THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2018 Apr.; 29(4), 285～289.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2018.29.4.285
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

시간 역전을 기반으로 한 지능적 원거리 무선전력전송

Smart Far-Field Wireless Power Transfer via Time Reversal

박 홍 수 · 홍 하 영 · 홍 순 기

Hong Soo Park · Ha Young Hong · Sun K. Hong

요 약

본 논문에서는 지능적인 원거리 무선전력전송의 방식으로 시간 역전(time reversal) 기반 전파 집속 방법을 제시하였다. 시간 역전 기반의 무선전력전송은 복잡한 전파환경에서도 기기의 위치에 상관없이 전파를 선택적으로 집속하여 높은 peak 전력을 전달할 수 있다. 현실과 가까운 전파환경 시뮬레이션을 통하여 시간 역전 기반의 시 · 공간 전파 집속 현상을 검증하였고, 집속된 RF를 정류하여 전달된 DC 전압을 확인하였다. 또한 일반적인 협대역 신호(CW) 대비 시간 역전 신호의 peak 향상률과 정류 전력비를 확인한 결과, 최대 12 dB 향상된 peak 전력이 전송되었으며, 따라서 보다 높은 효율로 전력전송이 이루어짐을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we demonstrate electromagnetic wave focusing and rectification based on time reversal as a smart method for far-field wireless power transfer. Time reversal in a complex propagation environment allows for transmission of high peak power pulses by focusing the electromagnetic waves selectively regardless of the receiver position. We demonstrate wave focusing and radio frequency (RF) to direct current (DC) rectification via numerical simulation of a complex propagation environment. The results reveal that time reversal can ensure peak power up to 12 dB greater compared to a narrowband continuous wave signal, thereby enhancing the rectified DC voltage with better efficiency.

Key words: Wireless Power Transfer, Far-Field, Time Reversal, IoT, Complex Propagation Environment

Ⅰ. 서 론

최근 들어 모바일 기기, 사물인터넷(IoT), 센서, 생체 이식 장치 등의 분야에서 소전력 및 초소형 무선 디바이스의 활용이 증대되면서 원거리 무선전력전송 및 충전의 수요가 증가하고 있다.

무선전력전송 기술은 크게 자기장을 이용한 근거리 방식과 전파를 이용한 원거리 방식으로 구분된다[1]. 근거리 무선전력전송은 코일을 이용하는 자기유도방식과 공명 회로를 이용하는 자기공명 방식을 통해 전력을 전송하는데, 거리가 멀수록 효율이 급격히 떨어진다. 이에 반해 원거리 무선전력전송은 안테나를 통한 전자기파를 방사하여 중 · 장거리 전력전송이 가능하다. 전력을 원하는 지점에 집속시키기 위해 배열 안테나 기반 빔포밍(beamforming)이 사용되지만[2],[3], 빔포밍은 장애물이 많거나 단일 안테나를 사용할 경우 효율이 떨어진다. 따라서 실내 환

「본 연구는 숭실대학교 교내학술연구비(201710001164) 지원을 받아 수행되었음.」

숭실대학교 전자정보공학부(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received February 2, 2018 ; Revised April 4, 2018 ; Accepted April 5, 2018. (ID No. 20180202-018)

· Corresponding Author: Sun K. Hong (e-mail: shong215@ssu.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

경과 같은 복잡한 전파환경에서는 기존 방식의 원거리 무선전력전송으로는 전파 집속의 한계가 존재한다. 이러한 한계를 보완하는 시간 역전(Time Reversal: TR)을 기반으로 한 원거리 무선전력전송 기술이 최근 제안되었다[4]. TR은 여러 기기가 존재하는 실내 환경에서 적게는 단일 안테나만을 사용하여 선택적으로 각 디바이스에 전력을 전송할 수 있게 한다[4]~[6].

본 논문에서는 기존에 보여주었던 기본 개념[4]에서 한 발 더 나아가 실제와 가까운 전파 환경에서의 시뮬레이션을 통해 TR 기반 지능적 원거리 무선전력전송의 가능성을 증명하였다. 또한 협대역 신호, 즉 정현파(CW)와 TR 신호의 전력 전달 능력을 비교하여 그 효율을 검증하였다.

