

PLUTO SDR 플랫폼을 활용한 빔포밍 기반 RF 무선전력전송 테스트베드 구현

Implementation of Beamforming-based RF Wireless Power Transmission System using PLUTO SDR Platform

문유정¹ · 윤창석² · 남성식^{1*} · 정재필^{1*}

¹가천대학교 전자공학과

²한국전자기술연구원

Yoo Jung Moon¹ · Changseok Yoon² · Sung Sik Nam^{1*} · Jae-Pil Chung^{1*}

¹Department of Electronic Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do 13120, Korea

²Korea Electronics Technology Institute (KETI), Gyeonggi-do 13509, Korea

[요 약]

본 논문에서는 다중 PLUTO SDR 플랫폼을 활용하여 전력 송수신단이 서로의 위치 정보를 모르는 상황에서 타겟 디바이스(전력 수신단)의 위치 정보를 계산하여 수신단에 대한 빔 정렬이 가능한 빔포밍 무선전력전송 테스트베드를 구현하였다. 구축한 테스트베드를 기반으로 실험실 환경에서 실험을 진행하였으며 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여 테스트베드가 효과적으로 구성되었는지 그리고 테스트베드의 성능 유효성을 확인하였다.

[Abstract]

In this paper, by using a multi-PLUTO SDR platform, we implement a beamforming wireless power transmission test bed capable of beam alignment for the receiving end by calculating the location information of the target device (power receiving platform) in a situation where power transmitting and receiving platforms do not know each other's location information. Experiments were conducted in a laboratory environment based on the built test bed, and the experimental results were compared with the simulation results to confirm both whether the testbed was effectively configured and the performance effectiveness of the test bed.

Key word : PLUTO SDR, Beamforming, Wireless Power Transmission.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.2.221>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 28 March 2023; **Revised** 31 March 2023

Accepted (Publication) 24 April 2023 (30 April 2023)

***Corresponding Authors**

Tel: +82-031-750-5801, 5318

E-mail: (ssnam & jpchung)@gachon.ac.kr

1. 서론

최근 들어 휴대전화, 무선 디바이스를 포함한 다양한 IoT (Internet of Things) 디바이스를 무선 전력 전송을 활용하여 무선으로 충전하는 기술이 생활 속으로 점차 들어오고 있다. 하지만 기존 유선기반 충전에서 무선기반 충전 방식으로 기술은 진화했으나 폭발적인 확산까지는 아직까지는 한계가 존재한다. 예로서 사용자는 충전 중에도 디바이스를 지속적으로 사용하기를 원하는 seamless 충전 방식을 선호하는 반면 현재 가장 많이 보급되어 있는 거치식의 무선 충전 방식 특히 가장 보편화된 WPC (Wireless Power Consortium) Qi 표준[1]의 유도 결합(Inductive Coupling) 충전 방식으로는 이러한 소비자의 욕구를 충족시킬 수 없다. 한편 최근, 마이크로웨이브(RF ; Radio Frequency) 방식의 무선전력전송이 위치 자유도 극대화 기술로 평가받아 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 많은 조명을 받고 있다 [2]-[3]. 하지만 IoT 디바이스들의 경우 energy storage device (ESD)로 rechargeable battery를 기반으로 작동을 하게 되는데 rechargeable battery의 경우 충전을 위한 threshold power가 크다[4]. 이로 인하여 RF신호 특성상 rechargeable battery가 충전동작을 하도록 충분한 에너지를 전달하기 위해서는 다수의 에너지 송신 디바이스를 기반으로 수신 디바이스의 방향으로 다중 안테나를 통한 RF 빔을 형성하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 전력 송수신단이 서로의 위치 정보를 모르는 상황에서 타겟 디바이스(전력 수신단)로부터 주기적으로 전송된 신호를 바탕으로 타겟 디바이스의 위치 정보를 계산하여 위치가 바뀌는 수신단에 대한 빔 정렬 위하여, 첫 번째로 dipole 위상 배열 안테나의 빔포밍을 기반으로 다중 Pluto SDR (Software Defined Radio) 플랫폼을 활용한 빔포밍 무선 전력 전송 테스트베드를 구현하고, 두 번째로 타겟 디바이스로부터 주기적으로 전송된 신호를 활용하여 타겟 디바이스의 위치 정보를 계산하여 얻어내며, 세 번째로 얻어진 위치 정보를 기반으로 타겟 디바이스에 에너지가 집중되어 전달될 수 있도록 다수 송신 안테나에 각각에 적절한 위상과 진폭의 신호를 인가할 수 있도록 제어한다. 마지막으로 이를 기반으로 최종적으로 실내 실험실 환경에서 실험을 진행하고 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여 테스트베드 시스템이 효과적으로 구성되었는지 확인하는 것을 목표로 한다.

