
J 인버터를 이용한 Hairpin Line 필터설계 연구

오 테레사*

The Study of a Hairpin Line Resonator Filter Design by Using a J Inverter

Teresa Oh

요 약

Hairpin 형태의 필터는 크기를 작게 설계할 수 있지만 설계방법이 복잡하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 기존의 전송선로 이론과 J 인버터 회로를 이용하여 Hairpin Line 필터 설계에 새롭게 적용하였으며, 설계하는데 필요한 J 와 b 파라미터를 정확히 구하는 방법을 제시하고 있다. 인접하는 소자간의 상호 결합이 없는 부분을 고려하였으며, 각 단에서의 결합성분에 대한 전기적인 결합선로 길이를 J 와 b 파라미터로부터 구할 수 있다. 제시하고 있는 설계방법으로 Serenade 8.0을 이용하여 중심 주파수 2.6GHz에서 동작하는 소형의 Hairpin Line 대역 통과 필터를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 특성을 확인하였다.

ABSTRACT

The filter of hairpin type can be designed small but has a demerit which a design method is complex. This paper suggests the method that a hairpin line filter is designed with applying a transmission line method and J inverter circuit, accurately calculated the J value and the b parameter. It is considered about the line have no the mutual coupling element with next line to each other, is calculated a length of electric coupling line about coupling element in each inverter stage from the J value and the b parameter. In order to show the validity of the proposed design method, band pass filter of small hairpin line is designed at center frequency 2.6 GHz, with Serenade 8.0 software tool and the simulation characteristics are compared with design results.

키워드

J inverter circuit, hairpin line, b parameter, transmission line method, Finite Element Method.

1. 서 론

초고속정보통신을 구성하기 위해 사용되는 마이크로로파 통신시스템의 소형, 경량화는 반드시 요구되는 필수요소로 마이크로스트립 선로를 이용한 마이크로파 소자라는 것은 이미 널리 알려진 사실이다^{[1]-[7]}. 또한 원하는 주파수를 선택하거나 분리해 내는 마이크로파 필터는 핵심 수동소자이며, 마이크로파 대역

통과필터 중에서 공진소자의 접지가 필요 없는 구조를 갖는 것으로 가장 많이 이용하고 있는 필터는 반과장 평행 결합선로 필터와 Hairpin Line 필터가 있다. Hairpin Line 필터 설계에 대한 일반식으로 Hairpin 형태로 구성된 평행결합선로 사이의 인덕턴스 행렬에서 등가회로를 유도^[8]한 것이 있으며, 그 래프 변환법과 Dual Property를 이용하여 일반식을

* 제주국립대학교 자연과학대학 물리학과

제시하고 있는 논문^[6]과 어드미턴스 인버터(J 인버터)를 이용한 일반식^[3] 등이 있다. 그러나 아직까지 Hairpin Line 공진기를 이용한 필터를 설계하는 명확한 해석이 이루어지지 않고 있으며, 설계 파라미터를 구하는 방법이 복잡하다.

본 논문에서는 Hairpin Line 공진기를 이용한 대역통과필터를 설계하기 위해서 전송선로이론을 적용하여 각단의 ABCD파라미터를 구하고, J 인버터를 이용하여 이론적인 대역통과 필터를 설계하였다.^[8] Hairpin 필터 설계에는 초단의 J 값의 영향이 크므로 Serenade8.0을 이용하여 설계 가능한 J 값을 추출하였다.

II. 이론과 설계방법

1. Hairpin Line 필터이론

마이크로스트립 라인을 이용하여 대역통과필터를 설계하기 위해서는 모든 주파수에 대하여 특성임피던스가 일정한 값을 가지며 90° 위상변화 시키는 특성을 갖는 J 인버터 회로의 ABCD파라미터를 이용한다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \pm j/J \\ \pm jJ & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 1은 Hairpin Line 필터와 이미턴스 등가회로이다. 그림 1(a)에서 보듯이 Hairpin Line 구조는 가운데 공진단 부분과 입출력단 부분으로 이루어져 있고, 그림 1(b)는 이미턴스 등가회로이다. 이러한 Hairpin Line 구조를 그림2의 평행결합선로 공진기의 이미턴스 등가회로로 나타낼 수 있다. 가운데 공진단 부분을 보면 이웃하는 공진기 사이에서 결합되는 길이는 $\pi/2 - \phi$ 이다.

