

단일 페라이트 공진기를 이용한 4단자 스트립라인 서큘레이터

김혜진*, 남민희*, 이재현*

A four-port stripline circulator using a single ferrite disk

Hye-Jin Kim, Min-Hee Nam, Jae-Hyun Lee

요 약

본 논문에서는 그린 함수(Green's function) 방법을 이용하여 하나의 페라이트 디스크를 사용하는 4 단자 스트립라인 서큘레이터 설계 방법을 제안한다. 통신 시스템 설계의 유연성을 높일 수 있는 4 단자 서큘레이터는 이제까지 2개의 3 단자 서큘레이터를 연결하여 사용하고 있다. 이를 하나의 페라이트 디스크를 사용하는 4 단자 서큘레이터로 대체하면 무게와 부피를 감소시킬 수 있어서 위성용으로 장점을 갖는다.

Key Words : Three-port circulator, Four-port circulator, Green's function, Circulator resonant cavity

ABSTRACT

The design method of a four-port stripline circulator with a single ferrite disk is proposed using Green's function method. The four-port circulator gives the flexibility of the design of the communication system. Two cascaded three-port circulators has been used as a four-port circulator. However, if a four-port circulator with a single ferrite disk replace the present four-port circulator, then it will give less weight and volume and so has the advantage in satellite application.

I. 서 론

서큘레이터는 무선통신 시스템의 RF Front-end를 구성하는 부품의 하나로 수동소자이면서 비가역 전달특성을 갖는다. 따라서 서큘레이터는 이러한 비가역 전달특성을 이용하여 RF 회로간 간섭을 감소 시키거나, 핵심부품의 보호 또는 임피던스 정합용으로 널리 쓰인다.

하나의 안테나를 사용하는 무선통신 시스템에서 송수신 신호를 적절히 분리시키기 위해서 그림1(a)와 같이 서큘레이터를 이용한 듀플렉서(duplexer)가 필요하다. 발진기 부하의 부정합으로 인하여 발진주파수가 변화되는 현상(load pulling)을 방지하기 위해서는 발진기와 부하 사이에 서큘레이터를 장착하여

신호원과 부하를 분리한다. 또한 그림1(b)과 같이 고출력증폭기와 부하 사이에도 사용된다.

단일 접합부를 갖는 4 단자 서큘레이터가 최초로 제작되었다[1]. $n = 0$ 와 $n = \pm 1$ 모드를 이용하여 4 단자 서큘레이터로 동작 시킬 수 있다는 것도 제안되었다[2]. 또한, 원통형 공동 공진기에서 $n = \pm 1$ 과 $n = 2$ 모드로 동작하는 4 단자 서큘레이터도 발표되었다[3]. 하지만 이들은 미세 조정을 위하여 금속 핀을 사용하였다. 4단자 스트립라인 서큘레이터의 설계를 위하여 해석적인 설계이론 연구 또는 정량적인 자료가 현재 거의 없는 상태이며, 상용 4 단자 서큘레이터는 그림 2와 같이 2개의 3 단자 서큘레이터를 연결하여 구현하고 있다.

* 충남대학교 위성초고주파통신연구실(miniumdda@hanmail.net, jaehyun@cnu.ac.kr)

논문번호 : 논0902-09, 접수일자 : 2009년 11월 20일, 최종제재논문통보일자 : 2009년 12월 28일

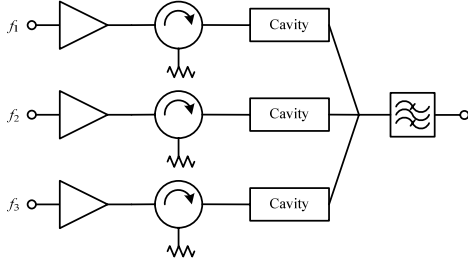
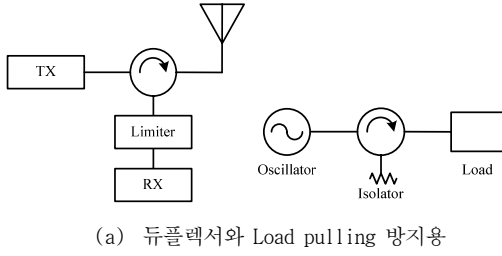


