

## 소프트웨어 정의 라디오를 이용한 전이중 통신 시스템의 연구

김성환<sup>1</sup> · 이웅섭<sup>2</sup> · 류종열<sup>1</sup> · 반태원<sup>2\*</sup>

### Studying Full-duplex Communication System using Software-defined Radio

Seong Hwan Kim<sup>1</sup> · Wongsup Lee<sup>2</sup> · Jong Yeol Ryu<sup>1</sup> · Tae-Won Ban<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Information & Communications Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

<sup>2\*</sup>Associate Professor, Department of Information & Communications Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

#### 요 약

본 논문에서는 이동성이 전이중 라디오의 성능에 미치는 영향을 분석한다. 이를 위해 배터리로 전원 공급이 가능하여 이동환경에서 동작이 가능한 소프트웨어 정의 라디오를 사용하여 전이중 라디오 원형을 구현하였다. 또한 다중 안테나 기반 전이중 라디오와 서큘레이터 기반 전이중 라디오를 모두 고려하여 두 경우의 간섭 제거 성능을 비교하였다. 끝으로 이동성이 전이중 라디오 시스템의 자기간섭제거 성능에 부정적인 영향을 미침을 보이고, 자기간섭제거 필터의 갱신주기가 성능에 미치는 영향을 분석한다. 특히 갱신주기를 약 1000배 줄였을 때, 자기 간섭의 전력이 서큘레이터 기반 전이중 라디오는 5.7dB 두 안테나 기반 전이중 라디오는 3.1dB 감소하는 결과를 얻었다.

#### ABSTRACT

In this paper, we analyze the effect of mobility on the performance of full-duplex radio. For this, we implement a full-duplex radio prototype using a software-defined radio that is powered by a battery and can thus function in mobile environments. In addition, we compare the performance of self-interference cancellation schemes for two cases considering multi-antenna based full duplex radio and circulator based full duplex radio, respectively. Finally, we show a negative effect of mobility on the self-interference cancellation performance of the full-duplex radio system, and analyze the effect of the update period of the self-interference cancellation filter on the performance. In particular, when the update period is reduced by about 1000 times, the power of self-interference is reduced by 5.7dB for circulator-based full-duplex radio and 3.1dB for both antenna-based full-duplex radio.

**키워드** : 소프트웨어 정의 라디오, 전이중 라디오, 이동성, 자기간섭제거

**Key word** : software-defined radio, full-duplex radio, mobility, self-interference cancellation

Received 20 November 2019, Revised 21 November 2019, Accepted 26 November 2019

\*Corresponding Author Tae-Won Ban (E-mail:twban@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9177)

Associate Professor, Department of Information & Communications Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.2.290>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

전이중 (full-duplex) 라디오는 하나의 통신기기가 송신과 수신을 동일한 대역에서 동시에 수행하는 통신 기술로 그렇지 않은 반이중 (half-duplex) 라디오에 비하여 이론적으로 두 배의 주파수 효율을 얻을 수 있다 [1,2]. 그러나 전이중 라디오는 자신이 송신한 신호를 간섭으로 수신함으로 인해, 다른 송신기에서 수신한 신호의 전력에 비해 자기간섭의 전력이 수십 dB에서 많게는 100dB 이상 크다. 따라서 두 배의 주파수 효율 이득에 근접하기 위해서는 자기간섭 (self-interference) 신호의 전력을 잡음의 전력 수준까지 줄여야 한다. 예를 들어, 무선랜의 경우 송신신호전력이 약 20dBm이고, 잡음의 전력이 약 -90dBm 일때, 자기간섭을 110 dB 줄여야 한다.

