저지 대역 제거 특성을 향상시킨 변형된 헤어핀 여파기

Modified Hairpin Filters Improving the Suppression Performance of Stop-Band

김봉수 · 강민수 · 변우진 · 김광선 · 송명선

Bong-Su Kim · Min-Soo Kang · Woo-Jin Byun · Kwang-Seon Kim · Myung-Sun Song

요 약

본 논문에서는 원하지 않는 특정 주파수 신호의 감쇠 특성을 향상시키기 위한 새로운 헤어핀 구조 스트립 선로 대역 통과 여파기를 소개한다. 변형된 헤어핀 여파기는 전통적인 헤어핀 여파기의 설계 방식과 동일하게 설계하며, 설계된 여파기의 구조를 새롭게 배치함으로써 구현한다. 그리고 변형된 대칭 구조 사이에 새롭게 형성된 결합 선로의 영향들이 대역 통과 여파기의 상/하향 주파수에 전송 제로를 만든다. 이들 각각의 전송 제로들은 여파기의 특정 부분을 조절하여 원하는 특정 주파수에 위치시킬 수 있다. 이 새로운 여파기의 성능을 평가하기 위해 9.2 GHz에서 15 % FBW를 가지는 5차 Chebyshev 대역 통과 여파기를 제작하였다. 설계 후 측정 결과, 삽입 손실이 0.8 dB@9.2 GHz이며, 최대 50 dB 정도의 우수한 차단 특성을 나타내었다.

Abstract

In this paper, a new hairpin type strip-line BPF(BandPass Filter) improving the suppression performance of unwanted frequency signal is studied. A modified hairpin filter is designed by classical hairpin filter design methodology and is realized by newly placing structure of designed filter. And a newly formed coupled-line effects between modified bilateral symmetry structures make the transmission zeros. Each transmission zeros can shift its frequency to wanted frequency by tuning a certain part of filter.

To investigate the validity of this novel technique, an order-5 Chebyshev BPF centered at 9.2 GHz with a 15 % FBW(fractional bandwidth) were used. Accroding to design and measurement results, a good performance of insertion loss of 0.8 dB and unwanted signal suppression of maximum 50 dB is achieved at full input/output ports.

Key words : BPF, Hairpin, LTCC

Ⅰ. 개 요

최근 10 GHz 이하의 마이크로파에서 동작하는 시스템은 소형화, 저가격화, 우수한 성능, 그리고 고급의 패키지 기술을 요구한다. 그 중에서도, 작고 저렴하며 좋은 선택도를 가지는 마이크로파 대역 통과 여파기는 무선통신 시스템의 RF front-end에서 매우 중요한 역할을 한다. 특히, 높은 선택도를 위해서는, 원하는 통과 대역 경계에서의 cut-off 특성뿐만 아니라 특정 주파수에서 발생하는 원하지 않는 신호의 제거 또한 중요한 역할을 한다.

일반적으로 원하지 않는 신호 성분을 제거하기 위한 많은 시도들이 있다. 우선, 주기적인 구조를 갖는 PBG(Photonic Bandgap), DGS(Defected Ground

「본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음[2008-F-013-01, 스펙트럼 공학 및 밀리미터파대 전파자원 이용기술 개발].」

한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논 문 번 호 : 20090909-105

· 교 신 저 자 : 김봉수(e-mail : bskim1@etri.re.kr)

· 수정완료일자 : 2009년 11월 24일

Structure) 등을 이용해 고차성분을 제거하는 방법이 있다[1]~[4]. 그리고 SLH(Slot Line Hairpin)과 SIR(Stepped-Impedance Resonator) 등을 헤어핀 여파기 형태에 적용하여 저지 대역의 제거 특성을 향상시키는 방법들도 연구되어 있다[5],[6]. 하지만 대부분의 방법들이 고차 신호 제거에 촛점이 맞추어져 있다. 또한 접지면에 패턴을 사용하는 경우들은 기구물의 가공까지도 필요한 경우가 발생한다.

본 논문에서는 통과 대역 중심 주파수가 9.2 GHz, 대역폭이 1 GHz, LO 주파수가 7.2 GHz인 RF 송수신기에서 믹서를 통해 누설된 LO 신호를 제거하기 위해 헤어핀 여파기를 변형시키는 간단하고 효과적인 수단을 제안한다. 그리고 상용화에서 많은 장점을 가지고 있는 SMD 형태의 패키지로 제작하기 위해 LTCC 공정을 이용한 여파기 패키지에 대해서도 언급한다.

