

광대역 항재밍 소형 GPS 안테나용 비 포스터 정합회로

Non-Foster Matching Circuit for Wideband Anti-Jamming Small GPS Antennas

하 상 규 · 정 경 영

Sang-Gyu Ha · Kyung-Young Jung

요 약

위성항법시스템은 민간 및 군수 분야에서 널리 사용되고 있는 유용한 시스템이다. 그러나 지구 상공 2만 km 이상 원거리 송신 신호로 인한 수신 감도 미약으로, 위성항법시스템의 신호는 항재밍 공격에 취약하다. 본 논문에서는 항재밍 소형 GPS 배열안테나 설계를 위한 선행 연구로 전기적으로 초소형인 GPS 안테나 소자를 효율적으로 정합하는 비 포스터 정합회로에 대한 연구를 수행하였다. 전기적으로 소형인 GPS 안테나는 높은 품질계수로 인해 방사 이득이 낮고, 광대역 정합이 어렵다. 이를 해결하기 위해 소형 GPS 안테나용 비 포스터 정합회로(non-Foster matching circuit)를 설계하였다. Linvill의 교차 결합쌍 트랜지스터로 구성된 네거티브 임피던스 변환기 회로를 제작하였으며, 시간 영역에서 안정도 검증 을 통해 안정성을 확인하였다. 비 포스터 정합회로를 이용한 소형 GPS 안테나 무반사실 측정결과, 전면방향이득이 17 dB 이상 개선됨을 확인하였다.

Abstract

Global Positioning System(GPS) is a useful system used in both civilian and military applications. However, the signal of GPS is susceptible to jamming attacks due to low receive sensitivity, since the signals come from the satellite located at over 20,000 km above the earth. In this paper, we have conducted a preceding research on a non-Foster matching circuit that efficiently matches an electrically ultra-small GPS antenna. Electrically Small Antennas(ESAs) are inefficient radiators and are difficult to match in wideband due to extremely high quality factor. In order to match small GPS antenna in wideband, a non-Foster matching circuit for a small GPS antenna was designed. A negative impedance converter circuit consisting of Linvill's cross-coupled pair transistors was fabricated and its stability was verified by the time-domain stability analysis. In addition, anechoic chamber measurements show that the non-Foster matching circuit for small GPS antenna can lead bore-sight gain improvement by more than 17 dB.

Key words: Electrically Small Antenna, Non-Foster Matching Circuit, Negative Impedance Converter

I. 서 론

인공위성을 이용한 지상 목표물 위치 추정 장치로 위성항법시스템이 운용되고 있다. 위성항법시스템은 지구

상공의 2만 km 이상 원거리에서 신호를 수신하므로 -130 dBm 정도의 매우 약한 수신신호로 인해 재밍(jamming, 전파방해) 및 간섭(interference)에 매우 취약하다. 위성항법 신호 수신을 교란하는 방법으로는 재밍, 미코닝(me-

「본 연구는 민군기술협력센터 지원으로 연구되었음(14-BR-SS-01).」

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(Department of Electronics Computer Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received November 8, 2016 ; Revised November 21, 2016 ; Accepted November 23, 2016. (ID No. 20161108-116)

· Corresponding Author: Kyung-Young Jung (e-mail: kyjung3@hanyang.ac.kr)

conig: 항법방해), 스푸핑(spoofing: 전파기만)이 있으며, 특히 재밍 방법은 간단한 기술로 쉽게 재머(jammer: 전파 방해장치)를 제작할 수 있어 재밍 공격에 대처하기 위한 항재밍(anti-jamming) 위성항법시스템 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. 배열안테나를 이용한 항재밍 기술은 외부 간섭 및 재밍 신호를 효율적으로 제거하기 위해 재밍 신호 방향에 널(null)을 형성해 재밍 신호를 제거하는 널 조향기술이다. 일반적으로 안테나 소자의 증가는 다수 재머 대처 가능성 및 항재밍 성능을 향상시키지만, 안테나 크기가 커지는 단점이 있다. 따라서 항재밍 초소형 GPS 배열안테나에 대한 연구가 요구된다.

