저지대역 반사특성을 개선한 대역통과 여파기 설계

조정훈[0], 황희용*
*서강대학교 전자공학과 초고주파 연구실
TEL : 02-713-8512 / FAX : 02-713-8512

The Design of Bandpass Filter with Improved Return Loss at the Stopband

Jeong-Hoon Cho*, Hee-Young Hwang*
*Dept. of Electronics Eng., Sogang Univ.
E-mail : jhcho@sogang.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 기존의 RF 여파기가 대역 내에서만 정합이 되는 특성을 개선하여 대역 외에서도 50Ω 정합 특성을 가지는 여파기 설계 기술을 제안하였다. 대역 외에서 정합 시켜 주는 방법으로 결합기와 대역 통과 여파기로 구성된 Balance Type과 결합기와 대역 저지 여파기로 대역 통과 여파기 특성을 가지는 Reflection Type을 제시하여 그 특성을 확인하였다. 각각의 형태는 광대역 90도 3-dB 결합기를 사용한 것으로 결합기의 대역폭과 진폭 및 위상 오차에 따라 저지 대역에서의 정합 특성이 좌우되며, 이에 광대역의 3-dB 결합기를 설계 및 적용하여 광대역의 반사 손실 개선 효과를 얻을 수 있었다.

제작 결과 Balance type의 경우 1.2 GHz~2.6 GHz까지 대역 내에서 -10 dB에서 -15 dB의 반사 손실 특성을 가지고 대역 저지 특성이 우수하며, Reflection type은 DC에서 3.3GHz까지 반사손실이 -15 dB 내외로 광대역 정합 특성을 가진다. 특히, 저주파 반사 특성이 우수하여 저주파 발진 가능성이 큰 회로 설계에 유용하다.

Keyword : Reflectionless filter, Balance type, Reflection type

Ⅰ. 서론

대역통과 여파기는 채널 선택, 이미지 신호제거 및 스퓨리어스 제거를 위해서 대부분의 RF 통신 시스템에 사용된다. 한 예로, RF 수신 단에서의 여파기는 안테나 초단 여파기, LNA와 Mixer 사이에 사용되는 여파기 및 IF 여파기 등으로 사용된다.(그림 1) 일반적으로

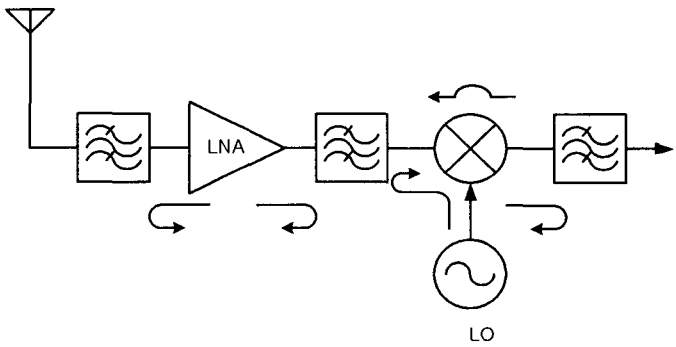

그림 1. RF 수신단

RF 시스템에서 사용되는 여파기는 대역 내에서만 정합 특성을 가지며, 대역 외에서는 부정합으로 인해 입력된 신호는 다시 입력 단으로 전반사 된다. 이러한 여파기 특성은 RF 시스템을 설계하는데 있어서 다음과 같은 문제점들을 유발시킨다. 첫째로 시스템의 불안정을 초래한다. 능동 회로의 입출력 단자가 대역통과 여파기와 연결될 때, 통과대역 밖에서는 50Ω이 아니므로 그 부정합으로 인한 반사파가 발생한다. 따라서, 통과대역 이외의 신호가 여파기에서 반사됨으로써 시스템의 불안정성이 높아진다. 특히 저주파 대역에서 능동 소자의 입출력 단자가 전반사 특성을 가질 경우 소자 내부의 기생 발진 가능성이 높다. 둘째, 혼합기에서 발생하는 대역 이외의 스퓨리어스 신호들이 IF 여파기에 의해 반사되어 다시 입력 단자로 되돌아가게 됨으로써 불요파 방사나 시스템 노이즈로 작용한다. 셋째, 국부 발진기에서 RF 단자로 통과된 신호가 영상제거 여파기에서 반사되어 혼합기로 인가됨으로써 self mixing 현상이 발생한다. 이것은 Homodyne 수신기에서의 DC Offset 문제의 원인이 된다. 이러한 현상들은 대역 내에서의 정합만으로 이루어진 여파기를 사용함으로서 발생하는 문제들이다. 따라서, 이런 문제점들을 해결하기 위해서는 대역 외에서도 정합이 된 여파기가 필요하게 된다.

