

도플러 주파수 관찰을 위한 무선 신호의 주파수 영역 해상도 향상

홍예린* · 오혁준

Improving the frequency domain resolution of Wireless signal for observing the Doppler frequency

Yerin Hong* · Hyukjun Oh

Department of Electronics and Communication Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

요 약

사용자 데이터뿐만 아니라 무선 신호에 담긴 물체 혹은 사람에 대한 물리적인 정보를 알아내기 위한 활발한 연구가 진행 중이다. RSSI, 도플러 주파수 등 무선 신호에서 얻을 수 있는 값들을 이용하여 물리적인 정보를 알아낼 수 있다. 예를 들어, 통신을 위해 사용되는 무선 신호에는 물리적으로 이동하는 물체에 의해 도플러 주파수가 발생한다. 도플러 주파수를 분석하면 물체의 이동 속도와 방향을 예측할 수 있다. 본 논문에서는 무선 신호로 802.11a 신호를 사용하고 무선 신호에서 움직이는 물체 혹은 사람을 알아내기 위한 선행 연구를 진행하였다. 움직임에 의해 발생하는 도플러 주파수를 관찰하여 움직임에 대한 정보를 알아내고자 802.11a 수신기의 주파수 영역 해상도를 향상시키는 방법을 소개하고 검증한다.

ABSTRACT

There are many research to find not only user data but also physical information about objects or human in radio signals. And we can obtain physical information from the wireless signals such as RSSI (Received Signal Strength Indicator), Doppler frequency and other values. For example, the Doppler frequency is generated by the object moving physically in wireless signals used for communication. By analyzing the Doppler frequency, the moving speed and direction of the object can be predicted. In this paper, we study the previous research which is to detect the moving objects or human using wireless signals, 802.11a signals. We introduce and verify the method to improve the frequency domain resolution of commercial 802.11a receivers to observe the doppler frequency and obtain the information of the moving objects or human.

키워드 : 802.11a 송수신기, USRP, GNU Radio, 도플러 주파수, FFT, 해상도 향상

Key word : 802.11a Transceiver, USRP, GNU Radio, Doppler frequency, FFT, resolution improvement

Received 10 september 2017, Revised 19 september 2017, Accepted 09 October 2017

* Corresponding Author Yerin Hong(E-mail:yerin0927@kw.ac.kr, Tel:+82-2-940-5132)

Department of Electronics and Communication Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.12.2270>

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

5 세대 이동통신에 대한 논의가 진행되면서, 사물인터넷 서비스의 확산으로 인해 무선 신호의 사용이 늘어나고 있다[1, 2]. 무선 신호에 담겨있는 사용자 데이터 정보 외에 생체 신호, 물체의 움직임 등을 알아내고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[3, 4]. 이러한 연구의 대표적인 예로는, 무선 신호로 Wi-Fi 신호를 사용한 Wi-Vi [5], WiKey [6], WiGest [7] 등이 있다.

Wi-Vi는 벽 뒤의 사람의 존재 유무와 인원수를 판별하기 위해 개발되었다. 이 기술은 벽에 의해 발생되어 발생하는 반사 전파를 없애기 위해 안테나에서 널링 기술을 사용하고 물체를 트래킹하기 위하여 ISAR 레이더의 트래킹 기술을 사용하였다. 따라서 움직이지 않는 물체의 인식은 불가능하다는 단점이 있다.

WiKey는 Wi-Fi 무선 신호를 입력 시스템으로 사용하기 위한 키보드 인식 시스템으로 무선 채널의 상태 변화를 이용하여 키보드 입력을 추정한다. MIMO 송수신 안테나의 입력으로 채널 상태를 추정하여 CSI 값을 계산한다. 여기서 CSI 값은 Wi-Fi 송신기에서 보내는 ICMP 핑 패킷으로 측정된다. 이 값의 변화를 DTW (Dynamic Time Warping) 알고리즘을 이용하여 현재의 입력 키를 추정한다.