Ⅱ. 추가적인 결합 선로를 가지는 여파기 설계

2-1 변형된 헤어핀 여파기 설계

제안된 새로운 여파기의 성능을 평가하기 위해, 우선 중심 주파수 f_c=9.2 GHz에서 대역폭 FBW=15 %를 가지는 5차 Chebyshev 대역 통과 여파기를 설계하였다. 기판은 비유전율 ε_r=7, 두께 h=0.1 mm인 LTCC 기판 12층을 사용한다. 그림 1에 일반적인 5차 헤어핀 대역 통과 여파기의 레이아웃을 설계하였다.

위에 설계된 여파기를 바탕으로 7.2 GHz의 LO 주파수에 저지 대역 특성을 가지도록 만들기 위해서는 그림 1에 보이는 A 부분 또는 B부분을 이용해 결합회로를 구성하는 것이 가능하다. 이 논문에서는 A

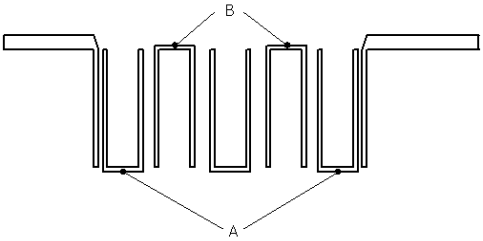

그림 1. 전통적인 5차 헤어핀 대역 통과 여파기
Fig. 1. A conventional 5th order hairpin BPF.

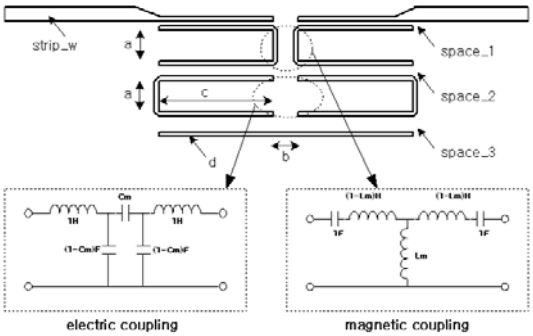

그림 2. 결합 선로를 가지는 새로운 5차 헤어핀 대역 통과 여파기와 결합 선로들의 등가회로
Fig. 2. Novel hairpin BPF with coupled-line and normalized equivalent circuits of coupled structures.

부분을 이용한 여파기에 대해서 언급한다. A 부분에 결합회로를 구성하기 위해서는 여파기의 중심을 기준으로 좌우를 각각 90도 틀어 그림 2와 같이 구성하면 된다. 여기서, 크게 두 가지의 결합 특성이 추가된 것을 볼 수 있다. 우선 선로 끝단의 결합에 의한 전기적 결합(electric coupling)이며, 이는 그림 2에서와 같이 pi 형태 커패시터로 표현된다. 그리고 선로 중간에서의 자기적 결합(magnetic coupling)으로, 이는 그림 2에서와 같이 T 형태의 인덕터로 표현된다. 이들 둘의 결합 특성이 추가되어 전송 제로를 만들 수 있다[7].

제안된 여파기를 이용해 LO 주파수에 대역 저지 특성을 가지도록 하기 위해서 가장 많은 영향을 주는 파라메터인 그림 2에 보이는 추가적인 결합 선로의 길이 a와 결합 선로 사이의 간격 b에 대해 시뮬레이션을 하였다. 설계의 일관성을 위해서 우선 대역 저지 주파수를 결정하는 가장 중요한 파라메터인 결합 선로의 길이 a를 조절해 제거를 원하는 주파수(여기서는 6.7, 7.0, 7.2 GHz)에 전송 제로를 만드는 결합 선로의 길이 a값을 찾았다. 그리고 대역 저지 주파수가 변하지 않는 범위 내에서 통과 대역의 특성을 보장하도록 결합 선로의 간격 b를 조절하였다. 그림 3에 나타난 시뮬레이션 결과, 약간의 통과 대역 주파수 이동을 제외하고는 3가지 모두의 여파기 시뮬레이션 결과에서 통과 대역의 삽입 손실이 1 dB 미만이고, 반사 손실이 −15 dB 이하인 결과를 얻었다. 그리고 결합 선로의 길이 및 간격이 짧아질수록

표 1. 제안된 대역 통과 여파기에 사용된 물리적 매개 변수
Table 1. Physical parameters for a proposed bandpass filter.

	a	*b*	*c*	*d*	space_1	space_1	space_1	strip_w
치수(mm)	0.7	0.55	2.65	0.1	0.1	0.25	0.35	0.33