기존에 이러한 기능의 여파기를 설계하기 위한 방법은 여파기 입출력 단자에 Isolator를 사용하는 것이었다.[1] 이것은 여파기의 대역 외에서 반사된 신호가 isolator에서 흡수해서 입력 단으로의 feedback을 최소화한 것이다. 그러나 소형화 및 경량화가 요구되는 시스템에 적용하기는 부적합하며, 대역 제한적인 특성이 있다. 그 외 multiplex의 개념을 적용한 무반사 여파기 설계 방법이 있다.[1] 이것은 서로 다른 대역 주파수의 여파기를 병렬로 연결하여 대역 외의 신호는 다른 대역 여파기를 거쳐 50Ω 종단 시켜주게 된다. 또 다른 방법으로는 동일 대역의 대역 통과 여파기와 대역 저지 여파기를 사용하는 것이다.[2] 대역 외의 신호는 대역 저지 여파기를 통해 50Ω 정합이 되고 대역 내에서는 대역 저지 여파기에서 개방으로 보여 대역 통과 여파기를 거치게 된다. 이러한 구조들은 서로 다른 대역 또는 형태의 여파기를 설계해야 하는 문제가 있다. 따라서, 본 논문에서는 동종의 여파기를 사용하여 광대역의 반사파 제거 특성을 가지는 대역통과 여파기 구조를 제안하였으며, 설계 제작하여 그 특성을 확인하였다.

II. 저지대역 반사특성이 개선된 여파기

1. Balance Type 대역통과 여파기

저지대역에서 반사파가 없는 여파기를 설계하기 위해서 제안하는 구조는 Balance Type과 Reflection Type이다. 먼저 Balance type의 경우, 그림 2에서처럼 동일한 2개의 90° 3-dB

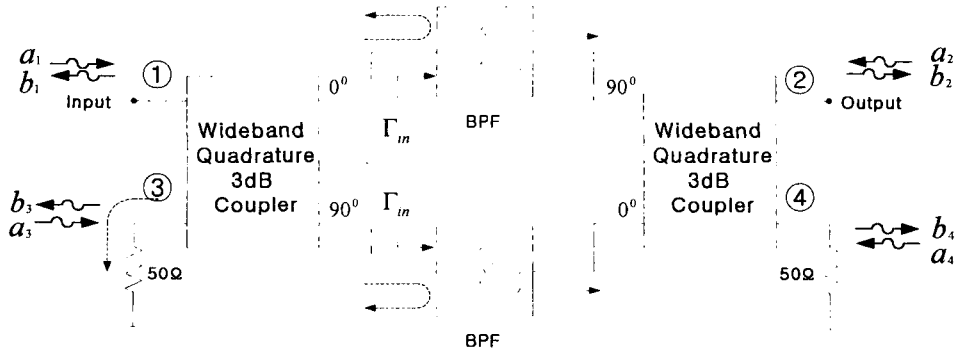

그림 2. Balance Type

결합기와 2개의 대역통과 여파기로 구성되어 있다. 여파기 대역 내에서는 상단과 하단으로 통과된 신호가 최종 단에서 동위상으로 결합되어 출력 단자에 나타나게 된다. 여파기 대역 외에서는 3-dB 결합기를 통과한 신호가 여파기에서 전반사 되어 입력 단자에서는 180° 위상 차로 제거되며, Isolation 단자로는 동위상이 되어 50Ω 종단이 된다. 따라서, 입력 정합 특성은 각 여파기에서 반사된 신호의 진폭 및 위상에 따라 결정되며 이는 3-dB 결합기의 대역폭에 따라 저지대역 반사파 제거 특성 대역폭이 결정됨을 의미한다.

대역저지 특성을 개선한 여파기의 2단자 S-parameter를 표시하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{13}^{'2} + S_{14}^{'2})\Gamma_{in} & 2S_{12}S_{13}^{'}S_{14}^{'} \\ 2S_{21}S_{13}^{'}S_{14}^{'} & (S_{13}^{'2} + S_{14}^{'2})\Gamma_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 $S_{13}^{'}, S_{14}^{'}$는 3-dB 결합기의 Thru 단자 및 결합 단자로의 S-parameter를 나타낸다. 3-dB 결합기의 대역 내에서 $S_{13}^{'2} + S_{14}^{'2} = 0$이 성립하므로 대역통과 여파기의 Γ_{in}에 무관하게 VSWR=1이 된다. 이는 저지대역 반사파 제거 특성을 개선하기 위해 여파기에 사용되는 각 여파기의 대역 내 VSWR이 좋지 않아도 됨을 의미한다. 따라서 각각의 여파기 설계가 용이하게 된다. 전체 회로의 전달 특성은 식(2)와 같다.

$$\frac{b_2}{a_1} = 2S_{21}S_{13}^{'}S_{14}^{'} = jS_{21} \quad (2)$$

이는 각 단의 대역통과 여파기 특성과 동일함을 의미한다. 식(3), (4)는 여파기의 입력 단자에서 전반사된 신호가 입력 결합기의 isolation 단자에 동위상으로 50Ω 종단됨을 보여준다.

$$\frac{b_3}{a_1} = 2\Gamma_{in}S_{13}^{'}S_{14}^{'} = j\Gamma_{in} \quad (3)$$

$$\frac{b_4}{a_1} = S_{21}(S_{13}^{'2} + S_{14}^{'2}) = 0 \quad (4)$$

2. Reflection Type 대역통과 여파기

두 번째로 Reflection Type은 그림 3과 같이 3-dB 결합기와 2개의 대역 저지 여파기(BSF)로 구성되어 있다. 대역 내에서 입사된 신호는 결합기를 거쳐 각 대역 저지 여파기에서 전반사 되며 동위상으로 isolation 단자에 결합하여 대역통과 특성을 가진다. 대역 외에서는 대역저지 여파기를 통과하여 50Ω 종단된다. 따라서, 입사된 에너지의 반사 특성이 우수하며 저주파 신호는 거의 50Ω 종단되기 때문에 광대역의 저지대역 반사파 특성이 개선된 여파기 설계가 가능하다. 이러한 구조의 대역통과 여파기의 전달 특성은 각 대역 저지 여파기의 반사 손실 특성과 결합기의 Directivity 성능에 좌우된다. Reflection Type은 하나의 결합기를 사용하기 때문에 Balance Type에 비해 작은 형태로 설계가 가능하다.