현재까지 전이중 라디오 시스템의 원형이 다수 제작되었고 비록 제한된 실험 환경에서 두 배의 주파수 효율에 가까운 성능을 달성할 수 있음이 확인되었다. 논문 [2]에서는 WiFi 802.11ac 물리계층 표준을 고려하였으며 반이중 라디오 시스템과 같이 단일 안테나를 사용하는 조건에서 전이중 라디오 원형을 구현하였다. 이 논문에서 구현한 원형은 단일 안테나에 서큘레이터를 연결하여 자기간섭을 약 15dB 줄였으며, 수신쪽 LNA (low noise amplifier) 이전에 아날로그 신호 영역에서 자기간섭 제거를 수행하여 자기간섭을 추가로 45dB 줄였고, ADC (analog-to-digital convertor) 이후에 디지털 신호 영역에서 한 번 더 자기간섭 제거를 수행하여 추가로 50dB를 줄였다. 결과적으로 자기간섭을 잡음 수준으로 줄였으며, 실내 환경에서 실제로 두 배에 가까운 수율 이득을 얻었다. 논문 [3]에서는 반이중 통신 방식의 SDR (software defined radio) 장비 두 대를 이용하여 전이중 통신 시스템 원형을 구현하였다. 이 논문의 원형은 디지털 영역에서만 자기간섭을 제거하여 자기간섭을 27dB 줄였다. 또한 500kHz 대역에서 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing)을 고려하여 4m 떨어진 거리에서  $10^{-5}$ 의 비트오류율을 달성하였다. 논문 [4]에서는 두 개의 RF (radio frequency) 채널을 갖고 있는 하나의 SDR 장비를 이용하여 전이중 라디오를 구현하였다. 이 원형 역시 디지털 영역에서만 자기간섭을 제거하였고 20MHz 대역에서 34dB의 제거성능을 달성하였다. 또한 두 라디오 장비가 0.5m 떨어진 상태에서  $2.6 \times 10^{-5}$ 의 비트오류율을 달성하였다. 그러나 이 논문들은 전이

중 라디오 원형의 위치가 고정인 상태에서 실험을 진행하였으며 이동 중인 상황에서의 성능은 평가되지 않았다.

전이중 라디오의 수신기가 받는 자기간섭은 회로를 따라 수신측으로 흘러들어가는 회로간섭과, 안테나에서 퍼져나간 전자기파가 주변의 반사체에 부딪힌 후 되돌아오는 반사간섭으로 나눌 수 있다. 전이중 라디오가 이동할 경우 회로간섭은 변하지 않지만, 반사 간섭은 변한다. 만약 자기간섭제거 필터를 초기에 한 번만 최적화 시켜준 상태에서 전이중 라디오가 이동한다면, 반사간섭의 변화로 간섭 제거 성능이 저하될 우려가 있다. 따라서 전이중 라디오의 이동성이 간섭제거 성능에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

논문 [5]에서는 전이중 라디오 시스템이 차량에 부착되었다고 가정하고 이를 위한 물리계층, 다중접속계층의 프로토콜을 제안한 후 이론적인 모델을 사용하여 제안 프로토콜의 성능을 분석하였다. 논문 [6]에서는 전이중 라디오를 IEEE 802.11 이동체 표준에 고려하여 패킷 충돌 검출에 활용하였고 컴퓨터 시뮬레이션으로 성능을 검증하였다. 그러나 저자가 조사한 바에 의하면 현재까지 이동성이 전이중 라디오의 성능에 미치는 영향을 실제 원형을 사용하여 진행한 연구는 없었다.

본 논문이 기여하는 바는 다음과 같다. 첫째, 배터리로 전원 공급이 가능하여 이동환경에서 실험이 가능한 SDR을 사용하여 전이중 라디오의 원형을 구현하였다. 둘째, 다중안테나 기반 전이중 라디오와 서큘레이터 기반 전이중 라디오를 모두 고려하여 두 경우의 성능을 비교하였다. 셋째, 이동성이 전이중 라디오 시스템의 자기간섭제거 성능에 부정적인 영향을 미침을 보였고, 걷기 속도의 이동상황에서 자기간섭제거 필터의 갱신주기가 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

## II. 전이중 라디오 시스템

두 안테나 기반 전이중 시스템과 서큘레이터 기반 전이중 라디오 시스템을 본 논문에서 고려한다. 전이중 라디오의 자기간섭 제거 성능을 전이중라디오의 성능이라고 보며, 수신한 신호의 디코딩 성능은 측정하지 않았다.

