韓國電磁波學會論文誌 第13卷 第10號 2002年 12月 論文 2002-13-10-11

고조파 감쇠특성을 향상시킨 변형된 마이크로스트립 여파기

Modified Microstrip Filters Improving the Suppression Performance of Harmonic Signals

김 봉 수 · 이 재 욱 · 송 명 선

Bong-S. Kim · Jae-W. Lee · Myung-S. Song

요 약

본 논문에서는 제 2차 고조파의 감쇠특성이 향상된 새로운 평행 결합선로 마이크로스트립 대역통과 여파기의 설계, 제작 및 특성에 관해서 소개한다. 결합선로에 연속적인 패턴을 사용함으로써 원하는 기본 통과대역의 특성을 향상시킴과 동시에 원하지 않는 고조파 통과대역은 제거한다. 또한 결합선로 사이의 간격, 마이크로스트립 선폭 및 길이와 같이 여파기 디자인을 위해 요구되는 매개변수의 복잡한 재계산이 필요하지 않다. 즉, 평행 결합선로 마이크로스트립 여파기의 전통적인 디자인 방법으로 설계한 기본 구조에 규칙적인 변형을 주면서 손쉽게 구현할 수 있다. 이 새로운 여파기의 성능을 평가하기 위해 2.5 GHz에서 10 % 대역폭을 가지는 3차 Butterworth 대역통과 여파기와 10 GHz에서 15 % 대역폭을 가지는 5차 Chebyshev 대역통과 여파기가 사용됐다. 각각 5개와 3개의 정사각형 홈이 사용됐을 때 30 dB 이상의 고조파 감쇠가 발생하며 통과대역에서는 더 우수한 차단 특성이 있다.

Key words : 평행 결합선로 여파기, 고조파 감쇠, 대역통과 여파기, 정사각형 홈

Abstract

In this paper, a new parallel-coupled-line microstrip BPF(BandPass Filter) improving the suppression performance of 2nd harmonic signals is studied. Using the consecutive pattern in coupled-line, the desired passband performance is improved and harmonic passband signal is rejected. Recalculation of classical filter design parameters(space-gap between lines, line widths and lengths) is not required. That is, after using the classical design methodology for parellel-coupled-line BPF, new filters can be easily realized by inserting periodic patterns in coupled-line. To investigate the validity of this novel technique, order-3 Butterworth BPF centered at 2.5 GHz with a 10 % FBW(Fractional BandWidth) and order-5 Chebyshev BPF centered at 10 GHz with a 15 % FBW were used. When five and three square grooves are used, over 30 dB harmonic suppression at 2nd harmonic is achieved in simulation and experiment.

Key words : Parallel-Coupled-Line Filter, Harmonic Suppression, Bandpass Filter, Square Groove

Ⅰ. 서 론

평행 결합선로 여파기는 여러 종류의 여파기를 구현하는데 사용될 수 있다. 마이크로스트립이나 스트립 선로 형태에서 약 20 % 이내의 대역폭에 대한 대역통과나 대역저지 결합선로 여파기의 구현은 특히 쉽다. Butterworth와 Chebyshev 기본형을 위해 요구되는 마이크로스트립 여파기 매개변수의 결정

한국전자통신연구원 무선방송연구소(Radio & Braodcasting Research Laboratory, ETRI)

· 논 문 번 호 : 20020829-103
· 수정완료일자 : 2002년 10월 8일

방법은 많은 자료들에 잘 정리되어 있다[1]~[3].

여파기의 이런 형태가 매우 일반적이고 구현이 단순하다 할지라도 설계 주파수의 통과대역에서와 유사한 특성이 고조파에서 발생한다는 기본적인 문제가 있다. 예를 들어, 주파수 변환기 뒤에 결합선로 여파기를 사용했을 경우 기본 주파수의 고조파가 계속해서 발생하는 주파수 변환기의 특성에 따라 여파기가 고조파 성분을 제거해 주어야 함에도 불구하고 아무런 감쇠 없이 고조파 성분을 통과시킴으로서 전체 시스템의 성능을 악화시킨다.