그림 1. 서클레이터 응용 사례

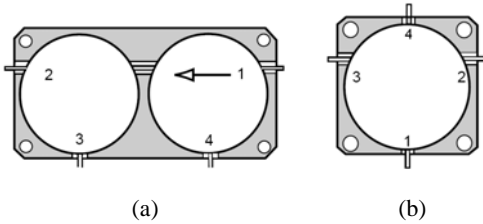


그림 2. 4단자 서클레이터 구조; (a) 상용 구조, (b) 제안하는 4단자 서클레이터 구조

본 논문에서는 기존 2개의 페라이트 공진기로 구성된 3 단자 서클레이터에 비해 무게와 부피 면에서 이점을 가질 수 있도록, 그림 2(b)와 같이 단일 페라이트 공진기만으로 구성된 4 단자 서클레이터를 보스마(Bosma)의 그린 함수(Green's function) 방법을 이용하여 정량적으로 해석하였다. 또한, 상용 프로그램을 이용하여 임피던스 정합단을 추가하여 최적의 4 단자 서클레이터를 설계하였다.

II. 이 론

2.1 접합 내부의 전자계

본 논문에서 설계할 서클레이터의 기하학적 구조는 그림 3과 같다. 전기장은 z 방향이고, 자기장은 $x-y$ 평면에 존재한다고 가정한다. 전자기장은 z 방향

으로는 변화가 없고, 시간적으로는 $\exp(-j\omega t)$ 로 변화한다.

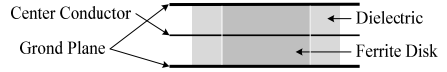
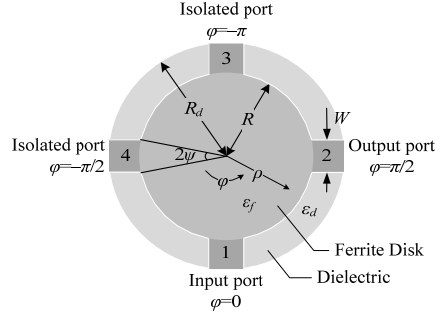


그림 3. 서클레이터의 기하학적 구조

페라이트 내부($r \leq R$)의 전기장과 자기장은 각각 식(1)과 (2)와 같다.

$$E_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n J_n(k_e \rho) e^{jn\phi} \quad (1)$$

$$H_\phi = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega(\mu^2 - \kappa^2)} \cdot A_n \left[\mu k_e J'_n(k_e \rho) - \frac{\kappa n}{\rho} J_n(k_e \rho) \right] e^{jn\phi} \quad (2)$$

k_e 는 페라이트 디스크 매질의 실효 전파상수이며 실효 투자율 μ_e 와 유전율 ϵ_f 로 나타낼 수 있다.

$$k_e = \omega \sqrt{\mu_0 \mu_e \epsilon_0 \epsilon_f} \quad (3)$$

$$\mu_e = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu} \quad (4)$$

유전체 내부($R \leq r \leq R_d$) 전자기장은 각각 식(5), (6)과 같다.

$$E_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n [B_n J_n(k_d \rho) + C_n Y_n(k_d \rho)] e^{jn\phi} \quad (5)$$

$$H_\phi = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{jA_n}{\eta_d} [B_n J'_n(k_d \rho) + C_n Y'_n(k_d \rho)] e^{jn\phi} \quad (6)$$

k_d 와 η_d 는 유전체 매질의 전파상수와 고유 임피던스이며, 유전율 ϵ_d 와 투자율 μ_d 로 표현된다.

$$k_d = \omega \sqrt{\mu_0 \mu_d \epsilon_0 \epsilon_d} \quad (7)$$

$$\eta_d = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_d}{\epsilon_0 \epsilon_d}} \quad (8)$$