WiGest는 Wi-Fi 신호에 기반한 손 제스처 인식 시스템으로 Wi-Fi 신호에 기반한 손 제스처 인식 시스템으로 Wi-Fi 장비의 어플리케이션을 제어하기 위해 개발되었다. WiGest는 모바일 디바이스에서 수신되는 무선 신호 세기의 변화를 이용하여 손의 움직임을 인식한다. 상용 디바이스에서 무선 신호 세기인 RSSI 정보를 제공하므로 추가적인 송수신기의 구현이 필요하지 않지만 RSSI 값의 변화를 방향, 장애물, 전파 방해 등에 매우 민감하여 안정적으로 인식이 어렵다는 단점이 있다.

위 예시들은 기존의 Wi-Fi 송수신기를 변형하지 않고 물체의 움직임을 알아내고자 하는 시도를 하였다. 하지만 위의 연구들은 물체 움직임 인식에 대하여 불안정한 결과를 보인다. 본 논문은 도플러 천이를 이용한 레이더의 물체 인식 방법에서 착안하여 Wi-Fi 무선 신호에서 도플러 주파수를 관찰 방법에 대한 연구를 진행하였다. 본 논문에서는, 먼저 802.11a Wi-Fi 송수신기의 구조를 서술하고 물체의 움직임으로 인한

Wi-Fi 신호의 도플러 천이는 매우 작기 때문에 이를 관찰하기 위한 주파수 영역 해상도 향상 방법을 제안하고 서술한다.

II. 802.11a 송수신기

본 논문에서는 도플러 주파수를 최대화 하기 위하여 5GHz 대역의 802.11a 송수신기 구조를 활용하였다. 802.11a의 송수신기 구조는 그림 1과 그림 2와 같다. 본 절에서는 802.11a 물리 층의 구조를 표준 문서[8]에 따라 간략하게 서술한다.

2.1. 스크램블러/디스크램블러

$$S(x) = x^7 + x^4 + 1 \quad (1)$$

스크램블러는 같은 2진 데이터가 반복되거나 일정한 패턴을 띠는 것과 같은 현상을 방지하고 2진 데이터의 랜덤성을 보장하기 위하여 사용된다. 802.11a의 스크램블러의 구조는 그림 3과 같고 생성 다항식은 식 (1)과 같다.

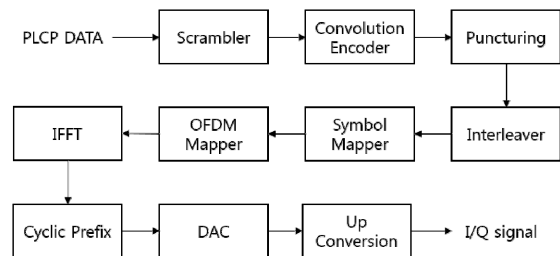


Fig. 1 802.11a Tx physical layer architecture

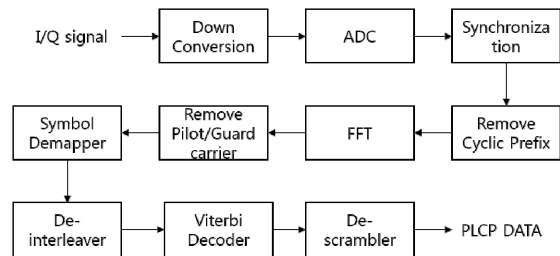


Fig. 2 802.11a Rx physical layer architecture

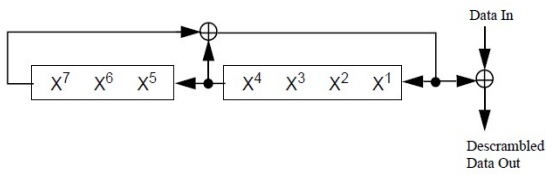


Fig. 3 Scrambler architecture

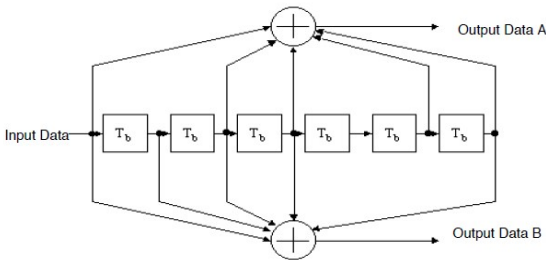


Fig. 4 Convolution encoder

스크램블된 코드를 복호화 하기 위해서 디스크램블러에서는 스크램블러와 같은 연산을 수행한다.

