

탭 선로의 등가회로를 이용한 여파기 설계

한성진^o, 김강욱
경북대학교 전자전기컴퓨터학부
Tel. 053-950-5510 / Fax. 053-940-8810

Design of Tapped Coupled-Line Filters Using a New Equivalent Circuit Model of Tapped lines

Sung-Jin Han^o, Kang Wook Kim
School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University
E-mail: kang_kim@ee.knu.ac.kr

Abstract

In this paper, a new design method for coupled-line filters with tapped input/output has been developed. The design equations for this tapped filter have been obtained using a new equivalent circuit model of tapped lines. From an edge coupled-line filter, tapped lines replaces the input/output coupled lines which tend to have very narrow gaps (few mils). Therefore, tapped coupled-line filters tend to be less sensitive to filter fabrication tolerances and to be easily fabricated using milling tools. The new filter design algorithm allows very accurate filter design for frequencies less than 20 GHz and bandwidth less than 20%. Above 20 GHz, the filter performance can be optimized starting from the filter design algorithm in this paper. Simulation problems with 2-D EM tools to characterize filter performance at high frequencies have shown to be solved by providing a channel for the filter to eliminate higher order modes.

Key words: tapped line, coupled line filter, equivalent model

I. 서론

최근 무선 통신용 마이크로파 시스템이 증가함에 따라 여러 가지 응용 분야에 사용되는 마이크로파 소자들이 개발되고 있다. 이러한 마이크로파 모듈에 쓰이는 여파기는 그 모양이나 특성, 규모, 설계 방법에 따라서 다양한 형태를 가진다. 특히, 마이크로스트립 선로를 이용한 결합 선로 여파기(edge coupled line filter)는 20% 이내의 넓은 대역폭(bandwidth)을 가진다. 이러한 형태의 여파기는 주로 다단의 대역 통과나 대역 저지 형태로 사용된다.[1][2] 그러나 결합 선로 여파기는 첫째단과 마지막단 결합 선로간의 간격이 좁아 제작하기에 어려우며, 단의 수가 많아 크기가 크다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하는 방법의 하나로, 탭(tab)을 사용한 결합 선로 여파기를 사용할 수 있다.[3][4] 탭을 사용한 결합 선로 여파기의 주파수 응답특성은 결합선로 대역통과 여파기와 거의 유사

한 특성을 가진다. 또한, 탭을 다단 결합 선로의 첫째단과 마지막단에 사용함으로써 크기를 줄일 수 있으며, 첫째단과 마지막단 결합 선로간의 간격이 좁은 단점을 보완하여, 제작의 용이성을 높일 수 있다. 본 논문에서는 결합 선로와 탭의 등가적인 관계를 수식적으로 유도하고 이를 이용한 설계의 예를 보였다. 또한 여파기의 특성해석 시에 주파수가 올라 갈수록 circuit 시뮬레이션과 EM 시뮬레이션이 일치하지 않게 되는데, 이 문제점을 channel을 이용하여 보완할 수 있음을 보였다.

II. 탭 선로를 사용한 결합선로 여파기 설계

2.1 결합선로의 등가모델

결합 선로 여파기의 구성요소인, 하나의 결합선로의 해석 과정은 다음과 같다. 먼저 개방된 결합선로

여파기의 구조와 그것의 등가회로를 그림 1에 나타내었다. 그림 1(b)로부터 하나의 결합선로에 대한 등가 모델을 얻을 수 있다.(그림 2)[5][6]

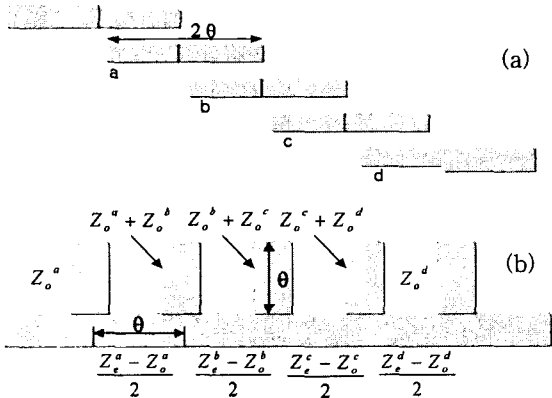


그림 1. (a) 개방된 결합선로 여파기, (b) 개방된 결합선로 여파기 등가회로

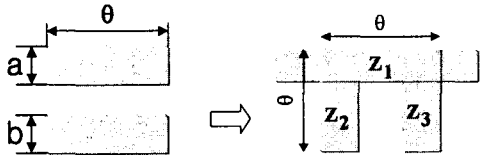


그림 2. 개방된 하나의 결합선로의 등가모델

그림 2에서의 선로 임피던스 Z_1 , Z_2 그리고 Z_3 는 아래의 수식에서와 같이 구할 수 있다.