Reflection Type을 2단자 S-parameter로 표시하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{13}^{'2} + S_{14}^{'2})\Gamma_{in} & 2\Gamma_{in}S_{13}^{'}S_{14}^{'} \\ 2\Gamma_{in}S_{13}^{'}S_{14}^{'} & (S_{13}^{'2} + S_{14}^{'2})\Gamma_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Balanced type과 달리 전달 특성은 식(6)에서처럼 대역저지 여파기(BSF)의 반사특성과 동일하다.

$$\frac{b_2}{a_1} = 2\Gamma_{in}S_{13}^{'}S_{14}^{'} = j\Gamma_{in} \quad (6)$$

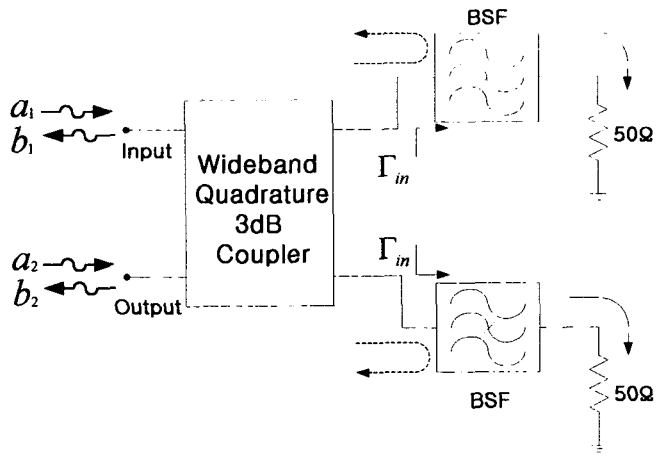

그림 3. Reflection Type

반사파 특성은 결합기 대역 내에서 $S_{13}^{'2}+S_{14}^{'2}=0$이므로 Γ_{in}에 상관없이 VSWR=1이 되며, 대역 외에서 $S_{13}^{'2}+S_{14}^{'2}\neq 0$ 경우에는 대역저지 여파기의 $\Gamma_{in}\neq 0$ 때문에 광대역의 반사파 제거 특성을 갖는다.

Reflection type의 경우 결합기의 isolation 특성에 따라 출력 단으로 결합되는 신호가 발생할 가능성이 있으며 이를 위해 높은 Directivity 성능을 가지는 결합기 설계가 선행되어야 한다.

Ⅲ. 설계 및 제작

1. 광대역 90° 3dB 결합기 설계

가장 간단한 형태의 90° 3-dB 결합기는 Branch line coupler[3]를 사용하는 것이다. 그러나 대역폭이 약 10% 내외로 광대역의 반사파 제거 특성을 구현하기에는 한계가 있다. 그 외 광대역 특성을 가지는 Broadside coupler[4], Re-entrant coupler[5], Lange coupler[6][7] 들이 있다. 이들은 50% 내외의 광대역 특성을 가지지만 대역 확장을 위한 muti-section으로 구현할 경우 3-dB 보다 큰 결합량을 구현하기는 쉽지 않다. 따라서 광대역 특성 뿐만아

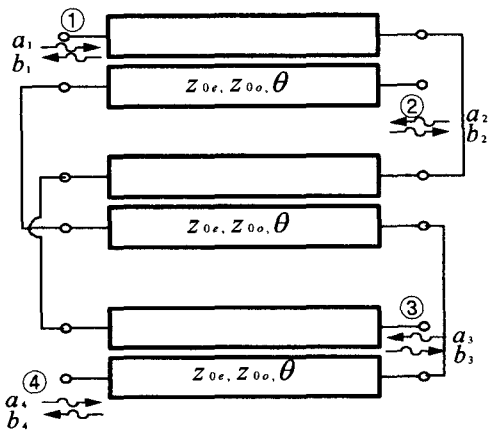

그림 4. 3단 평행결합 선로를 이용한 3dB 결합기

니라 강한 결합량을 쉽게 구현할 수 있는 tandem 연결 구조를[8][9] 확장한 그림 4의 구조를 사용하였다.[10]