본 논문에서는 항재밍 소형 GPS 배열안테나 설계를 위한 선행 연구로 전기적으로 초소형인 GPS 안테나를 효율적으로 정합하는 비 포스터 정합회로에 대한 연구를 수행하였다. 가상 구의 최소 반경을 포함하는 안테나의 최대 물리적 길이(a)가 자유공간 파장(λ_0)보다 훨씬 작은 경우 전기적으로 소형인 안테나라고 하며, $k_0a < 1$ 로 표현된다. 여기서 k_0 는 자유공간에서의 파수($2\pi/\lambda_0$)를 의미한다. 안테나 고유의 작은 크기로 인해 전기적으로 소형인 안테나는 근접장 저장 에너지가 우세하다. 따라서, 높은 품질계수 인해 안테나의 방사 이득이 낮고, 대역폭이 매우 제한된다^{[1],[2]}. 일반적으로 수동소자를 이용한 안테나 성능 개선은 관심 주파수 대역의 정합이 가능하지만, 이득 대역폭의 이론적 제한으로 광대역 정합은 불가능하다^[3].

1953년, 네거티브 임피던스 변환기^[4](Negative Impedance Convert: NIC)는 Linvill에 의해 처음 제안되었다. Linvill의 NIC는 부하 임피던스와 교차 결합쌍 트랜지스터로 구성되며, 입출력 전류 방향은 일정하나, 출력 전압 위상은 180° 반전되어 등가 임피던스의 부호가 부하 임피던스와 반대로 보이게 된다. 수동소자를 이용한 정합과 달리, NIC는 부하 임피던스의 부호를 변환시키는 회로이며, 주파수가 증가함에 따라 리액턴스 성분이 감소하는 특성으로, 음의 값을 갖는 커패시턴스 또는 인덕턴스를 만들 수 있다^{[5],[6]}. 이는 포스터(Foster) 이론에 반하는 특성으로 비포스터(non-Foster) 임피던스라 한다. 본 논문은 비 포스터 정합회로를 이용하여 광대역 항재밍 초소형 GPS 안테나

소자 설계에 관한 연구를 진행하였다.

II. 비 포스터 정합회로 설계

소형 GPS 안테나는 유전율(ϵ_r) 4.4, 손실 탄젠트($\tan\delta$) 0.002, 두께 3.2 mm를 갖는 FR-4 기판을 사용하여 설계하였다. 유전체 및 그라운드의 크기는 $21 \times 21 \text{ mm}^2$ 이고, 패치의 크기는 $12.5 \times 12.5 \text{ mm}^2$ 이다. 관심 주파수(L_1 : 1.575 GHz)에서 패치 크기는 $0.0656\lambda_0$ 로 전기적으로 초소형인 안테나이며, 이때의 안테나의 공진 주파수는 4.8 GHz이다. 소형화된 GPS 안테나는 급전점에서 높은 입력 리액턴스(커패시턴스)를 가지게 되어 관심 주파수에서 큰 반사 손실을 유발한다. 따라서 높은 입력 리액턴스를 줄이기 위한 최적 비 포스터 정합회로 설계가 요구되며, 소형 GPS 안테나의 입력 임피던스 등가모델을 이용해 최적 비포스터 정합회로를 설계하였다. 주파수에 따른 소형 GPS 안테나의 커패시턴스 값은 식 (1)을 이용하여 추출하였다.

$$C(\omega) = -\frac{1}{\omega X(\omega)} \quad (1)$$

여기서 C 는 커패시턴스, ω 는 각주파수, X 는 리액턴스이다. 그림 1은 안테나 등가모델을 이용한 최적 소형 GPS 안테나용 비 포스터 정합회로의 제작형상을 나타낸 것이다. NIC 회로는 유전율 4.4의 FR-4 기판으로 크기는 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 이며, 교차 결합쌍 NPN 양극성 접합 트랜지스터(bipolar junction transistors: BJT) NE68133을 사용하였다. 양의 부하 커패시터는 1.2 pF으로 결합쌍 BJT 이미터 사이에 연결되어 있어 음의 커패시터로 변환된다. 그림 2에

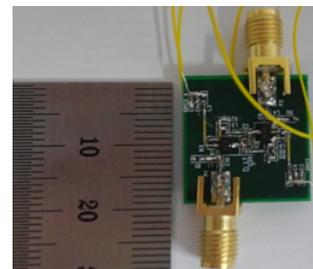


그림 1. 소형 GPS 안테나용 비 포스터 정합회로
Fig. 1. Non-Foster matching circuit for small GPS antenna.