### 2.1. 두 안테나 기반 시스템

두 안테나 기반 시스템에서는 RF 채널이 두 개 존재

하여 송신측 RF 채널에 송신 안테나가 연결되고 수신측 RF 채널에 수신 안테나가 연결된다. 송신 안테나에서 전송된 신호는 수신 안테나로 입력되어 간섭을 일으킨다. 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 거리가 멀어질수록 간섭의 세기는 약해지지만 실제 통신 기기에서는 두 안테나의 이격거리가 수 cm 이내로 제한되어야 할 것이다. 본 연구에서는 안테나 간 이격거리는 일반 스마트폰의 너비와 유사한 4cm로 한다. 그림 1 은 두 개의 안테나를 사용한 전이중 라디오의 원형을 보여준다.

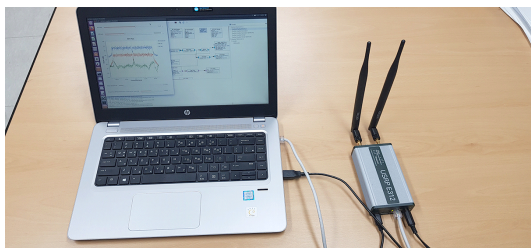


Fig. 1 Two-antenna based full duplex radio prototype

### 2.2. 단일 안테나 시스템

서큘레이터는 세 개 혹은 네 개의 입출력 포트가 이루어져 있으며, 한 방향으로만 감쇄 없이 신호가 전달된다. 예를 들어 서큘레이터의 1번 포트의 입력 신호는 오른쪽에 있는 2번 포트로는 잘 전달되나, 왼쪽에 있는 3번 포트로는 크게 감쇄된 신호가 전달된다. 또한 2번 포트의 입력신호는 3번 포트로는 잘 전달되나 1번 포트로는 미미한 양만 전달된다. 따라서 RF 채널의 송신 포트를 1번 포트에, 안테나를 2번 포트에, 그리고 3번 포트를 RF 체인의 수신 포트에 연결 시키면 송신신호는 안테나를 통해 잘 출력되지만 수신 포트로는 크게 감쇄된다. 그림 2 는 서큘레이터를 사용한 단일 안테나 시스템을 보여준다. 논문 [1]에서 사용된 서큘레이터는 입력신호가 약 15dB 정도 감쇄되어 전달되었다.

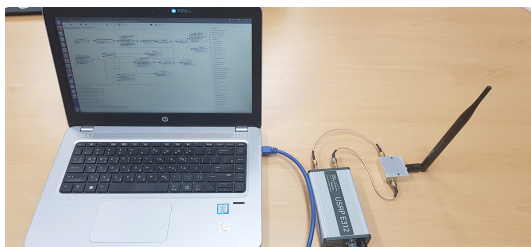


Fig. 2 Circulator-based full duplex system

### III. 간섭 제거 기법

본 연구에서는 디지털 영역에서 간섭 제거를 수행한다. 기저대역 간섭 제거기법으로 위너 필터를 사용한다 [7]. 위너 필터의 구조는 그림 3과 같다.  $y[n], s[n], x[n], e[n]$  은 각각 수신 신호, 송신 신호, 추정 수신 신호, 에러 신호를 나타낸다. 위너 필터는  $E[|e[n]|^2]$  를 최소화 하는  $\{a_0, a_1, \dots, a_K\}$  를 구한다.  $\{a_0, a_1, \dots, a_K\}$  의 값은 아래의 방정식을 풀어서 얻을 수 있다 [7].

$$\begin{bmatrix} R_s[0] & R_s[1] & \dots & R_s[K] \\ R_s[1] & R_s[0] & \dots & R_s[K-1] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_s[K] & R_s[K-1] & \dots & R_s[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ys}[0] \\ R_{ys}[1] \\ \vdots \\ R_{ys}[K] \end{bmatrix},$$