$$Z_1 = \frac{1}{2} \sqrt{(Z_c^a - Z_e^a)(Z_c^b - Z_e^b)} \quad (1.a)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} (Z_c^a + Z_e^a) - Z_1 \quad (1.b)$$

$$Z_3 = \frac{1}{2} (Z_c^b + Z_e^b) - Z_1 \quad (1.c)$$

만약, $Z_c^a = Z_c^b$, $Z_e^a = Z_e^b$ 인 조건을 만족하면 ($a = b$) 각 임피던스 값은 아래와 같이 더 간단한 수식의 형태로 나타나게 된다.

$$Z_1 = \frac{Z_c - Z_e}{2}, \quad Z_2 = Z_3 = Z_c \quad (2)$$

위의 결합선로의 등가회로를 ABCD 행렬로 나타내면 식(3)과 같다. 단, 여기서는 무손실로 가정하였다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_1 \sin \beta l \\ \frac{j}{Z_1} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \beta l (1 + \frac{Z_1}{Z_3}) & jZ_1 \sin \beta l \\ j \left\{ \frac{1}{Z_1} \sin \beta l - \left(\frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{Z_2 Z_3} \cot \beta l \cos \beta l \right) \right\} & \cos \beta l (1 + \frac{Z_1}{Z_2}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

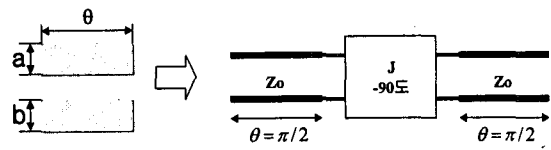


그림 3. J-인버터를 이용한 등가회로

결합선로의 ABCD 행렬을 얻는 다른 방법은 그림 3과 같이 J-인버터를 이용하여 구하는 방법이 있다. 이때 구한 ABCD 행렬은 다음과 같다.[1][5]

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & jZ_0 \sin \theta \\ \frac{j \sin \theta}{Z_0} & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -j/J \\ -jJ & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & jZ_0 \sin \theta \\ \frac{j \sin \theta}{Z_0} & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (JZ_0 + \frac{1}{JZ_0}) \sin \theta \cos \theta & j(JZ_0^2 \sin^2 \theta - \frac{\cos^2 \theta}{J}) \\ j(\frac{1}{JZ_0^2} \sin^2 \theta - J \cos^2 \theta) & (JZ_0 + \frac{1}{JZ_0}) \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

그리고 다음의 수식을 이용하면 ABCD 행렬의 각 요소를 Z_{oe} , Z_{oo} , θ 로 나타낼 수 가 있다.

$$\frac{1}{2} (Z_{oe} - Z_{oo}) = JZ_0^2, \quad \frac{Z_{oe} + Z_{oo}}{Z_{oe} - Z_{oo}} = JZ_0 + \frac{1}{JZ_0} \quad (5)$$

만약, $\theta = \pi/2$ 라면 ABCD 행렬의 각 요소값들은 다음과 같이 간단한 표현식으로 주어진다.

$$A = D = 0, \quad B = j \frac{(Z_{oe} - Z_{oo})}{2}, \quad C = j \frac{2}{(Z_{oe} - Z_{oo})} \quad (6)$$

2.2 탭 선로의 등가모델

Tap을 사용한 결합선로 여파기 설계를 위해 먼저 그림 4에서 보는 것과 같이 탭 선로를 변형시킨다. 이는 ABCD 행렬을 쉽게 구하여 그 특성을 파악하기 위해서이다. 이러한 변형은 약 20 GHz 이하의 대역에서는 크게 영향을 받지 않는다.