본 논문에서 사용하고자 하는 대역통과 여파기의 경우도 이런 고조파를 제거하기 위해서, 보통 추가적인 저역통과 여파기를 직렬로 연결할 필요가 있다. 이 방법은 여파기의 크기를 증가시키고 추가적인 삽입손실을 발생시킨다. 이에 단면적이 적으면서도 고조파를 제거할 수 있는 설계기술이 요구된다.

고조파를 억제할 수 있는 더욱 더 간결한 마이크로스트립 대역통과 여파기들은 평행 결합선로 여파기가 접지면에 uniplanar compact photonic-bandgap (UC-PBG) 구조를 가짐으로써 제안됐다[4]. 그러나 접지면에 UC-PBG 구조를 가지는 결합선로[4]는 물리적 그리고 전기적 파라메터의 변화와 관련해 평행 결합선로 여파기의 설계가 전체적으로 재계산되어야 한다. 다른 PBG 구조로는 접지면에 Bragg condition[5]을 사용해 사인파 또는 삼각파를 주기적으로 에칭함으로써 고조파를 제거하는 방법이 있다[6]. 여기서 삼각파는 45 dB 이상 그리고 사인파는 50 dB 이상의 고조파 억제효과가 있다[6]. PBG 구조와 마찬가지로 접지면에 에칭하지만 상대적으로 간단한 DGS(Defected Ground Structure) 방법이 있다[7]. 이는 전송선로의 커패시턴스와 인덕턴스 성분을 증가시킴으로써 특성을 변화시키는 기술로 DGS 구조를 전송선로를 따라 두개 이상 사용하면 저역통과 여파기의 특성을 가지게 된다.

이들 PBG나 DGS 방법은 여파기를 단독 모듈로 구성하여 접지면 전체에 원하는 주기적 패턴으로 에칭하거나 부분적으로 에칭하면 되지만 실제 응용에서는 전체 접지면 중 그 부분만을 따로 에칭해야 하므로, 작업시간과 비용면에서 간단하게 사용할 수 있는 방법은 아니다.

이를 개선할 목적으로 접지면에 사인파의 에칭을 하는 PBG 방법 대신에 평행 결합선로 마이크로스트립 대역통과 여파기의 선로폭을 주기적인 사인파 패턴으로 변경함으로써 고조파 성분을 없앰과 동시에 설계 주파수 응답은 거의 변하지 않게 하는 "wiggly-line 여파기" 기술이 제안되었다[8]. 하지만 결합선로에 원하는 사인파를 적용하고 에칭하는 것은 쉽지 않다. 그리고 고조파의 S_{21} 값이 줄어드는 대신 고조파 주파수의 양 옆으로 강한 S_{21} 값이 남아 있게 된다.

이런 문제들을 극복하기 위해, 앞서 언급된 논문에 소개된 개념들과 도파관에 주기적인 격자를 둠으로써 도파관이 여파기의 역할을 하게 된다는 원리를 마이크로스트립 선로에 적용시켜서 새로운 결과를 도출해 낼 수 있다. 본 논문에서는 먼저 중심 주파수가 2.5 GHz와 10 GHz에서 작동하는 두개의 평행 결합선로 여파기를 설계한 후, 각 결합선로에 정사각형 모양의 홈을 삽입함으로써 진행하도록 한다.

Ⅱ. 여파기 설계

2-1 평행 결합선로 여파기 설계

제안된 새로운 여파기의 성능을 평가하기 위해, 우선 중심 주파수 f_c = 2.5 GHz에서 대역폭 FBW = 10 %을 가지는 3차 Butterworth 대역통과 여파기를 설계하였다. 기판은 비유전율 ε_r = 10.2, 두께 h = 1.27 mm인 Rogers RT/6010을 사용한다.