여기서

$$R_s[k] = E[s[n]s^*[n+k]],$$

$$R_{ys}[k] = E[s[n]y^*[n+k]].$$

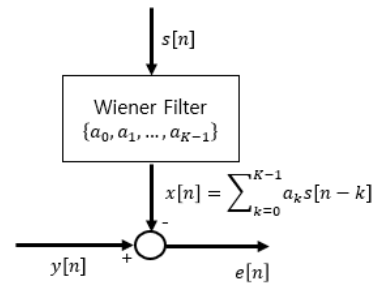


Fig. 3 Wiener filter structure for cancelling self-interference

### IV. 실험 결과

전이중 라디오의 성능을 측정하기 위한 실험에는 OFDM (orthogonal frequency division multiplex) 시스템으로 파일을 전송한다. 시스템 변수는 표 1에 정리하였다. SDR 장비는 Ettus 사의 USRP E312를 사용한다. E312는 배터리로 운용되어 이동 가능하며 2 채널을 지원하여 2x2 다중입출력안테나 시스템에 활용 가능하다. 실험에서는 디지털 영역에서만 자기간섭 제거를 수행하며, 이를 위한 위너 필터의 변수 개수는 6개 ( $K=5$ )로 한다. SDR 장비에서 측정된 복소 기저대역 신호의 표본을 호스트 컴퓨터로 전송하며, 호스트 컴퓨터에서

는 오픈소스 소프트웨어인 GNURADIO 라이브러리와 자체 제작한 위너필터 블록을 활용하여 자기간섭 제거를 수행한다.

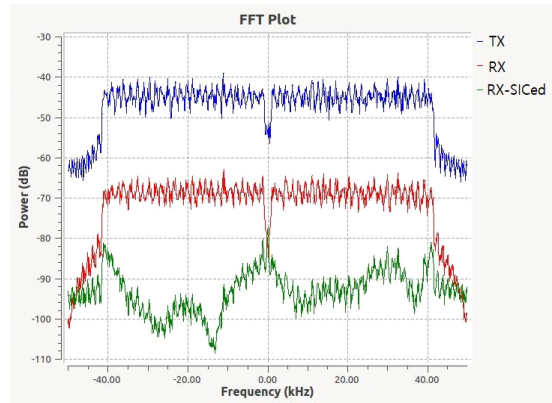
Table. 1 System parameters

System parameters	Value
Carrier frequency	900 MHz
Sampling rate	100 ksps
Bandwidth	100 kHz
Number of Subcarrier	64
Number of subcarriers allocated to data	48
Number of samples in cyclic prefix	16
Payload size in one OFDM frame	192 bytes

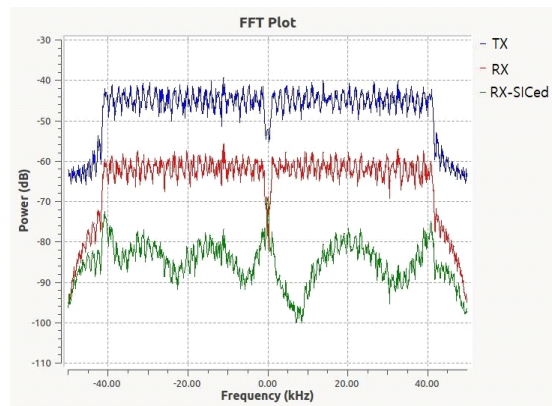
4.1. 전력스펙트럼밀도를 이용한 자기간섭제거 성능 평가

그림 4는 송신신호, 수신신호, 디지털 자기간섭제거 후 잔여 간섭 (residual interference)의 전력스펙트럼밀도를 보여준다. 이 중 그림 4 (a)는 서큘레이터 기반의 전이중라디오 시스템의 결과이며 그림 4 (b)는 두 안테나 기반의 전이중라디오 시스템의 결과이다. 그림 4는 특정 순간에 측정된 전력스펙트럼밀도이므로, 각 신호의 평균 전력을 계산하여 성능을 분석하고자 한다. 참고로 GNURADIO에서 다루어지는 신호의 전력은 실제 전력과 다르며 GNURADIO에서 표현된 신호의 값이 항상  $e^{j\theta}$ 인 경우 전력이 0 dB가 되어 이를 기준으로 상대적인 신호의 세기가 측정된다.

