THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2014 Nov.; 25(11), 1121～1127.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.11.1121
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

가변 주파수 특성을 갖는 평면형 모노폴 안테나 설계

Planar Frequency-Reconfigurable Monopole Antenna Design

김 영 규 · 임 종 식* · 한 상 민

Youngkyu Kim · Joingsik Lim* · Sang-Min Han

요 약

본 논문에서는 가변 커패시터를 이용한 주파수 재구성형 평면 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 미앤더 타입의 평면 모노폴로 설계되었으며, 버랙터 다이오드를 사용하여 가변 커패시티브 로딩(capacitive loading)에 의해 공진 주파수를 변화하였다. 등가회로 분석과 EM 시뮬레이션 분석에 의해 안테나의 가변 특성 변화를 설계하였으며, 동일한 방사 패턴의 특성도 확인하였다. 제작된 주파수 가변 모노폴 안테나는 설계시 사용된 캐패시터를 실장한 안테나와 버랙터 다이오드의 인가 전압에 따른 공진 주파수 변화를 비교함으로써 설계 결과를 검증하였다. 제안된 안테나는 인가 전압에 따라 2.25 GHz에서 2.42 GHz까지 공진 주파수 가변 성능을 나타내었다.

Abstract

In this paper, a planar frequency reconfigurable antenna is proposed with variable capacitors. The proposed one is designed with a planar monopole, and varies resonant frequencies by variable capacitive loading of a varactor diode. The equivalent circuit and electromagnetic(EM) simulation are utilized for the analysis at the variable characteristic design of the antenna, and the same radiation performance. The implemented frequency variable monopole antenna has been verified by comparing prototypes with designed capacitors and ones with biased varactor diodes. The proposed antenna has presented the resonant frequency variations from 2.25 GHz to 2.42 GHz.

Key words: Reconfigurable Antennas, Monopole Antennas, Planar Antennas, Varactor Diodes

Ⅰ. 서 론

무선을 이용한 다양한 미디어 응용 서비스의 발전은 이동통신 단말의 복잡도를 증가시킬 뿐만 아니라, 소형화 및 저전력화의 제한 요소가 되어 오고 있다. 이에 무선 단말의 송 · 수신 프레임에서 시스템의 가변성을 활용한 기기 설계 및 주파수 자원을 효율적으로 활용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다[1],[2]. 이에 따라 이 자원들을 다용도로 활용할 수 있는 재구성 안테나의 연구가 활발히 진행되어 왔다. 재구성 안테나 연구 분야는 크게 빔 조향, 편파 조향, 주파수 가변 등의 분야로 구분되어지며, 그 중 주파수 가변 안테나에 관한 연구는 단일 무선 통신 시스템 프레임에서의 다양한 주파수 자원 활용을 위해 활발하게 이루어지고 있다[3]~[6]. 주파수 대역의 재구성을 위한 안테나 메커니즘은 전기적 방식과 기계적 방식으로 나누어진다. 전기적 메커니즘을 통한 재구성 안테나는 밴

「이 연구는 2013학년도 순천향대학교 교수 연구년제와 정부(교육부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행되었음(2010-0009211).」
순천향대학교 정보통신공학과(Department of Information & Communication Engineering, Soonchunhyang University)
*순천향대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Soonchunhyang University)
· Manuscript received July 28, 2014 ; Revised October 20, 2014 ; Accepted October 24, 2014. (ID No. 20140728-056)
· Corresponding Author: Sang-Min Han (e-mail: smhan@sch.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

드 스위칭과 튜닝으로 분류되어지고, 밴드 스위칭 안테나는 다이오드 소자를 이용해 구현이 가능하고, 다른 주파수대역 사이에서 스위칭 된다.

그동안 수많은 연구의 방향이 안테나의 특성을 재구성하는 기능 자체에 초점이 맞추어졌다고 하면, 최근의 노력은 무선 단말의 소형화를 위한 소자의 소형화에 중점을 두는 추세라 할 수 있다[7]. 안테나의 소형화를 위한 방법은 단순히 안테나 크기를 줄이는 방법을 고려할 수 있으나 이득, 방사 효율 등의 고려 사항에 의한 한계를 거듭하여 왔다. 따라서 평면 구성이 가능하고, 안테나의 전류 분포 특성을 유지하는 선형 마이크로스트립 구조는 안테나의 성능과 소형화 모두의 목표에 부합하는 접근 방법이 될 것이다.