이와 같은 요구사항을 만족하는 평행 결합선로 여파기의 설계는 다양한 여파기 설계에 관한 책을

표 1. 대역폭 10 %를 가지는 2.5 GHz 3차 Butterworth 대역통과 여파기 물리적 매개변수
Table 1. Physical parameters for the order-3 Butterworth BPF centered at 2.5 GHz with a 10 % FBW.

n	g_n	J_n / Y_0	Z_{0e} (Ω)	Z_{0o} (Ω)	w_n (mm)	s_n (mm)	l_n (mm)
1	1	0.3963	77.6677	38.0377	0.75	0.42	11.98
2	2	0.1111	56.1722	45.0622	1.09	1.70	11.54

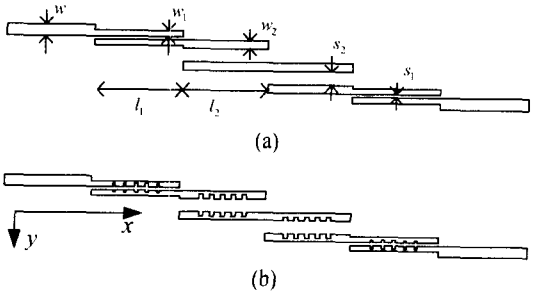

그림 1. 중심주파수가 2.5 GHz인 (a) 전통적인 평행 결합선로 대역통과 여파기 : 마이크로스트립 폭 w_n, 결합선로 길이 l_n, 결합선로 사이의 간격 s_n, (b) (a)에 5개의 정사각형 홈을 가진 변형된 여파기

Fig. 1. With 2.5 GHz center frequency (a) Classical parallel-coupled-line BPF: conductor strip widths w_n, length of coupled-line sections l_n, and separation between the coupled lines of the section s_n, (b) Modified filter resulting after applying the five square grooves at (a).

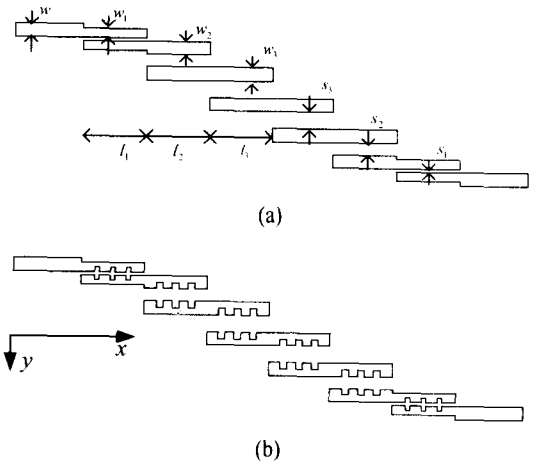

그림 2. 중심주파수가 10 GHz인 (a) 전통적인 평행 결합선로 대역통과 여파기, (b) (a)에 3개의 정사각형 홈을 가진 변형된 여파기

Fig. 2. With 10 GHz center frequency (a) Classical parallel-coupled-line BPF, (b) Modified filter resulting after applying the three square grooves at (a).

참조할 수 있다[1]-[3]. 이 논문에서는 앞에서 언급한 wiggly-line 여파기[8]와의 비교를 위해 같은 요구사항과 환경을 가지는 기본 평행 결합선로 여파기를 사용한다.

표 1에서, n은 차수, g_n은 저역통과 기본형 값, J_n/Y_0은 변환기 상수, $Z_{0e}(\Omega)$과 $Z_{0o}(\Omega)$는 각각 짝수와 홀수 모드 특성 임피던스를 나타내며, 입/출력 포트 마이크로스트립 폭 w는 1.5 mm(Z_0 = 50 Ω)로 설정하였다.

또한 변형된 여파기가 여파기 타입이나 주파수등과 상관없이 적용됨을 보이기 위해 중심 주파수 f_c =10 GHz에서 대역폭 FBW= 15 %을 가지는 5차 Chebyshev 대역통과 여파기를 설계하였다. 기판은 비유전율 ε_r = 10.2, 두께 h = 0.635 mm 인 것을 사용한다.

표 2에서 입/출력 포트 마이크로스트립 폭 w은 0.59 mm(Z_0 = 50Ω)로 설정하였다.

