

표면파 통신 시스템을 위한 저전력 자동 임피던스 정합 모듈 설계 및 검증

장승현, 현석봉, 송원영, 김준형*, 황정환
한국전자통신연구원 전파연구본부 RF 기술연구실, *충남대학교

damduk@etri.re.kr

Design and Verification of a Low-Power Auto-Impedance Matching Module for Surface-Wave Communication Systems

Seunghyun Jang, Seok-Bong Hyun, Wonyoung Song, Joonhyung Kim,
Jung-Hwan Hwang
ETRI, RF technology team

요약

표면파 통신용 안테나와 전송 매질의 표면 사이의 임피던스 부정합으로 인한 반사 손실을 최소화하기 위해, RF 전력 검출기와 MCU 기반 2.4 GHz 자동 임피던스 정합 모듈을 설계, 제작 및 검증하였다. 임피던스 가변 투너 시험 결과, 50Ω 부하에서 최적 매칭 상태를 자동 탐색했고, OPEN 부하에 서는 높은 반사 전압으로 High-Z 상태를 안정적으로 감지하였다. 따라서 제안 모듈은 산업 현장 및 선박 등 다양한 매질 환경에서도 표면파 통신 링크에 적용해 전송 효율을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서 론

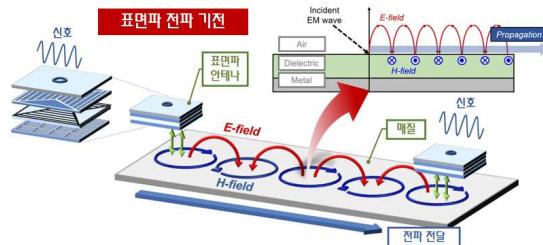
최근 다양한 차세대 유무선 통신 기술이 전 세계적으로 활발하게 연구되고 있다[1-9]. 특히 금속과 유전체의 경계면을 따라 전파되는 표면파(Surface Wave) 통신 기술은 기존 공간파(Space Wave) 기반 통신이 가진 전파 음영 및 장애물 차단 문제를 극복할 수 있는 유력한 대안 중 하나로 주목받고 있다. 표면파는 전자기 에너지가 매질의 표면 근방에 구속(trapped)되어 낮은 신호 손실로 장거리 전파가 가능한 전자기파로서, 선박 내 통신, 스마트 팩토리, 전파 음영 지역 해소 등 다양한 응용 분야에서 그 가능성이 대두되고 있다[1-3]. 그러나 표면파는 공간파와 달리 금속 표면 및 다양한 유전체 환경 등 매질 조건이 다양하므로 표면에서의 임피던스도 다양한 값을 가질 수 있다. 따라서, 이러한 안테나-표면 임피던스 부정합으로 인하여 전송 효율이 떨어지고 전력 손실이 발생하는 문제가 있어, 자동 임피던스 정합 회로를 통해 이를 보상하는 기술이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 표면파 통신 시스템에서의 전력 손실을 최소화하고 전송 효율을 극대화하기 위한 표면파용 자동 임피던스 정합(Auto Impedance Matching) 모듈을 제안하고 그 측정 결과를 기술하고자 한다.

II. Trapped Surface Wave 기반의 표면파 전파

그림 1은 금속과 유전체 사이의 경계면을 따라 전파되는 Trapped Surface Wave의 전형적인 전파 기전을 설명하고 있다. Trapped Surface Wave는 유전체와 금속 표면에서 발생하는 비복사성의 전자기파로, 에너지가 금속 표면과 유전체 층 사이에 2 차원적으로 국한되어 전파되는 특징을 갖는다.

이러한 파동은 자유공간으로 방사되지 않고 금속 표면을 따라 지속적으로 에너지를 전달하기 때문에, 기존의 공간파 기반 무선 전송 방식에 비해 경로 손실이 적고 외부 간섭에 강한 전파 특성을 갖는다. 특히 에너지가 금속 표면 인근에 국한되기 때문에 신호 누설

이 적고 보안성이 높으며, 안정적인 통신 품질을 확보할 수 있다는 장점을 지닌다.