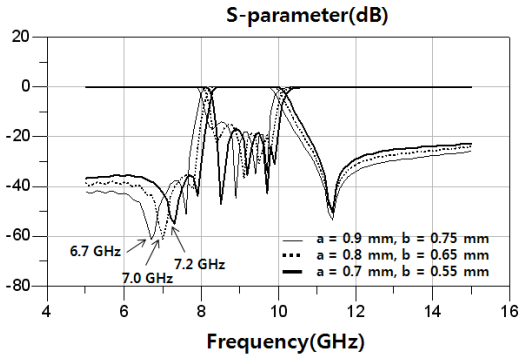

그림 3. 결합 선로의 길이와 간격에 따른 대역 저지 여파기의 *S*-parameter 시뮬레이션 결과
Fig. 3. *S*-parameter simulation results according to coupled-line lengths and gaps.

대역 저지 주파수가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이로써 통과 대역에 큰 성능 열화 없이 결합 선로의 길이와 간격을 적절히 조절해 원하는 주파수에 대역 저지 특성을 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

위에 언급된 3가지 설계 결과 중에 7.2 GHz에 대역 저지 특성을 가지는 여파기에 대해 설계에 사용된 파라메터를 표 1에 정리하였으며, 이 여파기와 기존의 일반적인 헤어핀 여파기와의 시뮬레이션 결과를 그림 4에 비교하였다.

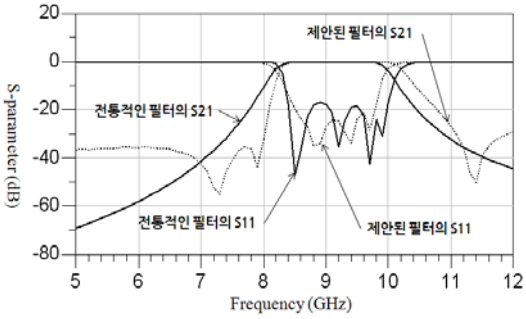

그림 4. 기존의 대역 통과 여파기와 제안된 대역 통과 여파기의 시뮬레이션 *S*-parameters.
Fig. 4. Simulated *S*-parameters of the conventional filter and a proposed filter.

그림 4에 보이는 바와 같이 기존의 헤어핀 대역 통과 여파기와 제안된 여파기의 설계 결과를 비교하면 기존 여파기가 대역폭에서 0.1 GHz 정도 좁은 것을 제외하고는 통과 대역에서 제안된 여파기와 거의 유사한 성능을 가진다. 그러나 제거해야 하는 LO 주파수(7.2 GHz)에서의 제거 특성이 기존 여파기가 36 dB이고, 제안된 여파기가 53 dB로 설계 결과로만 보면 17 dB 정도 더 우수한 것을 볼 수 있다. 실제 송신기의 믹서와 여파기를 통해 누설되는 LO 신호는 출력 신호보다 큰 신호이며, 2 GHz 정도만 떨어져 있기 때문에 증폭기의 범위 내에 존재하고, 최종단에서 고출력증폭기를 포화시킬 수 있다. 그렇기 때문에 링크 버짓 설계 결과, 기존의 여파기와 비교해 15 dB 더 큰 LO 신호 제거 성능을 필요로 한다. 표 2에 설계 요구 규격과 기존의 헤어핀 여파기 설계 결과 및 제안된 여파기 시뮬레이션 결과를 정리한 표를 보인다. 본 논문에 사용된 모든 시뮬레이션은 Agilent사의 momentum을 사용해 진행되었으며, 결과의 신뢰 성을 위해 CST사의 Microwave Studio로 다시 검증했다.

2-2 스트립 선로 대 마이크로스트립 선로 천이 설계

SMD 형태의 패키지를 가지는 단일 모듈 스트립

표 2. 설계 요구 규격과 기존의 여파기 및 제안된 여파기 시뮬레이션 결과
Table 2. Physical parameters for a proposed bandpass filter.

	설계 규격	기존 여파기 설계값	제안된 여파기 설계값
중심 주파수	9.2 GHz	9.1 GHz	9.25 GHz
대역폭	1.25 GHz	1.4 GHz	1.5 GHz
삽입 손실	< 1.5 dB	< 1 dB	< 1 dB
LO 제거 특성 @2 GHz	> 50 dB	36 dB	53 dB