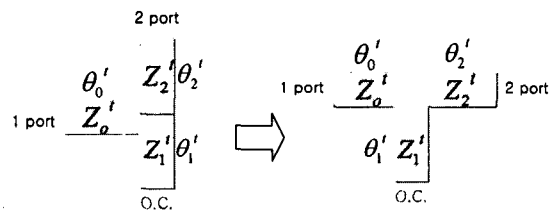


그림 4. 탭 선로의 변형 모델

그림 4에서와 같이 변형된 모델에서의 ABCD 행렬은 아래의 수식들과 같이 나타낼 수 있다. 단, 여기서도 무손실로 가정하였다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_r = \begin{bmatrix} \cos \beta l_0 & jZ_0 \sin \beta l_0 \\ \frac{j}{Z_0} \sin \beta l_0 & \cos \beta l_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_1' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta l_2 & jZ_2' \sin \beta l_2 \\ \frac{j}{Z_2} \sin \beta l_2 & \cos \beta l_2 \end{bmatrix}$$

여기서 $Y_1' = \frac{j}{Z_1'} \tan \beta l_1$ 이다. 이 값을 위에서 구한 ABCD 행렬에 대입하여 정리하면 식 (7)을 얻는다.

$$A = \cos \beta l_2 \left(\cos \beta l_0 - \frac{Z_0}{Z_1'} \sin \beta l_0 \tan \beta l_1 \right) - \frac{Z_0}{Z_2} \sin \beta l_0 \sin \beta l_2 \quad (7.a)$$

$$B = jZ_2' \sin \beta l_2 \left(\cos \beta l_0 - \frac{Z_0}{Z_1'} \sin \beta l_0 \tan \beta l_1 \right) + jZ_0' \sin \beta l_0 \cos \beta l_2 \quad (7.b)$$

$$C = j \cos \beta l_2 \left(\frac{1}{Z_0} \sin \beta l_0 + \frac{1}{Z_1'} \cos \beta l_0 \tan \beta l_1 \right) + \frac{j}{Z_2} \cos \beta l_0 \sin \beta l_2 \quad (7.c)$$

$$D = \cos \beta l_0 \left(\cos \beta l_2 - \frac{Z_2}{Z_1'} \sin \beta l_2 \tan \beta l_1 \right) - \frac{Z_2}{Z_0} \sin \beta l_0 \sin \beta l_2 \quad (7.d)$$

2.3 탭 선로 등가모델을 사용한 여파기 설계

하나의 결합선로에 대한 ABCD 행렬 식(3)과 탭 선로의 ABCD 행렬 식(7)이 서로 같다고 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_c = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_r \quad (8)$$

결합선로의 ABCD 행렬의 요소는 수식 (3)에서 구했다. 이 값을 식(7)에서 주어진 탭 선로의 ABCD 파라미터 값과 비교하여 등가 모델을 도출해 낼 수 있다. 우선 결합선로 등가모델에서 $A_c = D_c$ 이므로, 행렬의 요소 A_r 와 D_r 는 같아야 함을 알 수 있다. 따라서 식(9)와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$Z_0' = Z_2' \quad , \quad \theta_0' = \theta_2' \quad (9)$$

이렇게 가정하고 구한 탭의 ABCD 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_r = D_r = (\cos \beta l_2)^2 - \frac{Z_2'}{Z_1'} \sin \beta l_2 \cos \beta l_2 \tan \beta l_1 - (\sin \beta l_2)^2 \quad (10)$$

$$B_r = jZ_2' \sin \beta l_2 \left(2 \cos \beta l_2 - \frac{Z_2'}{Z_1'} \sin \beta l_2 \tan \beta l_1 \right) \quad (11)$$

$$C_r = j \cos \beta l_2 \left(\frac{2}{Z_2} \sin \beta l_2 + \frac{1}{Z_1'} \cos \beta l_2 \tan \beta l_1 \right) \quad (12)$$

위 탭 선로에 대한 식(9)의 가정과 결합선로의 등가회로를 그림으로 나타내어 보면 그림 5와 같다.