참고문헌[10]에서 유도된 식으로 50%의 대역폭을 갖는 3-dB 방향성 결합기를 설계하였다. $\lambda/4$ 평행 결합선로 한 단으로 3dB 결합기를 설계하기는 거의 불가능하므로, 최소 2단으로 구현하기 위해서는 33.4Ω 기모드 임피던스와 74.83Ω의 우모드 임피던스를 만들어야 한다. 이를 위해서는 유전율이 높고 기판의 유전체 높이가 높은 기판을 사용해야 한다. 이에 기판은 유전율 6.15, 두께는 50mil, Loss Tangent는 0.0019이며, 동판 두께는 0.5OZ.인 Rogers 사의 RT/Duroid RO6006을 사용하였다. 실제 에칭 가능한 간격을 0.1mm라 할 때, RO6006로 실제 구현할 수 있는 기모드 임피던스는 약 30Ω 이상이 된다. 이때, 각각의 방향성 결합기는 -8.34 dB 결합기가 된다. 2단의 경우 결합 간격이 약 0.1mm에 근접하므로 제작의 용이성을 위해서 좀더 loose coupling으로 3-dB 결합기를 구현하고자 하였다. 그림 4와 같이 3단으로 구현할 경우 약 -11.74 dB 방향성 결합기를 설계하면 된다. 그림 5는 중심 주파수 2 GHz, 대역폭 1 GHz로 설계된 3-dB 결합기 layout이며, 이때 dimension은 W(선폭)=1.6mm, s(coupling gap)=0.4mm, l=20mm로 제작되었다.

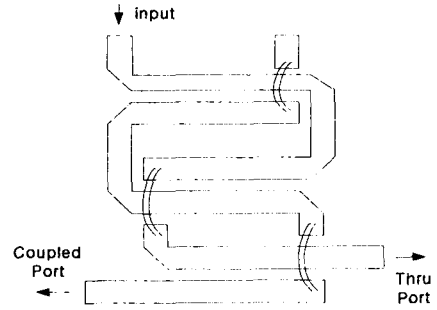

그림 5. 3단 평행결합선로를 이용한 3dB 결합기 layout

그림 6은 결합량을 측정한 것으로 중심 주파수 1.85 GHz에서 ±0.3 dB 진폭 불균형 지점을 선택할 때, 약 900 MHz의 대역폭을 가지며 삽입 손실은 약 0.3 dB~0.4 dB 내외이다. 대역 내에서 약 -20 dB 내외의 반사 손실과 19 dB 이상의 Isolation 특성을 가진다.(그림 7) 또한, 위상 차는 90^0+3^0의 차이를 보인다.(그림8)

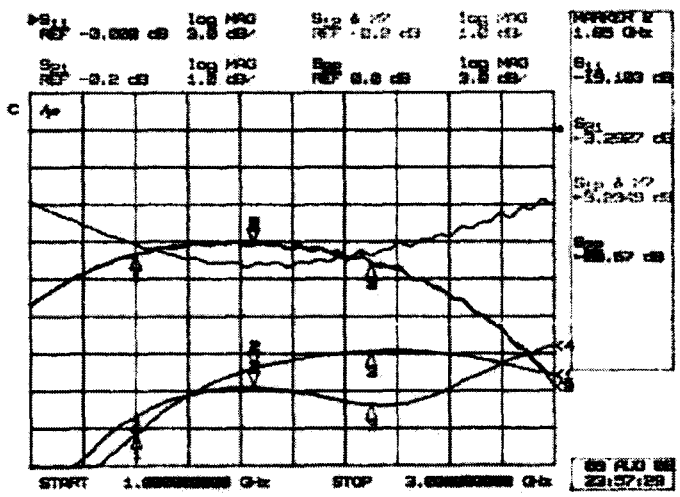

그림 6. 결합기 측정결과(결합량)

