체스판 형태를 갖는 주파수 선택구조 설계 Design of Frequency Selective Surface with Chessboard Patterns

이 인 곤*, 홍 익 표**
In-Gon Lee*, Ic-Pyo Hong**

Abstract

The frequency selective surfaces(FSSs) with chessboard patterns are proposed and designed for the first time in this paper. We proposed the design parameters like slot and patch size, gap between slots or patches, and dielectric thickness of FSS chessboard unit cell proposed in this paper. Also, we found that the variation of design parameters can be used to control the frequency transmission characteristics like the resonant frequency or bandwidth of FSS. To validate the proposed FSS, we fabricated the proposed FSS with the use of 1.0mm FR4 for the bandpass operation at X-band and measured the transmission characteristics. From the results, the proposed FSS with chessboard type can be widely applied to application of the frequency controllable radome design because we can use the design parameters selectively.

요 약

본 논문에서는 체스판 형태를 갖는 주파수 선택구조를 설계하였다. 주파수 선택구조의 주파수 응답 특성을 변화시키는 변수로서 단위 셀을 구성하는 개구면 및 패치의 크기, 간격, 두께의 변화에 따른 주파수 응답 특성 변화를 관찰하였다. 변수의 변화에 따라서 대역 저지 및 대역 통과 특성을 얻을 수 있었으며, 공진 주파수 및 대역폭을 제어할 수 있는 설계 변수를 얻을 수 있었다. 설계 결과를 바탕으로 X-band 공진특성을 갖는 패치 타입의 주파수 선택구조를 두께 1mm의 FR4 기판으로 제작 및 측정하여 설계 결과를 검증하였다. 본 논문에서 제안하는 체스판 형태를 갖는 주파수 선택구조를 사용하게 되면, 원하는 주파수 대역에 따라 주파수를 선택적으로 제어할 수 있는 레이돔과 같은 전자기구조 설계에 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

Key words : Frequency Selective Surface, Chessboard, Transmission, Bandpass, Radome

I. 서론

유전체 판상 위에 도체 또는 슬롯이 주기적으로 배

* 국립공주대학교 정보통신공학부

(Information and Communication Engineering, Kongju National University)

★ 교신저자 (Corresponding author)

※ 감사의 글 (Acknowledgment) : 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0026896)

接受日:2012年 01月 25日, 修正完了日: 2012年 02月 23日

掲載確定日: 2012年 02月 28日

열된 구조를 주파수 선택 표면(FSS: Frequency Selective Surface)라 한다. 이 FSS 구조는 일종의 공간여파기로 특정 주파수만 투과시키거나 또는 반사시키는 특성을 갖는 전자기구조라고 볼 수 있다. 일반적으로 FSS의 전자기적 특성은 기본 단위요소의 형상과 크기, 배열 주기 및 배열 형상에 따라 달라지며, 개구면 타입의 FSS는 특정 주파수 대역을 투과시켜 유도성(inductive) FSS, 패치 타입의 FSS는 특정 대역을 반사시키는 특성을 가지므로 용량성(capacitive) FSS라고 한다[1]. 이러한 특성으로 인해 주로 안테나의 레이돔 또는 반사판, 최근에는 마이크로파 공학 또는 광학분야에 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 대표적으로 국방분야에서는 대역 통과

필터 또는 대역 저지 필터로서 레이더파를 흡수 또는 반사할 수 있는 주파수 선택 구조를 이용한 RCS (Radar Cross Section) 감소 기술 등에 관련한 응용 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, FSS 구조의 대역 통과 및 저지 특성을 이용하여 안테나의 지향성을 향상하기 위한 방법으로 다수의 단일 안테나를 배열하는 어레이 안테나의 가장 큰 단점인 크고 복잡한 급전구조와 이에 따른 큰 전력손실을 보완하는 방법으로 [2][3], 파라볼라 반사기와 급전 혼안테나 사이에 FSS 구조를 두어 본래 초점 외에 가상의 초점을 얻어 독립된 안테나가 하나 더 있는 효과를 얻음으로써 여러 주파수 대역을 사용하는 위성 안테나의 무게와 부피 및 제작 비용면에서 효율성을 높이는 등 여러 가지 분야로 응용되고 있다 [4][5].