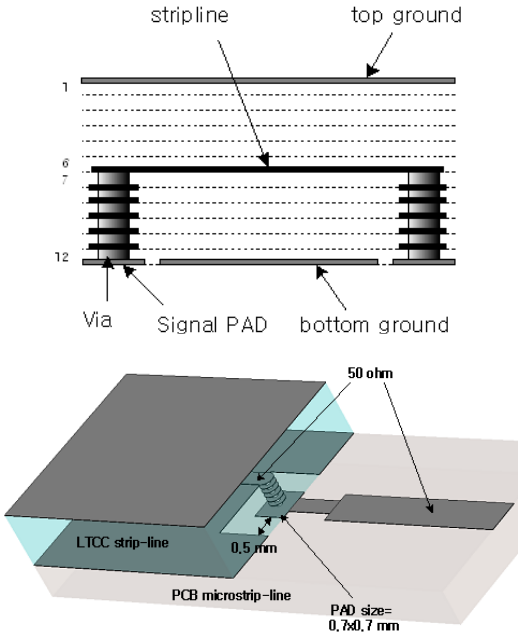

그림 5. 12층 LTCC 기판 정보 및 스트립 선로 대 마이크로스트립 선로 천이 구조
Fig. 5. 12 layers LTCC substrate information and strip-line-to-microstrip-line transition structure.

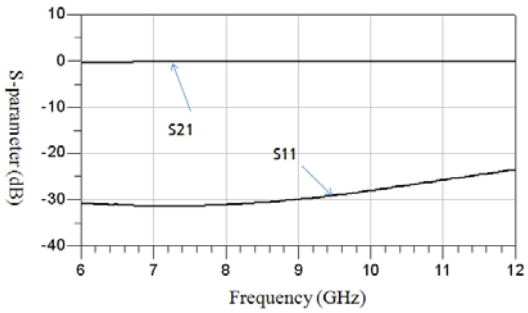

그림 6. LTCC 스트립 선로 대 PCB 마이크로스트립 선로 천이 구조 S-parameter 시뮬레이션 결과
Fig. 6. S-parameter simulated results of LTCC strip-line to PCB microstrip-line transition structure.

선로 여파기를 제작하는 경우, 내부에 존재하는 전송 선로를 이웃하는 소자와 연결하기 위해서 신호 비아와 내부 패턴들을 이용해 외부 패드 형태로 제작할 필요가 있다. 그리고 외부 전송 선로와의 연결과정에서 손실을 줄이기 위해 천이 회로를 추가해야 한다. 그림 5의 왼쪽은 사용된 기판 정보를 보여주는 것으로써 12층의 LTCC 기판이 적층되어 있는 것을 보여준다. 여기서, 여파기를 위한 패턴은 6층과 7층 사이에 위치하며, 스트립 선로를 형성하기 위해 최상면과 최하면에는 접지 비아를 이용해 접지시켜 준다. 그리고 최하면에는 신호의 입출력을 위한 패드가 있으며, 여파기와 패드 사이의 신호 연결은 신호 비아를 이용해 연결된다. 그림 5의 오른쪽은 LTCC 여파기와 외부 PCB 기판 사이의 천이 구조를 나타낸다. 이 방법은 와이어 본딩을 정합하기 위해 많이 알려진 L-C-L 정합 회로와 유사하다. 즉, 패드에서 발생한 커패시터 성분과 좁은 전송 선로로 이루어진 인덕턴스 성분을 이용해 원하는 주파수에서 좋은 전달 특성을 나타내도록 정합하는 방법이다. 이 구조를 시뮬레이션 한 결과 25 dB 이상의 반사 손실을 얻을 수 있었다(그림 6).

Ⅲ. 시뮬레이션 및 측정 결과

SMD 형태의 여파기 제작을 위해 유전율 7의 LTCC 기판 12층을 적층해 설계된 최종 레이아웃이 그림 7에 나타나 있다. 중심의 여파기를 기준으로 사면으로 접지용 비아 및 패턴들을 이용하여 최상면/최하면을 연결하여 스트립 선로가 정상적으로 동작하게 한다. 이를 이용해 제작된 LTCC 여파기와 실제 송수신 시스템에 장착된 사진이 그림 8에 있다.

그림 9의 측정 결과는 Anritsu Network Analyzer (37397C)와 Test Fixture(3680V)를 사용해 측정되었다. 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 저지 대역 주파수에서 약간의 차이를 보이기는 하나, 전체적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 측정 결과를 보면 9.2 GHz에서 0.8 dB의 삽입 손실(전대역에서 1.6 dB이하)과 전체 통과 대역에서 −10 dB 이하 반사 손실의 특성을 나타내었다. 그리고 7.2 GHz LO 주파수에서 50 dB의 우수한 제거 특성을 얻었다.