본 논문에서 구현한 안테나는 마이크로스트립 선로를 미앤더(meander) 구조로 설계하여 평면형과 소형의 장점을 유지하면서, 버랙터 다이오드를 실장하여 인가 전압에 따른 커패시턴스 변화를 통한 안테나의 주파수 대역 변화를 수행하였다. 이는 기존의 다양한 목표들과 비추어 안테나의 방사 특성을 유지하면서 소형화 설계가 가능하며, 매우 간단한 구조로 접근이 가능한 장점을 가지고 있다[8]~[10]. 본 논문의 구성은 1장 서론에 이어 제2장에서 제안된 안테나의 구조 및 설계 과정을 설명하였고, 안테나 제작 및 측정 결과를 제3장에서 기술하였으며, 끝으로 제4장에서 결론을 맺었다.

Ⅱ. 주파수 가변형 모노폴 안테나 설계

본 장에서는 주파수 가변이 가능한 평면 모노폴 안테나를 설계하였다. 제안된 안테나 설계 레이아웃을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 보이는 것과 같이 미앤더 라인으로 안테나를 구성하였고, 구부러지는 선로를 반복하여 상호 커패시턴스를 증가시켜 안테나의 주파수 대역폭을 증가시키는 역할을 하였다. 평행하게 배열된 스트립 선로 사이에서 발생하는 커패시턴스가 안테나의 인덕턴스 성분을 보상하여 안테나의 대역폭 개선에 큰 역할을 하게 된다. 급전선로는 50옴의 마이크로스트립 라인으로 설계하여 기판 뒷면에 접지면을 형성하였으며, 기판의 안테나 면은 모노폴 특성을 얻기 위해 접지면을 식각하였다.

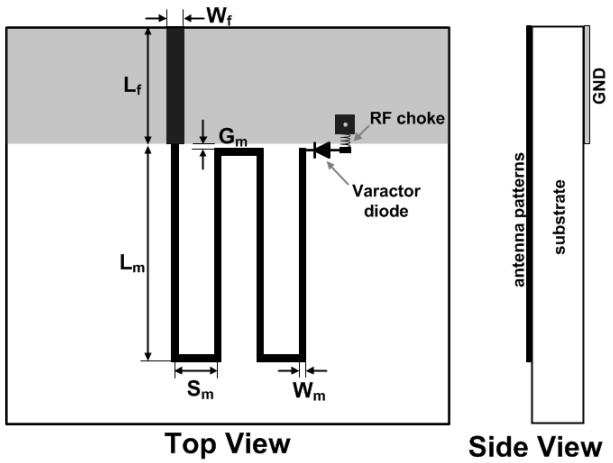


그림 1. 제안된 주파수 가변형 모노폴 안테나
Fig. 1. Layout of the proposed frequency-reconfigurable monopole antenna.

또한, 미앤더 안테나와 접지면의 간격이 안테나 성능에 미치는 영향을 고려하여 최적화 되었다.

여기서 미앤더 라인의 길이는 모노폴 안테나의 공진주파수를 결정하게 되므로 안테나 끝단에 커패시터에 의한 부하 효과(loading effect)를 이용하여 공진주파수를 가변하였다. 가변의 커패시터는 역방향 바이어스로 동작하는 버랙터 다이오드를 사용하였으며, 다이오드 구동을 위한 바이어스 회로와 다이오드 실장을 위한 아일랜드(island) 패드, 비아 홀(via hole) 패드를 설계하였다. 미앤더 안테나 RF 전류가 직접 접지되지 않도록 하기 위해 아일랜드 패드와 비아 홀 패드 사이에 RF choke를 실장하였으며, 비아 홀 패드에서 비아(via)를 사용하여 접지면에 연결하였다. 또한, 안테나 급전부에 Bias-Tee를 이용하여 DC 급전을 할 수 있도록 설계하였다.