II. 테스트베드 플랫폼 구조 및 동작

2-1 Pluto SDR 플랫폼을 기반으로 한 무선 전력전송 시스템 구성

그림 1.과 같이 Pluto SDR 플랫폼은 Analog Devices Inc. (ADI)사의 단일 RF Transceiver를 이용하여 구성된 독립적으로 동작이 가능한 SDR 시스템이다[5]. RF Transceiver는 송신 및 수신 독립적인 RF 채널을 각각 포함하고 있으며, 송신과 수신에 개별 Phase Locked Loop(PLL) 회로를 포함하고 있어 다른 주파수로 송신과 수신이 가능한 구조이다.

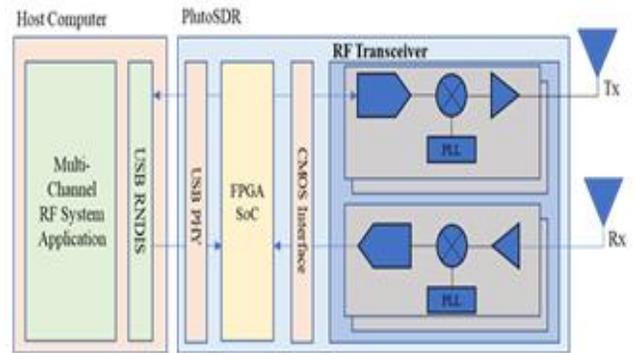


그림 1. Pluto SDR 플랫폼 구조

Fig. 1. Structure of PLUTO SDR

RF Transceiver는 FPGA SoC를 통하여 제어되고 전용의 송신 채널과 수신 채널을 통하여 IQ 신호를 주고받는다. 각 채널은 12 bit 병렬 CMOS 인터페이스이며 IQ 신호를 번갈아 가면서 Interleaved한 방식으로 주고받는다. FPGA SoC 모듈은 USB2.0 인터페이스를 통하여 호스트 컴퓨터로 연결된다. FPGA에서는 호스트 컴퓨터 측에서 수신된 신호들을 Digitally Up-converting 하여 RF Transceiver 측으로 전달하거나 RF Transceiver 측에서 수신된 신호들을 Digitally Down-converting 하여 호스트 컴퓨터 측으로 전달한다. USB로 연결된 Pluto SDR 장치는 호스트 컴퓨터 단에서 Remote Network Driver Interface Specification (RNDIS) 로 연결되어 개별 IP를 가진 네트워크 장치로 인식되어 이를 통해 데이터를 전달할 수 있게 된다.

2-2 다 채널 Pluto SDR 주파수 및 위상 동기화

무선 전력 전송을 위한 빔포밍 시스템 구축을 위해서는 다수의 독립적으로 제어 가능한 송신 채널들과 안테나들을 활용하여 수신단으로의 beamforming을 통하여 높은 집중도를 갖는 송신빔 (Highly Focused Transmitting Beam)을 생성하여 에너지를 전송해야 한다.

이를 개별 PLL 및 독립적인 RF 채널을 각각 포함하고 있는 다수의 Pluto SDR 시스템들을 기반으로 beamforming을 구현하기 위해서는 다수의 Pluto SDR의 전력 송신부로부터 beamforming을 통하여 전력 수신을 받을 타겟 디바이스 즉 전력 수신부로 전파 에너지를 집중할 수 있도록 전력 수신부로부터 파일릿 신호를 전력 송신기들에게 전송하여 전력 수신부로부터 전파 에너지를 집중할 수 있는 위상을 계산 후 이 방향으로 전력 송신부로부터 전력 수신부로 에너지를 집중하여 전송한다.

다수의 전력 송신기에서 전력 수신기로부터 송신된 파일릿 신호를 기반으로 전력 수신기의 전력 송신을 위한 방향을 추정하기 위해서는 전력 송신기의 모든 수신 채널 간의 위상 동기화가 우선 필요하다. 이를 위하여 우선 전력 송신부는 외부 Reference Clock을 단일 클럭 소스로 사용하여 이를 분배하

여 개별 Pluto SDR 플랫폼에 동일하게 공급한다. 이를 통하여 플랫폼별 개별 PLL을 포함하고 있는 다수 Pluto SDR 플랫폼 각각의 PLL의 출력 정현파의 주파수들을 동기화 시키고 이후 전력 수신기로부터 받은 파일럿 신호를 바탕으로 전력 수신부로의 beamforming을 통하여 에너지를 집중할 수 있는 위상을 계산한다.