상수 B_n 와 C_n 는 페라이트 디스크와 이를 둘러싼 유전체 간의 경계조건인 식 (9)와 (10)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E_{z_f}(\rho = R) = E_{z_d}(\rho = R) \quad (9)$$

$$H_{\phi_f}(\rho = R) = H_{\phi_d}(\rho = R) \quad (10)$$

위 경계조건을 적용하면[4],

$$B_n = \frac{-(\eta_d / \eta_e) Y_n(k_d R) BC1 - J_n(k_e R) Y'_n(k_d R)}{J_n(k_d R) Y'_n(k_d R) - J'_n(k_d R) Y_n(k_d R)} \quad (11)$$

$$C_n = \frac{(\eta_d / \eta_e) J_n(k_d R) BC1 + J_n(k_e R) J'_n(k_d R)}{J_n(k_d R) Y'_n(k_d R) - J'_n(k_d R) Y_n(k_d R)} \quad (12)$$

$$BC1 = J'_n(k_e R) - (\kappa / \mu) [n J_n(k_e R) / k_e R]$$

이다. η_e 는 페라이트 디스크 매질의 고유 임피던스이며,

$$\eta_e = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_e}{\epsilon_0 \epsilon_f}} \quad (13)$$

이다.

상수 A_n 은 서클레이터의 외부 영역의 경계 $\rho = R_d$ 에서 정의되는 H_ϕ^{per} 를 이용해 구할 수 있다. $\rho = R_d$ 에서의 Dirichlet 경계조건을 적용하여 최외각 경계에서의 자계를 구하면 식 (14)와 같다[5].

$$H_\phi^{per} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n e^{jn\phi} \quad (14)$$

$$b_n = \frac{\sin n\psi}{n\pi} [H_1 + H_2 e^{j\pi n/2} + H_3 e^{-j\pi n} + H_4 e^{-j\pi n/2}]$$

H_1, H_2, H_3, H_4 는 각각 4개 단자에서의 최외각 자기장이다.

식 (6)과 (14)는 $\rho = R_d$ 일 때 일치해야 하므로 상수 A_n 은 식 (15)와 같다.

$$A_n = \frac{\left(\frac{\eta_d \sin n\psi}{j\pi n} \right) [H_1 + H_2 e^{j\pi n/2} + H_3 e^{-j\pi n} + H_4 e^{-j\pi n/2}]}{B_n' J_n(k_d R_d) + C_n Y_n'(k_d R_d)} \quad (15)$$

경계조건을 통해 구한 상수들을 맥스웰 방정식에 대입하여 서클레이터의 임의의 위치에서의 전자기장을 계산할 수 있고, 완성된 전자자기장 식을 이용하여 산란 행렬, 전력 밀도 등을 계산할 수 있다.

2.2 서클레이션 조건

그림 3의 구조를 참고하여 식 (14)에 있는 각 단자의 최외각 자기장을 식 (16)과 같이 가정할 수 있다.

$$H_\phi(R, \phi) = \begin{cases} A, & -\pi/2 - \psi < \phi < -\pi/2 + \psi \\ B, & -\psi < \phi < \psi \\ C, & \pi/2 - \psi < \phi < \pi/2 + \psi \\ D, & -\pi - \psi < \phi < -\pi + \psi \end{cases} \quad (16)$$

$H_\phi(R, \phi)$ 와 보스마가 도출한 그린 함수를 이용하여 서클레이션 조건을 정의할 수 있다[6].

III. 시뮬레이션 결과

상기한 이론으로부터 도출된 설계값은 표 1과 같다. 이 값들을 이용하여 그림 4와 같은 구조를 상용 3차원 전자기장 해석 프로그램인 HFSS를 이용하여 분석한 결과를 그림 5에 나타내었다.

