

PSO를 이용한 주파수 선택 구조 기반 인공 자기 도체 설계

Design of Frequency Selective Surface Based Artificial Magnetic Conductor Using the Particle Swarm Optimization

홍익표 · 이경원* · 육종관* · 조창민** · 전흥재***

Ic-Pyo Hong · Kyung-Won Lee* · Jong-Gwan Yook* · Chang-Min Cho** · Hueng-Jae Chun***

요 약

본 논문에서는 주파수 선택 구조를 기반으로 하는 인공 자기 도체 구조를 설계하기 위하여 최적화 알고리즘 중 하나인 particle swarm optimization(PSO) 기법을 이용하였다. 주파수 선택 구조로서 Jerusalem Cross를 갖는 인공 자기 도체의 등가 회로 모델에 PSO를 적용하여, 원하는 공진 주파수 대역을 갖는 최적의 설계값을 얻어낼 수 있음을 확인하였다. 우선 유도한 등가 회로 모델로부터 공진 주파수와 반사 계수 위상 특성을 구하여 상용 소프트웨어로 얻은 값과 일치하는 것을 확인하여 본 논문의 유효함을 확인하였으며, 이로부터 원하는 공진 주파수에 대해 최적화 과정을 통하여 설계 파라미터를 추출하였다. 본 논문에서 유도한 최적화 과정을 이용한 주파수 선택 구조 기반 인공 자기 도체 구조 설계 방법을 이용하여 여러 다른 종류의 주파수 선택 구조 형태를 갖는 인공 자기 도체 구조뿐만 아니라, 인공 자기 도체 구조를 이용한 소형 안테나 접지면 설계 등 마이크로파 회로 설계에 유용하게 사용할 수 있다.

Abstract

In this paper, particle swarm optimization(PSO) is applied for the design of frequency selective surface based artificial magnetic conductor. An equivalent circuit model for this artificial magnetic conductor(AMC) with Jerusalem Cross arrays was derived and then PSO was applied for obtaining the optimized geometrical parameters with desired resonant frequency. The resonant frequency and the reflection phase characteristics from the optimization were compared to the results from commercial software for verifying the validity of this paper. The procedure presented in this paper can be applied to design the AMC with different frequency selective surface and also can be used for the design of microwave circuits like the AMC ground planes.

Key words : Frequency Selective Surface, Artificial Magnetic Conductor, Particle Swarm Optimization, Jerusalem Cross

I. 서 론

인공 자기 도체(AMC: Artificial Magnetic Conductor)

는 공진 주파수에서 실제로 존재하지 않는 완전 자기 도체(perfect magnetic conductor)의 특성을 갖는 인공 구조체로서 1999년 Sievenpiper^[1]의 박사논문에서

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.」
공주대학교 정보통신공학부(Dept. of Information & Comm. Eng., Kongju National University)

*연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electronics & Electricity Eng., Yonsei University)

**국방과학연구소(Agency for Defense and Development)

***연세대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Eng., Yonsei University)

· 논문 번호 : 20100318-026

· 교신저자 : 홍익표(e-mail : iphong@kongju.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 6월 1일

버섯 모양을 갖는 HIS(High Impedance Structure) 구조가 제안된 이후, EBG(Electronic Band Gap) 구조와 함께 최근 많은 연구가 이루어지고 있다^[2].

완전 도체(perfect electric conductor)는 -1 의 반사 특성을 갖는 반면, 완전 자기 도체는 $+1$ 의 반사 특성을 갖는다. 이러한 완전 자기 도체는 자연에 존재하지 않지만 EBG 구조를 응용하여 만들어지는 인공 자기 도체는 특정한 공진 주파수에서 반사 위상 특성이 0° 가 되는 특성을 가지게 되어, 이 경우 PMC처럼 동작하게 되고, 이와 같이 특정 주파수에 대해 완전 자기 도체 특성을 갖는 구조를 AMC라고 한다. AMC 구조는 접지면 반대편에 위치하는 등가 영상 전류 때문에 표면파(surface wave) 억제 성능을 가지며^[2], 따라서 전력 손실 특성을 개선할 수 있어 안테나의 접지면 등으로 사용되면 안테나의 방사 패턴의 개선 또는 배열 안테나 소자간의 결합 효과 등을 줄이는 등 안테나 및 마이크로파 회로 응용과 관련하여 많은 연구가 이루어지고 있다^{[2]~[5]}.