Beamforming 방향이 결정되면 다수의 Pluto SDR의 전력 송신부 간의 반송파 위상 동기 (Carrier Phase Synchronization)가 우선되어야 한다. 반송파 동기를 통하여 모든 송신기 채널은 특정 지점에서 반송파 위상을 일치할 수 있고 이를 기준으로 수신기로의 beamforming을 위한 각각 송신 신호의 계산된 위상으로 각각의 채널을 설정할 수 있다. 결과적으로 원하는 지점에 위치한 수신기로 송신된 전파의 위상이 일치하게 하여 보강 간섭 (Constructive Interference)이 일어나는 현상을 통하여 전파 에너지를 원하는 위치에 집중할 수 있다.

송신 반송파 (Carrier Wave)의 위상 동기화를 위해서는 먼저 개별 PLL을 가지고 있는 다수의 Pluto SDR 시스템의 주파수 동기화를 진행하여야 한다. 하지만 Pluto SDR 플랫폼의 특성상 개별 PLL을 가지고 있어 플랫폼들이 독립적으로 동작하도록 설계되어 있기 때문에 다수의 Pluto SDR 시스템의 주파수 동기화를 위한 전용 방법을 제공하지 않는다. 이에 본 논문에서는 그림 2와 같이 외부 Reference Clock을 단일 클럭 소스로 사용하여 이를 송신용 플랫폼들에 분배하여 개별 Pluto SDR 플랫폼에 동일하게 공급한다.

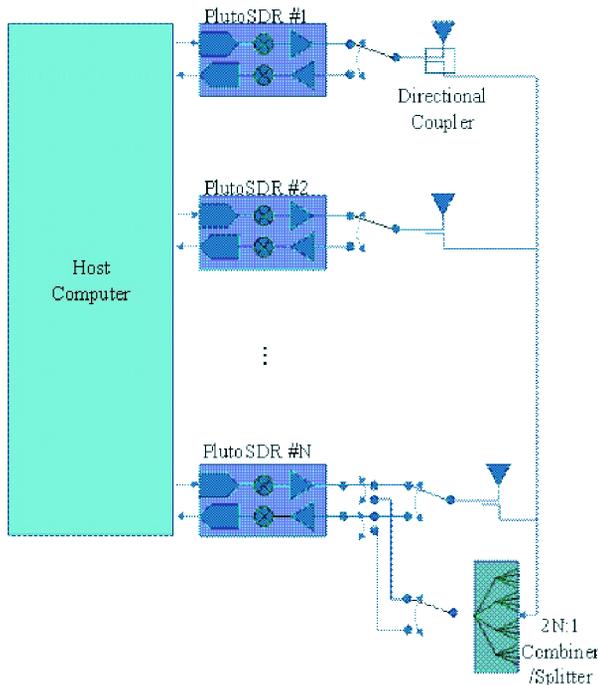


그림 2. RF Channel Carrier 동기화
Fig. 2. Synchronization of RF Channel Carrier

이를 통하여 플랫폼별 개별 PLL을 포함하고 있는 다수의

Pluto SDR 플랫폼의 PLL의 출력 정현파의 주파수들을 동기화 하기 위한 기준으로 사용하여 다수의 플랫폼들이 동일한 주파수를 생성할 수 있도록 한다. 하지만 이 방법은 아래와 같은 몇 가지 문제를 가지고 있다.

1) 위상 동기화를 위해서는 개별 PLL들의 동작이 동일한 시점에 시작될 수 있도록 회로를 동일한 시점에 Reset 하여 동작 시켜야 하지만 개별 Pluto SDR의 송신 PLL을 동시에 Reset 시키기 위해서는 추가적인 하드웨어 구성이 필요하다.

2) 각 PLL들이 개별 Pluto SDR 보드에 독립적으로 위치하기 때문에 시스템 별로 PLL 내부의 Voltage Threshold가 변화할 수 있어 10도 이상의 Drift가 발생할 수 있다.

3) 또한 만일 PLL 간 위상이 동일하게 얻어지더라도 송신 포트에 안테나 등 추가적인 디바이스들의 접속으로 인하여 접속부에서 반사가 일어나 이 신호와 송신 신호가 간섭을 일으켜 결과적으로 안테나에서 송신되는 신호의 위상 값이 변화할 수도 있다.