Ⅱ. 시간 역전 (Time Reversal)

2-1 시간 역전 이론

복잡한 전파환경에서의 TR 과정은 그림 1과 같다. 송·수신 지점 간의 임펄스 응답, $h(t)$를 구하기 위하여 짧은 펄스, $\delta(t)$를 전송한다. 이 때 전파가 다중경로를 통해 도달하므로 시간 분산(time spread)된 임펄스 응답이 발생한다. 따라서 임펄스 응답 신호에는 시·공간에 대한 정보가 함께 포함되어 있으므로 가장 짧은 경로로 전송된 신호는 가장 먼저 수신되고 가장 긴 경로로 전송된 신호는 가장 나중에 수신된다. 수신된 길이가 T 인 $h(t)$를 시간 역전하여 새로운 신호 $h_{TR}(t)=h(T-t)$를 생성하고, 이를 송신 안테나에서 전송하면, 가장 긴 경로의 신호를 먼저, 가장 짧은 경로의 신호를 나중에 수신하므로 시간 분산이 무효화 되어 신호가 모두 동일한 시점에 수신 안테나에 도달한다. 복원된 임펄스 응답은

$$y(t)=h_{TR}(t)*h(t) \tag{1}$$

로 표현할 수 있다. 여러 경로를 통해 전송된 짧은 펄스 신호가 $t=T$에 재결합하게 되므로 전파의 시·공간 집속이 가능하며, 또한 안테나의 위치마다 각각의 시간 역전된 신호는 서로 다른 채널이므로 최소한의 간섭으로 전송된다. 이러한 특성은 실내의 다중경로 전파환경에서 여러 수신 위치에 전파를 선택적으로 집속할 수 있도록 한다[6].

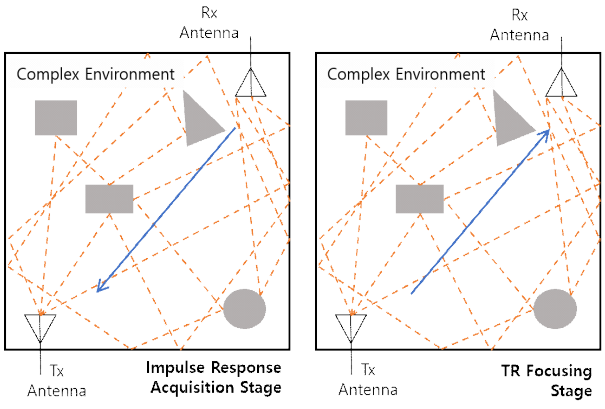


그림 1. 시간 역전 과정의 개념도
Fig. 1. TR process in a complex environment.

2-2 Problem Setup

현실과 비슷한 환경에서의 원거리 무선전력전송을 시뮬레이션하기 위해 그림 2와 같은 실내 전파환경 모델을 구축하였다. 방의 크기는 4×4×2.5 m^3이며 다중 반사 및 산란환경을 위해 모든 벽은 완전도체(PEC)로 이루어져 있다. 에너지의 손실을 발생시키기 위하여 2×1 m^2 크기를 가진 9개의 열린 창문을 만들었다. 또한 PEC 원기둥을 넣어 복잡하고 불규칙한 전파환경(ray-chaotic environment)을 만든다. 만들어진 모델을 FDTD 기반 수치 해석 프로그램인 SEMCAD-X를 통해 시뮬레이션하였다.