AMC 구조는 EBG 구조의 한 종류로 다루어지며, 접지를 가진 유전체 위에 주기적으로 배열된 금속면들이 비아(via)로 접지와 연결되면 AMC 특성을 갖는다는 사실이 알려졌으며^{[1][3]}, 또한 2002년 Enghta^[6]에 의해 주파수 선택 구조(FSS: Frequency Selective Surface)를 접지를 가진 유전체 위에 배열하면 협대역을 갖는 AMC 또는 높은 임피던스-주파수 선택 평면(HZ FSS)으로 동작한다고 연구되었다. 제안된 FSS-AMC 구조의 경우, 비아를 갖지 않기 때문에 저가 제작이 용이하고 마이크로파 소자들과 쉽게 집적이 가능하다는 장점을 갖는다^{[7][8]}.

수 십년 동안 주파수 선택 평면 구조로서 FSS는 안테나 시스템과 마이크로파 회로에 널리 사용되어 왔으며, 최근에는 AMC 구조에 적용되어 왔고, 특히 단위 셀 크기에 공진 주파수를 감소시키는 방법으로 Jerusalem Cross 모양의 FSS가 AMC 구조에 적용이 되어 왔다^[9]. 참고문헌 [10]에 EBG 구조에서 금속 패치 대신 FSS 배열을 사용하면 공진 주파수를 감소시킬 수 있다고 제안되었다. 또한, AMC 구조에서 비아를 제거하게 되면 표면파의 수직 입사에 대한 동위상 반사 특성과 반사 위상 특성에 대한 영향이 줄어든다는 장점이 있다. FSS-AMC 구조의 해석은 해석적 방법과 수치적 방법에 의해서 이루어지는데, 수

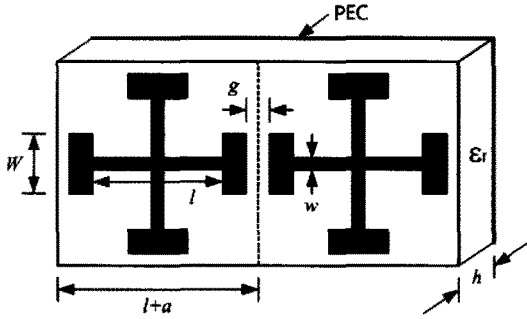
치적 방법은 기하학적 구조에 비교적 제한을 갖지 않는 반면, 계산시간과 컴퓨터 메모리 활용 측면에서 단점을 가진다. 반면, 해석적 방법은 제한된 기하학적 구조에 대해서만 해석이 가능하지만, 직관적으로 FSS-AMC 구조의 물리적 현상을 이해할 수 있다는 장점을 가진다. FSS-AMC 해석을 위해서는 FSS 자체의 해석도 매우 중요한데, FSS 해석은 주기적 모멘트법과 같은 해석적 방법이 주로 이용되지만, 간단한 셀 구조의 경우에는 등가회로 모델 접근 방법도 비교적 정확하면서 빠르게 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. FSS의 등가회로 모델은 1982년 Langley 등^[11]에 의해 사각 루프 형태 FSS, 그리드를 갖는 사각 루프, 이중 사각 루프 등으로 연구되어 왔다^{[12][13]}.

