패치 배열과 그리드 구조를 이용한 재구성 주파수 선택 구조 설계

Design of Reconfigurable Frequency Selective Surface Using Patch Array and Grid Structure

이인곤 · 홍익표 · 서윤석* · 전흥재* · 박용배** · 조창민***

In-Gon Lee · Ic-Pyo Hong · Yun-Seok Seo* · Heoung-Jae Chun* · Yong-Bae Park** · Chang-Min Cho***

요 약

본 논문에서는 패치 배열과 그리드 구조를 응용하여 C-밴드인 7 GHz 대역에서 동작하는 재구성 주파수 선택 구조를 설계하였다. 본 논문에서 제안한 구조는 바랙터 다이오드를 이용하여 슬롯에서 발생하는 커패시턴스 변화로부터 주파수 재구성 특성을 얻었으며, 커패시턴스의 변화에 따른 투과 주파수의 변화를 구현하였다. 설계한 결과를 바탕으로 유연성을 갖는 FPCB(Flexible Printed Circuit Board)와 상용 바랙터 다이오드를 이용하여 재구성 주파수 선택 구조를 제작하고, 바이어스 전압의 변화에 따른 주파수 재구성 특성을 측정하였다. 제작된 재구성 주파수 선택 구조는 약 6.6~7.6 GHz의 광대역 주파수 재구성 특성(투과 주파수의 가변 범위)을 가지며, 본 논문에서 제안한 구조는 제한된 곡률에 대하여 유연성을 갖기 때문에, 항공기 또는 군함의 레이돔과 같은 곡면 형상 구조 중 완만한 곡면 구조에 적용이 용이하다.

Abstract

In this paper, the reconfigurable frequency selective surface for C-band was designed using patch array and grid structure. Frequency reconfigurability was obtained by varying the capacitance from varactor diode. From the optimized design parameters, we fabricated the reconfigurable frequency selective surface using the FPCB(Flexible Printed Circuit Board) and commercial varactor diode and measured the frequency reconfigurability for different bias voltage. From the measurement results, proposed structure has the wideband operating frequency of 6.6~7.6 GHz. We can applied this proposed structure to the smooth curved surface like as radome of aircraft or warship.

Key words: Reconfigurable Frequency Selective Surface, FPCB, Radome

I. 서 론

주파수 선택 구조(frequency selective surface)는 유전체 기판 위에 도체 또는 슬롯이 주기적으로 배열된 전자기

구조로 전자기 공간 필터로 사용되며^[1], 특히 대역 통과 특성을 갖는 주파수 선택 구조는 스텔스 레이돔 또는 리플렉터어레이(reflectarray) 등 여러 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다^{[2],[3]}.

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화 연구센터 사업의 일환으로 수행되었음.」

공주대학교 정보통신공학부(Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University)

*연세대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Yonsei University)

**아주대학교 전기공학부(School of Electrical & Computer Engineering, Ajou University)

***국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received August 23, 2013 ; Revised December 2, 2013 ; Accepted December 16, 2013. (ID No. 20130823-01S)

· Corresponding Author: Ic-Pyo Hong (e-mail: iphong@kongju.ac.kr)

최근 단일 주파수 대역만을 통과하는 수동형 주파수 선택적 표면 구조의 특성을 개선하고자, 주파수를 능동적으로 변화시킬 수 있는 주파수 선택 구조인 능동형 주파수 선택 구조에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

능동형 주파수 선택 구조의 주파수를 변화시키는 방법으로는 핀 다이오드(PIN diode), 바랙터 다이오드(varactor diode), MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 등의 능동소자를 이용하는 방법이 일반적이다. 핀 다이오드를 이용한 방법은 바이어스 전압에 따른 다이오드의 단락(on) 또는 개방(off) 상태를 이용하여 투과 주파수를 가변시키는 방법으로, 투과 주파수의 가변 범위가 넓은 장점이 있는 반면에, 가변 가능한 투과 주파수가 두 가지로 한정된다는 단점이 있다^[4]. 바랙터 다이오드를 이용한 방법은 바이어스 전압에 따라 다이오드의 커패시턴스를 가변시킴으로써 투과 주파수를 가변시키는 방법으로, 다양한 투과 주파수의 구현이 가능하다는 장점이 있는 반면에, 높은 주파수 대역에서 구현이 어렵고, 높은 제작비용이 요구된다는 단점이 있다^[5]. MEMS를 이용한 방법은 기계적인 스위칭 기능, RF MEMS 등의 기능을 이용하여 구현되며, 낮은 제작 비용, 낮은 손실과 고격리 특성, 빠른 스위칭 시간 등의 장점이 있는 반면에, 구현되는 투과 주파수의 협대역 특성과 MEMS 소자의 상당히 작은 크기를 갖는 물리적인 특성으로 가변 가능한 커패시터 용량의 동적 범위가 작다는 단점이 있다^{[6],[7]}.