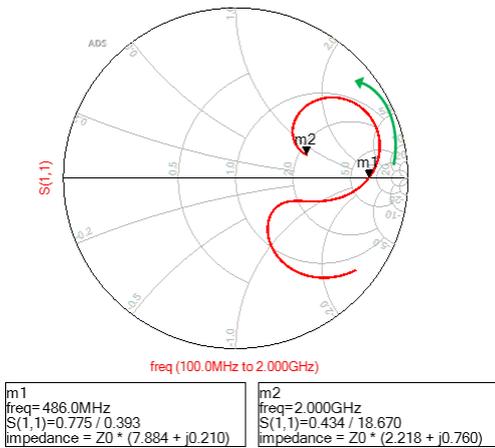


그림 2. 음의 커패시터 반사계수
Fig. 2. Reflection coefficient of a negative capacitor.

서 보는 바와 같이, 설계한 비 포스터 정합회로는 486 MHz~2 GHz 대역에서 주파수 증가함에 따라 스미스 차트의 반사계수가 반시계 방향으로 궤적이 변화함을 확인 하였으며, 이는 음의 커패시터로 동작함을 의미한다.

한편, 교차 결합쌍 트랜지스터로 구성된 비 포스터 정합회로는 정귀환 구조로 회로 내 양의 루프에 의한 의도 하지 않은 발진 가능성 때문에 안정성 검증은 필수적이다. 비 포스터 정합회로의 안정성 분석을 위해 시간영역에서 과도 응답 시뮬레이션을 수행하였다. 정합회로의 안정성 확인을 위해 100 MHz~8 GHz 대역을 갖는 정현파 변조 가우시안 펄스 신호를 인가하고, 출력 신호의 응답을 확인하여 안정성을 검증하였다. 그림 3에서 보는바와 같이, 비 포스터 정합회로를 이용한 소형 GPS 안테나 시스템이 안정하다는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 비 포스터 정합회로를 이용한 소형 GPS 안테나의 반사계수 측정결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 소형 GPS 안테나만 있을 경우(실선)와 비 포스터 정합회로를 소형 GPS 안테나에 적용한 경우(점선)를 비교할 때 L_1 대역에서 안테나 정합 성능이 매우 개선되었음을 확인할 수 있다. 비 포스터 정합회로를 이용한 초소형 GPS 안테나의 L_1 대역에서 반사계수는 -16.4 dB이고, VSWR(voltage standing wave ratio) 2:1 기준 대역폭은 1.527~1.764 GHz로 230 MHz 이상을 만족한다.

그림 5와 6은 비 포스터 정합회로를 이용한 소형 GPS

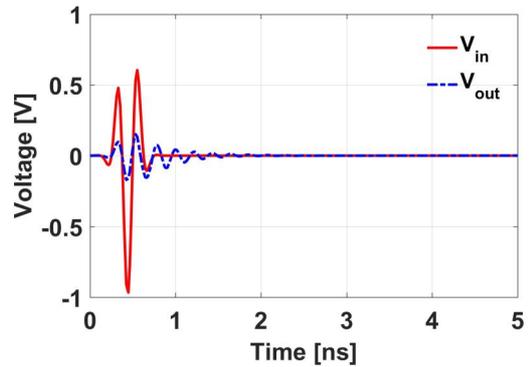


그림 3. 시간영역 안정도 검증
Fig. 3. Stability analysis in time-domain.

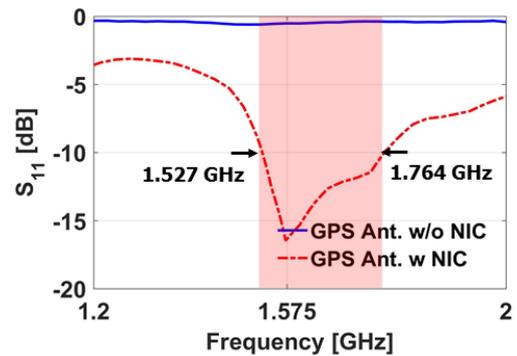


그림 4. 소형 GPS 안테나용 비 포스터 정합회로
Fig. 4. Non-Foster matching circuit for small GPS antenna.