<그림 1> 표면파 전파 기전

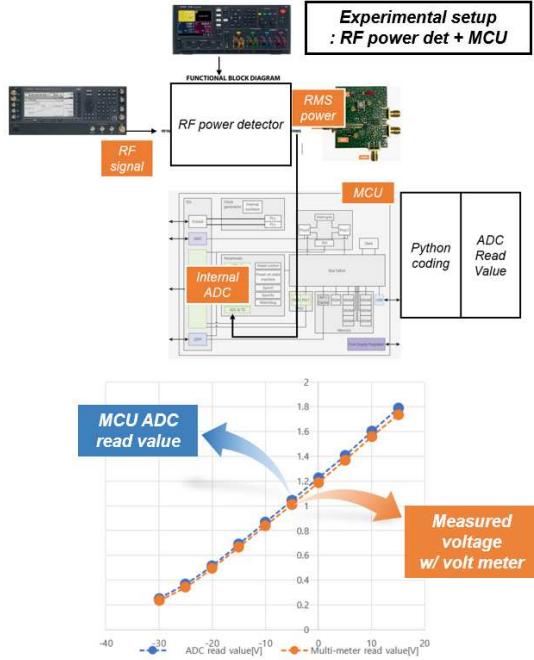
III. RF 전력 검출기와 MCU 간 연동 측정

본 절에서는 제안하는 RF 신호 평균 파워 기반 임피던스 자동 정합 회로의 핵심 구동부인 RF 전력 검출기(power detector)와 마이크로컨트롤러(MCU)를 연동하여 신호 파워를 측정한 결과를 기술한다.

먼저, 실험은 RF 신호 발생기(Signal Generator)를 통해 인가된 전력의 일부를 방향성 결합기(direction coupler)를 이용해 검출 회로로 전달하는 방식으로 구성되었다. 검출된 반사파 신호는 Analog Device 사의 RF 전력 검출기 모듈을 통과한 뒤, 그 출력 전압이 MCU 내부의 12-bit SAR ADC로 입력된다. ADC 변환 결과는 Python 기반 스크립트를 통해 UART 인터페이스로 획득하고, 동시에 고정밀 멀티미터를 사용해 RF 전력 검출기의 출력 전압을 병행 측정하였다(MCU 내 ADC 동작 검증을 위한 reference 제공 용도).

그림 2에 나타낸 바와 같이, ADC가 출력한 디지털 값과 멀티미터로 측정한 아날로그 전압 간에는 굉장히 적은 오프셋을 가지는 선형 관계가 확인되었다. 이는 MCU 내장 ADC를 이용한 전력 측정이 실용적인 수준에서 정확도가 만족함을 의미하며, 이로써 제안 회로를 통한 반사파 파워 기반 임피던스 스위핑 시, 단일 측정으로도 충분한 해상도와 선형성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

위 연동 시험 결과를 바탕으로, 차후 임피던스 자동 정합 알고리즘에서는 최소 반사파 파워 지점을 빠르게 탐색하여 가변 매칭 소자(tuning element)의 최적 설정을 결정할 수 있다.



<그림 2> RF power detector 와 MCU 연동 실험 셋업 및 측정 결과

IV. 2.4 GHz Auto Z-Tuner 연동 측정 결과

그림 3은 방향성 결합기, 2.4 GHz 가변 임피던스 튜너, 반사파 검출 센서, 그리고 자동 튜닝 알고리즘이 구동되는 MCU로 구성된 모듈과 그 측정 결과를 함께 나타낸다. 상단 사진은 실제 하드웨어 배치를, 하단 그래프는 튜닝 state(1 ~ 7)별 검출기 출력 전압을 Load 50 Ω(정색)과 Load OPEN(주황색) 조건에서 비교한 것이다.

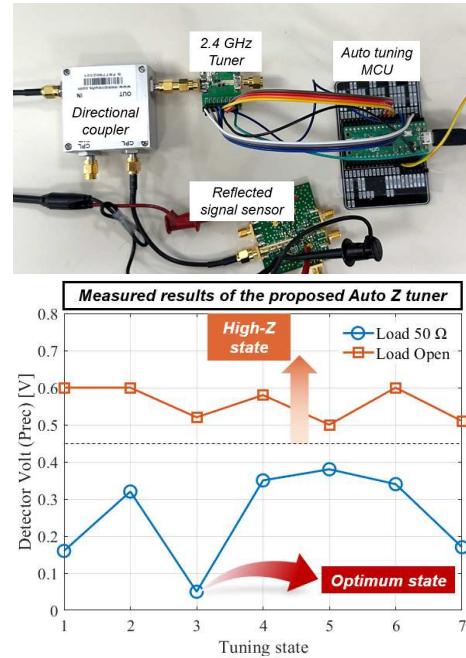
튜닝 state 3에서 검출 전압이 최저치를 기록하였으며, MCU 알고리즘은 해당 상태를 Optimum Z로 판단하였다. 하드웨어-소프트웨어 루프 전체 처리 시간은 1s 미만으로 확인되어 실시간 응용에 충분한 여유가 있음을 입증하였다 (표면파 안테나를 부착 후 해당 표면에 표면파 안테나 임피던스를 가변하는 시간). 부하 OPEN 조건에서는 모든 튜닝 상태에서 검출 전압이 0.5 V 이상으로 유지되었고, 특히 상태 4 부근에서 최대 전압을 보여 High-Z 특성이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 제안 튜너가 높은 반사 환경을 안정적으로 감지함을 의미한다.