FSS-AMC의 최적화 설계는 FSS를 구성하는 주기 구조의 형상을 최적화하는 연구와 고정된 형상에 대한 설계 파라미터를 최적화하는 연구로 나누어져 있는데, 대부분의 연구는 형상의 최적화 연구에 집중되고 있다. 주기 구조 형상의 최적화 연구로는 2002년 Monorchio^[8]가 최적화 알고리즘 중 널리 알려진 유전자 알고리즘을 이용하여 원하는 주파수 대역을 갖는 AMC 구조를 위한 FSS의 모양과 치수 등을 얻어내는 방법으로 FSS-AMC 구조를 설계하였다. 또한, 2005년 Werner^[14]는 마찬가지로 유전자 알고리즘을 이용하여 이중 대역 FSS-AMC 구조를 설계하였다. 고정된 FSS 형상의 설계 파라미터 최적화는 2009년 Yilmaz^[15]에 의하여 FSS 구조 중 사각 루프 형태를 갖는 FSS의 설계 파라미터를 PSO를 이용하여 최적화하였다.

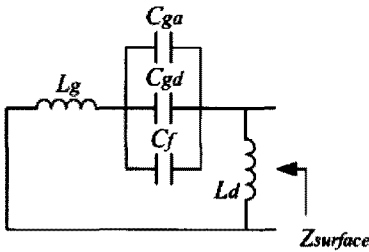
본 논문에서는 FSS 구조로서 Jerusalem Cross 구조를 포함하는 AMC 구조의 등가 회로 모델로부터 원하는 공진 주파수를 찾기 위해 최적화 알고리즘인 PSO를 이용하여 AMC 구조의 설계 파라미터를 구하는 과정을 제안하였다. 논문의 유효함을 입증하기 위하여 얻어진 설계 파라미터를 이용하여 상용 소프트웨어로부터 얻은 결과와 등가 회로 모델을 이용하여 얻은 결과를 비교하여 일치하는 것을 확인하였다.

II. 인공 자기 도체 등가 회로 모델

그림 1(a)에 본 논문에서 설계하기 위한 Jerusalem



(a) Jerusalem Cross 기반 AMC 구조
(b) Jerusalem Cross based AMC



(b) Jerusalem Cross 기반 AMC 구조의 등가 회로
(b) Equivalent Circuit Model for Jerusalem Cross based AMC

그림 1. Jerusalem Cross 기반 AMC 구조와 등가 회로 모델

Fig. 1. Equivalent circuit model of Jerusalem Cross-based AMC.

Cross 기반 AMC 구조를 나타내었다. 그림 1(a)는 두 셀만 나타내었지만 실제로는 무한한 평면을 가정한다. 유전체의 유전율은 ϵ_r 이며, 두께는 h 이고, 완전 도체인 PEC가 후면에 위치하고, 전면에서 주파수 선택 평면 중 하나인 Jerusalem Cross가 배열된다.

그림 1(b)에는 그림 1(a) 구조의 등가 회로 모델을 나타내었다. AMC 구조의 공진 주파수와 반사 계수의 위상은 AMC 표면 임피던스($Z_{surface}$)로부터 얻어지며, 그림 1(b)와 같은 등가 커패시턴스와 등가 인덕턴스의 회로로 구성이 된다. AMC 구조의 표면 임피던스를 얻게 되면 다음과 같은 식 (1)에 의해서 수직 입사하는 전자파에 대한 반사 계수(Γ)의 위상을 얻을 수 있다^[5].

$$\angle \Gamma(\omega) = \angle \left[\frac{Z_{surface}(\omega) - \eta_0}{Z_{surface}(\omega) + \eta_0} \right] \quad (1)$$

여기서, η_0 는 자유 공간의 임피던스를 나타낸다. 그림 1(b)의 등가 회로 모델에서 등가 커패시턴스는

C_{ga} , C_{gd} , C_f 모두 세 종류가 존재하는데^[7], C_{ga} 는 서로 다른 Jerusalem Cross의 간격 g 에 의해 발생되는 커패시턴스로 참고문헌 [1]에 의해 그림 1(a)와 같은 구조에 대해 다음과 같이 주어진다.

$$C_{ga} = \frac{2W}{\pi} \epsilon_0 \epsilon_{eff} \text{Cosh}^{-1} \left(\frac{a}{g} \right) \quad (2)$$

