의 검증을 위하여 Ka 대역 위성 중계기에 적용이 가능한 두 개의 통과대역을 갖는 정규 구조의 6차 이중모드 필터를 설계 및 구현하였다.

II. 다중 통과대역 필터

일반적으로 마이크로파 필터의 주파수 특성을 나타내는 전달함수 $t(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$t^2(s) = \frac{1}{1 + \epsilon^2 R^2(s)}, \quad s = j\omega \quad (1)$$

이 때, ω 는 정규화 주파수(normalized frequency), $R(s)$ 는 필터의 특성을 나타내는 특성함수(characteristic function), 그리고 ϵ 는 필터의 통과대역 리플(ripple) 특성을 나타내는 리플 상수이다. 특성함수에

따라서 Butterworth 응답, Chebyshev 응답, 타원 응답 등과 같은 필터의 응답특성이 결정된다. 다중 통과대역 특성을 갖는 필터의 경우 전달영점의 구현이 필수적이며, 전달영점이 존재하는 필터 응답의 종류로는 타원 응답형이 일반적이다. 이러한 타원 응답 특성을 나타내는 특성함수 $R(s)$ 는 다음과 같이 유리함수(rational function)로 나타낸다.

$$R(s) = \frac{\prod_j (s - s_{pj})}{\prod_k (s - s_{zk})} \quad (2)$$

이 때, s_p 와 s_z 는 각각 필터의 폴점과 영점이다. 타원응답형의 단일 통과대역 특성을 나타내는 필터의 경우 폴점은 모두 통과대역 내에 존재하고 영점은 차단대역에 존재한다. 그림 1은 일반적인 하나의 통과대역 갖는 6차 타원응답형 필터에 대한 응답특성과 폴점/영점 위치를 나타내고 있다.

여러 개의 통과대역을 갖는 필터는 그림 1의 단일 통과대역 내에 전달 영점을 위치시킴으로써 여러 개의 통과대역 특성이 나타나도록 할 수 있다. 즉, 각 통과대역 사이에 있는 전달영점은 하나의 통과대역을 두 개의 통과대역으로 나누는 역할을 함으로써 여러 개의 통과대역 특성이 나타나도록 한다. 그림 2는 각각의 통과대역이 3차 타원 응답형이며 두 개의 통과대역을 갖는 6차 필터의 폴점/영점 위치와 필터의 응답특성을 나타내고 있다.

필터의 폴점/영점 위치에 의해서 전달함수가 구해지면 회로망 파라미터를 구하여 필터를 물리적으로

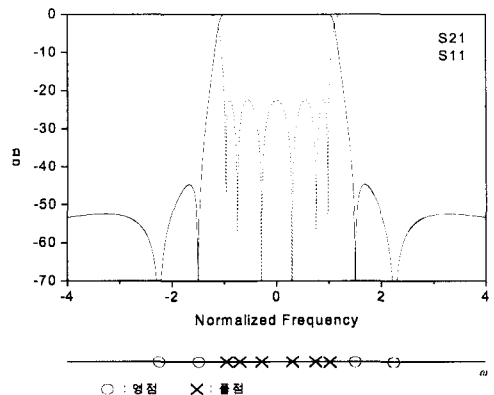


그림 1. 하나의 통과대역을 갖는 6차 타원응답 필터
Fig. 1. A 6-pole elliptic filter with single-passband.

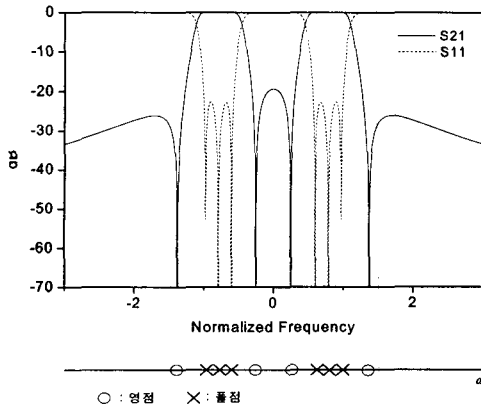
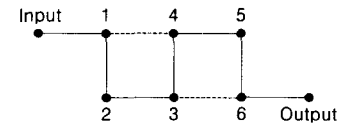


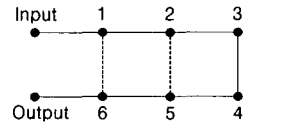
그림 2. 두 개의 통과대역을 갖는 6차 타원응답 필터
Fig. 2. A 6-pole elliptic filter with dual-passband.