설계된 주파수 가변형 모노폴 안테나의 급전부는 50옴 임피던스로 설계되었으며, 선폭(W_f)은 1.854 mm, 길이(L_f)는 11.27 mm이다. 미앤더 안테나는 각 단의 길이(L_m)는 18.46 mm, 2단 이후의 길이 차이(G_m)는 1.73 mm, 각 단의 간격(S_m)은 3.0 mm이며, 선폭(W_m)은 0.73 mm로 설계되었다.

제안된 안테나의 분석을 위해 그림 2와 같은 등가회로를 제시하였다. 직병렬로 연결된 3단의 인덕터와 커패시터에 의해 미앤더 안테나를 구성하고 있으며, 바랙터 다

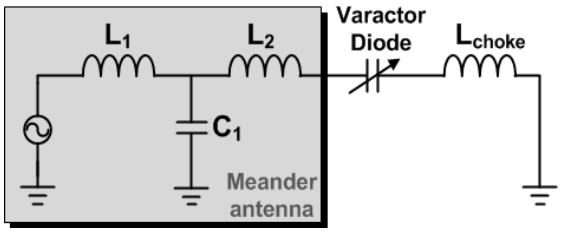
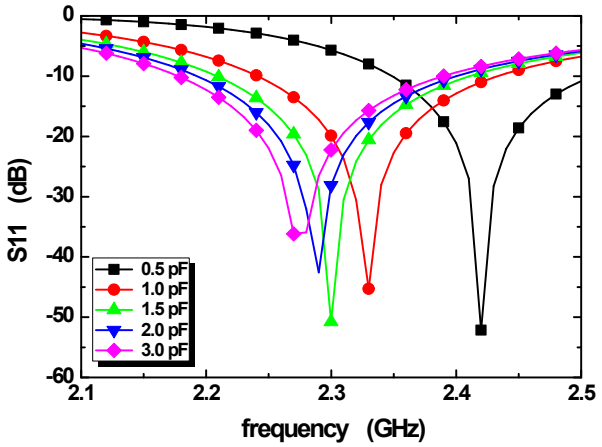


그림 2. 가변 안테나 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the variable antenna.

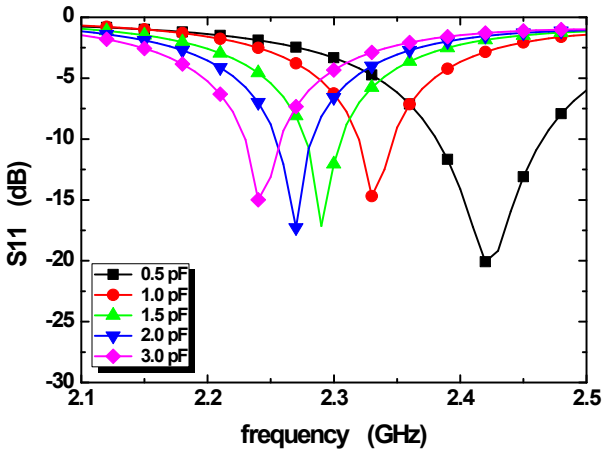
이오드는 가변 커패시터로 설계되었으며, RF choke로 사용된 인덕터를 통해 접지면으로 연결되어진다. 등가회로의 검증을 위해 등가회로 LC 회로의 회로 시뮬레이션과 실제 레이아웃을 구현한 EM 시뮬레이션을 비교하였다. EM 시뮬레이션은 Ansys사의 High Frequency Structure Simulator(HFSS)를 이용하였으며, 유전율이 4.4이고, 두께가 1 mm인 FR_4 에폭시 기판을 사용하였다. 회로 시뮬레이션은 Agilent Technologies사의 Advanced Design Simulator(ADS)를 사용하였다. 주파수 가변을 위해 각각의 시뮬레이터의 버랙터 다이오드는 커패시터 모델로 대체되었다. 설계된 등가회로의 등가 분산 소자의 값은 L_1=15.5 nH, C_1=0.5 pF, L_2=26 nH, L_choke=2.2 nH로 설정되었다.