여기서, ϵ_0 는 자유 공간의 유전율을 나타내며, ϵ_{eff} 는 그림 1(a)에서 커패시턴스를 계산하기 위한 선로를 마이크로스트립 선로로 가정한 경우 계산되는 유효유전율로 이미 널리 알려진 계산식 (3)과 같이 나타낸다^[15].

$$e_{eff} = \frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{2} F \left(\frac{W}{h} \right) \quad (3)$$

$$F \left(\frac{W}{h} \right) = \begin{cases} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.041 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \frac{W}{h} & \frac{W}{h} \leq 1 \\ \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} & \frac{W}{h} \geq 1 \end{cases}$$

두 번째 등가 커패시턴스 C_{gd} 는 Jerusalem Cross의 선로와 유전체 후면 PEC 사이에서 얻어지는 값으로 참고문헌 [16]에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$C_{gd} = \epsilon_0 \frac{\epsilon_r}{\pi} \ln \left[\coth \left(\frac{\pi g}{4h} \right) \right] + 0.65 C_f \left[0.02h \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{g} + \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r^2} \right) \right] \quad (4)$$

여기서 C_f 는 Jerusalem Cross 선로에서 발생하는 프런지 커패시턴스로 c 가 빛의 속도이고, Z_0 가 선로의 특성 임피던스라고 할 때 다음 식 (5)와 같이 주어진다^[16].

$$C_f = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sqrt{\epsilon_{re}}}{cZ_0} - \epsilon_0 \epsilon_r \frac{W}{h} \right\} \quad (5)$$

그림 1(b)에 나타낸 등가 인덕턴스 L_g 와 L_d 는 각각 Jerusalem Cross의 도체 스트립에서 얻어지는 인덕턴스와 유전체에 의해 주어지는 인덕턴스를 나타내는 것으로 다음과 같이 식 (6)과 식 (7)에 주어진다^{[9],[17]}.

$$L_g = Z_0 \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{l}{c} \quad (6)$$

$$L_d = \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan \frac{kh}{w} \quad (7)$$

표 1. 등가 회로 모델의 공진 주파수 비교
Table 1. Resonant frequency of equivalent circuit model.

구조	설계 파라미터(mm)						공진 주파수(GHz)	
	유전체	l	a	g	W	w	모델	HFSS
#1 ^[9]	$\epsilon_r=2.7$ $h=6$	3.5	0.5	0.1	2.0	0.2	4.65	4.61
#2 ^[17]	$\epsilon_r=2.2$ $h=0.5$	6.4	1.1	0.1	4.0	0.5	7.07	7.03

따라서, Jerusalem Cross 기반 AMC 구조의 등가 회로 모델로부터 식 (2)~(7)을 사용하게 되면 표면 임피던스 $Z_{surface}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{surface} = Z_d \parallel (Z_g + (Z_{ga} \parallel Z_{gd} \parallel Z_f)) \quad (8)$$

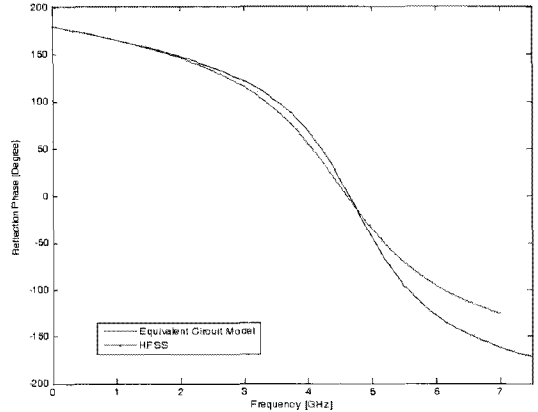
여기서 $Z_d, Z_g, Z_{ga}, Z_{gd}, Z_f$ 는 각각 $L_d, L_g, C_{ga}, C_{gd}, C_f$ 로부터 얻어지는 임피던스를 나타낸다. 식 (8)에서 구한 표면 임피던스로부터 공진 주파수를 얻을 수 있다.