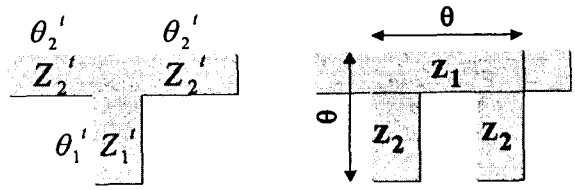


그림 5. 변형된 탭 선로와 결합선로의 모델

$$Z_0' = Z_2' \quad , \quad \theta_0' = \theta_2'$$

변형된 탭 선로와 결합선로 모델을 비교하여 해를 구하기 위해 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\beta l_1 = \theta \quad , \quad \beta l_2 = \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (13.a)$$

$$X = \cos \beta l \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (13.b)$$

$$Y = Z_1 \sin \beta l \quad (13.c)$$

$$Z = \frac{1}{Z_1} \sin \beta l - \left(\frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{Z_2 Z_3} \cot \beta l \cos \beta l \right) \quad (13.d)$$

결합선로의 ABCD 행렬과 탭 선로의 ABCD 행렬이 같다고 하면, 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$2(\sin \theta)^2 - \frac{Z_2'}{Z_1'} (\sin \theta)^2 = X + 1 \quad (14)$$

$$2Z_2' \sin \theta \cos \theta - \frac{(Z_2')^2}{Z_1'} \sin \theta \cos \theta = Y \quad (15)$$

$$\frac{(\sin \theta)^3}{Z_1' \cos \theta} + \frac{2}{Z_2'} \sin \theta \cos \theta = Z \quad (16)$$

식(14)~(16)을 정리하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$Z_2' = \frac{Y \sin \theta}{(X + 1) \cos \theta} = \frac{Y}{(X + 1)} \tan \theta \quad (17)$$

$$Z_1' = \frac{Y \tan \theta (\sin \theta)^2}{\left\{ 2(\sin \theta)^2 - (X + 1) \right\} (X + 1)} = \frac{\tan \theta (\sin \theta)^2}{\left\{ Z - \frac{2(X + 1)}{Y} (\cos \theta)^2 \right\}} \quad (18)$$

위의 수식 (17)과 (18)에서 X, Y, Z의 값은 수식 (6)을 이용하면 쉽게 원하는 파라미터들을 구해 낼 수 있다. 이렇게 해서 탭 선로와 결합선로 등가회로를 구성하였고 여파기의 나머지 부분, 즉, 첫째단과 마지막단을 제외한 부분은 결합선로 여파기와 동일하게 일치시키면 여파기의 설계는 끝나게 된다. 단, 여파기 설계를 위해 가정한 조건 식(9)외에 다른 가정을 들 수도 있으나, 그렇게 되면 추가적인 변수의 발생으로 인해 여파기 특성이 많이 변하게 될 수 있다.

III. 여파기 설계 및 결과

그림 6은 앞에서 전개한 수식들을 이용해서 작성한

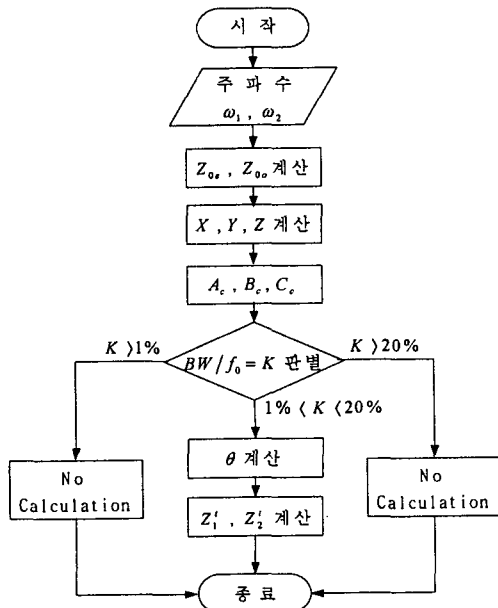


그림 6. 탭을 사용한 여파기 설계 알고리즘

탭 여파기 설계 알고리즘이다. 이 알고리즘은 Mathsoft사의 Mathcad를 사용하여 여파기의 설계 파라미터를 구하였고, Ansoft사의 Designer 시뮬레이션 Tool을 이용하여 탭 선로를 사용한 결합선로 여파기를 시뮬레이션 하였다. 또한, 결합선로 대역통과 여파기와 그 특성을 비교하였다. 설계한 대역통과 여파기의 통과 대역은 9.6 GHz에서 10.4 GHz로서 800 MHz의 대역폭을 갖고 중심주파수는 10 GHz이다. 그림 7은 결합선로 대역통과 여파기 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

