

Non-Foster 회로를 이용한 FM 안테나의 신호 대 잡음비 개선

Signal-to-noise Ratio Improvement of a FM Antenna Using a Non-Foster Circuit

박 흥 우* · 강 승 택** · 김 흥 준†
(Hongwoo Park · Sungtek Kahng · Hongjoon Kim)

Abstract - In this paper, we demonstrate a Non-Foster matching method for an electrically small antenna to improve the signal-to-noise ratio (SNR) of communication link. For the experiment, we used a general FM antenna whose resonance frequency is about 52 - 57 MHz and a floating type Linvill negative impedance converter(NIC)-based circuit as a Non-Foster matching element. By implementing the Non-Foster circuit to cover FM band, we can achieve a wide bandwidth matching covers 40 - 200 MHz. Our measurement shows 3 - 7 dB improvement of SNR for the same bandwidth though there are several spikes which means no improvement of SNR in the band.

Key Words : Broadband matching, Non-foster impedance matching, Negative impedance converter, FM antenna, Signal-to-noise ratio improvement.

1. 서 론

전자통신 기기들이 점점 소형화/다기능화 추세에 접어들어 따라 통신에 필요한 안테나 또한 그 크기를 축소해야 하는 상황에 놓여 있다. 특히 휴대전화의 경우 한 장치에 GSM, 3G, 4G, Wifi, Bluetooth, DMB등 많은 기능들을 한 장치에 구현해야 하므로 안테나의 개수도 많아질 수밖에 없으며, 이들을 위해 할당된 공간 또한 제한적이다. 따라서 안테나의 개수를 줄이기 위해 소형의 광대역 안테나들이 개발되어 오고 있으나[1, 2] 소형 안테나의 방사 효율 한계인 Wheeler/Chu limit[3]과 수동소자 정합 한계인 Bode-Fano limit[4]에 의해 그 성능 또한 제한적일 수밖에 없다. 따라서 소형의 광대역 안테나를 개발하기 위해서는 기존의 수동 소자 정합과는 다른 새로운 안테나 정합 방식이 필요하다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 능동회로를 이용한 소형 안테나 정합 사례들이 제시되고 있으며, 그 중 능동형 메타물질의 연구와 더불어 활발히 연구되어 오고 있는 것으로 네거티브 임피던스 변환기 (Negative Impedance Converter, NIC)를 이용한 Non-foster 정합이 있다.

Non-foster 회로를 이용한 임피던스 정합의 사례는 국내에서도 발표되었으나[5, 6], 실제로 이러한 정합 효과가 저주파 및

광대역 안테나의 신호 대 잡음비 개선으로 이어지는지에 관한 연구 사례는 국내에서 찾아보기 힘들었다.

따라서 본 논문에서는 FM안테나를 대상으로 Non-foster 회로를 이용해 광대역 정합을 실시하고, 설계한 실험을 통해 실제로 신호 대 잡음비 개선을 측정된 결과를 고찰하였다. 측정 결과 일부 대역에서는 신호 대 잡음비 개선이 이루어지지 않으나 대체적으로 광대역으로 정합된 주파수 대역 내에서는 상당한 신호 대 잡음비 개선이 이루어짐을 알 수 있었다.

2. Non-foster 회로의 이론적 배경

2.1 Non-foster 소자

모든 수동소자들은 그림 1의 (a)와 같이 리액턴스-주파수 관계가 양의 기울기를 가지는 Foster의 리액턴스 법칙을 만족한다[7]. 이러한 법칙을 만족해야 하므로, 수동소자를 이용한 정합에는 한계가 존재할 수밖에 없다. 예를 들어, 회로 정합을 위해 인덕터로 부터 생기는 리액턴스의 값을 상쇄시켜야 할 경우 커패시터의 리액턴스를 이용하여 그 값을 상쇄시켜줄 수 있는데, 두 리액턴스의 값이 상쇄되는 주파수영역은 그림 1의 (a)와 같이 매우 좁을 수밖에 없다. 광대역으로 정합하고자 하는 경우 반사손실은 그에 따라 증가하여 전력 전달 효율은 감소하게 되며 이를 Bode-Fano limit이라 한다.