기존의 정형화된 주파수 선택 단위구조를 통하여 광대역이나 다중 공진 주파수 대역을 갖는 주파수 선택구조를 설계하기 위해서는 유전자 알고리즘과 같은 최적화 알고리즘을 이용한 복잡한 설계 파라미터가 요구될 뿐만 아니라, 원하는 주파수대역에서 대역 저지 또는 대역 통과 특성을 구현하는데 있어서 주파수 선택구조 패턴을 다르게 설계해야 하는 등 많은 시간과 노력이 요구된다. 본 논문에서 제안한 체스판 형태를 응용한 주파수 선택구조에서는 [6][7], 설계 파라미터가 간단하고 원하는 주파수 대역에 따라 대역 저지 또는 대역 통과 특성을 구현할 수 있음은 물론, 공진 주파수도 제어할 수 있는 설계파라미터를 포함하는 장점을 제시하였다. 제안된 주파수 선택 구조의 주파수 응답특성을 변화시키는 변수로서 단위셀을 구성하는 도체 사이의 간격, 단위셀의 크기, 기판의 두께 등에 따른 주파수 응답 특성 변화를 관찰하였다. 제안한 구조는 단위셀을 구성하는 도체 사이 간격의 변화에 따라서 대역 통과 및 대역 저지의 특성을 얻을 수 있다는 장점을 가진다는 사실을 시뮬레이션을 통하여 확인하였으며, 제안한 설계파라미터를 이용하여 10GHz의 공진주파수를 갖는 대역 통과 특성의 X-Band 주파수 선택구조를 제작하고 측정을 통하여 검증하였다.

II. 주파수 선택구조의 설계 및 측정

주파수 선택구조를 설계하기 위해서는 고려해야 할 많은 변수들이 있다. 단위 패턴의 크기, 모양, 패턴의 구조, 유전체 등 실제로 설계 시 고려해야 할 사항들이며, 이러한 고려 없이는 특성에 맞는 정확한 설계가 불가능하다. 본 논문에서는 정사각형 형태의 개구면 및 패치를 체스판 형태로 다층의 유전체 사이에 주기적으로 배열하였다. 개구면 타입 및 패치 타입의

주파수 선택구조의 특성을 결정하는 변수의 변화에 따라 각각의 주파수 응답을 분석하였다.

Fig. 1. The proposed unit cell structure : Top view and side view

그림 1. 제안한 단위셀의 구조 : 패턴의 윗면과 측면

Fig. 2. The transmission coefficient with the variation of aperture size and distance between two apertures

그림 2. 개구면의 크기 및 개구면 간 간격에 따른 투과계수

제안한 주기구조의 특성을 결정하는 변수로 개구면과 패치의 크기, 간격, 유전체의 두께에 따라 대역 통과 및 대역 저지 특성을 확인하였다. 설계한 주기구조의 패턴은 전파해석 시뮬레이터인 Ansoft사의 HFSS의 Floquet 모드해석을 사용하여 결과를 확인하였다.

본 논문에서 제안한 개구면 타입의 단위셀 구조는

그림 1과 같다. 그림 1(a)에는 윗면, 그림 1(b)에는 측면을 각각 나타내었으며, 기판의 유전율을 4.0으로 고정한 후 각 설계변수 SL, PL, 유전체 두께 (Thickness)의 변화에 따른 주파수 응답의 변화를 관찰하였다. 그림 2는 정사각 개구면의 크기와 개구면의 간격에 따른 투과계수의 변화를 나타내었으며, 그림 3은 유전체 두께에 따른 투과계수의 변화를 나타내었다.

그림 2에서 유전체의 두께를 3.4mm로 고정하고, 개구면의 크기와 개구면 간 간격에 동시에 변화를 주는 변수 SL, PL의 변화에 따른 주파수 응답을 관찰하였다. 변수 SL, PL이 1mm 일 때의 주파수 응답을 관찰하면 -10dB 이하의 통과대역이 저지대역보다 넓은 특성이 있으며, 17.5GHz 이하의 주파수 대역에는 통과대역만이 존재한다. 따라서 일부분의 주파수만 통과시켜야 하는 대역 통과 필터 보다 대역 저지 필터에 더 가까운 특성을 가진다. 변수 SL, PL이 2, 3, 4mm 일 때의 주파수 응답을 관찰하면 SL, PL이 1mm 일 때의 주파수 응답과 유사한 형태라 할 수 있지만, 17.5GHz 이하의 주파수 대역 뿐만 아니라 전반적으로 -10dB 이하의 통과대역이 저지대역보다 좁기 때문에 대역 통과 필터에 가까운 특성을 가진다. 따라서 설계한 주기구조는 변수에 따라 대역 저지 또는 대역 통과 특성을 가짐을 확인 할 수 있다.