표 1. 4 단자 서클레이터 설계 변수 값

서클레이터 변수	값
결합각 (ψ) [deg]	30
중심 주파수 (f) [GHz]	4.5
페라이트 유전율 (ϵ_f)	14.3
유전체 손실 ($\tan\delta$)	< 0.0002
포화 자화 ($4\pi M_s$) [Gauss]	550
선폭 (ΔH) [Oe]	48
바이어스 자계 (H_0) [Oe]	1676
페라이트 디스크 반경 (R) [mm]	4.5
유전체 유전율 (ϵ_d)	16.8
디스크의 높이 (h) [mm]	1.0
도체 두께 (t) [mm]	0.1

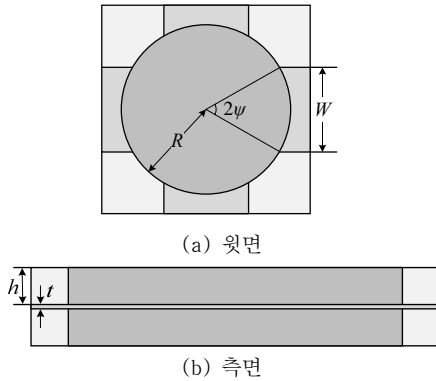


그림 4. 시뮬레이션 초기 구조

설계 결과가 규격 주파수인 4-5 GHz 범위를 만족하지 못하므로, 바이어스 자계, 페라이트 디스크 반경 등을 변화 시켜 주파수 범위를 만족 시킬 수 있도록 하였으면, 결과 그림 6과 같다. -20 dB 대역폭은 140 MHz이며, 대역 내 삽입손실은 0.53 dB이다.

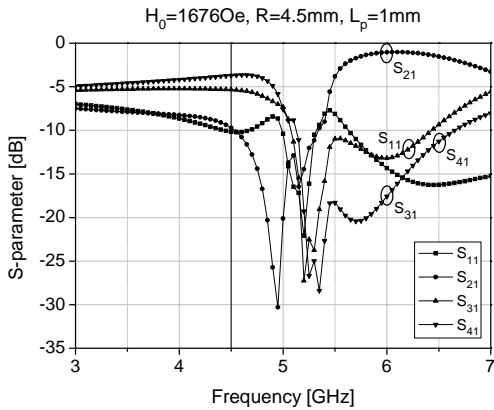


그림 5. 초기 시뮬레이션 결과

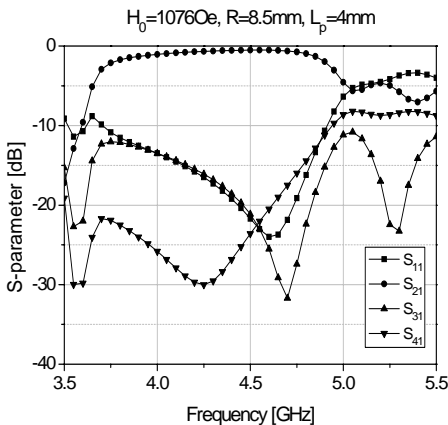


그림 6. 설계 변수 값을 조정한 4단자 서클레이터의 특성

본 논문에서는 임피던스 정합단을 그림 6의 HFSS 분석 결과로부터 산란 행렬 데이터를 추출하여 상용 툴인 ADS를 이용하여 정합회로를 설계하였다. 임피던스 정합단의 구성은 각각 단일 병렬 개방 스테르브와 이중 병렬 개방 스테르브 형태로 구성하였고, 그 결과 단일 개방 스테르브 형태의 경우에는 -20 dB 대역폭이 90 MHz, 삽입손실 0.49 ± 0.04 dB, 이중 병렬 개방 스테르브 형태는 -20 dB 대역폭이 90 MHz, 삽입손실이 0.60 ± 0.05 dB이다. 이중 병렬 개방 스테르브 형태가 삽입손실에 비해 대역폭을 많이 향상 시켜줌으로 이중 병렬 개방 스테르브 형태로 HFSS를 이용하여 최종 시뮬레이션 하였다. 그림 7은 HFSS 시뮬레이션 구조이고 표 2는 정합단의 크기이다.