2.2. 컨볼루션 부호기/비터비 복호기

$$G_0(x) = x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1 \quad (2)$$

$$G_1(x) = x^6 + x^3 + x^2 + x^1 + 1 \quad (3)$$

컨볼루션 부호기는 메모리를 갖는 컨볼루션 부호화를 사용하는 부호기로서 현재 블록에만 의존하지 않고 이전의 블록과 함께 부호화한다. 일반적인 블록 부호화에 비해 에러 정정 효과가 뛰어나고 랜덤 에러에 강한 특성을 지닌다. 802.11a의 컨볼루션 부호기 구조는 그림 4와 같고 생성 다항식은 식 (2), (3)과 같고 부호화율은 1/2이다.

부호화된 데이터를 복호화하기 위해 수신단에서는 비터비 복호기를 사용한다. 이때 비터비 복호기는 트렐리스 다이어그램으로 수행 가능한 여러 경로를 탐색하고 수신 비트열과 해밍 거리가 최소인 경로를 선택하여 복호한다. 비터비 복호 방법은 하드웨어 복잡도가 크지만 복호 성능이 뛰어나고 동작 속도가 빨라 무선 통신에서의 에러 정정의 용도 외에 머신러닝 등의 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

2.3. 인터리버/디인터리버

$$i = (NCBPS/16) \times (k \bmod 16) + \text{floor}(k/16) \quad (4)$$

$$k = 0, 1, \dots, NCBPS - 1$$

$$j = s \times \text{floor}(k/16) + (i + NCBPS - \text{floor}(16 \times i / NCBPS)) \bmod s \quad (5)$$

$$i = 0, 1, \dots, NCBPS - 1$$

$$s = \max(NCBPS/2, 1)$$

인터리버는 비터비 디코더의 효과적인 수행을 위해 버스트 에러가 발생되기 쉬운 무선 채널에서 버스트 에러를 랜덤 에러로 바꿔주는 역할을 한다. 802.11a 인터리버는 총 두 개의 순열을 사용하여 수행한다. 먼저 첫 번째 순열 (4)를 이용하여 인접한 서브 캐리어를 분산시켜주고 두 번째 순열 (5)를 이용하여 연산을 수행해 최하위 비트가 장기적으로 배열되는 것을 방지한다.

III. 주파수 영역 해상도 향상 연구

움직이는 물체 혹은 사람에 의해 무선 신호 주파수의 왜곡이 발생하고 이는 속도와 방향에 따라 달라진다. 이때 발생하는 왜곡을 도플러 현상이라고 하고 주파수의 변화량을 도플러 주파수라고 한다. 도플러 주파수는 무선 신호의 캐리어 주파수와 움직이는 물체 혹은 사람의 속도에 비례한다. 도플러 주파수의 일반적인 식은 (6)과 같이 나타낸다.

$$\Delta f \propto \frac{2v \cos(\theta)}{c} f \quad (6)$$

20MHz 대역폭의 Wi-Fi 채널에서 64개의 각 서브 캐리어는 312.5 KHz이다. 캐리어 주파수가 5 GHz인 802.11a Wi-Fi 시스템에서 물체 혹은 사람이 약 0.5 m/sec의 속도로 움직일 때, 도플러 주파수는 최대 약 17 Hz로 발생한다. 이 도플러 주파수를 관찰하여 물체 혹은 사람의 움직임을 인식하기에는 너무 작은 값을 가진다. 따라서 17 Hz의 도플러 주파수를 관찰하기 위해서는 주파수 영역의 해상도를 향상시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 주파수 영역의 해상도 향상을 위해 반복하는 데이터를 이용해 FFT 윈도우 크기를 늘려 해상도를 높이는 연구를 진행하였다.