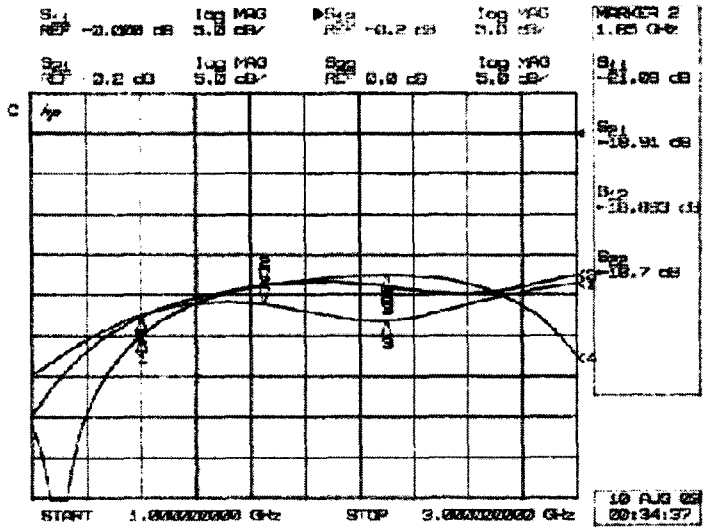

그림 7. 격리도 및 반사 손실 특성

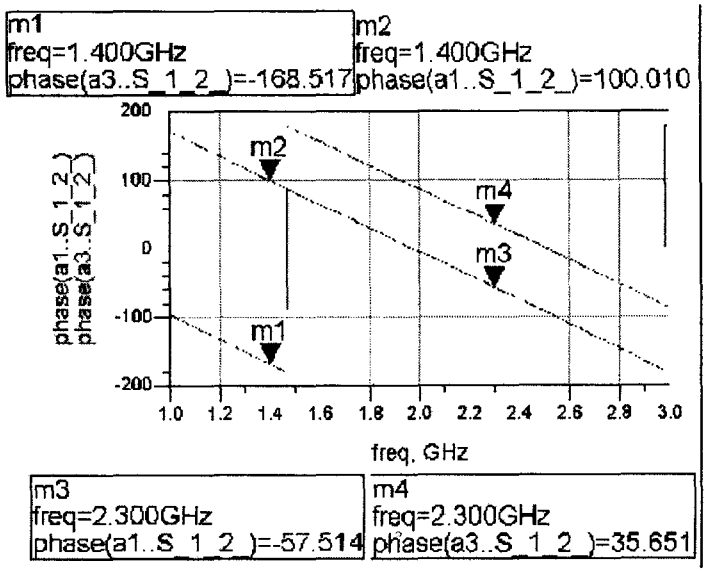

그림 8. 위상차 측정 결과

2. Balance Type의 대역통과 여파기 설계

대역 통과 여파기는 2단 $\lambda/4$ parallel coupled line을 이용하여 설계하였다. 기판은 RO6006으로 ε_r=6.15, 50mil 두께, Loss tangent는 약 0.0019이다. 중심 주파수를 2 GHz이고 대역폭은 100 MHz로 설계되었다.

2단 대역 통과 여파기(BPF)를 제작한 결과 그림 10에서처럼 대역폭은 1.84~1.94 GHz까지 약 100 MHz 이고, 삽입 손실이 -1.5~-2.2 dB이며, 반사 손실은 약 -10 dB 내외이다. 또한 대역 외에서는 전반사되는 특성을 확인할 수 있다. 이러한 특성의 2단 대역 통과 여파기를 그림 9에서처럼 Balanced type으로 설계하면 대역 외에서의 전반사 되는 반사특성을 50Ω 종단 시켜줄 수 있다. 전체 2단자 여파기의 특성은 그림 11과 같다.

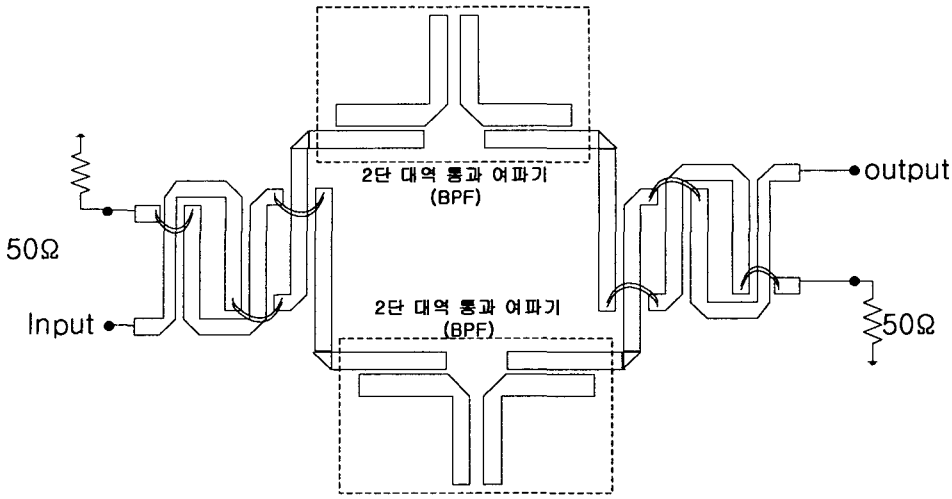

그림 9. Balance Type 여파기의 layout

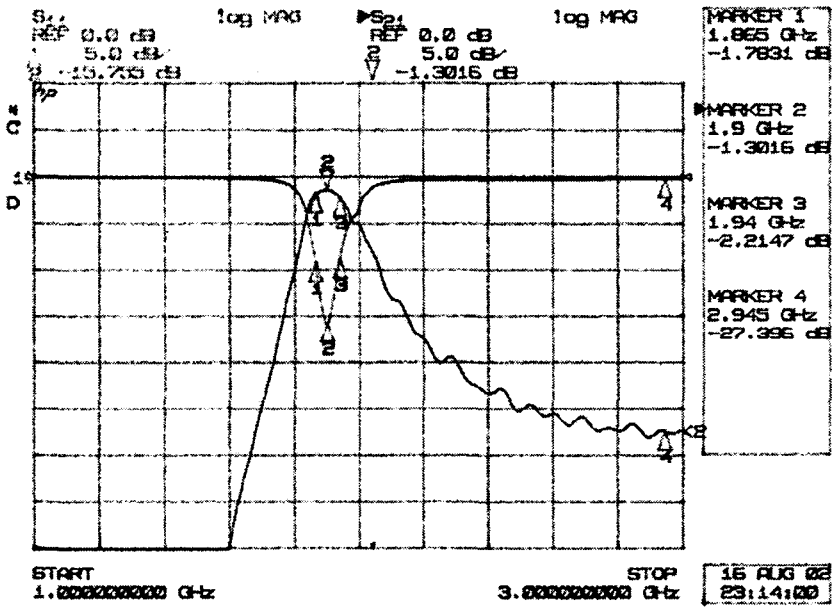

그림 10. 2단 대역 통과 여파기만의 특성

2단 대역 통과 여파기의 대역인 1.84 GHz~1.94 GHz에서 삽입 손실이 -2.69 dB~-3.6 dB로 약 1.2 dB 증가했으며 반사 손실은 대역 내에서 -15 dB의 특성을 가진다. 또한 1.2 GHz~2.6 GHz까지 -10 dB에서 -15 dB 이하의 양호한 반사 손실을 보여준다. 채널 내에서 뿐만 아니라, 대역 외에서도 전반사 되는 신호를 Isolation 단자로 제거하여 입력 단으로의 반사 손실이 개선됨을 확인할 수 있다.