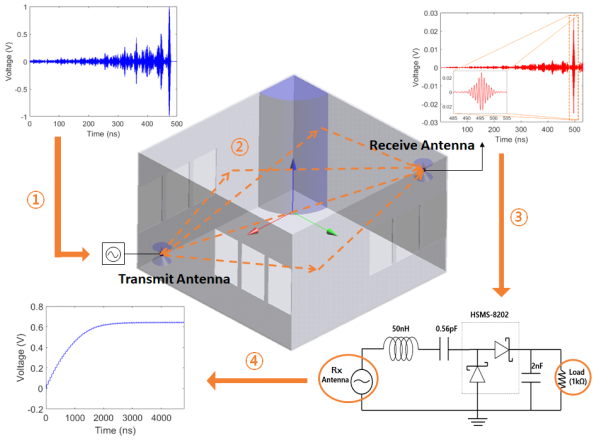
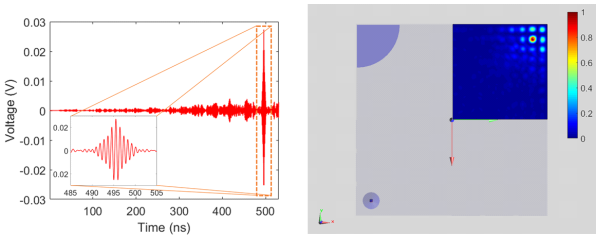


그림 2. 시뮬레이션 모델
Fig. 2. Simulation model.

2-3 시뮬레이션 결과

1 GHz의 중심주파수와 2 ns의 펄스폭을 갖는 가우시안 펄스를 사용하여 임펄스 응답을 500 ns 동안 구한 후, 이러한 500 ns 길이의 임펄스 응답을 시간역전시켜 얻어진 TR 신호를 사용하여 TR 과정을 시뮬레이션하였다. 그 결과, 원래의 신호와 같은 짧은 펄스가 한 시점(500 ns)에 복원된 것을 알 수 있다(그림 3(a)). 또한 수신 안테나가 위치한 xy평면에서 측정된 power의 분포가 수신 안테나의 위치에서 가장 크므로 공간상에서의 집속도 함께 일어남을 확인할 수 있다(그림 3(b)).

TR 신호가 아닌 CW를 보냈을 때의 peak 전력 수치를 비교함으로써 TR 기법의 peak 전력 전달 능력을 분석할 수 있다. 그림 4는 CW와 TR 신호를 보냈을 때 수신 지점



(a) (b)

그림 3. (a) 시간 역전에 의한 시간상에서의 전파 집속, (b) 시간 역전에 의한 공간상에서의 전파 집속

Fig. 3. (a) Temporal focusing via TR, (b) Spatial focusing via TR.

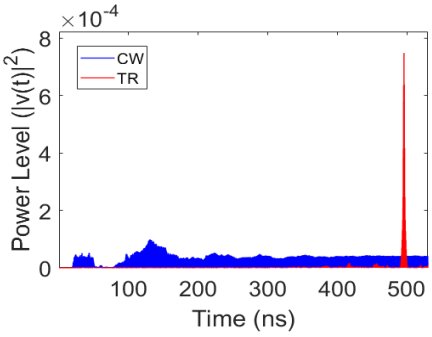


그림 4. CW와 시간 역전된 임펄스 응답을 전송했을 때의 power level $|v(t)|^2$ 비교

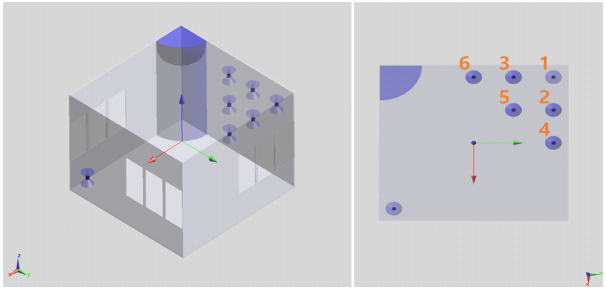
Fig. 4. Comparison of power level when CW and time reversal impulse response are transmitted.

에서 신호의 power level, 즉 $|v(t)|^2$을 보여준다. 송신 안테나에서 1 GHz의 주파수를 가진 CW를 TR 신호의 최대 진폭값과 동일한 크기로 전송했을 때는 전파가 집속되지 않는 것을 확인할 수 있다.