본 논문에서 구한 등가 회로 모델의 유효함을 입증하기 위해서 표 1과 같은 구조^{[9],[17]}에 대해서 등가 회로 모델을 이용하여 얻은 공진 주파수와 상용 소프트웨어인 Ansoft HFSS를 이용하여 얻은 공진 주파수를 나타내었다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 등가 회로 모델을 이용하여 얻은 공진 주파수는 상용 소프트웨어를 이용하여 얻은 결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

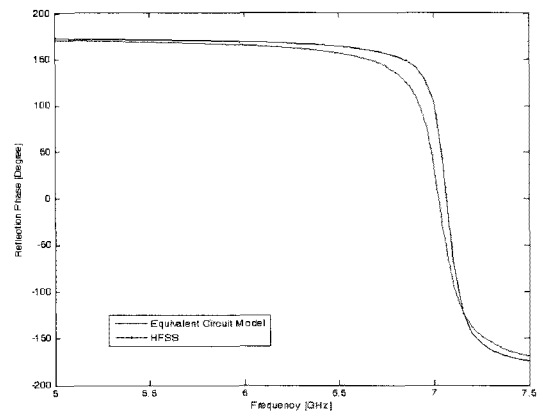
그림 2(a)와 그림 2(b)에는 각각의 구조에 대해서 반사 위상 특성을 역시 등가 회로 모델과 상용 소프트웨어를 이용하여 얻은 결과를 비교하여 나타내었다. 두 결과로부터 등가 회로 모델로부터 얻은 Jerusalem Cross 기반 AMC 구조가 상용 소프트웨어로부터 얻은 결과와 매우 유사한 위상 특성을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

III. PSO를 이용한 최적화 설계

유전알고리즘(GA: Genetic Algorithm)이 진화론에 기반한 우형 형질의 취사 선택으로 최적화 파라미터를 결정하는 반면 particle swarm optimization(PSO) 기법은 확률론적 최적화 기법으로 집단을 이루는 구



(a) #1 구조의 반사 계수 위상 특성
(a) Reflection phase of sample #1



(b) #2 구조의 반사 계수 위상 특성
(b) Reflection phase of sample #2

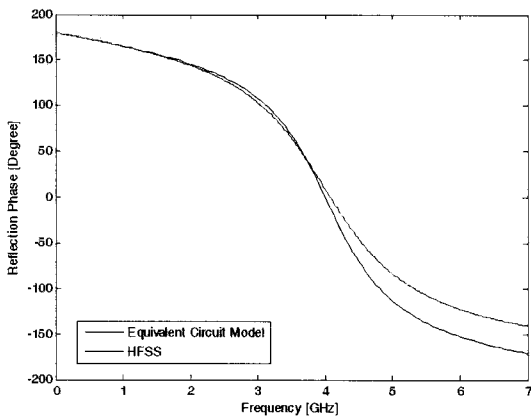
그림 2. 등가 회로 모델을 이용한 Jerusalem Cross 기반 AMC의 반사 계수 위상 특성
Fig. 2. Reflection phase of Jerusalem Cross using an equivalent circuit model.

성 요소들의 사회성에 기반하여 최적화 과정을 수행하는 방법으로 최적화 속도가 더 빠르다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 앞서의 Jerusalem Cross 기반 AMC 구조에 대한 등가 회로 모델로부터 원하는 대역의 공진 주파수를 찾을 수 있도록 설계 파라미터를 최적화하도록 하였다. 본 논문에서 다루고 있는 Jerusalem Cross 기반 AMC 구조는 인공 자기 도체의 특성 때문에 원하는 공진 주파수 대역에서 0°의 위상을 갖기 때문에 최적화 알고리즘의 목적함수를 다음과 식 (9)와 같이 정의하였다.

