

# 밀리미터파 대역 NRD Stepped-Impedance 듀플렉서

## NRD Guide Stepped-Impedance Duplexer in Millimeter Wave Band

김기돈 · 이재곤\* · 이정해\*

Ki-Don Kim · Jae-Gon Lee\* · Jeong-Hae Lee\*

### 요약

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 NRD guide를 이용한 듀플렉서를 설계하였다. 설계된 듀플렉서는 두 개의 stepped-impedance 필터와 한 개의 T-junction으로 구성되어 있다. 차단영역 도파관 등가회로를 이용하여 stepped-impedance 필터를 설계하였고, T-junction은 반사손실을 -20 dB 이하로 최적화하였다. 듀플렉서를 제작하여 측정된 결과 응답특성이 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we have designed the duplexer using non-radiative dielectric(NRD) guide in millimeter wave band. The designed duplexer is composed of two stepped-impedance filters and T-junction. Stepped-impedance filters are designed with an equivalent circuit model of evanescent waveguide and the T-junction is optimized to minimize return loss of -20 dB or more. The characteristics of duplexer show good agreements with the expected results.

Key words : NRD Guide, Filter, Duplexer

## I. 서론

밀리미터 대역의 주파수에 대한 수요가 점점 증가하면서 밀리미터파 회로를 구현하기에 용이하며 손실이 적은 non-radiative dielectric(NRD) guide에 대한 관심이 많아지고 있다. 이러한 NRD guide는 두 개의 평판 전도체 사이에 유전체가 삽입된 구조로서 평판 전도체 사이의 간격은 자유공간에서의 반 파장보다 짧아야 한다. 이때 전자기파는 air부분에서는 차단되고 유전체( $\epsilon_r > 1$ )부분에서는 전기적인 길이가 길어짐에 따라 유전체를 따라 전파하게 되므로, 불연속적인 도파로에서 발생하는 복사파는 차단 특성에 의하여 억제된다. NRD guide는 이러한 전파 성질 때문에 밀리미터파 대역에서도 microstrip 선로에 비해 전송 손실이 적다는 장점을 가지고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 NRD guide는 유전체로만 구성된 waveguide와

매우 유사한 특성을 보이므로 waveguide로 구현할 수 있는 대부분의 소자들은 NRD guide를 이용하여 구현할 수 있고 집적도도 waveguide에 비하여 매우 우수하다<sup>[2]</sup>.

본 연구에서는 NRD guide와 waveguide가 구조적으로 유사함을 이용하여 차단주파수에서의 waveguide를 이용한 대역통과 필터의 설계방법을 NRD guide를 이용한 필터 설계에 적용하였다<sup>[3]</sup>. 그리고 접속되는 송신용 필터와 수신용 필터를 사용하여 안테나를 공유하기 위해 T-junction power divider를 사용하였다<sup>[4]</sup>. 이때 송신용으로는 38.275 GHz, 수신용으로는 39.275 GHz를 중심 주파수로 하는 NRD Stepped-impedance 필터를 사용하여 듀플렉서를 설계, 제작, 측정하였으며, 응답특성이 원하는 결과에 근접하게 나옴을 확인하였다.

## II. Stepped-impedance 필터의 설계

에이에스이 코리아(ASE KOREA)

\*홍익대학교 전파통신공학과(Department of Radio Science and Communication Engineering, Hongik Univ.)

· 논문 번호 : 20030719-108

· 수정완료일자 : 2003년 11월 12일

NRD guide를 이용한 필터에는 Stepped-impedance 와 Gap-coupled 등의 방식이 있다. 제작과 측정상의 난점을 고려하여 본 논문에서는 Stepped-impedance 필터를 설계하였고, 인버터 개념을 이용한 대역통과 필터의 기본 등가회로 및 그에 관한 식은 다음의 그림 1과 식 (2)에 나타내었다. 식 (2)에서  $g_0, g_1, \dots, g_{n+1}$ 는 표준형 저역통과 필터회로의 정수 파라미터,  $w_1$ 은 정규화된 차단 주파수이며  $w_0$ 는 필터의 중심 주파수,  $w_1, w_2$ 는 각각 대역의 아래, 위쪽의 한계 주파수이며, 이때의 기울기 계수(slope parameter)는 식 (1)과 같다.

$$x_j = \left(\frac{1}{2} \pi\right) Z_0 \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_g}\right)^2 \quad (1)$$

$$K_{01} = \sqrt{\frac{R_a X_1 w}{g_0 g_1 w_1}}$$

$$K_{j,j+1} \quad j=1,2,\dots,n-1 = \sqrt{\frac{R_b X_n w}{g_n g_{n+1} w_1}} \quad w = \frac{w_2 w_1}{w_0} \quad (2)$$