그림 7에 나타난 결합선로 대역통과 여파기인 경우에는 삽입손실은 -2.24 dB 였고 반사손실은 -16.80 dB 였으며, 첫단과 마지막단의 결합 선로간의 폭은 2.2 mil 이하였다. 이와 비교하여 탭을 사용한 결합선로 필터인 경우(그림 8)에는 삽입손실 -2.14 dB, 반사손실 -42.62 dB 이며 첫 단과 마지막 단 사이의 폭은 29 mil 이다. 따라서, 제작에도 훨씬 용이할 뿐 아니라 제작오차에 따른 성능저하를 최소화 시킬 수 있다. 시뮬레이션 결과, 결합선로 대역통과 여파기에 비해 더 좋은 특성을 나타내었다.

그림 9(a)는 20 GHz 대역통과 여파기의 circuit 시뮬레이션 부분이고 9(b)는 Ansoft사의 Ensemble로 EM 시뮬레이션 결과이다. 그림 9(b)를 살펴보면 대역폭 내에 원하지 않는 작은 공진이 발생한 것을 볼 수 있다. 또한 circuit 시뮬레이션의 결과와 EM 시뮬레이션의 결과가 다른 것을 알 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 여파기를 둘러싼 channel을 삽입하였다. 이 channel은 포트 이외의 부분을 금

속으로 감싼 것이다. Channel의 크기결정은 도파관 크기를 결정하는 방법과 유사한 방법으로 설계할 수 있다. Channel을 삽입한 Layout을 그림 9(c)에 보았다. 그리고 그 결과를 그림 9(d)에 나타내었다. 그림 9(d)를 보면 9(b)에서 보이던 작은 공진 부분이 사라

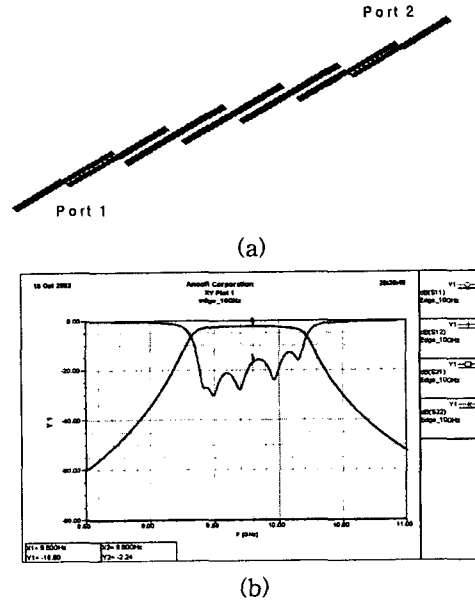


그림 7. (a) 결합선로 여파기 layout
(b) 결합선로 여파기 시뮬레이션 결과

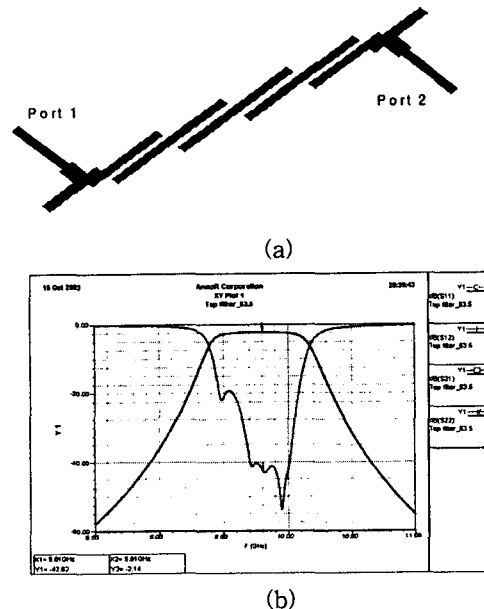
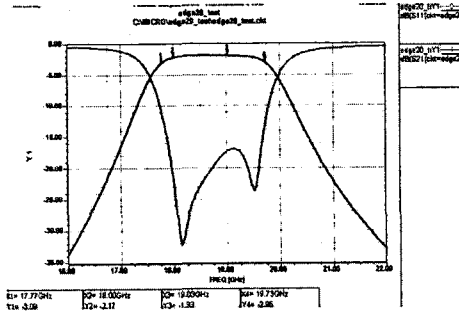


