

보정된 어드미턴스 인버터 등가회로를 이용한 NRD 대역통과 필터 설계

김동원, 이정해
홍익대학교 전자통신공학과

Design of NRD Bandpass Filter using Compensated Admittance Inverter Equivalent Circuit

Dong-Won Kim, Jeong-Hae Lee
Dept. of Radio Science & Communication Engineering, Hongik University

Abstract - 본 논문에선 보정된 차단영역 어드미턴스 인버터 등가회로를 이용하여 밀리미터파 대역의 NRD gap-coupled filter를 설계하였다. 설계된 filter는 3개의 반파장 공진기와 4개의 인버터 (gap)로 구성되어 있다. 인버터에 해당되는 gap (차단영역)의 S 파라미터를 EM 시뮬레이터로 추출해서 어드미턴스 인버터로 구현하였다. 위의 설계과정을 통하여 2% 대역폭, 0.1dB ripple, 38.3GHz를 중심주파수로 갖는 필터를 설계하였고, 보정된 인버터로 설계한 경우가 보정되지 않은 인버터로 설계한 경우보다 정확한 응답특성이 나옴을 확인하였다.

1. 서 론

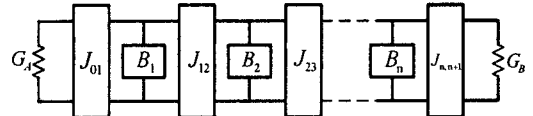
근래의 통신시스템에 있어서 밀리미터파 대역의 중요성이 점점 증가하면서 밀리미터파 집적회로를 만들기 위해 용이하고 손실이 적은 non-radiative dielectric (NRD) guide에 대한 관심이 증가하고 있다. NRD guide는 parallel plate waveguide 사이에 유전체가 삽입된 구조로 되어있으며 전도체 사이의 간격은 자유공간에서의 파장의 반보다 짧아야한다. 이때 전자기파는 유전체를 따라 전파하고 유전체 양쪽으로 복사되는 파는 parallel plate waveguide의 차단특성으로 인해 억압된다. 이러한 특성으로 인해 NRD guide는 밀리미터파 대역에서 저손실의 특성을 갖는다 [1].

본 논문에서는 NRD guide의 차단영역을 어드미턴스 인버터로 구현하여 대역통과 필터를 설계하는 방법과 그에 대한 보정을 연구하였다. 보정되지 않은 등가회로로 설계된 필터는 중심주파수가 상향 이동하고 대역폭이 커지는 현상을 보인다 [2]. 이를 보정하기 위해 차단영역에 대한 S 파라미터를 EM 시뮬레이터로 추출해서 보정된 어드미턴스 인버터 회로를 이용하여 대역통과 필터를 설계하였고 응답특성이 원하는 결과와 거의 일치하게 나옴을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 어드미턴스 인버터를 이용한 대역통과 필터

어드미턴스 인버터를 이용한 대역통과 필터의 기본 등가회로는 그림 1과 같고 차단영역에 대한 어드미턴스 인버터는 그림 2와 같다. 그림 1의 식에서 g_0, g_1, \dots, g_{n+1} 는 저역통과 필터에 대한 Chebychev equal-ripple 응답 점수 파라미터이고 w'_1 는 정규화된 차단주파수 이다. $\lambda_{g0}, \lambda_{g1}, \lambda_{g2}$ 는 각각 중심주파수, 통과대역의 양쪽 한계 주파수에 대한 파장을 나타내며, w_λ 는 파장에 대한 비대역폭이다 [3]. 그림 2에서 Y_g 는 NRD guide의 파동 어드미턴스를 나타내고 양단의 $\phi/2$ 는 음의 값을 갖는 전기적 길이로 인버터 양단의 공진기 길이에 보상을 해주게 된다. 그림 2의 가운데의 π 형 등가회로는 차단영역을



$$\frac{J_{01}}{Y_g} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{w_\lambda}{g_0 g_1 w'_1}}, \quad \frac{J_{i,i+1}}{Y_g} = \frac{\pi w_\lambda}{2 w'_i} \frac{1}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}$$

$$\frac{J_{n,n+1}}{Y_g} = \sqrt{\frac{\pi w_\lambda}{2 g_n g_{n+1} w'_1}}, \quad w_\lambda = \frac{\lambda_{g1} - \lambda_{g2}}{\lambda_{g0}}$$