일반적인 N사이즈 FFT 식은 (7)와 같다.

$$X_n = \sum_{k=1}^N x_k e^{-i2\pi kn/N} \quad (7)$$

수신기에 동일한 데이터가 반복하여 두 번 들어온다고 가정할 때 2N 사이즈 FFT 식은 다음과 같다.

$$X_n = \sum_{k=1}^N x_k e^{-i2\pi kn/2N} + \sum_{k=N+1}^{2N} x_k e^{-i2\pi kn/2N} \quad (8)$$

$$X_n = \sum_{k=1}^N x_k e^{-i2\pi kn/2N} + \sum_{k=1}^N x_k e^{-i2\pi(k+N)n/2N} \quad (9)$$

$$X_n = \sum_{k=1}^N x_k e^{-i2\pi kn/2N} (1 + e^{-i\pi n}) \quad (10)$$

$$X_{2l} = 2 \sum_{k=1}^N x_k e^{-i2\pi kn/2N}, X_{2l+1} = 0 \quad (11)$$

식 (11)에서 볼 수 있듯이 동일한 두 개의 데이터에 대한 2N FFT를 수행하면 홀수의 서브 캐리어는 0이 되고 짝수의 서브 캐리어에만 유효한 데이터가 존재하게 된다. 동일한 데이터의 반복을 M으로 표현하고 일반화하여 나타내면 유효한 데이터는 M*N번째의 서브 캐리어에만 존재하고 나머지 서브 캐리어의 값은 0으로 존

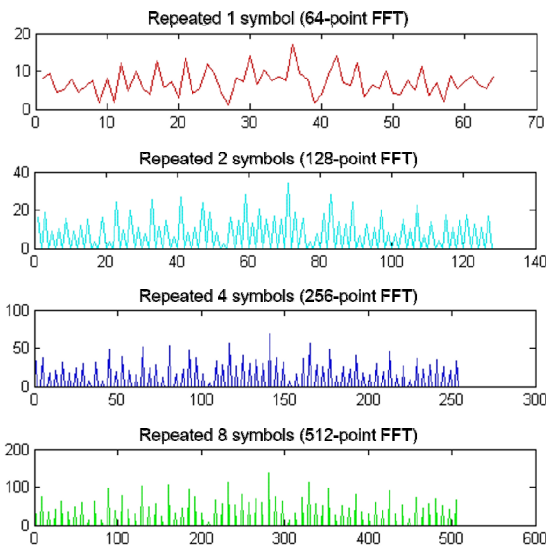


Fig. 5 Large FFT MATLAB simulation

$$\begin{aligned} & \underbrace{X_1^1 X_2^1 \dots X_n^1}_{1^{st} \text{ OFDM symbol}} \underbrace{X_1^2 X_2^2 \dots X_n^2}_{2^{nd} \text{ OFDM symbol}} \dots \underbrace{X_1^i X_2^i \dots X_n^i}_{i^{th} \text{ OFDM symbol}} \times \frac{X_n^1}{X_n^i} \\ & = X_1^1 X_2^1 \dots X_n^1 X_1^1 X_2^1 \dots X_n^1 \dots X_1^1 X_2^1 \dots X_n^1 \end{aligned}$$

Fig. 6 Data equalizing

재한다. 그림 5는 반복되는 데이터의 개수에 따른 FFT 수행 후, 주파수 영역 스펙트럼의 향상된 해상도를 매트랩 시뮬레이션으로 확인한 결과이다.

하지만 실제 수신기는 항상 반복되는 데이터를 수신하지 않는다. 따라서 수신되는 데이터를 인위적으로 반복되도록 할 필요가 있다. 데이터를 인위적으로 반복되게 하기 위해서 수신기는 복조 과정을 통해 원래의 데이터를 알아내고 다시 부호화 과정을 수행하여 송신기에서 송신한 데이터를 알아낸다. 그리고 수신기에서 수신한 데이터를 송신한 데이터로 나눠주어 무선 채널에 대한 채널 성분의 데이터를 계산한다.

이때의 채널 성분 데이터에는 물체 혹은 사람의 움직임에 대한 정보가 존재한다. 데이터의 반복 효과를 내기 위하여 계산한 채널 성분에 일정한 데이터를 곱해준다. 이러한 연산을 반복적으로 수행하여 채널 성분은 유지하며 데이터를 인위적으로 반복하도록 만들 수 있다. 이 과정은 수신되는 Wi-Fi 프레임에서 프리앰블 필드와 시그널 필드를 제외한 모든 데이터 심볼의 각 서브 캐리어마다 수행한다. 그림 6은 이 과정을 나타낸 것으로 X는 하나의 서브 캐리어를 나타내었다. 이후에 IFFT를 수행하여 시간 영역으로 변환한다.