본 논문에서는 다양한 투과 주파수의 주파수 재구성 구현이 용이한 바랙터 다이오드를 이용하여 능동형 주파수 선택 구조를 설계하였다. 바랙터 다이오드를 이용한 능동형 주파수 선택 구조는 앞서 기술한 바와 같이 높은 주파수 대역(5 GHz 이상)에서 커패시터의 낮은 Q 값과 요구되는 커패시터의 용량이 매우 작아야 하는 등의 문제로 구현이 어렵기 때문에, 선행 연구의 대부분 낮은 주파수 대역에서 동작을 목적으로 설계되었으며^{[8],[9]}, 높은 주파수 대역에서의 동작을 목적으로 설계된 능동형 주파수 선택 구조는 상용 바랙터 다이오드가 아닌 추가적으로 설계한 20~200 fF 범위를 갖는 가변 커패시터가 사용되거나^[5], 시뮬레이션 상에서의 구현 또는 바랙터가 아닌 커패시터를 사용한 측정 결과 등을 제시하고 있다^{[10],[11]}.

본 논문에서는 기존의 바랙터 다이오드를 사용한 능동

형 주파수 선택 구조의 한계인 높은 주파수 대역에서의 주파수 재구성을 구현하기 위해 패치 제안한 구조는 유연성을 갖는 구조로 바랙터 다이오드 때문에 제한적이지만 휘어짐이 가능하기 때문에, 항공기 또는 군함에서 사용되는 완만한 곡면 형상 레이돔과 같은 구조에 적용이 용이하다는 구조적 장점을 갖는다. 배열과 그리드 구조를 응용하였으며, 항공기나 레이돔 등의 완만한 곡면형 구조 적용의 용이성을 위해 유연성을 가지는 기판을 이용하여 설계하였다.

II. 재구성 주파수 선택 구조의 설계

일반적으로 주파수 선택 구조는 높은 주파수 대역에서의 투과 주파수의 재구성을 목적으로 설계하는 경우, 패치와 접지 그리드 사이에서 발생하는 커패시턴스의 용량이 작기 때문에 일반 상용 가변 커패시터를 사용하여 높은 주파수 대역에서의 주파수 재구성 구현에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 마름모 형태의 패치를 제안하여 접지 그리드 사이에 커패시턴스 값을 조절할 수 있고, 바랙터 다이오드를 추가함으로써 더욱 높은 커패시턴스를 구현하여 고주파수에서의 재구성이 가능하도록 하였다. 제안한 재구성 주파수 선택 구조의 커패시턴스를 그림 1(a)의 설계 변수(width)를 통하여 조절함으로써 설계 재구성 구현을 위한 변수를 단순화하였다. 따라서 바랙터의 커패시턴스 동적 폭을 조절하기 용이하여, 목적(투과 주파수의 가변 범위) 또는 임의의 커패시터 용량을 갖는 바랙터를 사용한 재구성 주파수 선택 구조의 설계가 용이하다. 표 1에 설계 변수(width)에

표 1. 설계변수(width)에 따른 커패시턴스 범위(TE)

Table 1. Dynamic range of capacitance at each design parameters(width)(TE).

Width(mm)	Reconfigurable frequency range	Dynamic range of capacitance
4.54	6.64~7.03 GHz	0.80~3.00 pF
3.94	6.66~6.93 GHz	0.80~3.00 pF
3.34	6.59~6.91 GHz	0.80~3.00 pF
2.74	6.44~7.16 GHz	0.40~3.00 pF
2.14	6.61~7.18 GHz	0.40~3.00 pF

그림 1. 설계한 재구성 주파수 선택 구조의 단위셀
Fig. 1. Designed unitcell of reconfigurable frequency selective surface.