이러한 추가적인 문제를 해결하기 위해서 각각의 Pluto SDR 플랫폼의 최종 송신 안테나 전단에 Coupler 장치 (송신 신호의 30 dB 크기의 신호를 수신함)을 위치하여 최종 송신 신호를 수신부로 Feedback 받고 이를 같은 Reference Clock 신호로 동기화 시킨 수신 채널을 기준으로 활용하여 송신 반송파와 수신 반송파 간의 위상 차를 계산하여 모든 송신 채널의 반송파를 기준 수신 반송파와 동기화를 수행하는 구조를 가지도록 한다.

2-3 위상차 추정

수신된 신호들의 위상차 측정은 이들 신호의 초기 위상을 FFT(Fast Fourier Transform) 및 ML(Maximum Likelihood) 추정 방법을 통하여 측정할 수 있다. 이 방법의 경우 noise에 대하여 저항성이 높다[6]. 예를 들어 두개의 측정된 신호의 fundamental harmonic 성분간 위상차는 이 두개의 측정된 신호를 DFT 방법을 통하여 fundamental harmonic DFT 위상 스펙트럼 값을 구하고 이들의 위상차를 이용하여 측정된 신호의 fundamental harmonic 성분간 위상차를 구할 수 있다. 특히 정현파 신호의 경우 정현파 신호의 특성상 주기의 정수 배 기간동안 샘플링된 신호의 경우 기본 DFT 스펙트럼 간격에는 0이 아닌 스펙트럼 선이 하나만 있다. Non-coherent 샘플링의 경우 spectral leakage로 인해 신호에 윈도우를 적용하고 interpolated DFT(혹은 "IDFT" 알고리즘) 방법을 적용한다[7]-[9]. 만일 interpolated DFT를 적용하는 경우 위상차 바이어스는 Non-coherent 샘플링에 의해 낮아진다. 이로 인하여 interpolated DFT를 적용함으로써 신호의 정확한 주파수는 amplitude frequency spectrum 값들 중 값이 가장 큰 두개의 스펙트럼 구성 요소를 기반으로 찾을 수 있다. 본 논문에서는 윈도우로 Hann 윈도우를 적용하였다. 윈도우는 스펙트럼을 분석 시 분석할 신호에 특정 형상의 함수를 곱하여 샘플 된 구간의 맨 앞쪽과 뒤쪽의 신호가 0으로 변하게 하며 나머지 구간을 모두 0으로 간주하도록 유도하여 유한

구간에 대해서만 FFT를 고려할 수 있도록 한다. 즉 스펙트럼 분석 시 샘플 된 구간의 맨 앞쪽과 뒤쪽의 신호가 0으로 변하게 되어 원하지 않는 주파수 성분에 대한 오차를 줄일 수 있게 된다. 특히 본 논문에서는 Hann 윈도우를 적용시켰는데 Hann 윈도우는 dynamic range 즉, 낮은 레벨의 신호까지 감지할 수 있는 특성을 제공하며 특히 좋은 frequency resolution과 감소된 spectral leakage를 제공한다. 상기 위상추정 과정을 주기적으로 수행하여 전력 수신 타겟 디바이스의 위치 정보를 주기적으로 업데이트하여 위치가 바뀐 수신단으로 beamforming을 진행한다.