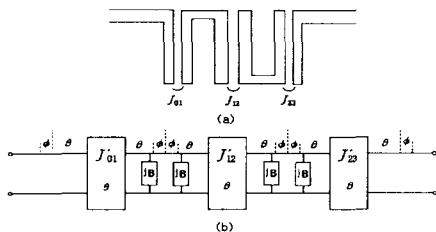


그림 1. Hairpin Line 필터와 이미턴스 등가회로
Fig. 1 Hairpin Line Filter and Immittance circuit

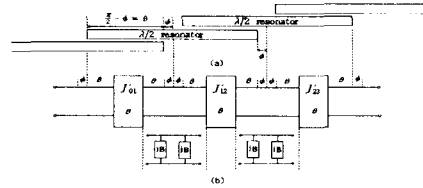
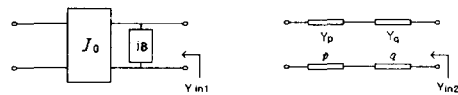


그림 2. Hairpin Line 필터를 만들기 위한 평행선로 이미턴스 등가회로
Fig. 2 Parallel line immittance circuit for Hairpin Line Filter



(a) 초단에서 인버터 등가회로, (b) 초단에서 전송선로 등가회로

그림 3. 초단에서 인버터와 전송선로 등가회로
(a) The first stage inverter, (b) An equivalent circuit
Fig. 3 The first stage inverter and an equivalent circuit.

그림 3은 초단에서 인버터와 전송선로 등가 회로이다. 초단의 인버터의 어드미턴스 값은

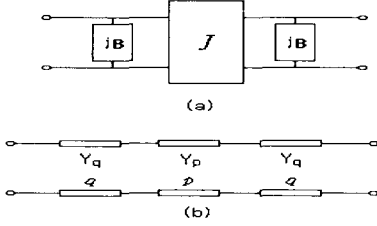
$$Y_{in1} = \frac{J_0^2}{Y_0} + jB \quad (2)$$

이며, 전송선로 경우는

$$Y_{in2} = Y_0 \frac{\left(1 - \frac{Y_q}{Y_p} \tanh p \tan q\right) + j \frac{Y_q}{Y_0} \left(\tan q - \frac{Y_p}{Y_q} \tanh p\right)}{\left(1 + \frac{Y_p}{Y_q} \tanh p \tan q\right) + j \frac{Y_0}{Y_q} \left(\tan q + \frac{Y_q}{Y_p} \tanh p\right)} \quad (3)$$

이 된다. (2)와 (3)식은 중심주파수에서 $B=0$ 이고 $Y_{in1} = Y_{in2}$ 되어야 하므로 (4)식을 유도할 수 있다. 그림3의 입출력 단에서 보면 입력포트와 첫째 공진기 사이의 결합길이는 $p=q=\pi/2 - \phi$ 로 일정하다.

그림 4는 공진단 부분에 대한 인버터 등가회로와 전송선로 등가회로를 보여준다. 공진기를 포함한 중간단에서의 전송선로 등가회로를 ABCD파라미터로 나타내면 (5)식이 된다.



(a) 공진단의 인버터 등가회로, (b) 공진단의 전송선로 등가회로
 그림 4. 공진단 부분에 대한 인버터 등가회로와 전송선로 등가회로
 (a) Inverter circuit for a resonator, (b) An equivalent circuit.
 fig. 4 Inverter circuit and an equivalent circuit for a resonator

$$A_t = D_t, \quad B_t C_t = -1 \text{ 을 만족하고}$$

$$A_t \Big|_{\omega = \omega_0} = 0 \tag{6}$$

$$J = \frac{1}{B_t} \Big|_{\omega = \omega_0} = 0 \tag{7}$$

$$B = -2JA_t \tag{8}$$

의 관계가 있으므로 (9)-(11)식을 얻을 수 있다.

$$q = \tan^{-1} \left(\frac{2 \coth p}{Y_q/Y_p - Y_p/Y_q} \right) \tag{9}$$

$$J = \frac{Y_q}{\cosh p \sin q + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{Y_q}{Y_p} + \frac{Y_p}{Y_q} \right) + \left(\frac{Y_q}{Y_p} - \frac{Y_p}{Y_q} \right) \cos q \right] \sinh p} \tag{10}$$

$$B = Y_q \frac{-2 \cos q + \left(\frac{Y_q}{Y_p} - \frac{Y_p}{Y_q} \right) \tanh p \sin q}{\sin q + \frac{1}{2} \tanh p \left[\left(\frac{Y_q}{Y_p} + \frac{Y_p}{Y_q} \right) + \left(\frac{Y_q}{Y_p} - \frac{Y_p}{Y_q} \right) \cos q \right]} \tag{11}$$