그림 3에서 등가회로의 회로 시뮬레이션 결과와 EM 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 버랙터 다이오드에 인가된 역전압 바이어스에 따른 커패시턴스 변화를 0.5 pF에서 3.0 pF로 가정하여 각각의 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 그림 3(a)의 등가회로 시뮬레이션에서는 버랙터 다이오드의 커패시턴스 값을 각각 0.5 pF, 1.0 pF, 1.5 pF, 2.0 pF, 3.0 pF로 설정하였을 때, 2.42 GHz, 2.33 GHz, 2.30 GHz, 2.29 GHz, 2.27 GHz의 중심 주파수 특성을 나타냈으며, 그림 3(b)의 EM 시뮬레이션 결과에서 나타난 공진 주파수 변화는 동일한 버랙터 다이오드의 커패시턴스에서 각각 2.42 GHz, 2.33 GHz, 2.29 GHz, 2.27 GHz, 2.24 GHz를 나타내었다. 두 시뮬레이션 결과, 주파수 변화 패턴은 유사한 값을 나타내었으며, 반사 계수의 값에서만 차이를 나타내었다. 이는 EM 시뮬레이션에서 발생한 유전체 손실과 방사 손실이 등가회로 시뮬레이션에서는 이상적인 환경에서 수행된 차이로 보인다.

재구성형 안테나의 설계를 주로 주파수의 가변 여부로



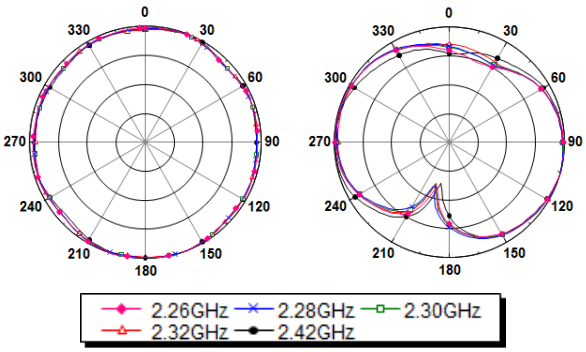
(a) 등가회로 시뮬레이션
(a) Equivalent circuit simulation



(b) EM 시뮬레이션
(b) EM simulation

그림 3. 제안된 안테나의 주파수 가변 특성 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulated results of the frequency variation for the proposed antenna.

성능을 평가하게 되나, 실제 사용을 위해서는 각 사용 주파수 대역에서의 방사 패턴이 변화하지 않고 동일한 특성을 나타내야 한다. 따라서 본 논문에서는 주파수 가변에 의한 각 공진 주파수에서의 안테나 방사 패턴을 고려하여 설계하였다. 가변 대역 내 2.26 GHz에서 2.42 GHz까지 가변된 안테나 공진 주파수에서의 방사 패턴 결과를 그림 4에서 나타내었다. 이는 등가적 가변 커패시턴스가 0.5 pF, 1.0 pF, 1.5 pF, 2.0 pF, 3.0 pF의 값을 나타낼 때



(a) E-평면 패턴 (b) H-평면 패턴
(a) E-plane pattern (b) H-plane pattern

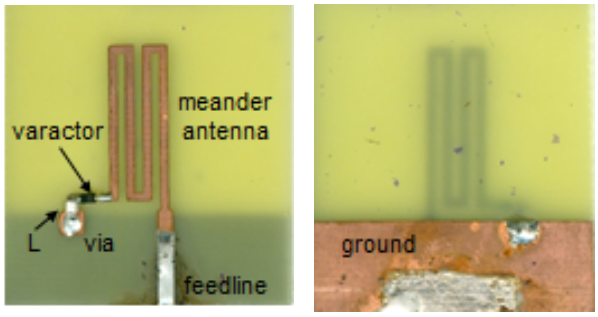
그림 4. 안테나 방사 패턴 시뮬레이션(10 dB/div.)
Fig. 4. Simulated antenna radiation patterns(10 dB/div.).