2-4 경로차 보정 빔포밍 알고리즘

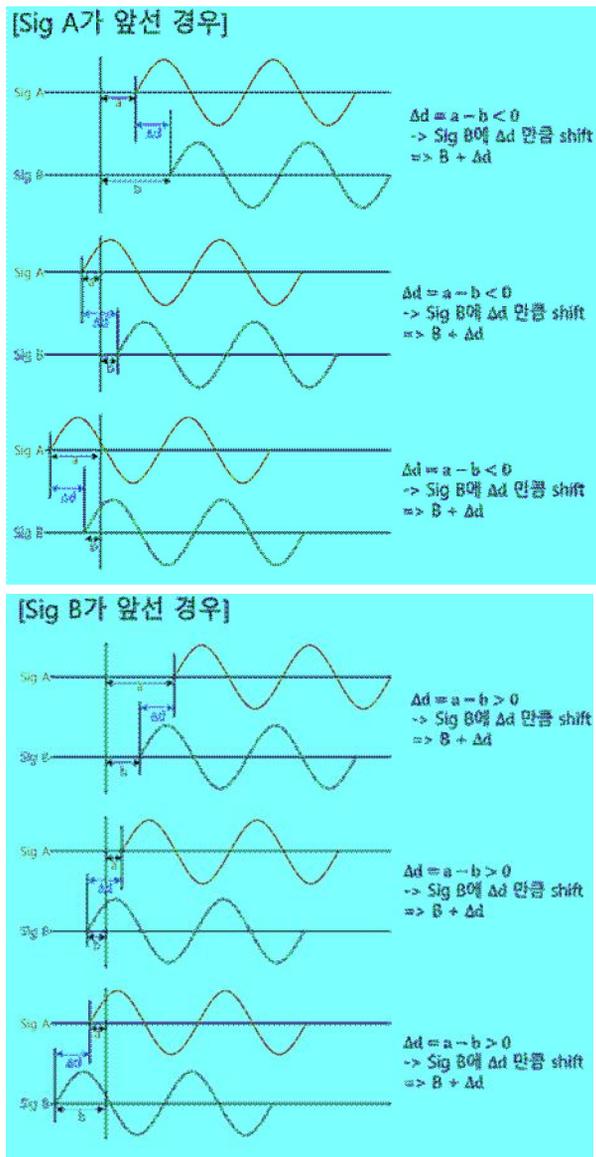


그림 3. 경로차 보정 알고리즘 구성
 Fig. 3. Configuration of path difference correction algorithm

전력 송신용 Pluto SDR 플랫폼들의 송신/수신단의 동기화를

완료 후 전력 수신용 Pluto SDR 플랫폼으로부터 송신한 신호를 두개의 전력 송신용 Pluto SDR 플랫폼의 Rx단 안테나에서 수신한 신호를 측정하고 전력수신기로의 beamforming을 위해서는 그림 3.과 같이 6가지 경우에 대한 경로차 보정을 고려하여야 한다. 그림 3.에서는 두개의 수신 안테나로부터 수신된 신호를 각각 Sig A, Sig B라고 할 경우, 두 신호 중 Sig A가 먼저 도착한 경우와 Sig B가 먼저 도착하는 두가지 경우를 고려할 수 있으며 이들 각각의 경우에도 그림과 같이 세부적으로 각각 3가지 경우를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 두개의 수신 신호 중 하나인 Sig A를 기준으로 Sig A와 Sig B의 경로차 값 (즉, Δd)를 계산하고 이를 바탕으로 계산된 경로차 값의 부호(음수/양수)를 기준으로 phase를 보정하여 결과적으로 Sig A와 Sig B도착 순서에 따라서 Sig B를 좌 또는 우로 신호를 계산된 경로차 값만큼 shift시켜 beamforming을 위한 경로 보정을 진행한다.

III. 실험 환경 및 결과분석

3-1 실험 환경

본 실험에서는 그림 4.와 같이 전력 수신용 Pluto SDR 1개, 전력 송신용 Pluto SDR 2개, 송수신용 Pluto SDR 제어용 host PC 및 Splitter를 기반으로 Pluto SDR 기반 무선 전력 전송 테스트베드를 구형하여 무선 전력 전송 과정을 실험하였다. 실험은 i) 전력 수신용 Pluto SDR 플랫폼의 안테나에서 정현파 신호를 송신하고, 이를 수신 동기화된 2대의 전력 송신용 Pluto SDR 플랫폼에서 수신한다. ii) 수신 동기화된 2대의 전력 송신용 Pluto SDR 플랫폼에서 수신된 신호를 바탕으로 각각의 전력 송신용 Pluto SDR 플랫폼은 수신된 신호를 기반으로 전력 수신용 Pluto SDR 플랫폼으로 beamforming을 위한 위상을 계산한다. iii) 계산된 각각의 위상을 기반으로 송신 동기화된 2대의 전력 송신용 Pluto SDR 플랫폼에서 전력 수신용 Pluto SDR 플랫폼으로 신호를 beamforming하기 위해 계산된 각각의 위상만큼 신호의 위상을 shift한다.

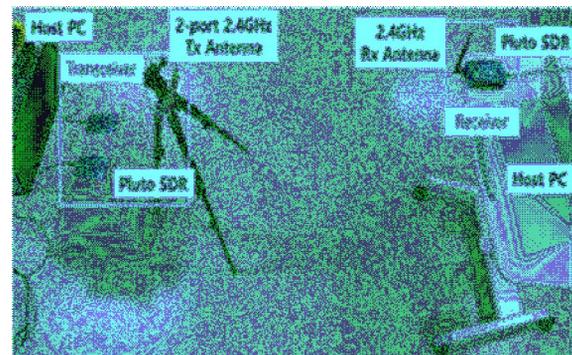


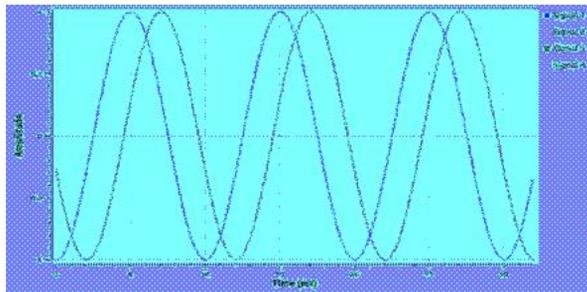
그림 4. 실험 환경
 Fig. 4. Experiment environment