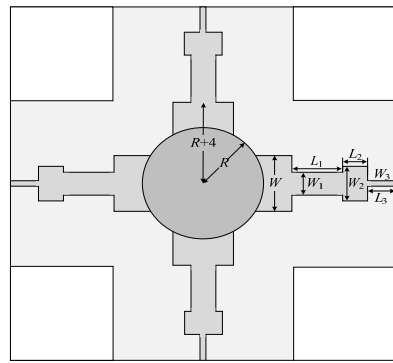


그림 7. 임피던스 정합단이 추가된 구조

표 2. 임피던스 정합단 크기 [mm]

W_1	W_1	W_1	W_1	W_1	W_1
3.6	7.1	3.6	1.7	0.9	3.9

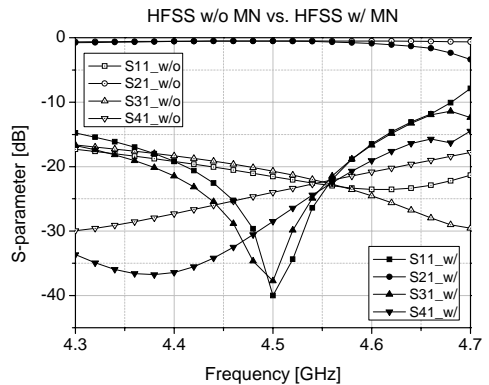


그림 7. 임피던스 정합단 추가 전/후 결과 비교

그림 7과 같이 임피던스 정합단을 추가함으로써 설계 중심 주파수 4.5 GHz를 중심으로 서클레이션 특성이 나타나며 -20 dB 대역폭 또한 20 MHz 더 개선되었다. 이로써 아이솔레이션, 반사 손실이 모두 20dB 이하의 값을 갖는 4.41-4.57 GHz 대역 내에서 삽입 손실이 0.59 ± 0.06 dB인 4 단자 서클레이터를 설계하였다.

IV. 결 론

본 논문은 기존 4단자 서클레이터에 비하여 가볍고 부피가 적은 단일 페라이트 공진기만으로 구성된 4 단자 서클레이터의 설계 방법을 제시하였다. 향후 대역폭을 확장 시킬 수 있는 방법을 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] S. Yoshida, "X-Circulator," *Proceedings of Inst. Radio Engrs*, vol 47, p. 1150, 1959

[2] C. E. Fay and R. L. Comstock, "Operation of the ferrite junction circulator," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech. (1964 Symposium Issue)*, vol. MTT-13, pp. 15-27, Jan. 1965.

[3] C. E. Fay and W. A. Dean, "The four-port single junction circulator in stripline," *G-MTT Symp.*, pp. 286-289, May. 1966.

[4] J. B. Davies, "An analysis of the m -port symmetrical H-plane waveguide junction with central ferrite post," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech. (1962 Symposium Issue)*, vol. MTT-10, pp. 596-604, Nov. 1962.

[5] V. G. Feoktistov, "Design of a strip Y-circulator," *Radio Eng. Electron. Phys.*, vol. 14, pp. 1111-1115, 1968.

[6] H. Bosma, "On the principle of stripline circulation," *Proc. IEE*, vol. 109, Pt. B, Suppl. No. 21, pp. 137-146, Jan. 1962.

[7] J. B. Davies and P. Cohen, "Theoretical design of symmetrical junction stripline circulators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 11, pp. 506-512, Nov. 1963.

[8] J. B. Davies, "An analysis of the m -port symmetrical H-plane waveguide junction with

central ferrite post," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech. (1962 Symposium Issue)*, vol. MTT-10, pp. 596-604, Nov. 1962.

저자

김 혜 진(Hye-Jin Kim)

학생회원



2008년 2월: 충남대학교
정보통신공학부 졸업

2008년 3월~현재:
충남대학교 전파공학과
(석사과정)

<관심분야> RF 시스템 및
부품, PCB에서의 EMC/EMI

남 민 희(Min-Hee Nam)

학생회원

2005년 3월~현재: 충남대학교
전자전파정보통신 공학부 (학사과정)

<관심분야> RF 시스템 및 부품, PCB에서의
EMC/EMI

이 재 현(jae-hyun Lee)

정회원



1978년~1982년: 인하대학교
전자공학과 (학사)

1983년~1985년:
한국과학기술원 전기 및
전자과 (석사)

1985년~1993년:
한국과학기술원 전기 및
전자과 (박사)

1991년 2월~2001년 2월: 한국전자통신연구원
책임연구원

2001년 2월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수

<관심분야> PCB에서의 EMC/EMI, 위성통신
시스템 및 RF 부품, Magnetostatic wave devices