기존의 수동소자와는 달리 그림 1의 (b)와 같이 -L이나 -C와 같이 Foster의 리액턴스 법칙에 반하는 음의 기울기를 가진 소자가 존재할 경우 모든 주파수에서 임피던스를 상쇄 가능하므로 Bode-Fano limit를 넘어서는 정합이 가능하며, 이러한 소자들

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea

E-mail : hongjoon@knu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungpook National University, Korea

** Dept. of Information and Telecommunication Engineering, University of Incheon, Korea

Received : November 30, 2015; Accepted : January 14, 2016

을 Non-foster 소자라 한다. Non-Foster 소자는 기존의 수동소자들로로는 구현이 불가능하며, 트랜지스터와 같은 능동회로를 이용하여 구현한다.

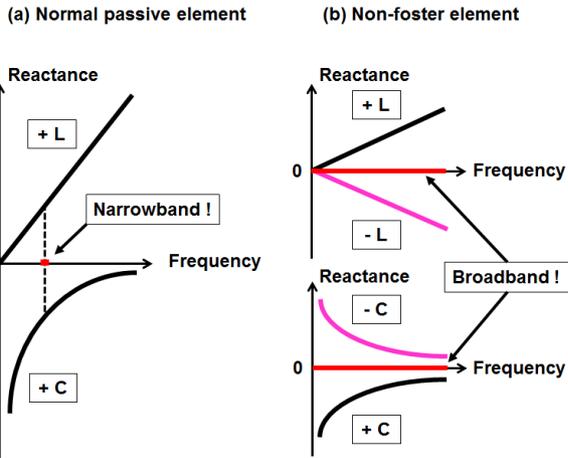


그림 1 일반 수동소자와 Non-Foster 소자의 차이점.
 Fig. 1 Difference between normal passive element and Non-foster element.

2.2 네거티브 임피던스 변환기(NIC)의 이론

네거티브 임피던스 변환기란, 임피던스의 값을 음의 값으로 바꾸어 주는 회로를 의미하며, Non-Foster 회로들은 NIC 회로를 이용해 제작할 수 있다. 네거티브 임피던스 변환기는 미국의 Linvill에 의해 연구되었으며[8], 개발 초기에는 전화선의 저항을 상쇄시켜 통화품질을 개선하기 위한 용도로 쓰였다.

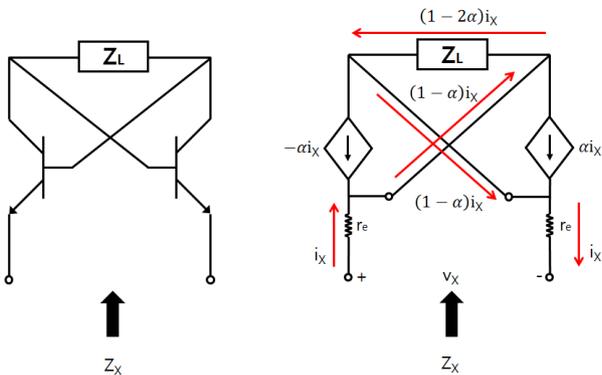


그림 2 네거티브 임피던스 변환기의 소신호 해석
 Fig. 2 Small signal analysis of a negative impedance converter.

그림 2은 Linvill의 Floating형 NIC 회로의 구성도이다. Linvill형 NIC회로의 형태는 여러 가지가 있으나 안테나에 적용이 쉬운 구조는 입력과 출력이 명확하게 나누어져 있는 Floating 형태이다. Floating 형 NIC는 그림2의 (b)와 같이 트랜지스터와 바꾸고

자 하는 임피던스 Z_L 을 이용하여 제작할 수 있으며, 트랜지스터의 교류해석을 위해 전류형 T 모델을 이용하여 해석하면 전류/전압 관계식에 의해 i_x 와 v_x 의 관계를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$v_x = Z_L(1 - 2\alpha)i_x + 2r_e i_x \tag{1}$$

(1)의 식에서 α 는 트랜지스터의 Forward current gain이므로 1에 가깝다. 또한 r_e 는 그 값이 매우 작으므로 결과적으로 NIC의 임피던스 Z_x 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 임피던스가 음의 값이 되므로, Z_L 이 커패시터나 인덕터일 경우 음의 기울기를 가지는 리액턴스인 Non-Foster 소자를 구현할 수 있다.

$$Z_x = \frac{v_x}{i_x} \approx -Z_L - 2r_e \approx -Z_L \tag{2}$$

실제로는 트랜지스터의 Forward current gain 값이 주파수에 대해 의존적이며[8], 바이어스 회로와 트랜지스터의 각종 기생성분들이 포함될 수 있으므로 이상적인 Non-Foster 소자의 동작을 하는 대역폭은 제한적일 수 있다.