그림 1. 어드미턴스 인버터를 이용한 대역통과 필터

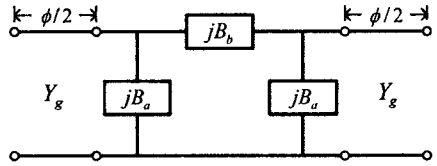


그림 2. 차단영역에 대한 어드미턴스 인버터 회로

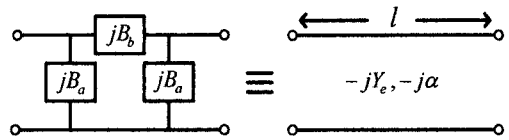


그림 3. 차단영역 도파로의 π 형 등가회로

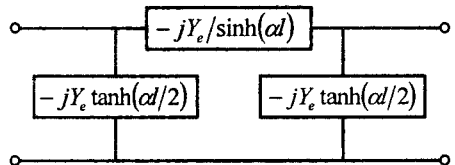


그림 4. 차단영역에 대한 등가회로 값

나타내는 부분으로 그림 3과 같이 길이가 l 이고 전파상수가 $-j\alpha$, 파동 어드미턴스가 $-jY_e$ 인 선로와 등가회로로 나타내어질 수 있다. 그림 3에서 양쪽의 ABCD matrix를 곱해 놓음으로서 B_a 와 B_b 를 식 (1)과 같이 표현할 수 있고 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. Y_e 와 α 는 각각 차단영역의 파동 어드미턴스와 전파상수이며 식 (2)로 구할 수 있다 [4].

2.2 NRD guide 대역통과 필터 설계방법

앞 절에서 설명한 어드미턴스 인버터를 이용한 대역통과 필터 기본개념과 어드미턴스 인버터를 이용하여 그림 5와 같은 구조의 NRD guide 대역통과 필터를 설계하였다. 평행 도체판 사이에 유전체로 된 공진기와 차단영역 (gap)이 주기적으로 배열된 대칭 구조로 되어 있으며 기본모드인 LSM₁₁를 사용한다. 인버터의 구조는 그림 2와 같고 인버터 값 J 와 음의 값을 갖는 전기적 길이 ϕ 는 식 (5)과 같이 유도된다.

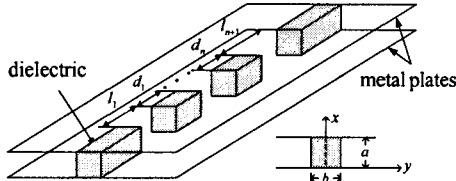


그림 5. NRD guide 대역통과 필터

$$B_a = -Y_c \tanh(\alpha l/2), \quad B_b = -Y_c / \sinh(\alpha l) \quad (1)$$

$$Y_c = \frac{\alpha}{w\mu}, \quad \alpha = \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - k_0^2} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{k_0^2 \epsilon_r - (\pi/a)^2 - \beta_y^2} \quad (3)$$

$$\beta_y \tan(\beta_y b/2) = \epsilon_r \zeta, \quad \zeta^2 = k_0^2 (\epsilon_r - 1) - \beta_y^2 \quad (4)$$

$$\phi = -\pi - \tan^{-1}\left(\frac{2B_b}{Y_g} + \frac{B_a}{Y_g}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{B_a}{Y_g}\right) \quad (5)$$

$$\frac{J}{Y_g} = \left| \tan\left(-\frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{2B_b}{Y_g} + \frac{B_a}{Y_g}\right) + \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{B_a}{Y_g}\right)\right) \right|$$

$$d_i = (\pi + 0.5(\phi_i + \phi_{i+1}))/\beta \quad (6)$$

NRD guide 대역통과 필터의 차단영역의 길이 l_i 와 공진기의 길이 d_i 는 다음과 같이 구해진다. 식 (1)에서의 Y_c 와 α 는 각각 parallel plate waveguide의 파동 어드미턴스와 전파상수 공식에다 β 대신 차단영역의 전파상수 $-j\alpha$ 를 대입함으로써 식 (2)과 같이 구할 수 있다.