2-2 홈을 가지는 평행 결합선로 여파기 설계

위에 설계된 두개의 여파기를 바탕으로 주기적인 정사각형 형태를 갖는 홈을 결합선로의 결합되는 부분에 양쪽이 대칭이 되도록 위치시킨다. 여기서 l_n은 설계 주파수의 $\lambda_g/4$가 되는 길이이며, 2차 고조파에서는 $\lambda_g/2$가 된다.

그림 1(b)와 2(b)에서 k_x를 $+x$ 축 방향으로 진행하는 TEM 모드에 대한 파수(wavenumber)라고 하면 Bragg reflection을 일으키기 위한 조건은

$$2k_xD = 2\pi n (n = 1, 2, 3, \ldots\ldots, \text{정수}) \quad (1)$$

표 2. 대역폭 15 %를 가지는 10 GHz 5차 Chebyshev 대역통과 여파기 물리적 매개변수

Table 2. Physical parameters for the order-5 Chebyshev BPF centered at 10 GHz with a 15 % FBW.

n	g_n	J_n/Y_0	$Z_{0e}(\Omega)$	$Z_{0o}(\Omega)$	w_n (mm)	s_n (mm)	l_n (mm)
1	1.1468	0.4533	82.9367	37.6092	0.385	0.161	2.852
2	1.3712	0.1879	61.1600	42.3705	0.575	0.540	2.772
3	1.9740	0.1432	58.1839	43.8661	0.595	0.730	2.756

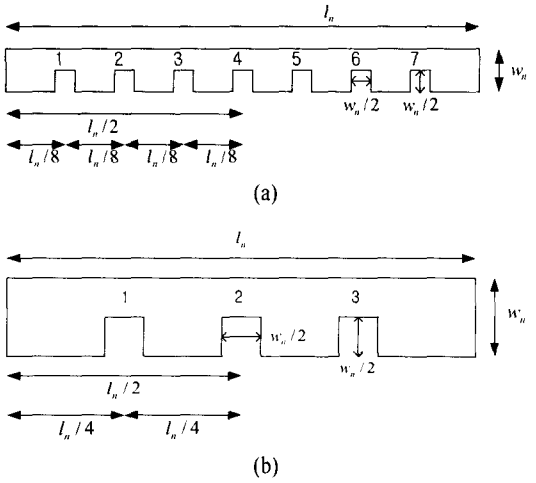

그림 3. (a) 2.5 GHz 여파기의 변형된 $\lambda_g/4$선로,
(b) 10 GHz 여파기의 변형된 $\lambda_g/4$선로
Fig. 3. (a) Modified line in 2.5 GHz filter,
(b) Modified line in 10 GHz filter.

의 식 (1)로 표현할 수 있으며, 이때 D는 pertubation 이 가해지는 격자의 주기를 나타낸다. 또한 설계한 중심 주파수 f_c에 대해서, 고조파인 $2f_c$에서 반사가 일어나기 위해서는 다음의 전개식

$$2\frac{2\pi}{\lambda_{gc}/2}D=2\pi\,(\text{만일 } n=1) \qquad (2)$$

의 식 (2)로부터 $D=\lambda_{gc}/4$임을 알 수 있다. 여기서, λ_{gc}는 설계 주파수에서의 파장이다. 이 때 D는 설계된 주파수의 고조파에서 감쇠가 일어나도록 하기 위한 perturbation 주기이며 beat wavelength라고도 한다[8].

그림 3(a), (b)에 정사각형 형태의 홈을 가지는 $\lambda_g/4$선로의 일반적인 형태를 나타내었다. 평행 결합선로 여파기에서 각 결합선로 폭의 반 $w_n/2$을 정사각형 한변의 길이로 가지고 정사각형 홈의 수를 2.5 GHz의 경우 1개(4), 3개(2,4,6), 5개(2,3,4,5,6) 그리고 7개(1,2,3,4,5,6,7)까지 변화하면서 그림과 같이 배치하고 10 GHz의 경우 1개(2), 3개(1,2,3)까지 변화하면서 그림과 같이 배치하였다. 각 정사각형의 중심은 각각 l_n의 1/8 그리고 1/4이 되는 지점이 된다.