3. FM 안테나의 Non-Foster 정합과 측정 결과

3.1 FM 안테나의 Non-Foster 정합 시뮬레이션

그림 3은 Non-Foster 회로의 시뮬레이션 설계도를 나타낸 그림이다. California Eastern Laboratory사에서 제공하는 기생성분이 포함된 NE68133 트랜지스터 모델을 이용하였으며, 나머지 수동소자의 파라미터들은 표 1과 같다. 회로에서 R_2, R_3, R_4, R_5 는 바이어스 저항의 역할을 한다. 네 저항의 값의 경우 α 의 값이 1에 가까우며, 소신호 증폭에 유리한 Class A 증폭기용 바이어스가 될 수 있도록 저항 값을 설정했다.

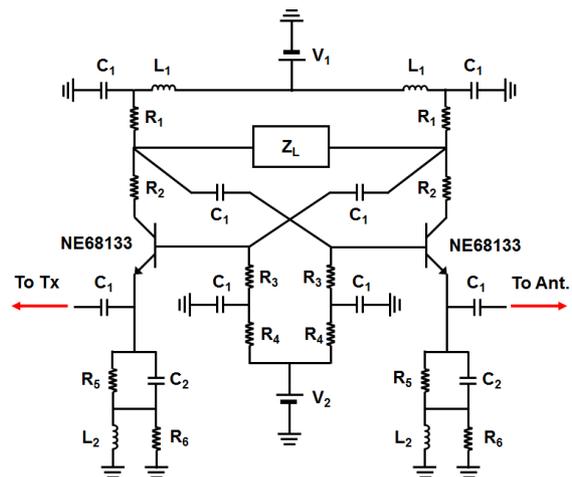


그림 3 NIC의 시뮬레이션 회로도
 Fig. 3 Schematic of NIC simulation

그 이외의 수동소자들은 NIC 회로가 고주파의 입장에서는 그림 2와 같이 동작할 수 있도록 바이어스 소자는 높은 임피던스를 가지도록 값을 설정하였다. Z_L 은 음의 값으로 변환하고 싶은 임피던스에 해당하는 수동 소자를 의미하며, Z_L 을 바꾸어 다양한 종류의 Non-Foster 회로를 구현할 수 있다.

표 1 NIC 시뮬레이션에서 수동소자의 값.

Table 1 Value of passive elements in NIC simulation

| 소자 번호 | 값 | 소자 번호 | 값 | 소자 번호 | 값 |
|----------------|--------|----------------|-------|----------------|-------|
| R ₁ | 680 Ω | R ₂ | 40 Ω | R ₃ | 1 kΩ |
| R ₄ | 1 kΩ | R ₅ | 750 Ω | R ₆ | 390 Ω |
| L ₁ | 1 uH | L ₂ | 1 uH | C ₁ | 10 nF |
| C ₂ | 1.2 pF | V ₁ | 20 V | V ₂ | 3 V |

그림 4는 Z_L 의 종류에 따른 NIC의 리액턴스 곡선의 시뮬레이션 결과와 커패시턴스/인덕턴스 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이다. 시뮬레이션 결과 0~40 MHz까지는 Non-Foster 소자로의 동작이 불가능하나, 40~200 MHz까지는 원래의 Z_L 과는 반대의 기울기와 값을 나타냄을 확인할 수 있다.