이상의 결과는 제안된 Auto Z-Tuner가 낮은 계산 복잡도로도 빠르게 최적 매칭 상태를 탐색-유지할 수 있음을 보여주며, 향후 2.4 GHz 전력증폭기와의 연동 및 표면파 안테나 실환경 검증을 통해 시스템 완성도를 제고할 계획이다.

V. 결론

본 논문에서는 표면파 통신 환경에서 발생하는 임피던스 부정합 문제를 해결하기 위하여 저전력 자동 임피던스 정합 모듈을 설계하고 실험적으로 검증하였다. 전력 검출기와 MCU 만으로 반사파 파워를 정밀 측정하고, 7-state 가변 튜너를 직접 구동하도록 하여 외부 연산 장치 없이 소형 및 저전력 구현을 달성하였으며 50Ω 부하 조건에서 1s 이내에 최적 매칭 상태를 탐색 및 설정하였고, OPEN 부하 조건에서도 높은 반사파 검출을 통해 High-

Z 상태를 안정적으로 식별할 수 있었다.



<그림 3> 2.4GHz Auto Z-tuner 연동 측정 결과

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (2023-00227466, Development and system demonstration of metal surface wave magnetic field communication technology in extreme environments)

참고 문헌

- [1] S. B. Hyun, et al., "Design Considerations for Physical Layers considering Propagation Characteristics of Ultra-High Frequency Surface Wave", JCCI, Apr. 2023.
- [2] A. Ishimaru, Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering, Wiley-IEEE Press, 2017.
- [3] T. Fei, et al., "A Comparative Study of Radio Wave Propagation Over the Earth Due to a Vertical Electric Dipole," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 10, pp. 2723-2732, Oct. 2007.
- [4] S. Jang, G. Jo, J. Jung, B. Park, S. Hong, "A digitized IF-over-fiber transmission based on low-pass delta-sigma modulation," IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 26, no. 24, pp.2484-2487,2014, DOI:[10.1109/LPT.2014.2361753](https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2361753)
- [5] S. Jang, et al., "Digital radio-over-fiber system with multi-pulse Manchester encoding-assisted delta-sigma modulation," Opt. Express, vol. 26, no. 7, pp. 8335-8349, 2017
- [6] S. Jang, B. Park, S. Hong, K.S. Kim, K.C. Lee, "Delta-sigma-modulated IFOF transmission system assisted by a correlative-level encoding technique," Optics express, 26(23), pp.29916-29930, 2018. DOI:[10.1364/OE.26.029916](https://doi.org/10.1364/OE.26.029916)
- [7] H. Lee, S. Jang and S. Hong, "A Hybrid Polar-LINC CMOS Power Amplifier With Transmission Line Transformer Combiner," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 61, no. 3, pp. 1261-1271, March 2013.
- [8] H. Jeong, H. D. Lee, B. Park, S. Jang, S. Kong and C. Park, "Three-Stacked CMOS Power Amplifier to Increase Output Power With Stability Enhancement for mm-Wave Beamforming Systems," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 71, no. 6, pp. 2450-2464, June 2023, doi: 10.1109/TMTT.2022.3228539.
- [9] S. Kong, H. -D. Lee, S. Jang, J. Park, K. -S. Kim and K. -C. Lee, "A 28-GHz CMOS LNA with Stability-Enhanced Gm-Boosting Technique Using Transformers," 2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Boston, MA, USA, 2019, pp. 7-10, doi: 10.1109/RFIC.2019.8701753.