Ⅲ. 시뮬레이션 및 측정 결과

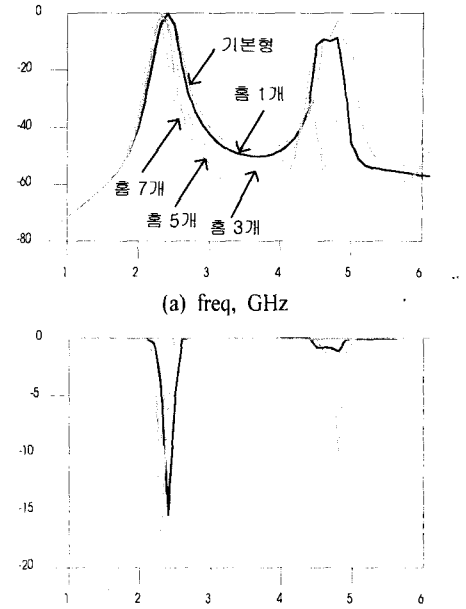

그림 4. 2.5 GHz 홈을 가지는 여파기에서 시뮬레이션된 (a) S_{21}, (b) S_{22}
Fig. 4. Simulated (a) S_{21} and (b) S_{11} for filter centered at 2.5 GHz with grooves.

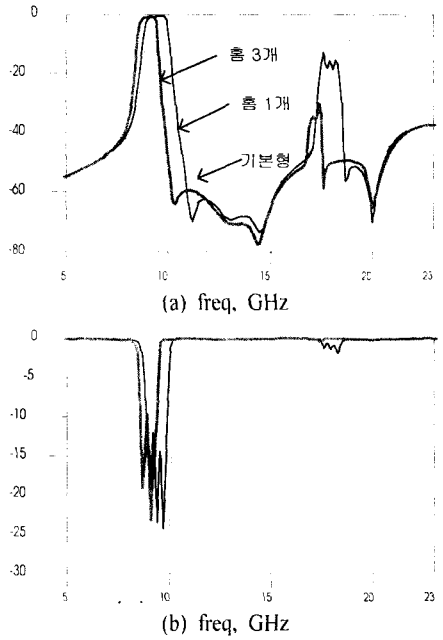

그림 5. 10 GHz 홈을 가지는 여파기에서 시뮬레이션된 (a) S_{21}, (b) S_{22}
Fig. 5. Simulated (a) S_{21} and (b) S_{11} for filter centered at 10 GHz with grooves.