따른 투과 주파수의 가변 범위와 적용 가능한 커패시턴스의 범위를 나타내었다.

제안한 구조는 그림 1(a)와 같이 유전체 윗면에 접지 그리드와 마름모 패치 형태의 주파수 선택 구조가 위치하며, 아랫면에는 그림 1(b)에 나타난 것처럼 바랙터 다이오드의 전원 인가를 목적으로 전원 그리드가 위치하여 그림 1(c)와 같이 비아홀로 윗면의 패치와 연결된 구조로 단위셀이 구성되어 있다. 바랙터 다이오드의 전원 인가를 위한 바이어스 회로를 주기적인 단위셀 구조에서 동작시키기 위해 제시된 참고문헌 [10]을 응용하여 아랫면에서는 전원 그리드를 구성, 윗면에는 접지 그리드를 구성하였다. 하지만 본 논문에서 응용한 형태의 전원 및 접지 그리드 구성은 실제 전원 인가를 위한 추가적인 바이어스 길이에 대한 주파수 응답을 고려하지 않은 설계이며, 따라서 바이어스의 길이에 따른 인덕턴스의 변화로 인한 공진주파수의 이동이 예상된다. 본 연구에서는 단순히 바이어스의 길이의 변화를 최소화하여 제작하였으며, 추후 바이어스 회로에 초점을 맞춘 연구를 통해 안정화 된 바이어스 회로를 갖는 재구성 주파수 선택 구조의 설계 파라미터를 제안할 계획이다.

본 논문에서는 그림 1(a)에 나타난 것처럼 접지 그리드와 마름모 패치 사이에 상용 바랙터 다이오드인 Skyworks사의 SMV2019-079LF를 이용하여 커패시턴스 변화를 얻도록 설계하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 재구성 주파수 선택 구조는 C 밴드인 7 GHz 대역에서 투과하도록 설계하였으며, 곡면 형상 등에 적용하기 위해 유연성을 갖는 유전체인 두께 1 mil의 Polyimide($\epsilon_r = 3.5$, $\tan\delta = 0.0027$)를 사용하였다. 또한, 제작의 편의성을 위해 바랙터 1, 3번 만을 실장하여 전파 해석 시뮬레이터인 Ansoft사 HFSS의 Floquet Mode를 사용하여 설계한 결과를 검증하였다. 그림 2와 같이 TE(Transverse Electric) Mode에서의 주파수 특성을 가변 커패시턴스 값을 0.35 pF(12 V), 0.38 pF(10 V), 0.44 pF(8 V), 0.55 pF(6 V), 0.81 pF(4 V), 1.2 pF(2 V), 2.22 pF(0 V)으로 각각 변화시키면서 반사 및 투과 특성을 계산하였다.

커패시터의 용량이 작아짐에 따라 투과 주파수가 높은 주파수 대역으로 이동하는 것을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였으며, 그림 2의 (a)는 반사 특성을, (b)에는 투과 특성을, 그리고 (c)에는 0~30도까지 입사파의 입사각에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

(a) 반사 특성
(a) Reflection characteristics

(b) 투과 특성
(b) Transmission characteristics

(c) 입사파의 입사각에 따른 반사 특성
(c) Reflection characteristics for different incident angles

그림 2. 커패시터 용량에 따른 투과 주파수의 변화 시뮬레이션(TE mode)
Fig. 2. Simulated operating frequency variation for different capacitance(TE mode).

그림 3. 제작한 능동형 주파수 선택 구조
Fig. 3. Fabricated reconfigurable frequency selective surface.

그림 2(a)의 시뮬레이션 결과로부터 약 6.62 GHz부터 7.28 GHz 사이(약 660 MHz)에서 0~12 V까지 입력 전압에 따른 각각의 커패시턴스에 따라 투과 주파수의 변화를 갖는 주파수 특성을 확인할 수 있다. 그림 2의 (c)에 나타난 입사파의 입사각에 따른 투과 특성은 각 입사각에 따른 변화가 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 전원 인가를 위한 전원 그리드와 슬롯에 위치한 바랙터 다이오드의 비대칭적인 구조적 특징으로부터 기인하는 것으로 판단된다.