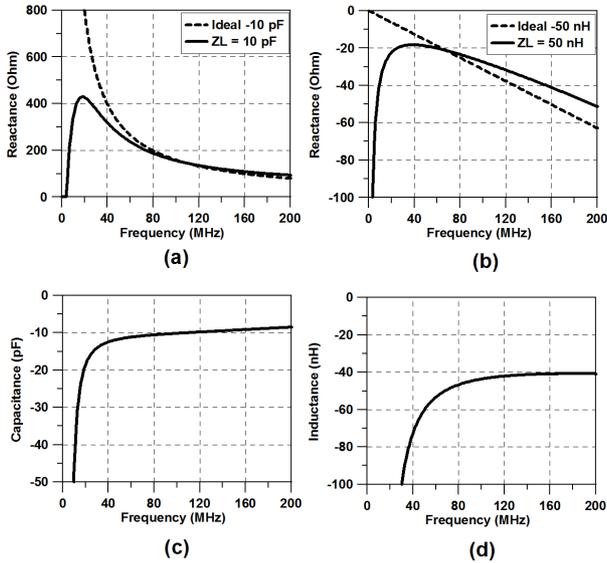


그림 4 (a) $Z_L=10$ pF 일 때 NIC의 리액턴스 시뮬레이션 결과; (b) $Z_L=50$ nH 일 때 NIC의 리액턴스 시뮬레이션 결과 ; (c) $Z_L=10$ pF 일 때 NIC의 커패시턴스 시뮬레이션 결과; (d) $Z_L=50$ nH 일 때 NIC의 인덕턴스 시뮬레이션 결과;

Fig. 4 (a) Reactance graph of NIC simulation when $Z_L=10$ pF; (b) Reactance graph of NIC simulation when $Z_L=50$ nH; (c) Capacitance graph of NIC simulation when $Z_L=10$ pF; (d) Inductance graph of NIC simulation when $Z_L=50$ nH;

이를 이용해 안테나를 정합하고자 할 경우에는 그림 5와 같이 시뮬레이션을 구성한다. 우선 통신망 분석기를 이용하여 정합하고자 하는 안테나의 S-Parameter의 S1P 파일을 추출한 뒤 이를 설계한 Non-Foster 회로와 연결하여 입력 임피던스와 S_{11} 의 결과를 보며 시뮬레이션을 진행하였다. 이때 Z_L 은 39 pF와 5Ω의 직렬연결이었다.

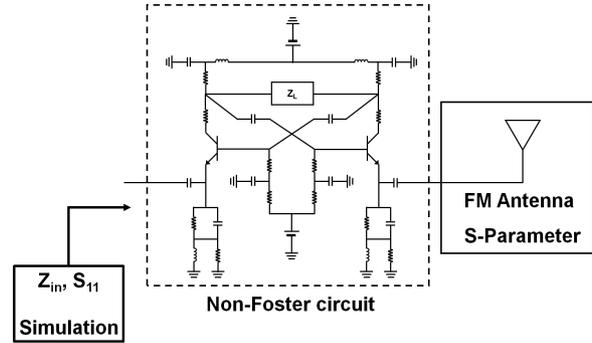


그림 5 Non-Foster 회로를 이용한 FM 안테나의 정합 시뮬레이션 구성도

Fig. 5 Simulation schematic of FM antenna matching using Non-Foster circuit.

그림 6은 Non-Foster 회로를 이용한 FM 안테나의 정합 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 52~57 MHz 인 FM안테나의 공진 주파수 영역을 Non-Foster로 정합하였을 경우 41~70 MHz까지 확장시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