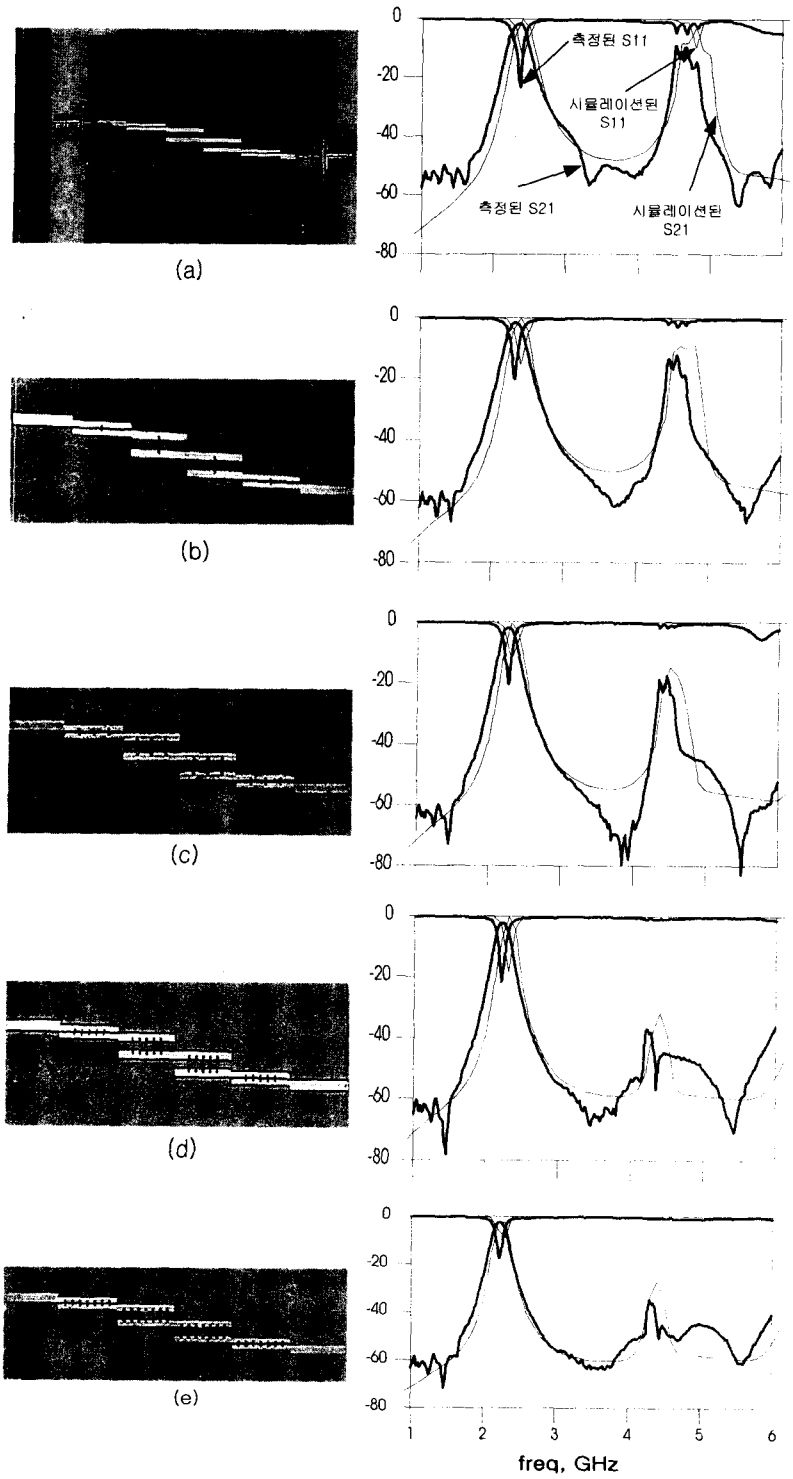

그림 6. 홈의 개수가 (a) 0개, (b) 1개, (c) 3개, (d) 5개, (e) 7개인 2.5 GHz 여파기 실물 사진과 측정 결과
Fig. 6. Photograph of filter centered at 2.5 GHz with groove numbers of (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 5, (e) 7 and measured results.

모든 시뮬레이션은 Ansoft사의 Ensemble ver. 5.0을 사용해 진행되었으며, 신뢰성을 위해 CST사의 Microwave Studio ver. 3.2로 다시 검증했다. 중심주파수가 2.5 GHz인 그림 4에서 기본형은 결합선로 여파기의 특징을 그대로 나타내 2차 고조파에서 높은 신호 레벨을 보이며 홈의 개수가 증가할수록 낮아짐을 알 수 있다. 그리고 홈의 개수가 증가할수록 여파기의 중심 주파수가 조금씩 낮아지며 대역폭이 줄어든다. 그 이유로는 스트립 선로상에 주기적인 홈이 가해짐으로 인해서 전파의 경로길이가 길어지는 효과가 발생한 것으로 여겨진다. 그러나 홈의 개수가 7개가 되면 고조파 성분이 다시 상승하여 고조파 억제 특성이 나빠짐을 알 수 있다. 그 원인은 perturbation이 일어나는 간격이 $l_g/4 \sim l_g/8$의 범위를 벗어나 더 작아지므로, perturbation이 가해진 홈간 간섭의 영향 증가로 보여진다.