의 공진 주파수인 2.42 GHz, 2.32 GHz, 2.30 GHz, 2.28 GHz, 2.26 GHz에서 측정되었다. E-패턴과 H-패턴 모두 가변 대역 내에서 거의 동일한 전력 방사 성능과 패턴을 나타내었다. 안테나 최대 이득은 2.26 GHz에서 6.6 dB이며, 주파수에 따른 편차는 4 dB 이내로 측정되었다.

Ⅲ. 가변 주파수 안테나 제작 및 측정

설계된 안테나는 1 mm 두께(1t)와 4.4의 유전율을 갖는 FR4-Epoxy 기판에 제작되었다. 버랙터 다이오드는 0 V에서 최대 26 V까지의 동작범위를 가지며, 14.228 pF에서 0.517 pF까지의 가변이 가능한 Skyworks사의 SMV1283을 사용하였다. RF Choke로 사용한 인덕터 값은 2.2 nH이며, 전체 안테나 크기는 접지면을 모두 포함하여 32×35 mm^2이다. 그림 5에서 제작된 주파수 가변형 평면 모노폴 안테나를 보이고 있다.

제작된 안테나의 성능 측정을 위해 그림 6과 같이 측정 환경을 구성하였다. 안테나에 입사되는 마이크로웨이브 신호와 함께 DC를 버랙터 다이오드에 공급하기 위해 Bias-Tee를 사용하였다. 네트워크 분석기(Agilent E5071C)에 바이어스 티를 연결하고, 이를 통해 전원 공급기를 통해 인가되는 DC 전원을 가변하며 동시에 공급하였다. 또한, 네트워크 분석기로의 DC 전류 손실을 최소화하고, 장비 보호를 위해 DC block을 연결하였다. 반사 손실을 측정하기 위한 네트워크 분석기의 캘리브레이션은 바이어스 티



(a) 앞면 (b) 뒷면
(a) Front side (b) Rear side

그림 5. 제작된 가변 주파수 모노폴 안테나
Fig. 5. Photos of the implemented frequency-variable planar monopole antenna.

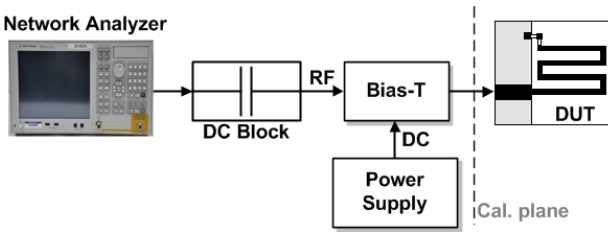
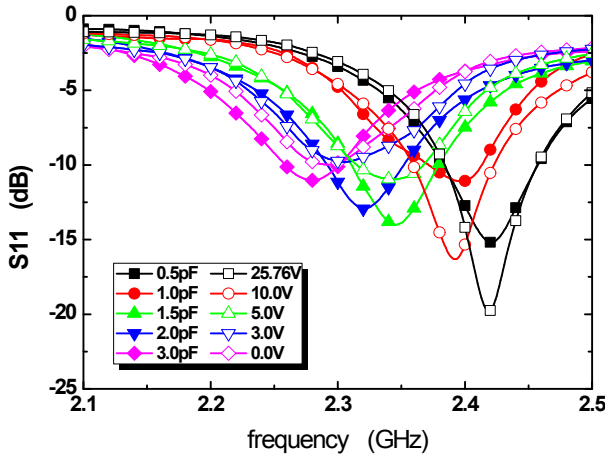


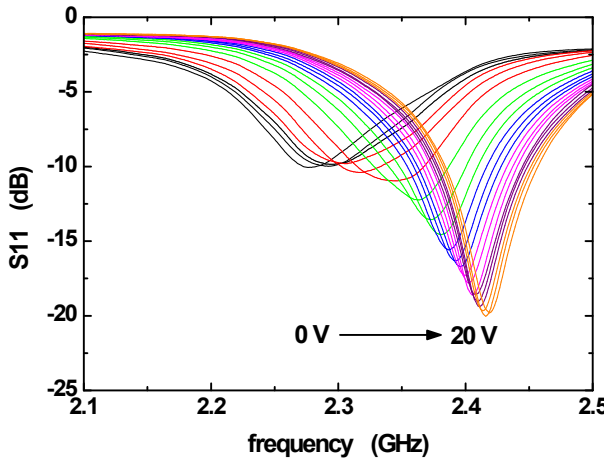
그림 6. 버랙터 다이오드를 이용한 가변 주파수 안테나 측정 셋업
Fig. 6. Measurement setup for reconfigurable antenna with a varactor diode.