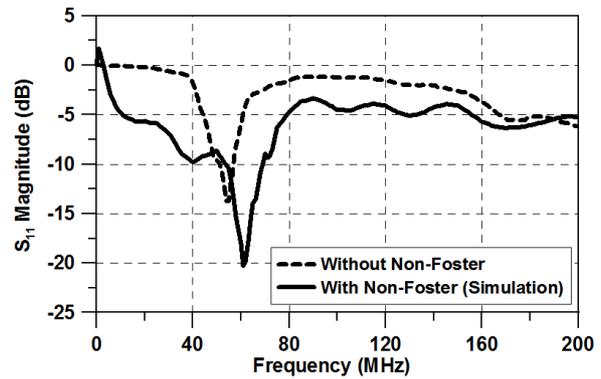


그림 6 Non-Foster 회로를 이용한 FM 안테나의 정합 시뮬레이션 결과

Fig. 6 Simulation result of FM antenna with Non-Foster matching circuit

3.2 FM 안테나의 Non-Foster 정합 결과와 신호 대 잡음비 개선도 측정 결과

그림 7은 제작된 Non-Foster 정합회로와 FM 안테나의 사진이

다. Non-Foster 회로는 FR-4 기판(비유전율 4.35 두께 1.6mm) 위에 패드와 전원공급선을 포함한 전체 구조를 만들고 Johanson Dielectric 사의 0603 칩 인덕터와 Walsin Technology 사의 0603 칩 저항과 커패시터, California Eastern Laboratory사의 NE68133 트랜지스터를 이용하여 제작하였으며 수동소자의 값은 시뮬레이션과 동일했다. FM안테나의 경우 가정용으로 사용하는 라디오의 안테나를 분리하여 50Ω 마이크로스트립 전송선로에 납땜 후 사용했다.

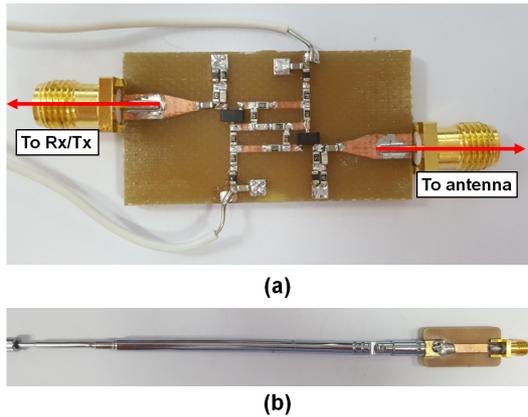


그림 7 (a) 제작된 Non-Foster 회로; (b) FM 안테나;
 Fig. 7 (a) Fabricated Non-Foster circuit; (b) FM antenna;

그림 8은 Non-Foster 정합된 FM 안테나의 반사손실을 측정 한 그래프이다. Non-Foster 회로를 이용해 52~57 MHz 인 FM 안테나의 정합 대역을 45~200 MHz 로 약 150 MHz 정도 확장 시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 80 MHz 까지는 시뮬레이션과 측정 결과가 어느 정도 일치도를 보이나 80 MHz 후로는 다소 차이를 보이는데, 이는 1 uH 인덕터의 SRF가 60 MHz 인 부분이 시뮬레이션에서 반영되지 않았으며, 보드의 기생 성분이나 트랜지스터의 모델에서 예측하지 못한 저항 성분이 정합에 영향을 미친 결과로 볼 수 있다.

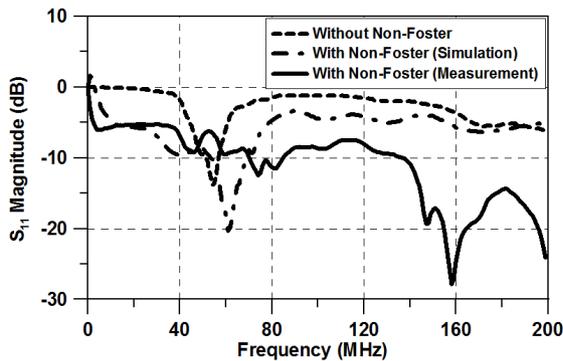


그림 8 Non-Foster 회로를 이용한 FM 안테나의 정합 시 반사 손실 측정 결과
 Fig. 8 Return loss measurement result of FM antenna with Non-Foster matching circuit.

신호 대 잡음비 개선도 측정의 경우 그림 9과 같이 실험을 구성하여 진행하였다. FM 안테나에 Non-Foster 회로를 장착하지 않았을 때의 스펙트럼 분석기 노이즈 레벨과 수신 전력을 N_0, S_0 라 하고, FM 안테나에 Non-Foster 회로를 이용해 정합하였을 때의 스펙트럼 분석기 노이즈 레벨과 수신 전력을 N_1, S_1 이라 하면, 신호 대 잡음비 개선도 SNR_{adv} 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$SNR_{adv} = (S_1 - S_0) - (N_1 - N_0) \quad (3)$$