로 구현 가능하도록 하여야 한다. 필터의 경우 회로망 파라미터는 입출력 결합계수와 결합행렬이 있으며 이러한 회로망 파라미터는 구현하고자 하는 필터의 구조에 맞게 추출하여야 한다. $n(n)$ 차 필터에 있어서 인라인 구조의 필터는 최대 $n/2$ 개의 전달영점을 구현할 수 있고 정규 구조의 필터는 최대 $n-2$ 개의 전달영점을 구현할 수 있기 때문에 4차 이상의 고차 필터의 경우 정규 구조의 필터가 인라인 구조의 필터보다 구현 가능한 전달영점의 수가 많다. 따라서 그림 1과 2와 같은 응답특성은 인라인 구조의 필터로는 구현이 불가능하지만 정규 구조의 필터로는 구현이 가능하다. 그림 3은 6차 인라인 구조와 정규 구조 필터에 대한 신호 흐름도를 나타내고 있고, 그림 4는 원통형 공동 공진기를 이용하여 이중모드로 6차 필터를 구현하는 경우에 대한 필터의 형상을 나타내고 있다.

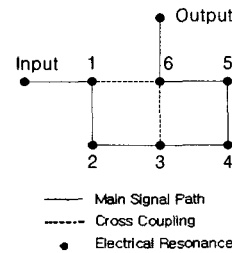
정규 구조 필터는 다시 대칭형 정규 구조 필터와 비대칭형 정규 구조 필터로 나뉜다. 대칭형 정규 구조 필터는 그림 4에 나타난 바와 같이 이중모드로 구현하는 경우 입력단과 출력단이 물리적으로 동일한 공동에 존재하기 때문에 입출력 분리도 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이중모드 필터를 정규 구조로 구현하는 경우 일반적으로 비대칭형 정규 구조로 설계하는 것이 입출력 분리도 측면에서 대칭형 정규 구조보다 유리하므로 비대칭형 구조로 많이 설계한다. 따라서 본 논문에서는 그림 2의 응답 특성을 갖는 필터를 이중모드 비대칭형 정규 구조로 설계 및



(a) 인라인 구조 필터의 신호 흐름도
(a) Signal flow of in-line filter



(b) 대칭형 정규 구조 필터의 신호 흐름도
(b) Signal flow of symmetric canonical filter

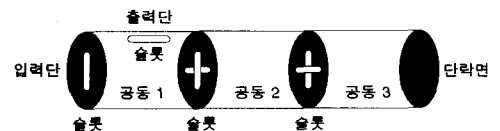


(c) 비대칭형 정규 구조 필터의 신호 흐름도
(c) Signal flow of asymmetric canonical filter

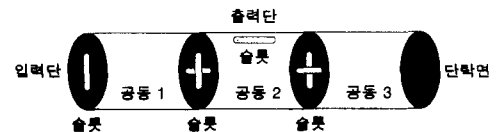
그림 3. 구조별 6차 필터의 신호 흐름도
Fig. 3. Signal flow of 6-pole filters.



(a) 인라인 구조의 이중모드 필터 형상
(a) Dual-mode in-line filter structure



(b) 대칭형 정규 구조의 이중모드 필터 형상
(b) Dual-mode symmetric canonical filter structure



(c) 비대칭형 정규 구조의 이중모드 필터 형상
(c) Dual-mode asymmetric canonical filter structure

그림 4. 구조별 6차 이중모드 필터 형상
Fig. 4. 6-pole dual-mode filter structures.