Fig. 3. The transmission coefficient with the variation of the dielectric thickness

그림 3. 유전체 두께 변화에 따른 투과계수

그림 3은 변수 SL, PL을 2mm로 고정하고, 유전체 두께 변화에 따른 주파수 응답을 나타내었다. 유전체 두께가 증가함에 각 공진된 중심주파수로부터 주파수 대역폭이 21.3%, 20.9%, 18.9%, 15.8%로 감소하였으며, 공진주파수가 낮은 대역으로 이동하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 일반적으로 FSS에서 일어나는 유전체의 두께 변화에 따른 공진주파수의 이동현상과 동일하다.

Fig. 4. The proposed unit cell structure : Top view and side view

그림 4. 제안한 단위셀의 구조 : 패턴의 윗면과 측면

Fig. 5. The transmission coefficient with the variation of patch size and distance between two patches

그림 5. 패치의 크기 및 패치 간 간격에 따른 투과계수

본 논문에서 제안한 패치 타입의 단위셀 구조는 그림 4와 같다. 그림 4의 제안구조는 그림 1에서 제안한 구조와 대칭인 형태의 패턴구조로 기판의 유전율을 4.0으로 고정한 후 각 변수 SL, PL의 변화에 따른 주파수 응답의 변화를 관찰하였다. 그림 5는 정사각 패치의 크기와 패치의 간격에 따른 투과계수 변화를 나타내었으며, 그림 6는 패치의 크기에 따른 투과계수 변화를 나타내었다.

그림 5는 유전체의 두께를 3.4mm로 고정하였을 때, 패치의 크기 및 패치의 간격을 나타내는 변수 SL, PL의 변화에 따른 주파수 응답을 관찰하였다. 변수의 변화에 따라 공진 주파수가 이동하는 것을 확인

Fig. 6. The transmission coefficient with the variation of patch size

그림 6. 패치의 크기 변화에 따른 투과계수

할 수 있었다. 그러나, 공진되는 주파수의 대역폭이 상대적으로 좁으며, 높은 주파수 대역으로 갈수록 원치 않는 기생 공진이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 시뮬레이터의 주기구조 시물레이션 방법 특성상 설계한 단위셀을 무한히 반복된 구조로 가정하여 시물레이션을 하기 때문에 볼 수 없는, 인접한 도체로 전류가 유기되는 커플링 효과로 인한 공진이라 할 수 있다. 주기적으로 반복되는 단위셀의 개수를 제한하거나, 가중치를 갖는 크기구조를 응용하여 높은 주파수 대역에서 발생하는 원치 않는 공진을 감소시킬 수 있을 것으로 예상되며 반복되는 단위셀의 개수에 따른 투과계수의 변화에 관한 충분한 실험과 원하는 대역폭을 얻을 수 있는 구조가 추가, 수정 되어야 적용이 가능할 것으로 예상된다.

그림 6은 유전체의 두께를 3.4mm, 변수 SL을 2mm로 고정한 후, 변수 PL 변화에 따른 주파수 응답을 관찰하였다. 변수 PL이 감소함에 따라 공진 대역이 감소하였으며, 공진주파수가 낮은 대역으로 이동하는 것을 확인 할 수 있었다.

위의 설계 결과를 바탕으로 10GHz에서 공진 특성을 갖는 패치 타입의 X 밴드 주파수 선택구조를 유전율 4.3, 손실 탄젠트 0.02를 갖는 두께 1mm인 FR4 기판을 사용하여 제작 및 측정을 하여 설계 결과를 검증하였다. 10GHz에서 공진 특성을 갖는 패치 타입의 주파수 선택구조의 최적화된 설계값은 $PL=10.65\text{mm}$, $SL=15.8$, $\text{Thickness}=1\text{mm}$ 이며, 공정상 가능한 크기가 $250\text{mm} \times 250\text{mm}$ 인 기판에 가로, 세로 각각 9개의 단위셀을 배열하여 제작하여, 입사파가 TM 모드인 경우에 대하여 입사각을 0° , 30° 로 바꿔가며 각각 측정하였다. 유한한 크기이기 때문에 가장자리에서 회절효과가 발생할 수가 있기 때문에 혼안테나에 의해 만들어지는 균일 전계에 위치하도록 거리를 조정하고 전자파 흡수체를 추가하여 회절효과

를 감소시킬 수 있도록 하였다.