송신 신호의 평균 전력은 -9dB로 맞추었다. 서큘레이터 기반 전이중 라디오를 약 50초간 고정시킨 상태에서 측정된 수신신호의 전력은 -33.2dB 였고, 잔여 간섭의 전력은 -54.3dB 였다. 즉, 위너필터를 통하여 21.1dB의 간섭을 줄였다. 두 안테나 기반 전이중 라디오를 약 50초간 고정시킨 상태에서 측정된 수신신호 전력은 -26.3dB 였고 잔여 간섭의 전력은 -47.7dB 였다. 즉 위너필터를 통하여 21.4dB의 간섭을 줄였다. 또한 서큘레이터 기반 전이중 라디오가 두 안테나 기반 전이중 라디오 보다 잔여 간섭의 전력이 6.6dB 더 낮았다.



(a) Circulator based system

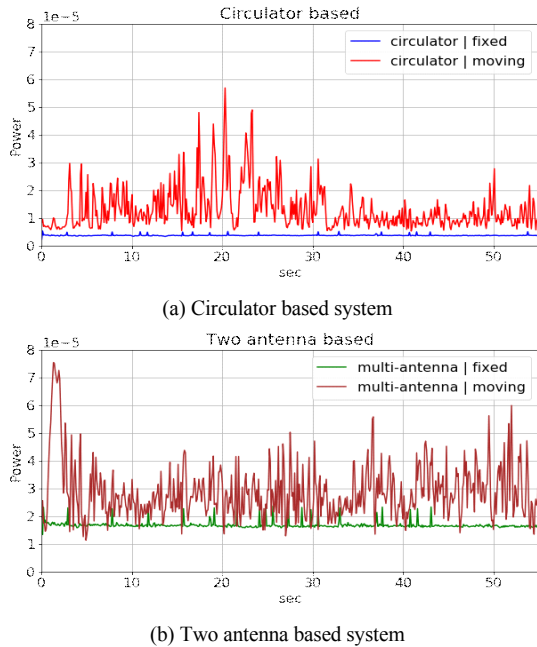


(b) Two-antenna based system

Fig. 4 Power spectral density of transmitted, received, and residual signals.

4.2. 이동성이 간섭제거 성능에 미치는 영향

그림 5는 서큘레이터 기반 전이중라디오 시스템과 두 안테나 기반 전이중라디오 시스템의 잔여간섭신호의 시간에 따른 전력을 나타내며, 라디오가 고정일 때와 걷는 속도 (약 1.5 m/s)로 이동할 때를 고려하였다. 전력 계산에 쓰인 윈도우 길이는 10,000 샘플이며, 0.1초마다 평균전력 값을 산출한다. 이렇게 하는 이유는 OFDM에 내재하는 큰 PAPR (peak to average ratio)의 효과를 제거하기 위함이다. 그림을 통해, 서큘레이터 기반 시스템이 고정일 때는 일정한 전력을 유지하는 경향을 보이며, 이동할 경우 전력 값이 크게 출렁이는 것을 볼 수 있다. 두 안테나 기반 시스템도 유사한 경향을 보여준다. 표 2에서는 시간에 따른 변화량을 정량적으로 판단하기 위해 잔여신호 전력의 표준편차를 계산한다.



**Fig. 5** The moving average-power of residual signals of circulator-based and two-antenna-based full duplex systems while terminals are fixed or moving

표 2에 나타난 바와 같이 서큘레이터 기반 시스템이 고정위치에 있을 때 표준편차가 가장 작으며, 이 시스템이 이동할 경우 표준편차가 약 28배 증가함을 알 수 있다. 다중안테나 기반 시스템은 고정인 상황에서 서큘레이터 기반 시스템에 비해 표준편차가 약 5배 이상 나는 것을 알 수 있으며, 이동 상황에서는 비슷한 표준편차값을 갖는 것을 알 수 있다.