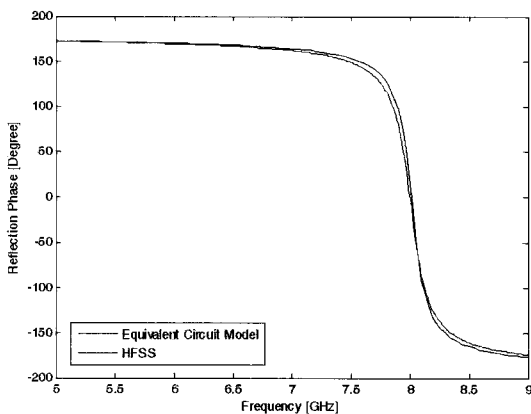
$$f(x) = W_{obj} \left\{ \sum_{f_{resonant}} |\angle \Gamma(\omega)| \leq 3^\circ \right\} \quad (9)$$

여기서 $\angle \Gamma(\omega)$ 는 앞의 식 (1)에서 구한 반사 계수의 위상을 나타내고, $f_{resonant}$ 는 원하는 공진 주파수를 나타내며, $W_{|3^\circ|}$ 는 원하는 공진 주파수 대역에 $\pm 3^\circ$ 대한 가중치 함수를 나타낸다. 즉, 식 (9)에 의해 $|3^\circ|$ 보다 작은 값을 가지는 경우를 공진 주파수로 가정하고, 설계 파라미터를 찾게 된다. 본 논문에서 PSO에서의 개체수는 50으로 설정하였으며, 최적화를 위한 반복 연산 회수는 500으로 설정하였다. 또한 PSO의 경계 조건으로는 반사 경계 조건을 사용하였다.

그림 3에는 앞서의 #1 구조와 #2 구조에 대하여 동일한 유전체를 사용하는 경우, 원하는 공진 주파수



(a) #1 구조의 반사 계수 위상 특성
(a) Reflection phase of sample #1



(b) #2 구조의 반사 계수 위상 특성
(b) Reflection phase of sample #2

그림 3. 최적화된 설계값을 이용한 Jerusalem Cross 기반 AMC의 반사 계수 위상 특성

Fig. 3. Reflection phase of Jerusalem Cross using design values from optimization.

표 2. 원하는 공진 주파수의 설계 파라미터

Table 2. Design parameters for desired resonant frequency.

구조	공진 주파수 [GHz]	설계 파라미터[mm]					
		유전체	l	a	g	W	w
#1 ^[9]	4.0	$\epsilon_r=2.7$ $h=6$	3.00	1.07	0.07	2.53	0.50
#2 ^[17]	8.0	$\epsilon_r=2.2$ $h=0.5$	3.94	1.01	0.02	2.98	0.50

가 각각 4.0 GHz와 8.0 GHz로 설정되었을 때 얻어진 설계 파라미터를 표 2에 나타내고, 이를 이용하여 구한 반사 위상 특성을 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 주파수 선택 구조중 하나인 Jerusalem Cross를 기반으로 하는 인공 자기 도체 구조의 등가 회로 모델을 유도하여 공진 주파수와 반사 계수 위상 특성을 얻어내고, 원하는 공진 주파수에 대한 설계 파라미터를 얻기 위하여 최적화 알고리즘중 하나인 PSO 기법을 이용하였다. 유도한 등가 회로 모델로부터 공진 주파수와 반사 계수 위상 특성을 구하여 상용 소프트웨어로 얻은 값과 일치하는 것을 확인하여 본 논문의 유효함을 확인하였다. 인공 자기 도체 구조는 안테나의 접지면 등에 사용하여 안테나의 빔 패턴 및 성능 개선을 위한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 본 논문에서 유도한 최적화 과정을 이용하면 여러 다른 종류의 주파수 선택 구조 형태를 갖는 인공 자기 도체 구조뿐만 아니라, 인공 자기 도체 구조를 이용한 소형 안테나 접지면 설계 등 마이크로파 회로 설계에 유용하게 사용할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] D. F. Sievenpiper, "High-impedance electromagnetic surfaces", Ph. D. thesis, Univ. Calif., Los Angeles, CA, 1999.
 [2] F. Yang, Y. Rahmat-Samii, *Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering*, Cambridge