TR 기반 전파 집속은 수신 위치에 상관없이 이루어질 수 있다. 이를 확인하기 위해 xy 평면에서 0.85 m씩 이동시킨 5개의 서로 다른 수신 안테나 위치에서 TR 신호와 CW를 각각 전송하여 수신된 신호의 peak 값을 비교하였다(그림 5). 표 1은 각 위치에서 수신된 신호의 CW 대비 TR 신호의 peak 향상률(*PG*), 즉

$$PG = 10\log\left(\frac{\max|V_{TR}(t)|^2}{\max|V_{CW}(t)|^2}\right) \quad (2)$$

의 값을 나타낸다. 안테나의 위치에 따라 전파의 다중 경로가 바뀌므로 이에 따라 임펄스응답도 바뀌게 되어 결



(a) (b)

그림 5. (a) 공간상에서 서로 다른 안테나의 위치, (b) x, y 평면상에서 서로 다른 안테나의 위치

Fig. 5. (a) Location of different antennas in space, (b) Location of different antennas on the x, y plane.

표 1. 안테나 위치에 따른 PG 값

Table 1. Values of PG at various antenna positions.

Antenna No.	Peak gain(dB)
1	8.8
2	12.3
3	10.0
4	6.5
5	10.1
6	10.7

과적으로 TR에 의해 집속된 peak 값도 달라진다. 따라서 위치마다 *PG* 값이 서로 다르지만, 모든 위치에서 *PG*의 값이 적어도 6 dB, 많게는 12 dB 임을 알 수 있다. 그러므로 전력을 받는 위치에 상관없이 TR 신호를 전송하는 것이 CW를 전송하는 것에 비해 peak 전력을 전송하기에 보다 효과적임을 증명한다.

Ⅲ. RF to DC 정류 (Rectification)

3-1 Problem Setup

전파 집속에 이어 정류회로를 통해 수신된 RF 신호를 DC로 변환하는 과정을 시뮬레이션하였다. 그림 5와 같은 배전압 정류회로를 설계하여 CW 대비 TR 신호를 사용하였을 때 load에 전달되는 DC 전력의 크기를 비교하였다. 다이오드는 HSMS-8202 Schottky model을 사용하였다. 이전 과정에서 TR 신호를 송신 안테나에서 반복하여 보낼 때, 수신 안테나에는 500 ns마다 반복되는 펄스를 정류하게 된다. 하지만 본 논문에서는 효과적으로 peak가 정류되는 것을 보여주기 위해 60 ns마다 신호가 반복되는 경우를 시뮬레이션하였다. 임펄스 응답은 240 ns에서 충분히 감소하므로 240 ns의 임펄스응답과 4개의 송신안테나를 이용하면 60 ns마다 peak가 반복될 수 있다.

3-2 정류회로 시뮬레이션 결과

앞서 전파 시뮬레이션에서의 수신 안테나에서 획득한 TR 신호와 CW를 각각 정류회로(그림 6 box)에 통과시켜 DC로 변환된 전압을 측정하여 load(1 kΩ)에 전달된 전력을 계산하였다. 수신된 CW 신호의 peak 전력을 1 mW로 설정하였으며, TR 신호의 peak는 그보다 12 dB 높은 16 mW로 설정하였다. 이 때 load에 CW의 경우 약 17 mV, 그리고 TR의 경우 약 640 mV의 DC 전압이 전달됨을 확인하였다(그림 6).

그림 5의 그래프를 보면 처음에는 정류된 전압이 크게 변동하는 것을 볼 수 있는데, 이는 CW 신호가 다중경로 환경에서는 steady state에 도달하는 동안의 과도(transient) 응답이다. 따라서 더 이상 진폭이 변동하지 않는 steady state에서 안정적인 정류가 가능하다. 반면, TR 신호의 경우 집속된 숏펄스이므로 CW와는 다르게 DC 전압에 도달하는

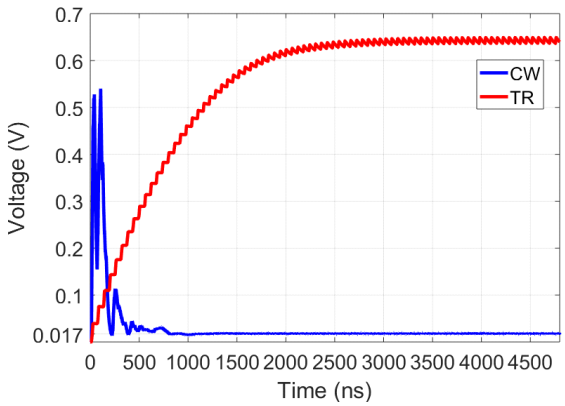


그림 6. 배전압 정류회로 모델 (box) 및 TR 신호와 CW 신호의 정류결과

Fig. 6. Voltage doubler rectifier (box) and rectified DC voltage from TR and CW signals.