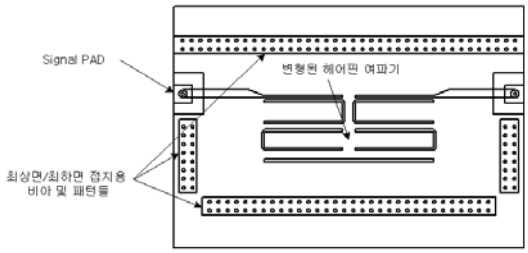

그림 7. LTCC 스트립 선로 여파기 레이아웃
Fig. 7. LTCC strip-line filter layout.

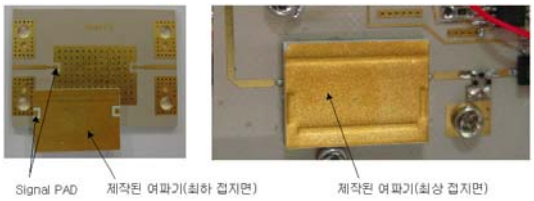

그림 8. 제작된 LTCC 스트립 선로 여파기 사진
Fig. 8. Photograph of fabricated LTCC strip-line filter.

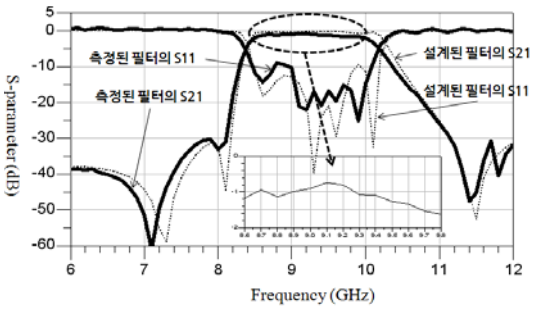

그림 9. LTCC 스트립 선로 여파기 측정값 및 시뮬레이션값
Fig. 9. Measured and simulated results of LTCC strip-line filter.

Ⅳ. 결 론

본 논문은 원하지 않는 주파수 성분을 제거하기 위해 기존 헤어핀 여파기의 간단한 구조 변형을 통해 특정 주파수에 저지 대역을 만드는 방법에 대해 제안하였다. 결과로 1.6 dB 이하의 삽입 손실을 유지하면서 LO 주파수에서 50 dB의 우수한 제거 특성을 얻을 수 있었다. 이는 기존의 여파기 설계 방식을 그대로 사용함으로써 설계가 용이하며, 간단을 파라메터 조절을 통해 저지 대역 주파수를 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있다. 그리고 LTCC 공정을 이용해 SMD 형태의 여파기를 제작해 단일 여파기 모듈로 사용할 수 있는 장점도 가진다. 향후 계속적인 연구에서 정확한 저지 대역 주파수를 결정하기 위해서는 본 논문의 구조에 따른 전기적 결합과 자기적 결합에 대한 이론적인 연구가 추가적으로 필요하다.

참 고 문 헌

[1] F. R. Yang, K. P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, "Analysis and application of coupled microstrips on periodically patterned ground plane", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Boston, MA, vol. 3, pp. 1529-1531, Jun. 2000.

[2] M. A. G. Laso, M. J. Erro, T. Lopetegi, D. Benito, M. J. Garde, and M. Sorolla, "Optimization of tapered bragg reflectors in microstrip technology", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 21, no. 2, pp. 231-245, Feb. 2000.

[3] B. S. Kim, J. W. Lee, and M. S. Song, "An implementation of harmonic-suppression microstrip filters with periodic grooves", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 14, no. 9, pp. 413-415, 2004.

[4] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, no. 1, pp. 86-93, Jan. 2001.

[5] Priyanka Mondal, Ajay Chakrabarty, "Hairpin bandpass filter with extended upper stopband", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 6, pp. 1463-1464, Jun. 2007.

[6] M. H. Yang, J. Xu, "Design of compact, broad-stopband lowpass filter using modified stepped impedance hairpin resonators", *Electronics Letters*, vol. 44, no. 20, Sep. 2008.

[7] J. S. Hong, M. J. Lancaster, "Couplings of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 20, pp. 2099-2109, Nov. 1996.

김 봉 수

1999년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학사)
2001년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2000년 12월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능동/수동회로 해석 및 설계, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석

김 광 선

1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 발진기, PLL 설계, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석

강 민 수

1996년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월~2000년 3월: (주)현대전자 통신사업본부 통신연구소
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, 이동통신 시스템

송 명 선

1984년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1986년 2월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 인지무선연구팀장
[주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 회로 설계 및 응용 시스템 개발

변 우 진

1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1999년 11월~2004년 8월: 삼성전기㈜ 책임연구원
2004년 9월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 시스템 설계, 밀리미터파 CMOS 및 MMIC 설계, 안테나 설계, 전자파 수치해석