- University Press, 2009.
- [3] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
- [4] D. J. Kern, D. H. Werner, A. Monorchio, L. Lanuzza, and M. J. Wilhelm, "The design synthesis of multiband artificial magnetic conductors using high impedance frequency selective surfaces", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 1, Jan. 2005.
- [5] M. Hosseini, M. Hakkak, "Characteristics estimation for Jerusalem Cross-based artificial magnetic conductors", *IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters*, vol. 7, pp. 58-61, Dec. 2008.
- [6] N. Engheta, "Thin absorbing screens using metamaterial surfaces", *IEEE AP-S/URSI Symp Dig.*, pp. 392-395, 2002.
- [7] M. Hosseinipناه. Q. Wu, "Equivalent circuit model for designing of Jerusalem Cross-based artificial magnetic conductors", *Radioengineering*, vol. 18, no. 4, Dec. 2009.
- [8] A. Monorchio, G. Manara, and L. Lanuzza, "Synthesis of artificial magnetic conductors by using multilayered frequency selective surfaces", *IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters*, vol. 1, pp. 196-199, Dec. 2002.
- [9] C. R. Simovski, P. de Maagt, and I. V. Melchakova, "High-impedance surfaces having stable resonance with respect to polarization and incidence angle", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 3, Mar. 2005.
- [10] N. Engheta, R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, Wiley-Interscience, 2006.
- [11] R. J. Langley, E. A. Parker, "Equivalent circuit model for arrays of square loops", *Electronics Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 294-296. 1982.
- [12] R. J. Langley, E. A. Parker, "Double square frequency selective surfaces and their equivalent circuit", *Electronics Letters*, vol. 19, no. 17, pp. 675-677, 1983.
- [13] C. K. Lee, R. J. Langley, "Equivalent-circuit models for frequency selective surfaces at oblique angles of incidence", *IEE Proceedings H-Microwaves Optics and Antennas*, vol. 132, pp. 395-399, 1985.
- [14] D. H. Werner, D. J. Kern, and M. G. Bray, "Advances in EBG design concepts based on planar FSS structures", *Proceedings of the Loughborough Antennas and Propagation Conference*, pp. 259-262, Apr. 2005.
- [15] A. E. Yilmaz, M. Kuzuoglu, "Design of the square loop frequency selective surfaces with particle swarm optimization via the equivalent circuit model", *Radioengineering*, vol. 18, no. 2, Jun. 2009.
- [16] R. Garg, I. J. Bahl, "Characteristics of coupled microstriplines", *IEEE Trans. on Microwave Theory & Tech.*, vol. 27, no. 7, pp. 700-705, Jul. 1979.
- [17] I. Bahl, *Lumped Elements for RF and Microwave Circuit*, Norwood, Artech House, 2003.
- [18] R. Baggen, M. Martinez-Vazquez, J. Leiss, and S. Holzwarth, "Comparison of EBG substrates with and without vias for GALILEO/GPS applications", *Proc. EuCAP 2007*, Edinburgh, UK, 2007.

홍 익 표



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
 2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자

정보통신총괄 책임연구원
 2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting Scholar
 2003년 3월~현재: 공주대학교 정보통신공학부 부교수
 [주 관심분야] 전자기 수치 해석, 스펙트럼 관리, 이동 통신

조 창 민



1983년: 서울대학교 항공공학과 (공학사)
 1985년: 한국과학기술원 항공공학과 (공학석사)
 1996년: University of Maryland, Aerospace Engineering Dept. (공학박사)

1985년 4월~현재: 국방과학연구소 책임연구원
 [주 관심분야] 유한요소해석, 복합재 구조, 레이돔, 안테나 내장 구조

이 경 원



2003년 2월: 대전대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로

파 해석, Radome

전 흥 재



1990년~1994년: Northwestern University 기계공학과 (공학박사)
 1994년~1997년: Northwestern University 기계공학과 (Post Doc.)
 1997년~현재: 연세대학교 기계공학과 교수
 [주 관심분야] Radome 설계, FSS 구

조 해석

육 중 관



1987년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
 1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow

1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer
 1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
 2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
 [주 관심분야] 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막공진 구조