**Table. 2** The standard deviation of moving average power of residual signals for various schemes.

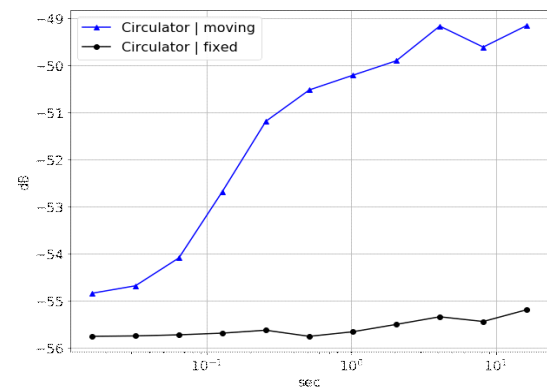
Schemes	standard dev.
Circulator   fixed	$2.62 \times 10^{-7}$
Circulator   moving	$7.46 \times 10^{-6}$
Multi-antenna   fixed	$1.27 \times 10^{-6}$
Multi-antenna   moving	$9.54 \times 10^{-6}$

### 4.3. 필터 파라미터의 업데이트 주기

그림 5를 얻은 실험에서는 전송 시작 시점에만 필터의 파라미터를 구한 후 파라미터를 갱신하지 않았다. 만약 주기적으로 필터의 파라미터를 갱신할 경우 성능이

얼마나 개선되는지를 알아보고자 한다. 이를 위해 SDR로부터 측정된 수신신호를 저장한 후 컴퓨터상에서 주기적으로 필터를 갱신하면서 간섭을 제거하는 시뮬레이션을 수행하였다. 필터의 파라미터 값을 구하는데에는 1600 샘플을 사용하였다. 그 이유는 하나의 OFDM 프레임이 1600 샘플로 이루어져 있기 때문이다. 샘플간 간격이  $10^{-5}$  초 이므로 가장 빠른 갱신 주기는 0.016 초이며,  $2^n, n = \{1, 2, \dots, 10\}$  배로 증가시키면서 잔여신호의 전력을 계산한다.

그림 6은 서큘레이터 기반 시스템의 갱신 주기에 따른 잔여신호의 전력을 나타내며 그림 7은 두 안테나 기반 시스템에 대한 같은 성능을 나타낸다. 먼저 고정상황일 때와 이동상황일 때의 잔여신호전력의 차이는 갱신 주기가 16.4초일 때 서큘레이터 기반 시스템은 6.7 dB, 두 안테나 기반 시스템은 2.9dB 였으며, 갱신주기가 0.016초일 때 서큘레이터 기반 시스템은 0.9 dB, 두 안테나 기반 시스템 역시 0.9dB 였다. 또한 라디오의 위치가 고정 상황일 때에는 갱신 주기에 따른 잔여신호의 전력 변화가 작음을 알 수 있다. 그러나 서큘레이터 기반 시스템이 이동하는 경우 갱신 주기가 최소일 때와 최대일 때 전력의 차이가 약 5.7 dB이며, 두 안테나 기반 시스템이 이동하는 경우 약 3.1 dB인 것으로 나타났다. 즉 이동하는 상황에서 필터 파라미터의 갱신주기가 간섭제거 성능에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그림 6과 7에 따르면, 최소 주기일 때의 잔여간섭전력보다 1dB 이하로 증가하는 정도까지 허용하려면, 서큘레이터 기반 시스템의 경우 0.064 초 마다 필터를 갱신 하여야 하며, 두 안테나 시스템의 경우 0.128 초 마다 필터를 갱신하여야 한다.



**Fig. 6** The power of residual signal for varying update period of circulator-based system.



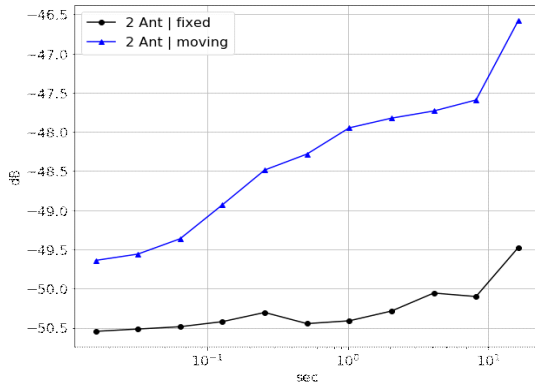


Fig. 7 The power of residual signal for varying update period of ciculator-based system.