그림 12는 광대역 특성을 보여주는 것으로 결합기의 대역폭 내에서는 -15 dB 내외의 반사 손실을 가지지만 결합기 대역 외에서는 -5 dB에서 -10 dB 내외로 특성이 저하된다. 이것은 결합기의 진폭 및 위상 불균형이 증가하여 제거 특성이 저하되기 때문이다.

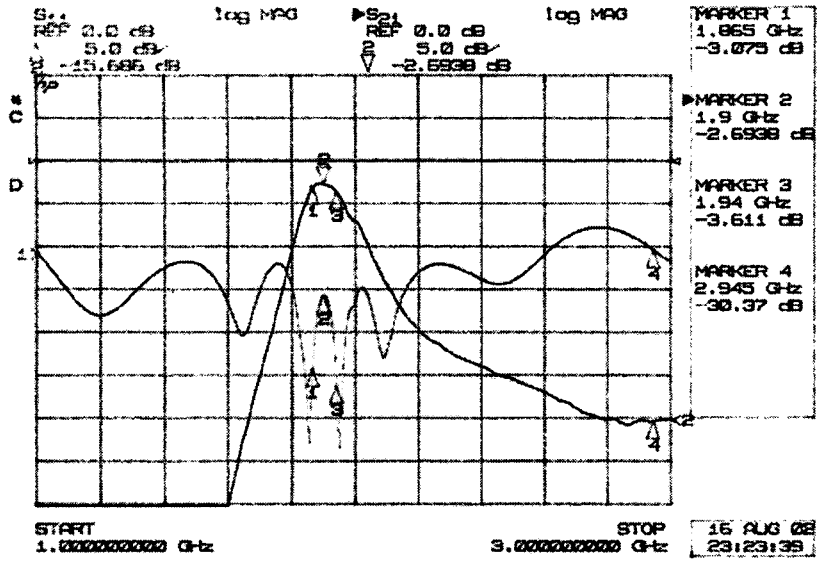

그림 11. Balance Type의 대역 통과 여파기 특성

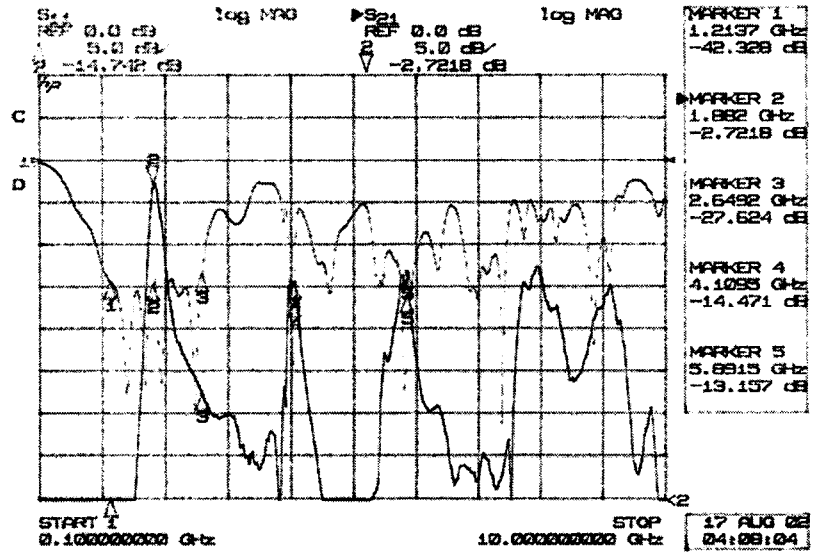

그림 12. Balance Type 대역통과 여파기의 광대역 특성

3. Reflection Type의 대역통과 여파기 설계

Reflection Type은 대역 저지 여파기를 설계하여 그 반사파로 대역 통과 여파기 특성을 나타낸다. 따라서, 동일 기판에 중심 주파수 2 GHz에서 대역폭 100 MHz 대역 저지 특성을 가지는 여파기를 설계하였다. 평행결합 선로에서 $\lambda/4$ open stub를 사용하여 대역 저지 특성의 공진기를 2단 연결하여 제작하였다. 제작결과 1.975 GHz~2.05 GHz까지 약 75 MHz 대역폭을 가지며, 대역저지 특성은 -10 dB 내외이다. 대역 내에서 반사 손실은 -1.37 dB~-1.49 dB이다.