구현하는 방법에 대해서 기술한다.

III. 두 개의 통과대역 갖는 비대칭형 정규 구조의 이중모드 필터 설계 및 구현

그림 2의 응답특성을 나타내는 필터의 폴점/영점의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s_{p1} &= -j0.974, & s_{p2} &= -j0.790, & s_{p3} &= -j0.600, \\ s_{p4} &= j0.600, & s_{p5} &= j0.790, & s_{p6} &= j0.974, \\ s_{z1} &= -j1.375, & s_{z2} &= -j0.250, & s_{z3} &= j0.250, \\ s_{z4} &= j1.375 \end{aligned} \quad (3)$$

필터의 폴점/영점 위치에 의해서 필터의 전달함수를 구하면 식 (4)와 같다.

$$t(s) = \frac{1}{\epsilon} \frac{s^4 + a_{z2}s^2 + a_{z0}}{s^6 + a_{p5}s^5 + a_{p4}s^4 + a_{p3}s^3 + a_{p2}s^2 + a_{p1}s + a_0} \quad (4)$$

여기서, 식 (4)의 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{p5} &= 1.096, & a_{p4} &= 2.533, & a_{p3} &= 1.630, & a_{p2} &= 1.623, \\ a_{p1} &= 0.430, & a_{p0} &= 0.214, & a_{z2} &= 1.953, & a_{z0} &= 0.118, \\ \epsilon &= 5.138 \end{aligned}$$

전달 함수로부터 비대칭 정규 구조에 부합하는 필터의 회로망 파라미터는 대칭형 정규 구조의 회로망 파라미터를 구한 후 결합행렬에 평면 회전을 적용하여 구할 수 있다^[7]. 비대칭 정규 구조 필터의 회로망 파라미터인 결합행렬 M 과 입출력 결합계수 R 을 구하면 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.8450 & 0 & 0 & 0 & 0.1776 \\ 0.8450 & 0 & 0.4768 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4768 & 0 & 0.7328 & 0 & -0.5199 \\ 0 & 0 & 0.7328 & 0 & 0.0952 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0952 & 0 & 0.6661 \\ 0.1776 & 0 & -0.5199 & 0 & 0.6661 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R = 0.548$$

각 공동은 TE₁₁₃ 모드의 수직 및 수평 편파를 이용하여 이중모드로 구현하도록 설계하였으며, 각 슬롯의 크기는 식 (5)에서 주어진 회로망 파라미터에 부합하도록 먼저 McDonald의 근사식^[8]을 이용하여 계산한 후 측정을 통한 반복적인 트리밍 작업을 통하여 구하였다^{[9],[10]}.

그림 5는 필터의 3차원 구조를 나타내고 있다. 각

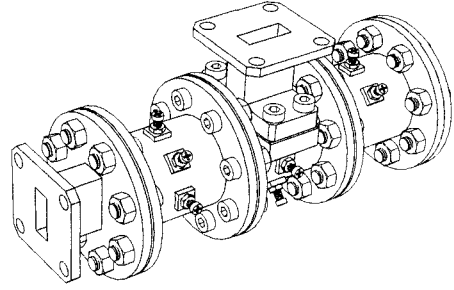


그림 5. 6차 비대칭 정규 구조의 이중모드 필터
Fig. 5. A 6-pole dual-mode asymmetric canonical filter.

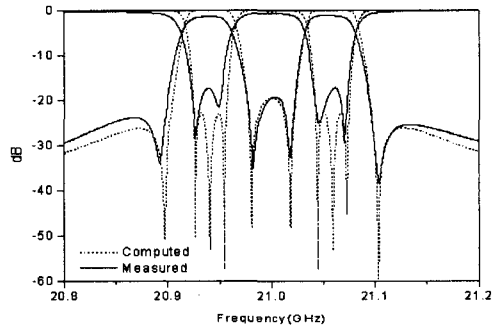


그림 6. 두 개의 통과대역을 갖는 6차 이중모드 필터의 측정결과
Fig. 6. Measured result of a 6-pole dual-mode filter with dual-passband.