그림 5는 중심주파수가 10 GHz인 여파기의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 2.5 GHz 여파기에서 발생하는 현상이 그대로 발생하며 홈이 3개일 때 30 dB 정도의 감쇠 효과를 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 이 시뮬레이션 결과들을 볼 때 여파기의 타입(Butterworth 또는 Chebyshev)이나 중심주파수에 관계없이 이러한 사각형의 홈들이 적용될 수 있다.

시뮬레이션을 통해 나타난 결과들을 검증하기 위해 2.5 GHz 여파기를 실제 제작 및 측정하였다. 제작에 사용한 기판은 Rogers RT/6010으로 비유전율 10.2, 두께 1.27 mm인 것을 사용하였고 측정은 에질런트사의 E8357A PNA Serises Network Analyzer를 사용해 1 GHz에서 6 GHz까지 측정하였다. 실제 제작한 여파기의 사진과 측정 결과가 그림 6에 있다.

그림 6을 보면 시뮬레이션과 측정결과가 거의 같은 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 여기서, S-파라메터를 보면 홈의 개수가 0에서 5개로 증가할수록 2차 고조파 성분이 점점 감소하여 5개일 때 가장 많은 감쇠를 일으켜 −35 dB 이하의 값을 갖는다. 그리고 시뮬레이션 결과에서도 보였듯이 7개일 때 조금 증가한다. 또한 차단대역에서의 cut-off 특성이 전통적인 결합선로 여파기와 비교해 10 dB 정도 향상된 것을 볼 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문은 전통적인 평행 결합선로 마이크로스트립 대역통과 여파기에서 선로에 정사각형 홈을 Bragg condition이 만족되도록 규칙적인 배열을 함으로써 고조파 제거 특성을 향상시키는 방법을 제안했다. 결과로 30 dB 이상의 고조파 감쇠효과는 물론 설계 주파수에서의 우수한 차단 특성을 얻을 수 있었다. 또한 전통적인 여파기의 물리적 매개변수를 재계산하지 않고 그대로 사용함으로써 작업시간 및 비용면에서 잇점을 갖는다.

참 고 문 헌

[1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed. Addison-Wesley, 1998.

[2] Jia-Sheng Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, 2001.

[3] G. Matthaei, L. F. Young and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House, 1980.

[4] 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, pp. 1529-1531, June 11-16, 2000.

[5] 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, 2000.

[6] T. Lopetegi, M. A. G. Laso, M. J. Erro, D. Benito, M. J. Garde, F. Falcone and M. Sorolla, "Novel Photonic bandgap microstrip structures using network topology", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 25, no. 1, pp. 33-36, Apr. 2000.

[7] 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.

[8] T. Lopetegi, M. A. G. Laso, J. Hernandez, M. Bacaicoa, D. Benito, M. J. Garde, M. Sorolla, and M. Guglielmi, "New microstrip "wiggly-line" filters with spurious passband suppression", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, no. 9, pp. 1593-1598, 2001.
[9] CST사의 Microwave Studio ver. 3.2
[10] Ansoft사의 Ensemble ver. 5.0

김 봉 수

1999년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학사)
2001년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 대학원 (공학석사)
2000년 12월 ~ 현재: 한국전자통신연구원 무선방송연구소 전파기반연구부 연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리 미터파 수동회로, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석

송 명 선

1984년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1986년 2월 ~ 현재: 한국전자통신연구원 무선방송연구소 광대역 RF연구팀장
[주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 회로 설계, 응용시스템 개발

이 재 욱

1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1995년 10월 ~ 1996년 9월: 일본큐슈대학교 정보공학과 교환학생
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1998년 3월 ~ 현재: 한국전자통신연구원 무선방송연구소 전파기반연구부 선임연구원
[주 관심분야] 고출력 증폭기 설계, 전자기수치해석, 저주파 및 광대역 안테나 설계, 마이크로파 및 밀리미터파 수동회로 해석 및 설계, EMI/EMC 해석