(a)

(b)

Fig. 7. Photographs of (a) the measurement setup

(b) the proposed frequency selective surface
그림 7. (a) FSS 측정시스템 (b) 제안된 주파수 선택 구조의 제작사진

제안된 FSS의 투과특성 측정을 위한 시스템을 그림 7(a)에, 제작한 주파수 선택구조의 외형은 그림 7(b)에 각각 나타내었으며, 측정된 투과계수와 시물레

Fig. 8. The measured results of the proposed frequency selective surface

그림 8. 제안한 주파수 선택구조의 측정값

이터를 통하여 계산된 투과계수의 결과를 그림 8에 비교하여 나타내었다. 결과를 비교하였을 때, 측정된 투과계수와 계산된 투과계수 결과의 형태는 비슷하지

만, 공진 주파수는 약간의 차이가 발생하였다. 입사각이 0°인 경우에 측정된 공진주파수는 10.6GHz에서 -45.4dB, 입사각이 30°인 경우에 9.4GHz에서 -31.5dB로 계산된 투과계수 결과와 비교하여 약 0.3GHz-0.4GHz의 주파수 이동 오차가 발생하였다. 이는 주파수 선택구조 패턴이 공정상 정확하게 유전체의 중앙에 위치시켜 제작하기 힘들기 때문에 발생한 제작상의 오차, 그리고 높은 주파수특성에 비해 주로 저주파수 용도로 사용되는 FR4를 이용한 제작 등 설계변수의 부정확성 인하여 발생한 오차로 예상된다.

III. 결 론

본 논문에서는 체스판 형태를 갖는 주파수 선택구조를 제안 하였다. 각 설계 변수의 변화에 따른 주파수 응답의 변화를 관찰하여 설계하고자하는 주파수 대역에 따라 대역 저지 또는 대역 통과특성 구현이 용이하며, 공진주파수 제어가 가능함을 확인하였다.

제안한 주파수 선택구조의 설계 결과를 이용하여 10GHz에서 공진 특성을 갖는 X 밴드에서 동작하는 패치 타입의 주파수 선택구조를 FR4 기판을 사용하여 제작 및 측정을 하였고, 주파수 선택구조의 시뮬레이션을 통한 계산값과 측정값을 비교함으로써, 제안한 설계 구조를 검증하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 주기구조는 주파수를 선택적으로 제어할 수 있는 여파기 또는 전파흡수 구조체와 같은 전자구조 설계에 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

향후 연구방향으로는 제안한 주파수 선택구조의 커플링 효과 최소화와 능동 주파수 선택구조의 관한 연구가 진행될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. L. Law, "Simple formulas for transmission through metal periodic grids or plates", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 5, pp. 904-909, Sep. 1982.
- [2] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Design of a frequency selective surface(FSS) type superstrate for dual-band directivity enhancement of microstrip patch antenna", *IEEE Antennas & Propagation Society International Symposium*, vol. 34, no. 5, pp. 462-467, Jul. 2005.
- [3] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park,

"Thin frequency selective surface(FSS) superstrate with different periodicities for dual-band directivity enhancement", *IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials(IWAT)*, pp. 375-378 Mar. 2005.

[4] G. H. Schennum, "Frequency-selective surfaces for multiple frequency antenna", *Microwave Journal*, vol. 16, pp. 55-57, May. 1973.

[5] V. D. Agrawal, and W. A. Imbriale, "Design of dichroic cassegrain subreflector", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 27, no. 4, pp. 466-473, July. 1979.

[6] S. Simms and V. Fusco, "Chessboard reflector for RCS reduction", *Electronic Letters*, vol. 44, No. 4, Feb. 2008.

[7] M. E. de Cos, Y. Alvarez, and F. Las-Heras, "A novel approach for RCS reduction using a combination of artificial magnetic conductors", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 107, pp. 147-159, 2010.

저 자 소 개

이 인 곤 (학생회원)

2012년 3월~현재 : 국립공주대학교
정보통신공학부 4학년 재학중
<주관심분야>
안테나 설계

홍 익 표 (정회원)

1994년 : 연세대학교 전자공학과
졸업 (공학사)
1996년 : 연세대학교 대학원 전자
공학과 (공학석사)
2000년 : 연세대학교 대학원 전기
컴퓨터공학과 (공학박사)
2003년 3월~현재 : 국립공주대학교
정보통신공학부 부교수
<주관심분야>
안테나, 전자기수치해석