공동 공진기에는 튜닝나사와 결합나사가 있으며 입출력 단자는 WR-51로 설계되었다. 그림 6은 필터의 측정결과를 나타내고 있다. 필터의 측정결과 두 개의 통과대역을 갖는 응답특성을 나타내었으며 이론값과 잘 일치한다.

IV. 결론

본 논문에서는 기존의 여러 개의 통과대역을 갖는 이중모드 인라인 구조 필터보다 많은 전달영점을 구현할 수 있는 정규 구조 필터를 제시하였다. 정규 구조의 필터는 인라인 구조의 필터가 구현하지 못하는 필터의 응답특성을 구현할 수 있으며, 보다 많은 전달영점을 구현할 수 있기 때문에 여러 개의 통과대역을 갖는 필터를 설계하는 데 있어서 인라인 구조 필터보다 유리하다.

본 논문에서의 설계방법을 이용하여 Ka 대역 위성 중계기에 적용이 가능한 두 개의 통과대역을 갖

는 정규 구조의 이중모드 필터를 설계 및 구현하였다. 측정결과는 이론값과 잘 일치하였으며, 본 논문에서 제시한 여러 개의 통과대역을 갖는 정규 구조의 필터의 설계 방법은 상용필터의 설계에도 적용이 가능하다.

감사의 글

필터의 제작을 위해 도움을 주신 (주)텔웨이브 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Ch. 9, Addison-Wesley, 1993.
 [2] J. A. G. Malherbe, *Microwave Transmission Line Filter*, Artech House, 1979.
 [3] S. Holme, "Multiple passband filters for satellite applications", *20th AIAA Int. Communication Satellite Systems Conference and Exhibition*, Paper No., AIAA-2002-1993, 2002.
 [4] A. E. Williams, "A four-cavity elliptic waveguide filter", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 19, no. 12, pp. 1109-1114, Dec. 1970.

[5] R. J. Cameron, J. D. Rhodes, "Asymmetric realization for dual-mode bandpass filter", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 29, no. 1, pp. 51-58, Jan. 1981.
 [6] 이주섭, 엄만석, 염인복, 이성팔, "Ku 대역 위성 중계기용 입력 멀티플렉서에 관한 연구", *한국전자과학회 논문지*, 14(4), pp. 393-400, 2003년 4월.
 [7] 엄만석, 이주섭, 염인복, 이성팔, "이중모드 비대칭 canonical 구조 필터의 합성에 관한 연구", *한국전자과학회 논문지*, 14(6), pp. 599-605, 2003년 6월.
 [8] N. A. McDonald, "Simple approximations for the longitudinal magnetic polarizabilities of some small apertures", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 48, no. 9, pp. 1559-1564, Sep. 2000.
 [9] R. S. Kwok, J. F. Jiang, "Characterization of high-Q resonators for microwave-filter applications", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, no. 1, pp. 111-114, Jan. 1999.
 [10] A. E. Atia, A. E. Williams, "Measurements of inter-cavity couplings", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 23, no. 6, pp. 519-522, Jun. 1975.

이 주 섭



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

[주 관심분야] 위성통신, 통신위성 중계기, 위성용 RF부품

엄 만 석



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

[주 관심분야] 위성 중계기, 위성 안테나, 위성용 중계기 부품

염 인 복

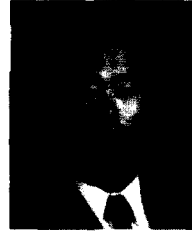


1990년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
2004년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성 RF부품연구팀 팀장 선임연구원

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

[주 관심분야] 위성 중계기, 위성 안테나, 위성 중계기 부품

박 종 홍



1982년 2월: 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
1997년 8월: 한양대학교 기계공학과 (공학박사)
1992년 9월~1995년 5월: 무궁화위성 현장교육 참여(영국 Matra Marconi사 등)

1982년 3월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성RF기술 연구팀장

[주 관심분야] 위성통신, 위성 안테나, 위성 중계기