시뮬레이션 결과를 바탕으로 측정을 위해 5×5의 단위 셀을 갖는 크기 204.5 mm×204.5 mm의 재구성 주파수 선택 구조를 설계 및 제작하였으며, 제작된 구조의 앞면과 뒷면을 그림 3의 (a), (b)에 각각 나타내었다. 제안한 구조는 자유공간 측정법을 사용하여 반사 및 투과 특성을, 전원공급기를 이용하여 0~12 V까지 2 V 간격으로 각각의 전압에 따라 측정하였다. 측정 환경 구성에 관한 내용은 그림 4의 (a)에, 측정환경 사진은 (b)에 각각 나타내었다. 측정한 반사 특성과 투과 특성 결과는 그림 4의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다.

측정된 각 전압에서의 투과 주파수의 가변 범위는 약 6.6~7.6 GHz(약 1 GHz, TE mode)를 얻었으며, 측정된 반사 특성과 투과 특성이 시뮬레이션과 대체로 일치하는 결과를 그림 5와 표 2를 통하여 확인할 수 있다.

0.38 pF(10 V) 이상에서의 측정 투과 주파수의 오차는 측정이 무반사실에서 이루어지지 않아, 측정 시간이 길어짐에 따라 반사된 신호가 누적됨에 따라 발생한 측정 오

그림 4. 제작한 능동형 주파수 선택 구조의 측정 환경(TE mode)

Fig. 4. Measurement setup of the fabricated reconfigurable frequency selective surface(TE mode).

차와 제작으로 인한 오차에 기인한다고 판단되며, 추후 유연성을 갖는 주파수 선택 구조의 곡률에 따른 주파수 특성에 관한 연구와 사용한 상용 바랙터를 해당 커패시턴스를 갖는 커패시터로 대체하여 발생한 오차의 원인을 검증할 것이다.

III. 결 론

본 논문에서는 유연성을 갖는 유전체인 Polyimide를 사

표 2. 시뮬레이션 결과와 측정 결과의 비교(TE)

Table 2. Comparison between simulation and measurement results.

Voltage (V)	Capacitance (pF)	Operating frequency(GHz)	
		Simulation	Measurement
0	2.22	6.618	6.640
2	1.20	6.728	6.754
4	0.81	6.844	6.904
6	0.55	6.990	7.012
8	0.44	7.160	7.396
10	0.38	7.246	7.588
12	0.35	7.278	7.606

그림 5. 측정된 커패시터 용량에 따른 반사 및 투과 특성의 투과 주파수의 변화(TE mode)

Fig. 5. Measured operating frequency variation for different capacitance(TE mode).

용하여 FPCB로 C 밴드인 7 GHz 대역에서 바이어스 전압에 따라 능동적으로 투과 주파수 특성을 변화시킬 수 있는 재구성 주파수 선택 구조를 설계 및 제작하였다. 고주파수에서 재구성 선택 구조를 구현하기 위하여 패치 배열과 그리드 구조를 갖는 형태를 응용하였으며, 상용 바랙터 다이오드를 이용하여 제작하였다. 측정된 재구성 주파수 선택 구조의 투과 주파수 가변 범위는 6.6~7.6 GHz (약 1 GHz)로 광대역 특성을 자유공간 측정법을 이용한 측정으로부터 얻었다. 제안한 구조는 유연성을 갖는 구조로 바랙터 다이오드 때문에 제한적이지만 휘어짐이 가능하기 때문에, 항공기 또는 군함에서 사용되는 완만한 곡면 형상 레이돔과 같은 구조에 적용이 용이하다는 구조적 장점을 갖는다. 향후 제안한 재구성 주파수 선택 구조의 입사각에 대한 안정성과, 휘어짐이 가능한 유연성으로부터 곡률에 대한 주파수 응답 특성에 관한 연구가 필요하다.