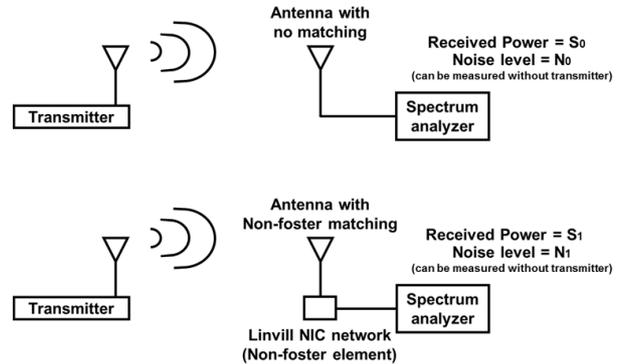


그림 9 신호 대 잡음비 개선도 측정 실험의 설명도.
 Fig. 9 Description of signal-to-noise ratio improvement measurement.

그림 10은 신호 대 잡음비 개선도 측정 환경의 사진이다. Non-Foster회로를 통한 신호 개선의 효과와 발생한 노이즈를 정확하게 측정하기 위해 본교의 무반향실에서 측정하였다. 송/수신기 간의 거리는 무반향실 공간의 제약과 안테나의 근접장을 고려한 최대 거리인 4.5 m로 측정하였으며, 송신기의 출력은 5 dBm 으로 송신하였다. 스펙트럼 분석기의 경우 Resolution Bandwidth 를 최대한 높여 잡음 레벨이 -100 dBm이 되도록 하여 결과를 측정하였다.

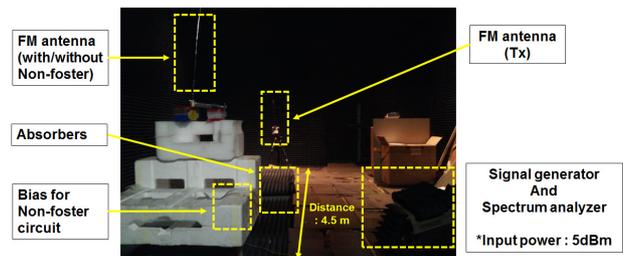


그림 10 신호 대 잡음비 개선도 측정환경
 Fig. 10 Measurement setting of signal-to-noise ratio improvement.

측정된 SNR_{adv} 의 결과는 그림 11과 같다. 그래프에서도 확인할 수 있듯이 Non-Foster 정합을 통해 안테나의 반사 손실이 개선된 주파수 대역 내에서는 대체적으로 신호 대 잡음비가 개선

됨을 확인할 수 있으며, 최대 7 dB 정도의 신호 대 잡음비 개선도를 보임을 확인할 수 있다. 따라서 안테나의 Non-foster 정합은 안테나의 신호 대 잡음비 개선과 직접적인 관련성이 있음을 확인할 수 있다. 그러나 대역 몇 부분에서 SNR이 개선되지 않는 스파이크가 나타나는데, 이는 회로의 기생 성분에서 기인한 것으로 보이며, 좀 더 많은 연구를 통해 개선해야 할 부분이다. 그럼에도 불구하고 40~200 MHz 사이의 몇 개의 넓은 대역에서 SNR이 향상됨을 알 수 있다.

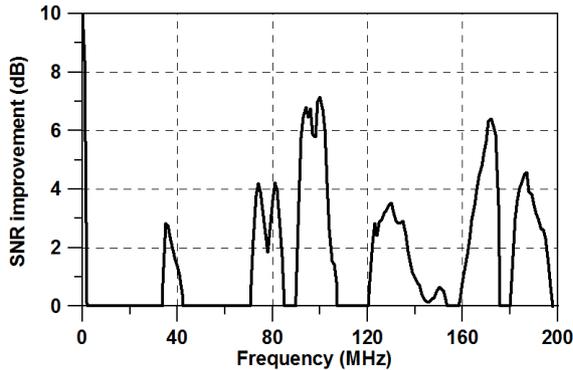


그림 11 Non-Foster 회로를 이용한 FM 안테나의 신호 대 잡음비 개선도 측정 결과

Fig. 11 Measurement result of signal-to-noise ratio improvement of FM antenna using Non-Foster circuit