를 포함하여 수행되어 안테나 회로 자체만의 반사 손실을 측정하였다.

그림 7은 제안된 안테나의 공진주파수 변화 측정 결과를 나타내고 있다. 그림 7(a)는 앞서 등가회로의 모델에 의한 등가 캐패시터를 연결하여 측정한 결과와 버랙터 다이오드 인가 전압에 따른 안테나 동작 특성을 비교하였다. 최대 25.76 V의 역전압이 인가된 안테나는 0.5 pF의 캐패시터가 연결된 안테나와 동일한 공진 특성을 나타내었으며, 0 V가 인가되었을 때는 3.0 pF의 등가 캐패시터를 연결한 모델과 유사한 특성을 나타내었다. 그림 7(b)는 버랙터 다이오드에 의한 제안 안테나의 주파수 대역 변화 특성을 나타내고 있다. 0 V로부터 20 V까지의 역전압 인가에 따라 약 2.25 GHz에서 2.42 GHz까지의 주파수 변화 특성을 나타내었다. 인가 전압에 다른 바랙터 다이오드의 임피던스 변화에 의해 대역별로 매칭 특성은 다소 다



(a) 등가 캐패시터 모델과의 비교
(a) Comparison with the equivalent capacitor model

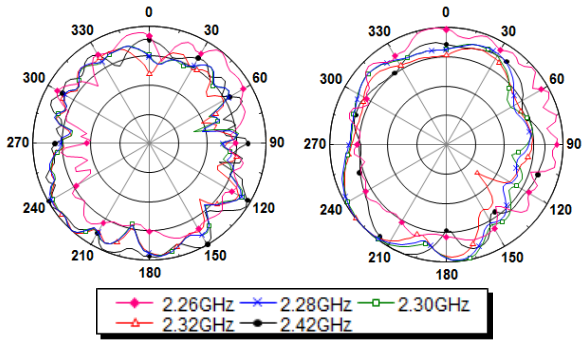


(b) 인가 전압에 따른 공진 주파수 변화
(b) Resonant frequency variation corresponding to bias voltages

그림 7. 제안된 안테나의 주파수 가변 특성 측정 결과
Fig. 7. Measured results of the frequency variation of the proposed antenna.

르게 나타냄을 알 수 있다.

가변 주파수에 따른 안테나 방사 특성을 평가하기 위해 안테나의 방사 패턴을 무반향실(anechoic chamber)에서 측정하였다. 가변 주파수 범위 내의 공진 주파수 2.26 GHz, 2.28 GHz, 2.30 GHz, 2.32 GHz, 2.42 GHz에서 방사 패턴을 측정하였으며, E-패턴과 H-패턴 측정 결과를 그림 8에서 나타내었다. 첨가된 회로의 동작 특성에 의해 방사 방향에 따른 왜곡이 일부 발생하였으나, 공진주파수의 변



(a) E-평면 패턴 (b) H-평면 패턴
(a) E-plane pattern (b) H-palne pattern

그림 8. 안테나 방사 패턴 측정 결과(10 dB/div.)
Fig. 8. Measured antenna radiation patterns(10 dB/div.).