본 연구에서는 다음 그림 2와 같은 구조의 인버터를 차단영역 이하에서의 도파관의 등가회로에 적용하였다. 이때의 인버터 값  $K$ 와 그 양단의 부가적인 전기적 길이  $\phi$ 를 구하기 위한 식은 식 (3)과 같다.

$$K = Z_g \left| \tan(\phi/2 + \tan^{-1}(X_a/Z_g)) \right|$$

$$\phi = -\tan^{-1}(2X_b/Z_g + X_a/Z_g) - \tan^{-1}(X_a/Z_g) \quad (3)$$

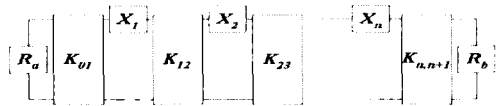


그림 1. 임피던스 인버터를 이용한 대역통과 필터의 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of bandpass filter with impedance inverter.

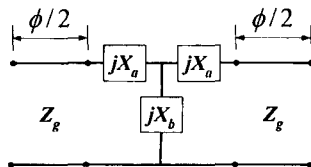


그림 2. 인버터  
Fig. 2. Inverter circuit.

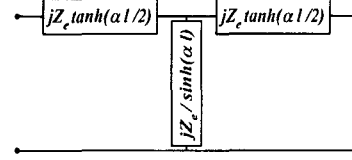
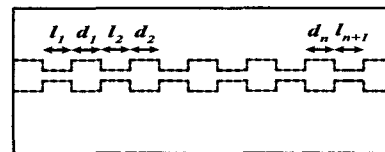


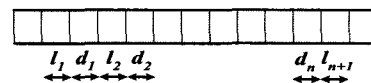
그림 3. 차단영역 도파관의 T형 등가회로  
Fig. 3. T-equivalent circuit of an evanescent waveguide.

NRD guide와 차단영역 이하에서 유전체가 삽입된 waveguide의 동작특성이 유사함을 이용하여 다음 그림 3의 등가회로<sup>[3]</sup>를 그림 2의 임의의 소자부분에 대입하였다. 즉, 인버터를 이용한 필터의 설계 시 그림 2와 같은 인버터의 임의의 소자부분에 식 (2)를 넣어 계산하였다. 이때  $Z_e, \alpha$ , 그리고  $l$ 은 각각 감쇠영역에서의 파동 임피던스, 감쇠상수, gap 부분의 길이이다. 이와 같은 인버터와 반 파장 공진기를 이용하여 평판 전도체 사이에 유전체를 주기적으로 배열한 다음 그림 4와 같은 NRD Stepped-impedance 대역통과 필터를 설계하였다. 이 필터는 gap과 좁은 유전체에서 주모드를 제외한 고차모드가 모두 차단된다. 인버터의 구조는 그림 2와 같고 인버터의 값  $K$ 와 전기적인 길이의 값은 그림 2와 같다. 이때  $Z_e$ 와  $Z_g$ 는 각각 감쇠영역과 유전체 영역에서의 파동 임피던스이다. 이와 같은 식에 의해 인버터 값  $K$ 와 전기적인 길이 값은 감쇠영역에서의 길이  $l$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

NRD guide 필터는 다음과 같은 순서에 따라 설계한다. 우선 표준형 저역통과 필터회로의 정수 파라



(a) 위에서 본 모습  
(a) Top view



(b) 옆에서 본 모습  
(b) Side view

그림 4. NRD guide Stepped-impedance 대역통과 필터  
Fig. 4. NRD guide Stepped-impedance bandpass filter.

미터, 원하는 대역폭을 이용하여 인버터의 값을 구한다. 여기서 구한 인버터의 값을 그림 2의 식에서 구한 인버터의 값과 비교하여 감쇠영역의 길이  $l$ 을 구한다. 그리고 유전체의 길이  $d$ 는 다음의 식 (4)에 의해 결정된다.

$$d_i = [\pi + 0.5(\phi_i + \phi_{i+1})] / \beta_g \quad (4)$$

여기에서  $\beta_g$ 는 NRD guide의 전파상수이다.

### III. T-junction의 설계

본 논문에서는 그림 5와 같이 유전체의 높이 ( $a$ )와 너비( $b$ ), main-arm( $ma$ )과 sub-arm( $sa$ )의 길이, metal-patch의 높이( $mh$ ), 너비( $mw$ ) 그리고 두께( $t$ )를 변화시키며 듀플렉서를 최적화하였다. 이때 각각 유전체의 높이와 너비는 차단 주파수의 결정, main-arm과 sub-arm은 임피던스 정합, metal-patch는 mode conversion의 억제에 위해 사용되었다.