## V. 결론

본 논문에서는 배터리로 전원 공급이 가능하여 이동 환경에서 실험이 가능한 소프트웨어 정의 라디오를 사용하여 전이중 라디오를 구현하였다. 또한 다중안테나 기반 전이중 라디오와 서클레이터기반 전이중 라디오를 모두 고려하여 두 경우의 성능을 비교하였다. 특히 이동성이 전이중 라디오 시스템의 자기간섭제거 성능에 부정적인 영향을 미침을 보였다. 예를 들어, 서클레이터 기반 시스템에서 간섭제거 필터 파라미터의 갱신 주기가 16.4초일 때, 고정상황보다 이동상황에서 잔여 신호전력이 6.7dB 컸다. 또한 이동상황에서 자기간섭제거 필터의 갱신주기가 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 한 예로, 서클레이터 기반 시스템의 이동상황에서 갱신 주기가 0.016초 일 때보다 16.4초일 때 잔여신호전력이 5.7dB 컸다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the fund of research promotion program, Gyeongsang National University, 2016

## REFERENCES

- [ 1 ] N. V. Shende, O. Gurbuz, and E. Erkip, "Half-Duplex or Full-Duplex Communications: Degrees of Freedom Analysis Under Self-Interference," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 1081-1093, Feb. 2018.
- [ 2 ] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full Duplex Radios," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM*, Aug. 2014.
- [ 3 ] W. Zhou, G. Villemaud, and T. Risset, "Full Duplex Prototype of OFDM on GNUradio and USRPs," in *Proceeding of 2014 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Jun. 2014.
- [ 4 ] H. Park, J. Yoon, and Y. Kim, "In-Band Full-Duplex Wireless Communication Using USRP," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.30, no.3, pp. 229-235, Mar. 2019.
- [ 5 ] C. Campolo, A. Molinaro, A. O. Berthet, and A. Vinel, "Full-Duplex Radios for Vehicular Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 182-189, Jun. 2017.
- [ 6 ] A. Bazzi, C. Campolo, B. M. Masini, A. Molinaro, A. Zanella, and A. O. Berthet, "Enhancing Cooperative Driving in IEEE 802.11 Vehicular Networks Through Full-Duplex Radios," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 2402-2416, Apr. 2018.
- [ 7 ] R. G. Brown, and P. Y. C. Hwang, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering," John Wiley & Sons, Inc. 4<sup>th</sup> ed. 2012.



**김성환(Seong Hwan Kim)**

2006년 8월 고려대학교 전기전자전파공학부 학사  
2008년 8월 KAIST 전자전산학과 석사  
2013년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사  
2013년 8월~2016년 2월 맥길대학교 박사후 연구원  
2016년 3월~ 국립경상대학교 정보통신공학과 조교수  
※관심분야: 차세대 이동통신 시스템, 사물인터넷 보안, 인공지능



**이용섭(Woongsup Lee)**

2006년 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사  
2011년 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사  
2012년 2월~2013년 2월 한국과학기술원 박사후 연구원  
2013년 2월~2014년 2월 독일 FAU 박사후 연구원  
2014년 3월~ 2018년 2월 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
2018년 3월~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 부교수  
※관심분야: 차세대 이동통신 시스템, 인지 라디오 시스템, 스마트 그리드, 빅 데이터 분석, 딥러닝



**류종열(Jong Yeol Ryu)**

2008년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 학사  
2010년 2월 KAIST 전기및전자공학과 석사  
2014년 2월 KAIST 전기및전자공학과 박사  
2014년 4월~2016년 8월 싱가포르기술디자인대학교 박사후 연구원  
2016년 9월~국립경상대학교 정보통신공학과 조교수  
※관심분야: 보안 통신 시스템, 차세대 이동통신 시스템, 사용자 릴레이 통신 등



**반태원(Tae-Won Ban)**

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사  
2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사  
2010년 2월 KAIST 전기및전자공학 박사  
2009년 6월~2010년 10월 KT 연구 엔지니어  
2011년 2월~2012년 8월 KT Project Manager  
2012년 9월~2016년 8월 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
2016년 9월~현재 경상대학교 정보통신공학과 부교수  
※관심분야: 차세대 이동통신, 무선 자원 관리, Cognitive Radios, Relay Systems, OFDM/MIMO