안테나 무반사실 측정결과를 나타낸다. 전면방향이득은 각각 0.41 dBi($x-z$ 평면), -1.82 dBi($y-z$ 평면)로 소형 GPS 안테나만 있을 경우(-16.91 dBi, -17.62 dBi)와 비교해 17 dB 이상 정합성능이 개선됨을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 항재밍 소형 GPS 배열안테나 설계를 위한 선행 연구로 관심 주파수(L_1 : 1.575 GHz)에서 전기적으로 소형인 단품 GPS 안테나를 설계하였다. 또한, 광대역 정합을 위해 교차 결합쌍 트랜지스터로 구성된 비 포스터 정합회로를 설계하였다. NIC 회로는 소형 GPS 안테나 등가회로의 입력 임피던스를 이용해 최적으로 설계하였으며, 시간영역에서 안정도 분석을 통해 전체 시스템의 안정성을 확인하였다. 관심 주파수에서 반사계수는 -16.4

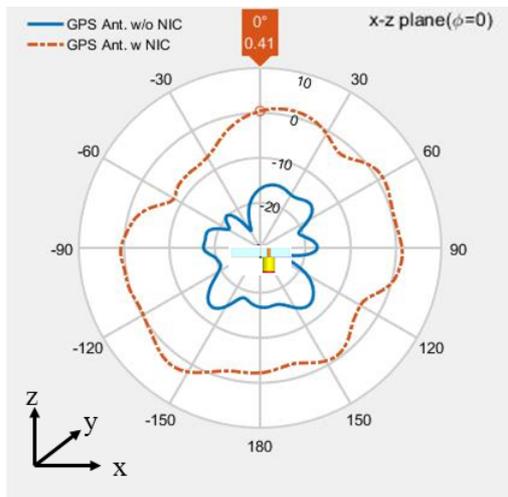


그림 5. 방사 특성: x - z 평면($\phi=0^\circ$)
 Fig. 5. Radiation pattern: x - z plane($\phi=0^\circ$).

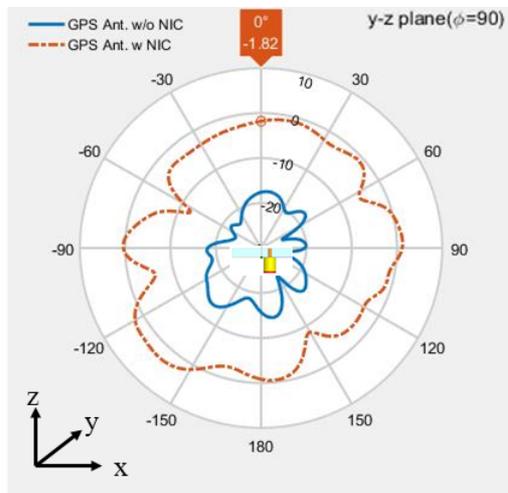


그림 6. 방사 특성: y - z 평면($\phi=90^\circ$)
 Fig. 6. Radiation pattern: y - z plane($\phi=90^\circ$).

dB이고, VSWR 2:1 기준 대역폭은 1.527~1.764 GHz로 230 MHz 이상의 광대역 정합 성능을 확인하였다. 향후 비 포스터 회로를 이용하여, 광대역 항재밍 소형 GPS 배열 안테나에 대한 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas", *Proc. IRE*, vol. 35, no. 12, pp. 1479-1484, Dec. 1947.
- [2] L. J. Chu, "Physical limitations of omni-directional antennas", *J. Appl. Phys.*, vol. 19, no. 12, pp. 1163-1117, Dec. 1948.
- [3] H. W. Bode, *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. New York, NY, USA: Van Nostrand, 1947.
- [4] J. G. Linvill, "Transistor negative impedance converters", *Proc. IRE*, vol. 41, pp. 725-729, Jun. 1953.
- [5] S. E. Sussman-Fort, R. M. Rudish, "Non-Foster impedance matching of electrically-small antennas", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 8, pp. 230-2241, Aug. 2009.
- [6] 양혜민, 김강욱, "네거티브 임피던스 변환기에 기반을 둔 저항성 V 다이폴 안테나의 논 포스터 매칭", *한국전자과학회논문지*, 26(7), pp. 597-605, 2015년 7월.