것을 볼 수 있다.

Load에 전달된 DC 전력은

$$P_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{R_{LOAD}} \tag{3}$$

이므로 CW와 TR 각각 $P_{DC-CW} = 0.3\ \mu W$, $P_{DC-TR} = 410\ \mu W$임을 알 수 있다. 여기서 TR 신호가 월등히 높은 효율로 전력을 전송할 수 있음을 알 수 있다. 여기서 사용한 Schottky diode 의 potential barrier가 0.5 V이므로 수신된 CW 신호의 전압이 1 mW에 맞춘 0.3162 V임을 생각하면 potential barrier를 넘지 못해 제대로 정류가 이루어지지 못했지만, 이에 비해 TR 신호는 CW peak의 4배(12 dB)인 1.264 V의 peak를 가지므로 충분히 정류가 되는 경우이다. 또한 *PG*의 값이 12 dB 미만일 경우 효율이 더 작게 측정될 수 있지만, 본 논문에서 진행된 시뮬레이션을 통해 TR을 이용하면 그렇지 않은 경우보다 훨씬 효과적으로 무선전력전송이 가능함을 확인하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 실제 실내 환경과 유사한 전파환경 시뮬레이션을 통해 시간 역전(TR)을 기반으로 한 지능적 원거리 무선전력전송의 과정을 보여주었으며, TR을 사용했을 때 일반적인 협대역(CW) 신호에 비해 높은 효율로

DC 전력이 전달됨을 증명하였다. 본 연구를 바탕으로 실제 환경에서의 측정·분석을 통해 시간 역전 기술을 발전시킨다면 효과적인 지능적원거리 무선전력전송을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] 김성민, 문정익, 조인귀, 윤재훈, 변우진, "무선전력전송 기술동향과 발전방향," 전자통신동향분석, 29(3), pp. 98-106, 2014년 6월.

[2] D. L. Mascarenas, E. B. Flynn, M. D. Todd, T. G. Overly, K. M. Farinholt, and G. Park, et al., "Experimental studies of using wireless energy transmission for powering embedded sensor nodes," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, no. 12, pp. 2421-2433, Jun. 2010.

[3] X. Wang, S. Sha, J. He, L. Guo, and M. Lu, "Wireless power delivery to low-power mobile devices based on retro-reflective beamforming," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 919-922, May 2014.

[4] F. Cangialosi, T. Grover, P. Healey, T. Furman, A. Simon, and S. M. Anlage, "Time reversed electromagnetic wave propagation as a novel method of wireless power transfer," in *2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, Aveiro, Jun. 2016, pp. 1-4.

[5] S. K. Hong, V. M. Mendez, T. Koch, W. S. Wall, and S. M. Anlage, "Nonlinear electromagnetic time-reversal in an open semireverberant system," *Physical Review Applied*, vol. 2, no. 4, Oct. 2014.

[6] G. Lerosy, J. De Rosny, A. Tourin, A. Derode, G. Montaldo, and M. Fink, "Time reversal of electromagnetic waves," *Physical Review Letters*, vol. 92, no. 19, p. 193904, May 2004.

박 홍 수

2013 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 학사과정

[주 관심분야] 무선전력전송, 마이크로파 디바이스

홍 하 영

2015 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 학사과정

[주 관심분야] 무선전력전송, 레이다 및 센서

홍 순 기

2005년 5월: 미국 University of Maryland, ECE (공학사)

2008년 12월: 미국 Virginia Tech, ECE (공학석사)

2012년 12월: 미국 Virginia Tech, ECE (공학박사)

2008년 5월~2015년 10월: 미국 해군연구소 (NRL) 연구원

2015년 11월~2017년 2월: 미국 Rose-Hulman 공대 ECE 조교수

2017년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 조교수

[주 관심분야] 무선전력전송, 마이크로파 디바이스, 안테나, 레이다 및 센서