공진기의 기울기 파라미터 b 는

$$b = \frac{\omega_0}{2} \frac{dB}{d\omega} \Big|_{\omega = \omega_0} \tag{12}$$

으로부터 구할 수 있다. 이상과 같이 길이가 일정한 Hairpin Line 형태의 공진기를 이용한 대역통과 필터를 설계하기 위해서 반드시 필요한 각단의 J 값을 구할 수 있고 (13)-(17)식과 같은 표준적인 필터 설계공식에 대입하면 b 값도 알 수 있다.

$$J_{01} = \sqrt{\frac{Y_0 W b_1}{\omega_1' g_0 g_1}} \tag{13}$$

$$J_{j,j+1} \Big|_{j=1 \text{ to } (n-1)} = \frac{W}{\omega_1'} \sqrt{\frac{b_j b_{j+1}}{g_j g_{j+1}}} \tag{14}$$

$$J_{n,n+1} = \sqrt{\frac{Y_{n+1} W b_n}{\omega_1' g_n g_{n+1}}} \tag{15}$$

$$W = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \tag{16}$$

$$\frac{\omega_i'}{\omega_c} = \frac{2}{W} \left(\frac{f_i - f_0}{f_0} \right) \tag{17}$$

Hairpin Line 형태의 대역통과 필터 전체 ABCD 행렬식은 (18)식과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & j/J \\ jJ & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB & 1 \end{bmatrix} \tag{18}$$

각단의 J 와 b 를 차례대로 대입하면 주파수에 따른 산란행렬 값을 얻을 수 있다.

2. 설계방법

필터 디자인을 위한 구체적인 설계값은 J 값을 알고 있으므로 특성임피던스 Z_0 와 결합성분 $J_{j,j+1}$ 으로 구성된 결합선로의 우·기모드 임피던스[8]를 구하는 일반식인 (19), (20)식에서 구할 수 있다.

$$Z_{0e,j+1} = Z_0 (1 + J_{j,j+1} Z_0 + J_{j,j+1}^2 Z_0^2) \tag{19}$$

$$Z_{0o,j+1} = Z_0 (1 - J_{j,j+1} Z_0 + J_{j,j+1}^2 Z_0^2) \tag{20}$$

다중결합 선로의 구조는 우·기모드 임피던스로부터 (21)-(24)식과 같은 단일 선로인 경우에 대한 우·기모드 임피던스로 변화하는 것이 필요하다. 첨자 s 는 single line을 의미한다.

$$Z_{ose} = \frac{Z_{oe}}{2} \tag{21}$$

$$Z_{oso} = \frac{Z_{oo}}{2} \tag{22}$$

$$\left(\frac{w}{h} \right)_s = \frac{2(D-1)}{\pi} - \frac{2}{\pi} \log(2D-1) + \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \left[\log(D-1) + 0.293 - \frac{0.517}{\epsilon_r} \right] \tag{23}$$

$$D = \frac{60\pi^2}{Z_0(\epsilon_r)^{0.5}} \tag{24}$$

그리고 특성임피던스와 주파수에 따른 선로의 폭 w 과 선로사이의 간격 s 을 구할 수 있다^[8].

$$\frac{s}{h} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \times \left\{ \frac{\cosh[(\pi/2)(w/h)_{sc}] + \cosh[(\pi/2)(w/h)_{so}] - 2}{\cosh[(\pi/2)(w/h)_{so}] - \cosh[(\pi/2)(w/h)_{sc}]} \right\} \quad (25)$$

여기서 구한 선로폭 w 와 선로간격 s 를 이용하여 Serenade 8.0에서 설계하고 시뮬레이션 하였다. 설계과정의 순서도는 그림 5와 같다.