한 쪽 필터의 중심 주파수에서 전자파는 모두 통과하고 다른 쪽 필터에서는 모두 반사된다고 보면 반사되는 필터의 T-junction에 연결된 포트는 stub 기능을 하게 된다. 이러한 상황을 재현하기 위하여 그림 5와 같이 Port 3을 개방시킨 상태에서 값을 조절하면서  $S_{21}$ 을 최적화 시켰고, 그림 6과 같이 최적화된 T-junction은 -20 dB 이하의 반사손실을 얻을 수 있었다. 또한, T-junction  $S_{21}$ 의 대역폭이 설계하려는 듀플렉서의 중심주파수를 포함하도록 설계하였다. 위에서 설계된 T-junction과 Stepped-impedance 필터를 결합하여 듀플렉서를 최적화 하였고, 그 구조와 필터와 T-junction의 최적화된 수치는 각각 그림 7,

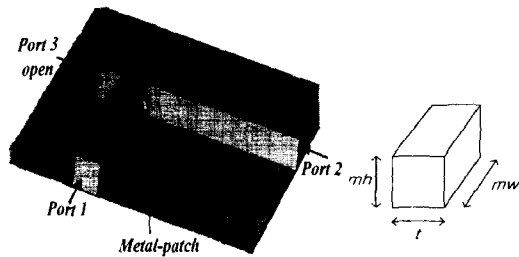


그림 5. Port 3가 개방된 T-junction와 metal-patch의 구조

Fig. 5. The structure of T-junction being open at port and metal-patch.

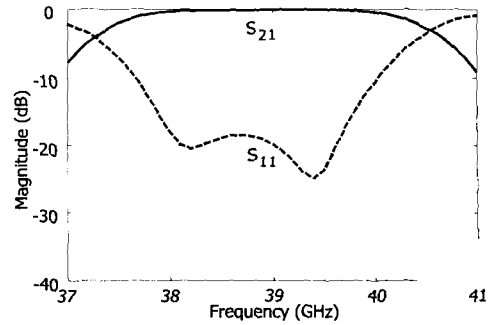


그림 6. 최적화된 T-junction의 특성

Fig. 6. S-parameters of T-junction.

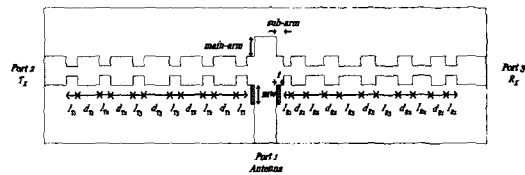


그림 7. 듀플렉서의 구조

Fig. 7. Structure of an NRD duplexer.

표 1. 최적화된 필터의 수치

Table 1. Size of two NRD filters( $a=3.48$  mm,  $b=3.1$  mm).

Center Frequency	$T_x$ 38.275 (GHz)	Center Frequency	$R_x$ 39.275 (GHz)
$l_{T1} = l_{T6}$ (mm)	1.57	$l_{R1} = l_{R6}$ (mm)	2.55
$l_{T2} = l_{T5}$ (mm)	3.88	$l_{R2} = l_{R5}$ (mm)	5.96
$l_{T3} = l_{T4}$ (mm)	4.85	$l_{R3} = l_{R4}$ (mm)	7.09
$d_{T1} = d_{T5}$ (mm)	5.70	$d_{R1} = d_{R5}$ (mm)	3.66
$d_{T2} = d_{T4}$ (mm)	5.86	$d_{R2} = d_{R4}$ (mm)	3.61
$d_{T3}$ (mm)	5.88	$d_{R3}$ (mm)	3.61

표 2. 최적화된 T-junction의 수치

Table 2. Size of an optimized T-junction.

Parameter	Size (mm)
Height of dielectric	3.48
Width of dielectric	3.10
Length of main-arm	3.89
Length of sub-arm	3.01
Width of metal patch	0.77
Height of metal patch	0.91
Thickness of metal patch	0.54

표 3. 시뮬레이션 및 측정 결과

Table 3. Simulated and measured results of the duplexer.

	Tx			Rx		
	Spec.	Simulated	Measured	Spec.	Simulated	Measured
IL (dB)	-0.01	-0.17	-1.75	-0.01	-0.3	-2.35
RL (dB)	< -20	< -14.9	-13.4	< -20	-12.18	-12.6
Center Frequency (GHz)	38.275	38.290	38.270	39.275	39.380	39.390
Bandwidth (%)	1.18	0.83	0.82	1.15	1.14	1.08
Isolation (dB)	> 40	81	45	> 40	42	40

표 2 그리고 표 3과 같다.

#### IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

그림 7의 주파수 응답특성을 확인하기 위하여 finite element method(FEM) commercial simulator, Ansoft HFSS를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이

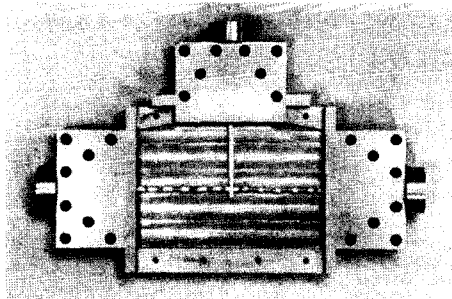


그림 8. 듀플렉서의 사진  
Fig. 8. Photo of an NRD duplexer.

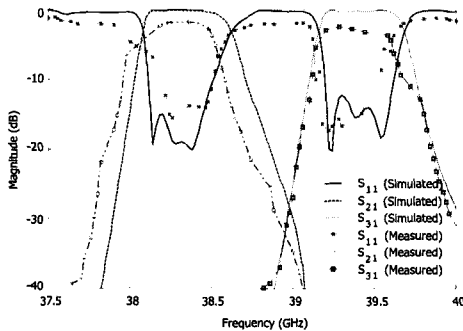


그림 9. 시뮬레이션 및 측정 결과  
Fig. 9. Simulated and measured S-parameters of the duplexer.

션 시에는 무 손실을 가정하였고 측정 시에 추가된 waveguide to NRD transition 부분은 제외하였다. NRD guide 듀플렉서의 시뮬레이션 및 측정 결과는 표 3, 그림 8과 같다. 듀플렉서는 CNC를 이용하여 제작되었다. 유전체 부분은 Teflon( $\epsilon_r=2.08$ )을 사용하였다. 제작된 듀플렉서의 응답특성은 벡터 네트워크 분석기(HP8510C)를 이용하여 측정하였다. 표 3 및 그림 8에서 듀플렉서의 응답특성을 보면 시뮬레이션 및 측정결과가 서로 잘 일치함을 보여주고 있다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 저 손실 특성을 갖는 NRD guide를 이용해서 차단주파수 영역의 waveguide 등가회로 모델을 이용한 NRD 필터를 설계하였으며, 최적화된 T-junction을 결합하여 NRD 듀플렉서를 설계하였다. 38 GHz와 39 GHz 대역의 두개의 필터와 T-junction을 설계하여 시뮬레이션 및 측정해 본 결과 듀플렉서의 응답 특성이 원하는 결과에 근접하게 나옴을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. G. Lee, J. H. Lee and H. S. Tae, "Design of a multi beam feed using a nonradiative dielectric rotman lens", *IEICE Trans. on Communication*, vol. E85-B, no. 6, pp. 1178-1184, Jun. 2002.
- [2] T. Yoneyama, S. Nishida, "Nonradiative dielectric waveguide for millimeter-wave integrated circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory and Technique*, vol. MTT-29, pp. 1188-1192, Nov. 1981.

[3] 김소영, 이정해, "차단 주파수 영역 도파관 등가 회로를 이용한 Gap-coupled NRD Guide 대역통과 여파기의 설계", 한국전자과학회 논문지, 11(6), pp. 990-995, 2000년 9월.

[4] T. Yoneyama, S. Nishida, "Nonradiative dielectric waveguide T-junctions for millimeter-wave applica-

tions", *IEEE Trans. Microwave Theory and Technique*, vol. MTT-33, no. 11, pp. 1239-1241, Nov. 1985.

[5] G. Matthaei et al., *Microwave filters, impedance matching networks, and coupling structures*, Artech House, 1980.

### 김 기 돈



2001년: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2003년: 홍익대학교 대학원 전파통신공학과 (공학석사)  
 2003년 9월~현재: ASE KOREA [주 관심분야] 밀리미터 회로설계, Packaging

### 이 정 해



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
 1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)  
 1993년 3월~1996년 2월: General Atomics 교환 연구원  
 1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor  
 1996년 9월~현재: 홍익대학교 전파통신공학과 부교수 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, 밀리미터파 진단

### 이 재 곤



1999년: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)  
 2001년: 홍익대학교 대학원 전파공학과 (공학석사)  
 2001년 3월~현재: 홍익대학교 대학원 전파통신공학과 박사과정 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, Meta-materials