식 (1)에서 구해진 B_a 와 B_b 를 식 (5)에 대입해 음의 값을 갖는 전기적 길이 ϕ_i 를 구하고 그림 1의 식으로 구한 값과 비교한 그래프의 교점으로부터 차단영역의 길이 l_i 를 구할 수 있다. 공진기의 길이 d_i 는 식(6)에 의해 구해지고, NRD guide의 전파상수 β 는 식 (3)으로 구해지며 β_y 는 식 (4)의 두 식의 값을 비교해 구할 수 있다 [2].

2.3 NRD 대역통과 필터 설계방법에 대한 보정

위에서 구한 설계식으로 필터를 설계하면 중심주파수가 상향 이동되고 대역폭도 의도한 대로 정확한 결과가 나오지 않는다. 이를 보정하기 위해 그림 6과 같은 구조로 차단영역의 길이를 1에서 7mm까지 변화시키며 식 (1)대신 EM 시뮬레이터로 차단영역의 S 파라미터를 추출해서 직접 식 (5)에 대입하여 대역통과 필터를 설계하였다.

차단영역에 대한 S 파라미터를 추출하는 방법은 다음과 같다. 우선 그림 6에 대한 전체구조의 S 파라미터를 구하고 식 (7)을 이용해 ABCD matrix로 바꿔주어야 한다. 대칭적 구조이므로 $S_{11} = S_{22}$, $S_{12} = S_{21}$, $A = D$ 이고 변환된 ABCD matrix는 식 (8)과 같이 나타내어지며 식 (8)에서의 [TOTAL], [PROPA], [GAP]은 각각 전체 구조, 전파영역, 차단영역에 대한 ABCD matrix이다. 마지막으로 그림 7의 등가회로를 통하여 차단영역의 ABCD matrix [GAP]을 π 형 등가회로의 서셉턴스 성분으로 변환하면 그림 4와 식 (1)에 대한 실제적인 값을 구할 수 있다. 이때 $Y_1 = Y_2 = jB_a$, $Y_3 = jB_b$ 이다.

차단영역의 길이를 1에서 7mm까지 변화시킬 때 그림 4와 식 (1)과 같이 설계식으로 구한 보정되지 않은 수치와 그림 6과 같은 구조에서 파라미터를 추출해서 구한 보정된 수치에 대하여 표 1에서 비교하여 나타냈다.

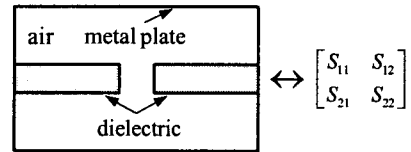


그림 6. 차단영역의 S 파라미터를 추출하기 위한 모델

$$A = D = \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \quad (7)$$

$$B = Z_g \frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{2S_{21}}$$

$$C = Y_g \frac{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}{2S_{21}}$$

$$\begin{bmatrix} \text{[PROPA]} & \text{[GAP]} & \text{[PROPA]} \end{bmatrix} = \text{[TOTAL]} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \text{[GAP]} \end{bmatrix} = \text{[PROPA]}^{-1} \text{[TOTAL]} \text{[PROPA]}^{-1}$$

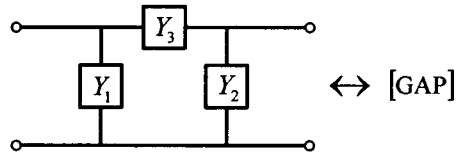


그림 7. π 형 등가회로와 그에 대한 ABCD 행렬

표 1. 차단영역에 대한 π 형 등가회로 성분 비교

Gap (mm)	비 보정		보정	
	B_a	B_b	B_a	B_b
1	-2.50E-04	-3.22E-03	-5.20E-04	-4.24E-03
2	-4.82E-04	-1.50E-03	-9.72E-04	-1.95E-03
3	-6.83E-04	-8.85E-04	-1.33E-03	-1.11E-03
4	-8.46E-04	-5.66E-04	-1.59E-03	-6.83E-04
5	-9.73E-04	-3.73E-04	-1.78E-03	-4.31E-04
6	-1.07E-03	-2.50E-04	-1.91E-03	-2.76E-04
7	-1.14E-03	-1.68E-04	-1.99E-03	-1.78E-04

2.4 비 보정된 필터와 보정된 필터와의 결과비교

표 1을 통해서 차단영역을 π 형 등가회로로 구현했을 때 각 성분에 대해 보정된 경우와 보정되지 않은 경우에 수치가 적지 않은 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 2.4절에선 2.2절에선 설명한 어드미턴스 인버터를 이용한 대역통과 필터 설계방법과 2.3절에서의 보정방법을 이용해 중심주파수가 38.3GHz인 대역통과 필터 (3-pole, 0.1dB ripple, 2% 대역폭)를 보정할 경우와 보정을 하지 않은 경우에 대하여 각각 설계한 후 시뮬레이션을 통해서 응답특성을 비교하였으며 이때 이용한 EM 시뮬레이터는 CST사의 Microwave Studio Ver 4.0이다.