화에 따른 안테나 방사 패턴은 큰 변화가 없음을 확인할 수 있었다. 측정된 안테나 최대 이득은 2.42 GHz에서 4.7 dB이며, 주파수 변화에 따른 최대 이득의 편차는 4.0 dB를 나타내었다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 주파수 대역 가변이 가능한 평면형 모노폴 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 미앤더 구조를 이용한 모노폴 특성과 소형·평면화를 동시에 실현하였으며, 급전선으로 사용된 마이크로스트립 접지면을 활용한 버랙터 다이오드의 급전 회로를 용이하게 구현하였다. 따라서 기존의 평면형 모노폴 안테나의 방사 특성을 유지하면서 주파수 가변이 가능한 평면 안테나 구조를 제안하였다. 급전선을 통한 직류 전압 인가에 따른 커패시턴스 변화로 2.2 GHz에서 2.5 GHz 대역 안테나의 동작 주파수 가변이 가능하도록 설계되었다. 이는 ISM 대역의 무선 랜, 블루투스뿐만 아니라, 와이브로 대역을 커버할 수 있는 성능을 나타내었다. 제안된 안테나는 매우 간단한 회로 구조로 설계되었으며, 분석된 등가회로의 동작 특성은 EM 시뮬레이션과 측정 결과를 통해 확인하였다.

References

[1] D. Peroulis, K. Sarabandi, and L. P. B. Katehi, "Design of reconfigurable slot antennas", *IEEE Trans. Antennas*

Propag., vol. 53, no. 2, pp. 645-654, Feb. 2005.

[2] S. Lee, K. J. Kim, and Y. J. Yoon, "Frequency and pattern reconfigurable antenna with chip inductors and parasitic elements", *Proc. Int', Symp. Antennas Propag., 2012*, pp. 1112-1115, Nov. 2012.

[3] S. -L. S., Yang, A. A. Kishk, and K. -F. Lee, "Frequency reconfigurable U-slot microstrip patch antenna", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 127-129, Jul. 2008.

[4] J. -S. Row, T. -Y. Lin, "Frequency-reconfigurable coplanar patch antenna with conical radiation", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 1088-1091, Nov. 2010.

[5] H. L. Zhu, X. H. Liu, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "Frequency-reconfigurable antenna using metasurface", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 1088-1091, Jan. 2014.

[6] 주지선, 한상민, "광대역 주파수 가변 대역통과여파기 설계", 한국정보기술학회논문지, 11(6), pp. 63-68, 2013년 6월.

[7] 목세균, 강승택, 김용진, "다이버시티 안테나의 소형화와 격리도 향상을 위한 미앤더 선로와 개방형 루프가 결합된 방사구조의 설계", 전기학회논문지, 61(1), pp. 110-116, 2012년 1월.

[8] R. Sato, "A design method for meander-line networks using equivalent circuit transformations", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 19, pp. 431-442, May 1971.

[9] R. Hosono, N. Guan, H. Tayama, and H. Furuya "An equivalent circuit model for meander-line monopole antenna attached to metallic plate", *Proc. Int.' Symp. Antennas Propag, 2012*, pp. 1421-1424, Nov. 2012.

[10] A. Das, S. Dhar, and B. Gupta, "Lumped circuit model analysis of meander line antennas", *Med. Microw. Symp.*, pp. 21-24, Sep. 2011.

김 영 규

2014년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
2014년 3월～현재: 순천향대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] RF Systems

임 종 식

1991년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
1993년 2월～1999년 3월: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단 선임연구원
2003년 3월～2003년 7월: 서울대학교 BK21 정보기술사업단 박사후 연구원
2003년 7월～2004년 9월: 특허청 특허심사관
2004년 9월～2005년 2월: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 선임연구원
2005년 3월～현재: 순천향대학교 전기통신공학과 부교수
[주 관심분야] 초고주파 무선 회로/부품 설계, 능동/수동 소자 모델링 및 회로 응용, 주기 구조의 모델링 및 회로 응용 등

한 상 민

1996년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
1998년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
2003년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
2003년 10월~2004년 11월: 미국 University of California, Los Angeles(UCLA), Post-Doc. Research Fellow
2005년 1월~2007년 8월: 삼성종합기술원 전문연구원
2013년 8월~2014년 7월: 미국 Georgia Institute of Technology, Research Faculty
2007년 9월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 부교수
[주 관심분야] RF Systems, Low-Power Transceivers, Active Integrated Antennas