References

- [1] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. L. Law, "Simple formulas for transmission through metal periodic grids or plates", *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, vol. 30, no. 5, pp. 904-909, Sep. 1982.
- [2] E. L. Pelton, B. A. Munk, "A streamlined metallic radome", *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, 22, pp. 799-803, 1974.
- [3] A. E. Martynyuk, J. I. Martinez Lopez, and N. A. Martynyuk, "Spiraphase-type reflectarrays based on loaded ring slot resonators", *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, vol. 52, no. 1, 142-153, Jan. 2004.
- [4] G. I. Kiani, K. L. Ford, L. G. Olsson, K. P. Esselle, and C. J. Panagamuwa, "Switchable frequency selective surface for reconfigurable electromagnetic architecture of buildings", *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, vol. 58, no. 2, pp. 581-584, Feb. 2010.
- [5] D. T. M. Rosales, A. E. Martynyuk, J. I. M. Lopez, and J. R. Cuevas, "Frequency selective surfaces based on ring slots loaded with monolithically integrated capacitors", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 6, no. 3, pp. 245-250, Mar. 2012.
- [6] B. Schoenlinner, A. A. Tamijani, L. C. Kempel, and G. M. Rebeiz, "Switchable low-loss RF MEMS Ka-band frequency-selective surface", *IEEE Trans. on Microwave Theory & Tech.*, vol. 52, no. 11, pp. 2474-2481, Nov. 2004.
- [7] D. Robben, S. F. Peik, T. Henning, M. Becker, and K. Froehner, "Laser machined microsystems for active frequency selective surfaces", *2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1-3, Jun. 2012.
- [8] L. B. Qin, Q. S. Bo, T. C. Ming, Z. Hang, Z. H. Yang, and L. Wei, "Varactor-tunable frequency selective surface with embedded bias network", *Chin. Phys. B.*, vol. 22, no. 9, 094103.1-094103.4, 2013.
- [9] C. Mias, C. Tsakonas, "Waveguide demonstration of varactor-diode-tunable band-pass frequency selective surface", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 45, no. 1, pp. 62-66, 2005.
- [10] F. Bayatpur, K. Sarabandi, "Design and analysis of a tunable miniaturized-element frequency-selective surface without bias network", *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, vol. 58, no. 4, pp. 1214-1219, Apr. 2010.
- [11] F. Bayatpur, K. Sarabandi, "Tuning performance of metamaterial-based frequency selective surfaces", *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, vol. 5, no. 2, pp. 590-592, Feb. 2009.

이 인 곤

2012년 2월: 공주대학교 정보통신공학부
전파공학과 (공학사)
2013년 12월~현재: 공주대학교 정보통신
공학과 석사과정
[주 관심분야] 안테나 설계

전 홍 재

1990년~1994년: Northwestern University
기계공학과 (공학박사)
1994년~1997년: Northwestern University
기계공학과 Post Doc.
1997년~현재: 연세대학교 기계공학과 교
수
[주 관심분야] 레이더 설계, FSS 구조 해
석

홍 익 표

1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공
학사)
1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공
학석사)
2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학
과 (공학박사)
2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 정보
통신총괄 책임연구원

2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting
Scholar
2012년 2월~2013년 2월: Syracuse University, Visiting Scholar
2003년 3월~현재: 공주대학교 정보통신공학부 부교수
[주 관심분야] 전자기 수치 해석

박 용 배

1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전
자공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전
자공학과 (공학석사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전
자공학과 (공학박사)
2003년 2월~2006년 8월: KT 인프라연구
소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 부교수
[주 관심분야] 전자기장 해석, 전자파 산란, EMI/EMC

서 윤 석

2012년 2월: 연세대학교 기계공학과 (공
학사)
2014년 2월: 연세대학교 기계공학과 석사
과정
[주 관심분야] 복합재료, FSS 구조해석

조 창 민

1983년: 서울대학교 항공공학과 (공학사)
1985년: 한국과학기술원 항공공학과 (공
학석사)
1996년: Aerospace Engineering Dept., Uni-
versity of Maryland (공학박사)
1985년 4월~현재: 국방과학연구소 책임
연구원

[주 관심분야] 유한요소해석, 복합재 구조, 레이더, 안테나 내장
구조