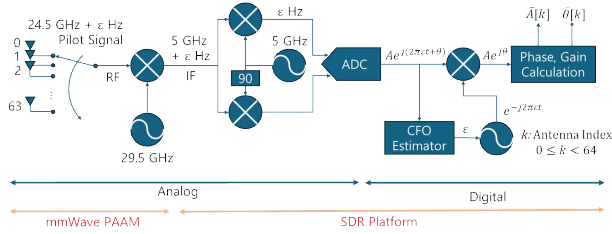
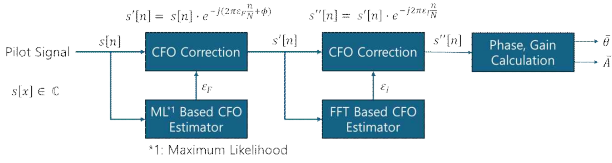


24 GHz 대역의 무선전력전송 송신 시스템을 구현하기 위해 Fujikura사의 PAAM(Phased Array Antenna Module)을 활용하였다. 해당 모듈은 24.25~29.5 GHz 대역을 지원하며, 상단에는 64 개의 이중 편파 (Dual-polarized) patch 안테나가, 하단에는 Beamformer IC, Frequency conversion IC, Bandpass filter, Splitter, Combiner 등의 부품으로 통합된 구조를 갖는다[4]. 8×8 배열의 64 개 통합 안테나는 이중 편파 모드에서



(a) 무선전력 송신 시스템 내 Pilot 신호 CFO 추정 구조



(b) Pilot 신호 CFO 보정과 정밀 위상 및 이득 추정 알고리즘

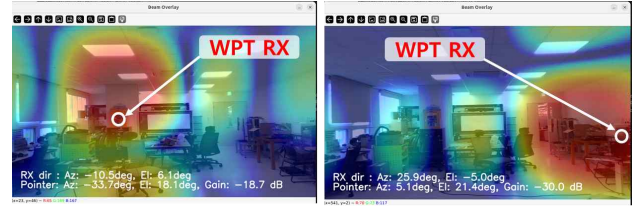
[그림2] 무선충전 수신부 위치 추정 실시간 Pilot 신호 보정 알고리즘

최대 59 dBm의 EIRP(Effective Isotropic Radiated Power)를 출력할 수 있으며, $\pm 60^\circ$ 의 넓은 빔 조향 범위를 제공한다. 특히 이 시스템은 PAAM의 배열 확장을 통해 송신 안테나 면적과 송출 전력을 증가시킬 수 있다. 신호 입출력단은 IF(Intermediate Frequency) 대역에서 이중 편파 무선전력 신호를 제어할 수 있도록 되어있다. 빔 제어를 위해 SDR(Software Defined Radio) 플랫폼과의 연동을 통해 5 GHz 대역에서 무선전력 빔 집속을 수행하고 수신 디바이스로부터의 Pilot 신호를 분석할 수 있도록 구현하였다. SDR 플랫폼과 PAAM 간의 클록 동기화 및 통합 제어는 WPT TX Control System을 통해 구현되었으며, 이를 통해 다양한 소프트웨어 기반 무선전력 빔 제어 알고리즘을 유연하게 적용할 수 있는 환경을 구축하였다. [그림1]은 제작한 mmWave 무선전력 송신 시스템 구성도이다. 이 시스템을 기반으로 제안하는 실시간 무선충전 수신부 추적 빔 집속 알고리즘을 검증하였다.

III. 실시간 무선충전 수신부 추적 빔 집속 알고리즘

제안하는 무선전력 송신 시스템의 수신 디바이스 인지 및 위치 추적 시퀀스는 다음과 같다. 먼저 근거리 무선통신(BLE, Wi-Fi, UHF RFID 등)의 Request 및 ACK 과정을 통해 서비스 반경 내 디바이스의 유무 및 고유 ID를 식별한다. 이후 수신 디바이스가 무선충전 수신 모드로 전환되어 Pilot 신호를 방출하면, 무선전력 송신 시스템은 입력되는 Pilot 신호의 위상과 이득 정보를 실시간으로 추정한다. 그 다음 추정된 Pilot 신호에 복소 공액(Complex conjugate) 가중치를 적용하고 이득을 증폭하여 역방향으로 송출함으로써, 수신 디바이스의 위치에 정밀하게 에너지를 집중시키는 Retro-reflective 빔포밍 방식을 통해 무선전력을 전송한다. 하지만 이 때 입력된 Pilot 신호와 무선전력 송신 단위 소자가 송출하는 신호 사이에 주파수 Offset이 존재하면, 위상 드리프트(Phase Drift)가 발생하여 수신 디바이스의 위치로 정확한 무선전력 빔 집속을 유지하기 어려워진다. 송출 전력 신호의 위상 오류로 인한 빔 지향 오차는 전송 효율을 급격히 저하하는 요인이 되므로, 입력되는 Pilot 신호에 대한 실시간 Offset 보상 알고리즘이 필수적으로 요구된다.