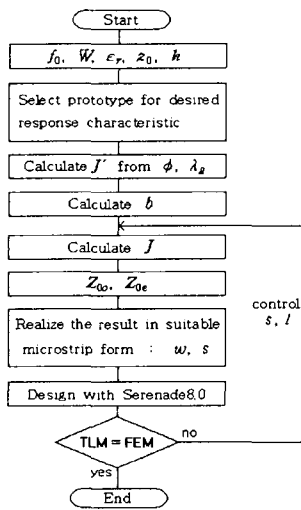
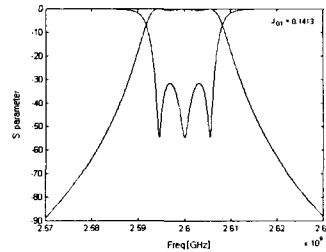


그림 5. 순서도
Fig. 5 Flow chart

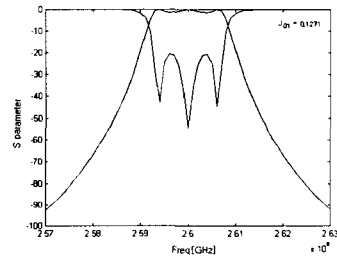
여기서 w 는 선로 폭, s 는 선로 간격, l 은 결합 선로 길이이며 TLM(Transmission Line Method)이다. 체비셰프 prototype의 저역통과 필터 특성으로부터 원하는 대역통과 특성을 갖는 이상적인 필터를 구현하였다. 이때 구한 J, b 값을 전송선로 이론에 의한 해석방법에 적용하여 실제 제작을 위한 선로의 물리적인 길이를 구하였다. 그리고 FEM(Finite Element Method)방법을 이용한 해석 툴인 Serenade 8.0을 이용하여 디자인하고 시뮬레이션 한 결과를 앞서 구한 이론적인 필터 해석 특성 결과와 비교하였다.

III. 시뮬레이션 결과

중심주파수 2.6GHz이며 $n=3$ 인 경우에 대하여 대역폭 1%, 리플=1, 유전율 $\epsilon_r=10$ 인 기판의 높이 $h=1.8\text{mm}$ 의 Hairpin Line 공진기의 시뮬레이션 결과이다.



(a) $J_{01} = 0.1413$



(b) $J_{01} = 0.1271$

그림 6. Hairpin Line 필터의 이론적인 해석 결과.
Fig. 6 The theoretical analyzing result of a Hairpin Line Filter.

Matlab을 이용한 이론적인 해석에 의하면 공진기의 첫째 단 부분의 초단의 J 값에 의해 통과대역특성이 좌우되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 인버터의 값이 클수록 공진기 설계시 선로사이의 간격이 좁아지게 되므로 제작상의 어려움이 따르게 된다. 이론적인 해석결과를 보면 그림 6(a) $J_{01} = 0.1413$ 은 S_{11} 이 30dB 이하로 좋은 통과대역특성을 나타내며, 그림 12(b)는 첫째단의 결합량이 $J_{01} = 0.1271$ 으로 설계하였을 때 통과대역에서 S_{11} 은 18dB까지 떨어지고 있다. 그림 6(b)의 설계 파라미터는 표1과 같다.

설계 회로도에는 그림 7과 같다.

표 1. 설계 파라미터.
Table 1. Design parameter.

설계규격	
선로 간격	3.8338mm
미결합부분 ϕ	10.5mm
초단선로간격	0.854mm
공진단선로간격	7.95mm



그림 7. 설계 회로도
Fig. 7 Design circuit

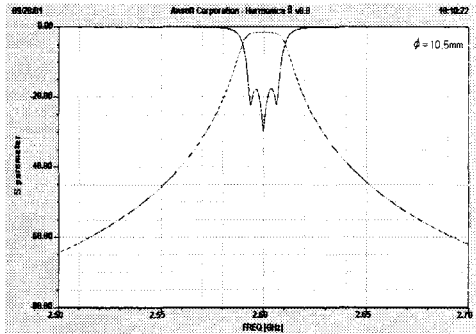
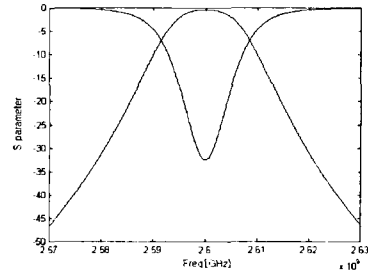
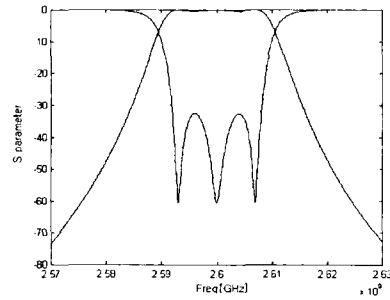