이러한 특성의 2단 대역 저지 여파기를 Reflection Type으로 그림 13과 같이 설계한 결과

그림 15에서처럼 1.95 GHz~2.01 GHz까지 60 MHz의 대역폭과 -1.83 dB ~ -2.98 dB의 삽입 손실을 보여준다. 반사 손실은 DC에서 3.3 GHz까지 -15 dB 이하의 광대역 특성을 보여준다.(그림 16) Balance Type과 달리 광대역 특성과 저주파 특성이 우수한 것은 결합기의 대역 외에서 진폭 불균형이 크더라도 대역 저지 여파기가 50Ω Microstrip Line으로 동작하여 저주파 신호가 BSF 출력 50Ω으로 종단되기 때문이다.

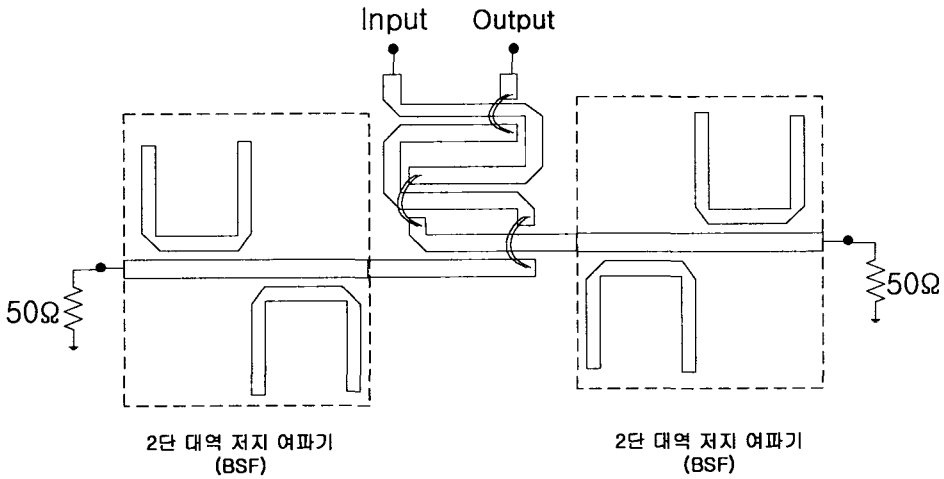

그림 13. Reflection Type 여파기의 Layout

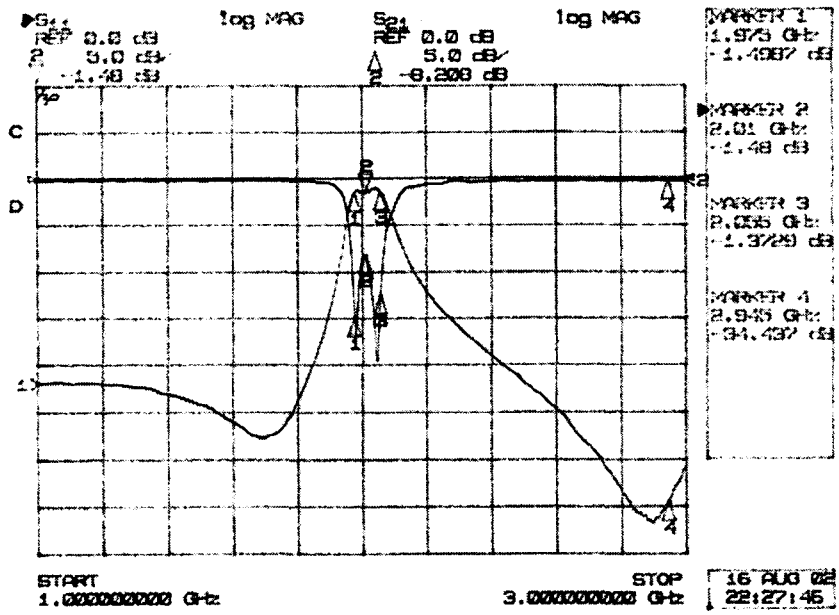

그림 14. 대역 저지 여파기 특성

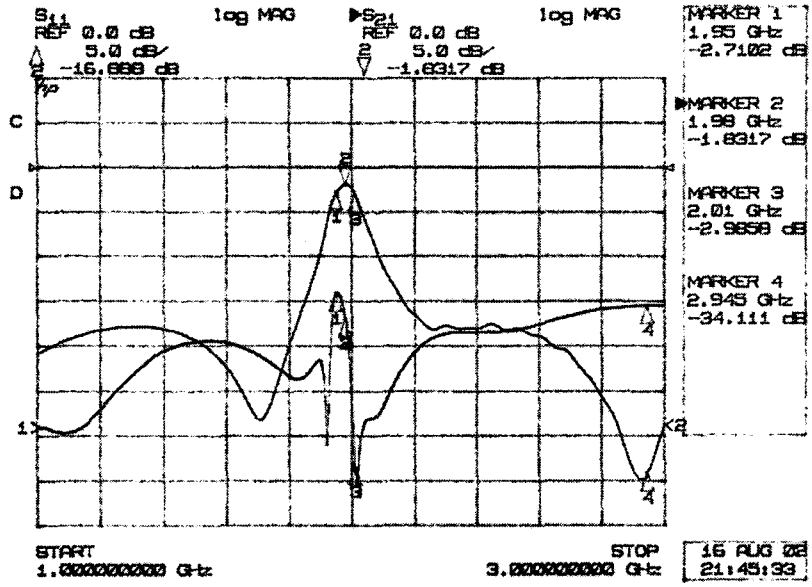

그림 15. Reflection Type의 여파기 특성

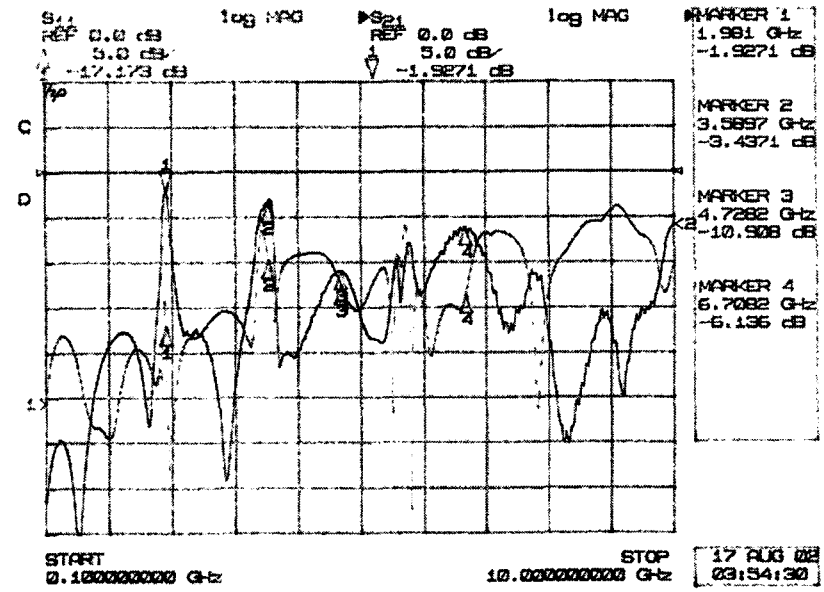

그림 16. Reflection Type 여파기의 광대역 특성

이상에서 Balance type은 결합기의 대역폭에 따라 반사 특성이 개선되는 대역폭이 결정되며, 여파기의 전달 특성이 우수한 특성을 가진다. 반면에 Reflection type은 결합기의 Directivity 성능에 따라 여파기의 대역 저지 특성에 영향을 주며 전달 특성에 비해 반사 특성이 우수하다.

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 RF 대역통과 여파기의 저지대역 반사특성을 개선한 여파기 설계 방법을

제안하였다. 제안된 구조인 Balance type은 여파기의 전달 특성이 우수하며 광대역의 반사파 제거특성을 얻기 위해 광대역의 결합기를 설계하여 1.2~2.6 GHz까지 반사 손실을 개선하였다. Reflection type은 전달 특성에 비해 반사특성이 우수하여 DC에서 3.3 GHz까지 -15dB의 광대역의 반사파 제거 특성을 가진다. 각 type에 따라 광대역 특성과 Directivity가 우수한 결합기가 요구되며 이에 초광대역으로의 확장이 용이하고 격리도 특성이 좋은 3-dB 결합기를 설계하여 적용하였다. 이와 같이 설계된 저지대역 반사파 특성이 개선된 대역통과 여파기는 기존에 저지 대역에서의 전반사 특성으로 인해 발생했던 스퓨리어스 방사 및 feedback 현상으로 인한 시스템의 불안정 요인을 해결할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] I. Bhal, P. Bhartia, "Microwave Solid State Circuit Design" , Wiley Interscience, pp.237~239, 1988.