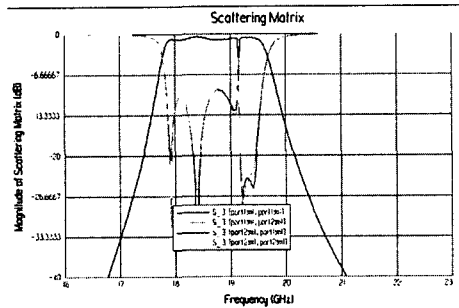
그림 8. (a) 탭을 사용한 여파기 layout
(b) 탭을 사용한 여파기 시뮬레이션 결과

진 것을 알 수 있으며 전체적으로 circuit 시뮬레이션과 일치하고 있음을 보여주고 있다.

EM 시뮬레이션 결과

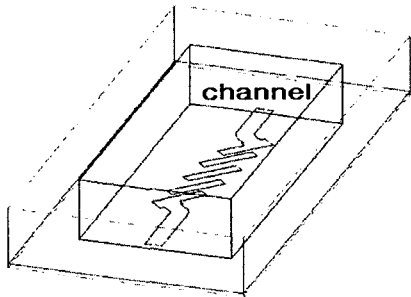


(a)

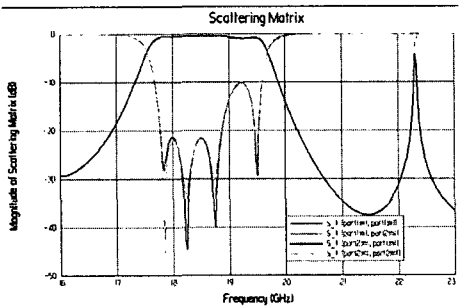


(b)

그림 9. (a) 대역통과 여파기 시뮬레이션 결과
(b) 대역통과 여파기 EM 시뮬레이션 결과



(c)



(d)

그림 9. (c) 대역통과 여파기 channel layout
(d) Channel을 사용한 대역통과 여파기

IV. 결론

본 논문에서는 결합선로 여파기와 비슷한 주파수 응답 특성을 가지며, 제작에 더 용이하고 제작오차에 덜 민감한 탭을 사용한 결합선로 여파기를 탭선로 등가회로를 사용하여 설계하였다. 여파기의 설계를 쉽게 하기 위해서 등가회로에서 얻은 수식을 이용하여 여파기를 설계하는 프로그램을 개발하였고, 그 결과를 시뮬레이션을 통해서 확인하였다. 단, 탭의 변형 모델부분에서 주파수가 높은 대역으로 가면 등가성이 달라질 수 있으므로 20 GHz 미만에서는 정확히 설계가 되지만, 그보다 높은 주파수에서는 본 논문의 알고리즘에 의한 설계를 기준으로 최적화가 필요할 것이다. 또한, 높은 주파수(즉, 20 GHz 이상)에서 동작하는 여파기 설계시 EM 시뮬레이터를 사용하더라도 고차의 모드 때문에 좋지 않은 결과를 도출할 수 있다. 이때, 고차 모드를 억제하는 채널을 도입함으로써 EM 시뮬레이션에 정확한 여파기의 특성을 계산할 수 있다.

Acknowledgement

“이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.” (KRF-2002-003-D002000)

참고 문헌

- [1] David M. Pozar, "Microwave Engineering second edition", John Wiley & Sons, 1998
- [2] 박준석, "초고주파 필터 최신 기술동향", 한국전자파학회지 vol.14, no. 3 pp. 1-2, 2003년 7월
- [3] Joseph S. Wong, "Microstrip Tapped-Line Filter Design", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-27, No. 1, pp. 44-50, Jan 1979
- [4] Chen Y. Ho, John H. Weidman, "Improved Design of Parallel Coupled Line Filters with Tapped Input/Output", *Microwave Journal*, Oct 1983
- [5] G. Matthaei, L. Young and E.M.T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. Artec. House, 1980
- [6] Jia-Sheng Hong and M.J. Lancaster, "Microstrip Filters for RF/Microwave Applications", John Wiley & Sons, 2001