4. 결 론

본 논문에서는 Non-Foster 회로를 이용한 안테나의 광대역 정합과 안테나의 신호 대 잡음비 개선 간의 관계를 실험을 통해 측정하고, 그 결과를 고찰하였다. 실험 결과 Non-Foster 회로를 이용해 안테나를 광대역 정합할 경우 정합 대역 내에서는 대체로 신호 대 잡음비의 개선이 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구결과를 토대로 향후 Non-Foster 회로를 이용한 안테나의 매칭 개선 시 신호 대 잡음비의 개선도 검증을 통해 Non-Foster 정합 회로의 성능을 평가 가능할 것으로 보이며, 본 연구에서 제시한 실험방법을 응용하여 다양한 형태의 Non-Foster 결합형 수동소자의 성능을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (NRF-2015R1D1A1A02061454) and by the Info-Communication & Broadcasting Technology Research Program through the Ministry of Science, ICT and Future Planning (No. 2014-044-047-001).

References

- [1] RongLin Li, Bo Pan, J. Laskar, M. M. Tentzeris, "A compact broadband planar antenna for GPS, DCS-1800, IMT-2000, and WLAN applications", IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. vol. 6, pp. 25-27, July 2007.
- [2] C. Rowell and E. Y. Lam, "Multiple frequency band and high isolation mobile device antennas using a capacitive slot", IEEE Trans. on Antennas and Propagation vol. 60, no. 8, pp. 3576-3582, July 2012.
- [3] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas", Proceedings of the IRE vol. 35, no. 12, pp. 1479-1484, Dec 1947.
- [4] R. M. Fano, "Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances", Journal of the Franklin Institute vol. 249, no. 1, pp. 57-83, Jan. 1950.
- [5] Hongjong Park, Sangho Lee, Sunghwan Park and Youngwoo Kwon, "Negative Impedance Converter IC for Non-Foster Matching", The Journal of Korea Electromagnetic Engineering Society vol. 26, no. 3, pp. 283-291, Mar. 2015.
- [6] Hyemin Yang and Kangwook Kim, "NIC-Based Non-Foster Impedance Matching of a Resistively Loaded Vee Dipole Antenna". The Journal of Korea Electromagnetic Engineering Society vol. 26, no. 7, pp. 597-605, July 2015.
- [7] R. M. Foster, "A reactance theorem", Bell System Technical Journal vol. 3, no. 2, pp. 259-267, April 1924.
- [8] J. G. Linvill, "Transistor negative-impedance converters". Proceedings of the IRE vol. 6, no. 41 pp. 725-729, June 1953.

저 자 소 개



박 흥 우 (Hongwoo Park)

1991년 4월 30일생. 2014년 경북대학교 전기공학과 졸업(공학 학사). 2014. 3~현재 경북대학교 전기공학과 석사과정 재학 중.

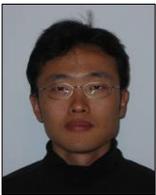
Tel. : 053-950-5601

Email : pjw33223@gmail.com



강 승택 (Sungtek Kahng)

2000년 2월 한양대학교 전자통신공학과 졸업(공학 박사). 2000. 3~2004. 2 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원. 2004~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수. 2007~현재 송도 국방벤처 자문교수. 2007~현재 한국통신학회 마이크로파 및 전파연구회 위원장, 한국전자과학회 편집이사, 국제이사. 2014. 12 대한전기학회 학술상 수상(광전자 및 전자파 분야). 2015. 3~현재 대한전기학회 학술이사
[주관심분야] 전자파 수치 해석 및 응용, EMI/EMC 대책, 초고주파 부품 및 안테나 설계, 메타물질구조 이론 및 응용
Tel : 032-835-8288
Email : s-kahng@inu.ac.kr



김 홍준 (Hongjoon Kim)

1972년 10월 4일생. 1997년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 University of Southern California 전기공학과 졸업(공학 석사). 2006년 University of Wisconsin-Madison 전기공학과 졸업 (공학박사). 2006. 9~2011. 2 미국 City University of New York 조교수. 2011. 3~현재 경북대학교 전기공학과 부교수
Tel : 053-950-5601
Fax : 053-950-6600
E-mail : hongjoon@knu.ac.kr