iv) 전력 송신용 Pluto SDR 플랫폼에서 전력 수신용 Pluto SDR 로 전송된 신호를 수신하여 신호의 크기를 비교한다.

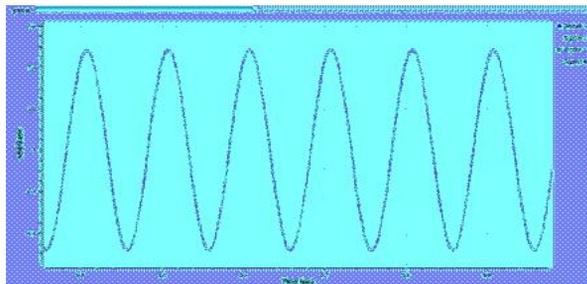
Beamforming의 결과를 확인: a) 전력 송신 장치에서 전력 수신 장치로 송신되는 신호의 세기를 측정하기 위하여 송신기를 원점으로 전력 수신기까지의 거리를 반지름으로 원을 그려 시계방향으로 0° 부터 350° 까지 10° 씩 측정용 수신기의 위치를 이동하면서 수신된 신호를 측정하여 송신 신호의 beam pattern을 확인한다. b) 전력 수신기의 위치를 0° - 20°, 그리고 +20° 위치로 바꾸어 가며 상기 a) 과정을 반복하여 측정하여 beam pattern을 그리고 beamforming을 통하여 송신 신호의 에너지가 타겟 수신기의 위치로 집중됨을 확인한다. c) 전력 수신기의 위치를 0° - 20°, 그리고 +20° 위치에서 beamforming 전과 후 전력 수신기로의 beam pattern을 비교하여 beamforming을 통해 전력 수신기로 신호가 집중되는 정도를 확인하였다.

3-2 실험 결과

그림 5.에서는 전력 송신기 플랫폼들의 Rx port 동기화에 관한 결과로 전력 수신기의 위치를 파악하기 위해 전력 송신기 플랫폼들의 Rx port로 전력 수신기에서 송신한 신호를 수신하여 두 신호의 위상차를 측정하기 위하여 측정 전 두대의 전력 송신기의 Rx port를 동기화한 결과로 그림 5. a)는 동기화 전 그리고 그림 5. b)는 동기화 후 결과를 나타낸 것이며 결과를 바탕으로 동기화가 잘 이루어 졌음을 확인할 수 있다.



a) Result before synchronization

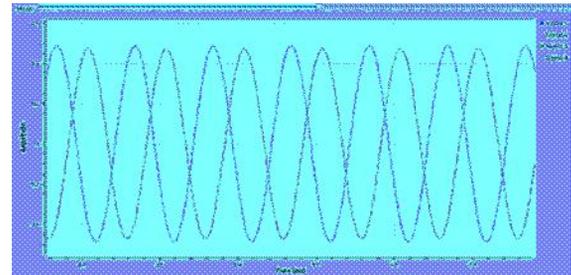


b) Result after synchronization

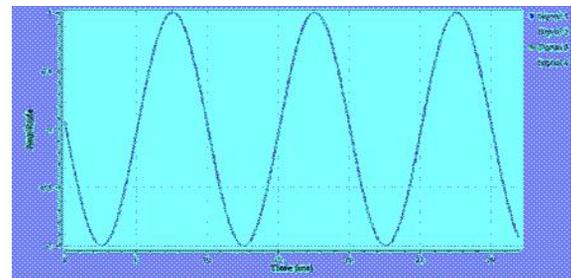
그림 5. 전력 송신기 Rx ports 동기화 전/후 결과
Fig. 5. Result before/after synchronization of power transmitter Rx ports

그림 6.에서는 그림 5.와 유사하게 수신 동기화된 2대의 전력 송신용 플랫폼에서 수신된 신호를 바탕으로 각각의 전력 송신용 전력 수신용 플랫폼으로 beamforming을 위해 계산된 위상으