이제 수신기는 주파수 영역 해상도를 향상하기 위해 큰 사이즈의 FFT를 수행할 수 있게 되었다. 이때, 효과적인 도플러 주파수의 관찰을 위하여 반복되는 데이터

Table. 1 MN-point FFT for resolution improving

Bandwidth	MN-point FFT
312 KHz	1
156 KHz	2
78 KHz	4
...	...
38 Hz	8192
19 Hz	16384

M의 개수는 표 1에서 나타낸 것과 같이 16384개의 심볼 이상으로 수행하여야 한다.

IV. 구현

본 절에서는 구현 방법과 실험 결과를 서술한다. 실험은 그림 7과 같이 USRP B210을 이용하여 GNU Radio 환경에서 주어진 데이터를 송수신하는 방법으로 진행하였다.

먼저 5GHz 대역을 가지는 상용 Wi-Fi 장비로부터 송신되는 무선 신호를 수집하여, 이를 분석할 수 있는 환경을 구축하기 위해서 802.11a 오픈 소스를 활용하였다[9, 10]. 오픈 소스의 기능 블록을 검증하고[11] 실험을 위한 수정 작업을 수행하였다. 그리고 앞 절에서 소개한 주파수 영역 해상도 향상 방법을 구현하고 검증하였다.

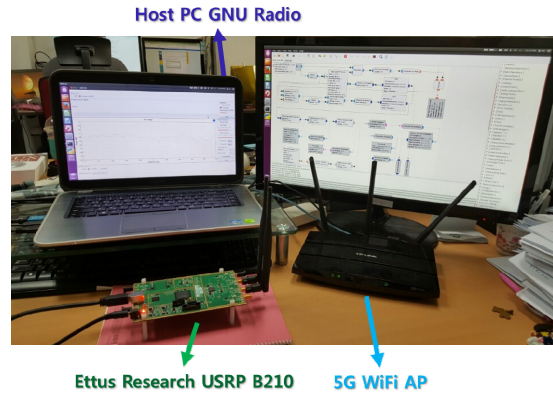


Fig. 7 Environment of experiment

4.1. 802.11a 송수신기

GNU Radio 802.11a 송수신 모듈은 [9], [10]을 참고하고 수정하여 실험하였다. 그림 8 은 송신기와 수신기

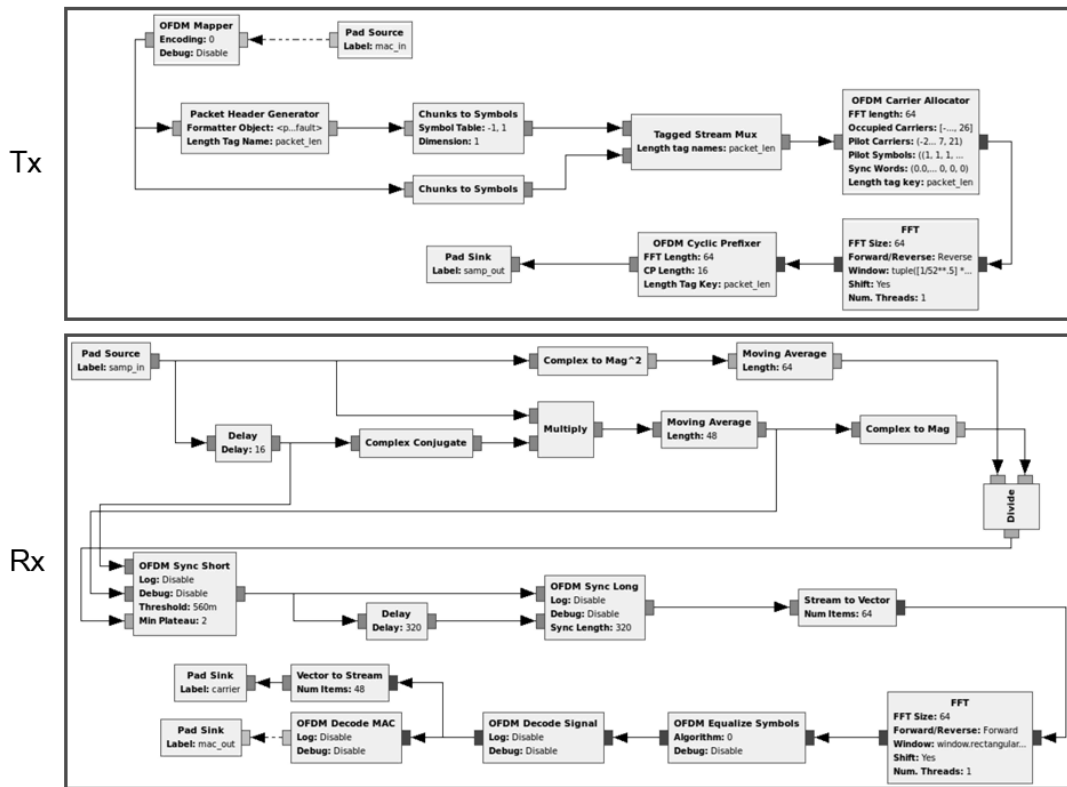


Fig. 8 802.11a GNU Radio Tx/Rx GRC

```

new mac frame (length 60)
=====
duration: 00 00
frame control: 00 08 (DATA)
Subtype: Data
seq nr: 263
mac 1: ff:ff:ff:ff:ff:ff
mac 2: ff:ff:ff:ff:ff:ff
mac 3: ff:ff:ff:ff:ff:ff
instantaneous fer: 0
[SIM]802.11a WLAN WiFi Loopback Test
    
```