그림 8. Hairpin Line 필터의 Serenade8.0 해석 결과
Fig. 8 Serenade8.0 analytic result of a Hairpin Line Filter

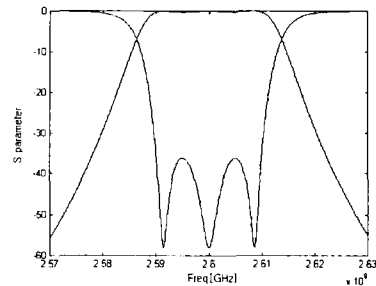
그림 8은 FEM(Finite Element Method) 방법의 해석 툴인 Serenade8.0의 시뮬레이션 결과이다. 그림 8의 결과는 이론적인 해석결과인 그림 6과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 9는 중심주파수의 통과대역에서 S_{11} 을 -30dB 이하로 떨어뜨리기 위한 방안과 제시한 설계 방법의 타당성을 입증하기 위해 단수와 리플 값을 다르게 설정하고 계산한 결과이다.



(a) ripple=2



(b) ripple=0.3



(c) ripple=0.1

그림 9. 설계 파라미터에 따른 특성 변화.
Fig. 9 Characteristic variance in accordance with design parameters.

단수를 2로 설계한 그림 9(1)의 결과는 S_{11} 이 -30dB 이하로 떨어졌지만 대역통과특성이 완만하게 나타난다. 그림 9의 (b)와 (c)에서는 리플이 작을수록 S_{11} 이 -30dB 이하로 떨어지기는 하나 대역폭이 커지는 특성을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 Hairpin Line 대역통과 필터를 설계하는데 중요한 파라미터인 초단의 결합성분과 더불어 공진기 내의 결합성분이 없는 부분에 대하여 전송선로 이론을 적용하여 고려해 주었으며, 중심주파수 2.6Ghz에서 1%의 대역통과 특성을 갖는 필터를 설계하고 FEM 해석방법의 Serenade8.0을 이용하여 제시한 설계 방법의 타당성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 윤석순, 박익모, 민병길, 최영환, 문승현, 이승민, 오병두, "고온초전도 헤어핀 콤 필터의 급전 구조에 관한 연구." 전자공학회논문집 제36권 D편 12호, pp 11-20, 12, 1999.
- [2] George L. Matthaei, Neal O. Fenzi, Roger J. Forse, Stephan M. Rohlfing, "Hairpin-Com Filters for HTS and Other Narrow-Band Applications." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., VOL. 45, No. 8, p.1226-1231, Aug. 1997.
- [3] 이동환, 이용우, 김철수, 김근영, 박준석, 안달, "임피던스의 영상 임피던스의 결합기를 갖는 hair-pin형태의 대역통과 필터 설계." 전자공학회논문집 제36권 D편 12호, pp 21-30, 12, 1999.
- [4] 황희용, 윤상원, 장익수, "인버터 이미턴스의 주파수 의존성을 고려한 대역통과 여파기의 설계" 전자공학회논문집 제 36권 D편 6호, pp 13-20, 6, 1999.
- [5] 윤형국, 윤영중, 김성민, 이상렬, "고온 초전체를 이용한 협대역 대역통과 여파기 설계." 한국통신학회논문집 제24권 제9B호, pp 1668-1675, 9, 1999.
- [6] 광우영, 박진우, "Hairpin Line 여파기의 간단한 등가회로." 한국통신학회논문집 제24권 제 9A호, pp 1434-1441, 9, 1999.
- [7] Morikazu Sagawa, Kenichi Takahashi, Mitsuo Makimoto, "Miniaturized Hairpin Resonator Filters and Their Application to

Receiver Front-End MIC's." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., VOL. 37, No. 12, p.1991-1997, Dec. 1989.

- [8] L.A.Trinogga, Guo Kaizhou, I.C.Hunter, Practical Microstrip Circuit Design, Chap. 2, 1991.

저 자 소 개



오데레사(Teresa Oh)

제주대학교 전자공학과 석사
제주대학교 통신공학과 박사
제주대학교 물리학과 Post-Doc

※ 관심분야 : 마이크로파 회로해석, 반도체 회로 설계 및 nano 박막 특성 해석.