$a=3.52\text{mm}$, $b=3.77\text{mm}$, $\epsilon_r=2.08$ 인 경우에 보정한 필터와 비보정한 필터에 대해 그림 8을 통해 2.2절에서 설명한 방법으로 차단영역의 길이를 결정하였다. 각 필터의 설계 수치는 표 2에 나타냈으며 이에 대한 각 필터의 시뮬레이션 응답특성은 그림 9와 같다. 표 3에선 각 필터에 대한 보정 여부에 따른 응답특성을 비교하여 나타내었다. 보정한 필터가 보정하지 않은 필터보다 중심주파수와 대역폭이 설계 사양과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

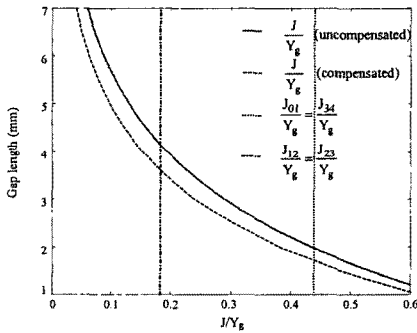


그림 8. 차단영역 길이에 따른 어드미턴스 인버터의 값

표 2. 각 필터에 대한 설계수치 ($a=3.52\text{mm}$, $b=3.77\text{mm}$)

	비 보정	보정
$l_1=l_4$ (mm)	1.96	1.71
$l_2=l_3$ (mm)	4.15	3.61
$d_1=d_3$ (mm)	2.86	3.80
d_2 (mm)	2.74	3.83

표 3. 각 필터에 대한 응답특성 비교

	비 보정		보정	
	Specification	Simulation	Specification	Simulation
Center Frequency (GHz)	38.30	39.61	38.30	38.33
Bandwidth (%)	2	2.97	2	2.26

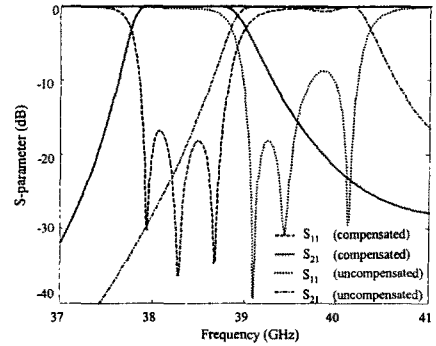


그림 9. 각 필터에 대한 응답특성 (3-pole, 0.1dB ripple, 2% 대역폭)

3. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 집적회로를 만들기 위해 용이하고 손실이 적은 NRD guide를 이용하여 차단영역에 대하여 어드미턴스 인버터로 구현한 대역통과 필터를 설계하였다. 설계식대로 필터를 설계했을 때 중심주파수의 이동현상과 대역폭이 넓어지는 특성을 확인할 수 있었다. 이에 대한 보정 방법으로 차단영역의 인버터를 EM 시뮬레이터를 이용하여 S 파라미터를 추출하여 설계 식에 대입하는 방법을 사용하였고 보정을 했을 때 원하는 결과와 거의 근접하게 나오는 것을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Yoneyama and S. Nishida, "Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits," IEEE Trans. Microwave Theory and Technique, Vol. MTT-29, pp. 1188-1192, Nov. 1981.
- [2] 김소영, 이정해, "차단 주파수 영역 도파관 등가회로를 이용한 Gap-coupled NRD Guide 대역통과 여파기의 설계," 한국전자파학회 논문지, 제11권, 제6호, 2000년 9월.
- [3] G. Matthaei, et. al., "Microwave filters, impedance matching networks, and coupling structures," Artech House, 1980.
- [4] G. Craven, "Waveguide below Cutoff: A New Type of Microwave Integrated Circuit," Microwave Journal, pp. 184-188, August. 1970.