제안 알고리즘에서는 제작한 mmWave 무선전력 송신 시스템의 SDR 플랫폼단에서 단위 소자별로 입력된 Pilot 신호의 CFO(Carrier Frequency Offset)를 개별적으로 보상한다. 각 안테나 소자에서 산출된 정밀한 위상 정보는 Retro-reflective 빔포밍 방식을 통한 빔 집속도를 높여 무선전력 전송 효율 향상에 기여한다. [그림2]는 제안한 Pilot 신호의 CFO를 보정하는 방식에 대한 내용이다. CFO 성분은 Integer(ϵ_I)와 Fractional(ϵ_F) 값으로 아래 식과 같이 표현될 수 있다.



[그림3] mmWave 무선전력 실시간 위치 추정 빔 집속 동작

$$\epsilon = \epsilon_I + \epsilon_F \quad (1)$$

Fractional 값은 ML(Maximum Likelihood) Based CFO Estimator를 통해 보정된다. 이는 시간 영역에서 순차적으로 입력되는 Pilot 신호의 프레임 간 상관관계(Correlation)를 분석하여, 동일 신호 구간 내에서 발생하는 위상 변화량을 통해 오차를 추정하는 방식이다. 그리고 Integer 값은 FFT Based CFO Estimator를 통해 처리된다. 이는 수신 신호를 주파수 영역으로 변환한 후, 할당된 중심 주파수와 실제 Peak 지점 간의 편차를 분석함으로써 정수 단위의 주파수 편이를 식별한다. 이로써 무선전력 출력 신호와 입력된 Pilot 신호와의 CFO를 보정함에 따라 수신 디바이스에 무선전력 빔 집속 정확성을 높일 수 있다.

IV. 원격 무선전력전송 동작 검증

제안한 알고리즘의 유효성은 mmWave 무선전력 송신 시스템과 파일럿 신호 생성 기능이 통합된 수신 테스트 모듈을 통해 검증되었다. [그림3]과 같이 무선충전 수신 디바이스의 위치 변화에 따라 실시간으로 무선전력 빔 집속 동작이 가변되는 것을 확인하였다. 빔 집속을 통한 무선전력 전달 성능을 분석한 결과, 1 m 거리 LOS(Line of Sight) 상황에서 송신부를 출력했을 때에 비하여 빔 집속을 통한 전력 수신 강도가 83배 향상되는 결과를 도출하였다.

V. 결론

본 논문에서는 빔 조향이 가능한 mmWave 대역의 무선전력 송신 시스템을 설계하고, 수신 디바이스가 송출하는 Pilot 신호를 기반으로 위치 추정 정밀도를 극대화하는 알고리즘을 제안하였다. 시스템 및 알고리즘 연동 구현을 통해 수신 디바이스 추적 기반의 실시간 무선전력 빔 집속 성능을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025/2026년도 한국전자기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 401C5941, 미래 전파 기반 Over-the-Air 전파빔 무선충전기술)

참고 문헌

- [1] A. Eid et al., "A scalable high-gain and large beamwidth mm-wave harvesting approach for 5G-powered IoT," in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1309 - 1312, Jun. 2019.
- [2] C. Song et al., "Wideband mmWave wireless power transfer: Theory, design and experiments," in *Proc. EuCAP*, pp. 1 - 5, 2023.
- [3] M. Wagih et al., "Millimeter-wave power harvesting: A review," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 1, pp. 560 - 578, 2020.
- [4] Fujikura, "Phased Array Antenna Module", Millimeter-wave Wireless Communication Module(n257/n258/n261) Web page, (<https://mmwavetech.fujikura.jp/5g>).