[2] C.E. NELSON. "Circularly Polarized Microwave Cavity Filters", *IRE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT pp.136~147 April. 1957.

[3] Levy, R and Lind, L.F. ," Synthsis of symmetrical branch-guide directional couplers", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-16, NO.2, pp.80~89, Feb. 1968.

[4] J. S. Izadian, "A New 6~18GHz, -3dB multisection hybrid coupler using asymetric broadside, and edge coupled lines," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 243-247, 1989.

[5] S. B. Cohn, " The Re-Entrant Cross Section and Wide-Band 3-dB Hybrid Coupler", *IRE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-3, pp.29-38, Oct. 1955.

[6] J. Lange, "Interdigitated stripline quadrature hybrid," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-17, pp. 1150-1151, Dec. 1969.

[7] D. Kajfez, Z. Paunovic, S. Pavlin, "Simplified Design of Lange Coupler," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-26, pp. 806-808, Oct. 1978.

[8] J. L. B. Walker, "Analysis and design of Kemp-type 3dB quadrature couplers," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp.88-90., Jan. 1990.

[9] Shelton, J. P., J. Wolfe, and R. Von Wagoner, "Tandem Couplers and Phase Shifters for Multi-Octave Bandwidth," *Microwaves*, Vol. 4, pp.14-19. Apr. 1965.

[10] 조정훈, 윤상원, " N단 평행 결합 선로를 이용한 90° 광대역 3dB 결합기 설계," 전자파학회 논문지, 제 13권 제 1호, pp.94~100, 1, 2002.