로 전력을 송신하기 위하여 전력 송신기 플랫폼들의 Tx port를 동기화 시켜야 하는데 그림 6. a)는 동기화 전 그리고 그림 6. b)는 동기화 후 결과를 나타낸다. Rx port동기와 마찬가지로 결과를 바탕으로 Tx port의 동기화가 잘 이루어 졌음을 확인할 수 있다.



a) Result before synchronization



b) Result after synchronization

그림 6. 전력 송신기 Tx ports 동기화 결과
Fig. 6. Result before/after synchronization of power transmitter Tx ports

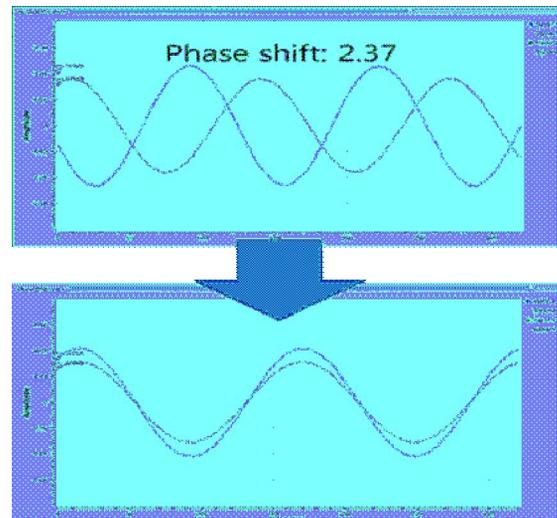


그림 7. Beamforming을 위한 경로차 보정 예 (전력수신기 위치는 정면 0°)
Fig. 7. Path difference compensation example for beamforming (power receiver position is front 0°)

그림 7.은 동기화된 플랫폼을 기반으로 전력 송신용 플랫폼에서 전력 수신용 플랫폼으로부터 수신된 신호 및 이를 바탕으

로 계산된 위상차 결과를 바탕으로 beamforming을 위하여 경로 보정을 한 결과이다. 이 경우 전력수신기 위치는 정면 0°에 위치한 경우로 결과를 바탕으로 경로차 보정이 잘되었음을 확인할 수 있다.

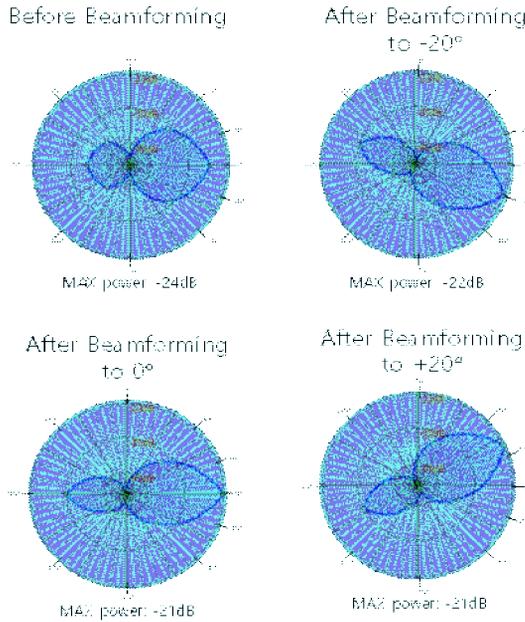


그림 8. Beamforming 전/후 예측 결과 비교
 Fig. 8. Comparison of prediction results before and after beamforming

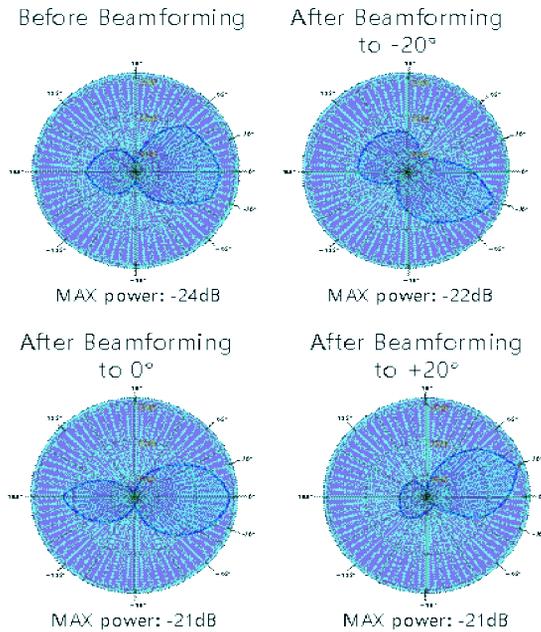


그림 9. Beamforming 전/후 실험 결과 비교
 Fig. 9. Comparison of prediction results before and after beamforming

그림 8.과 그림 9.는 전력수신기를 정면에서 -20°, 정면 0°, 그리고 정면에서 +20°에 위치한 3가지 경우에 대하여 beamforming 결과를 수신된 신호를 바탕으로 antenna beam pattern을 통하여 나타낸 그림이다. 그림 8.은 측정된 결과를 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 beamforming 결과를 예측한 결과이며 그림 9.는 실제 구축한 시스템을 통하여 beamforming 과정의 결과를 측정된 결과를 나타낸 결과이다.

시뮬레이션 및 실제 시스템을 기반으로 실험실에서 실험을 통하여 측정된 결과가 유사함을 확인할 수 있다. 또한 두 결과를 바탕으로 전력 수신단에서 수신한 신호의 beamforming 전/후 결과를 비교해보면 beamforming전에 비하여 전송 안테나를 2개를 사용한 실험 결과의 경우 beamforming후 약 2배 (약 3 dB)정도 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Pluto SDR 플랫폼을 활용하여 빔포밍 기반 RF 무선전력전송 테스트베드를 구현하고 실험실환경에서 구축한 테스트베드를 이용하여 실험을 진행하였으며 실험결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 구축된 테스트베드를 기반으로 실험실에서 실험을 통하여 측정된 결과와 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과가 유사함을 확인할 수 있었다. 특히 beamforming후 beampattern이 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 유사하였으며 beamforming후 beamforming전에 비하여 안테나를 2개를 사용한 실험 결과의 경우 beamforming후 약 2배 (약 3 dB)정도 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

Acknowledgments

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부, 행정안전부, 국토교통부, 산업통상자원부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020-0-00061, 디지털트윈 기반의 지하공동구 화재·재난 지원 통합플랫폼 기술개발)

References

- [1] Qi Specification Power Delivery; Wireless Power Consortium: Piscataway, VI.3, NJ, USA, 2021.
- [2] P. S. Yedavalli, T. Riihonen, X. Wang and J. M. Rabaey, "Far-Field RF Wireless Power Transfer with Blind Adaptive Beamforming for Internet of Things Devices," IEEE Access, Vol. 5, pp. 1743-1752, 2017,
- [3] N. Shinohara, "History and Innovation of Wireless Power Transfer via Microwaves," IEEE Journal of Microwaves,

- Vol. 1, No. 1, pp. 218-228, 2021
- [4] R. de Fazio, D. Cafagna, G. Marcuccio, P. Visconti, "Limitations and Characterization of Energy Storage Devices for Harvesting Applications," *Energies*, Vol. 13, No. 4, pp. 1-18, 2020.
- [5] ADALM-PLUTO, Oct. 2021, [Internet]. Available: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto>
- [6] M. Sedlacek, M. Krumpholz, "Digital measurement of phase difference - a comparative study of DSP algorithms." *Metrology and Measurement Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 427-448, 2005.
- [7] G. Andria, M. Savino, A. Trotta, "Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 38, No. 4, pp. 856-863, 1989.
- [8] D. Agrez, "Interpolation in the frequency domain to improve phase measurement," *Proc. of 17th IMEKO World Congress, Dubrovnik*, pp. 446-450, Jun. 2003.
- [9] D. Agrez, "Improving Phase Estimation With Leakage Minimization," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. 54, No. 4, pp. 1347-1353, 2005.



문 유 정 (Yoo Jung Moon)

가천대학교 전자공학과 학사과정
 ※관심분야 : 전자공학, 통신공학, 통신시스템



윤 창 석 (Changseok Yoon)

한양대학교 미디어통신공학과 학사
 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 석사
 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 박사과정
 ※관심분야 : 전자공학, 통신공학, 통신시스템, 무선전력전송



남 성 식 (Sung Sik Nam)

한양대학교 전자 공학과 학사
 한양대학교 전자 공학과 석사
 USC 통신시스템 석사
 Texas A&M 전기컴퓨터공학과 박사
 가천대학교 전자공학과 교수
 ※관심분야 : 전자공학, 통신이론, 무선전력전송, 무선광통신



정 재 필 (Jae-Pil Chung)

단국대학교 전자공학과 학사
 단국대학교 전자공학과 석사
 한국항공대학교 통신정보공학과 박사
 가천대학교 전자공학과 교수
 ※관심분야 : 전자공학, 통신시스템, 신호처리