Fig. 9 Loop back CSMA/CA result with HYR OOT block

```

new mac frame (length 102)
=====
duration: 00 00
frame control: 00 80 (MANAGEMENT)
Subtype: Beacon
SSID: zhimi-airpurifier-v3_milo4705
seq nr: 1182
mac 1: ff:ff:ff:ff:ff:ff
mac 2: 64:9:80:25:47:5
mac 3: 64:9:80:25:47:5
    
```

Fig. 10 USRP transceiver CSMA/CA result with HYR OOT block

의 GNU Radio 모듈이고 그림 9는 이를 이용하여 시뮬레이션 한 결과와 그림 10은 USRP를 사용하여 실험한 결과이다.

4.2. 주파수 영역 해상도 향상을 위한 모듈

$$\frac{X_n^N H_n^N}{X_n^N} \times X_n^1 = \frac{X_n^N H_n^N}{X_n^1} \times X_n^1 = X_n^N H_n^N \quad (12)$$

수신된 데이터를 복조하고 다시 부호화하면 심볼의 앞, 뒤 제로 패딩 캐리어와 DC 캐리어의 데이터는 0을 가진다. 채널 성분을 구하기 위하여 이를 수신한 데이터에 나눠주면 결과는 NaN(Not a Number)가 나온다. 따라서 채널 성분을 구하기 위하여 제로 패딩 캐리어와 DC 캐리어에서는 식 (12)와 같이 구현하였다. 이는 매 심볼의 제로 패딩 캐리어와 DC 캐리어는 모두 0으로 같은 값을 가지기 때문에 가능하다. 해상도 향상을 위한 블록의 검증은 먼저 채널 성분이 없는 데이터로 수행하여 주파수 영역 해상도가 향상된 것을 확인하였다. 그리고 인위적인 채널을 통과한 데이터로 검증하였다. 인위적인 채널은 크게 세 가지로 구현하였다. 첫 번째는 진폭에 변화를 주는 채널이고 두 번째는 위상에 변화를 주는 채널이다. 마지막으로 진폭과 위상이 무작위로 변화하게 하는 채널을 구현하여 실험을 진행했다. 그리고 이 채널들을 통과한 데이터에 채널 성분의 여부를 확인하고 주파수 영역 해상도 향상을 확인하였다.

그림 11 은 본 논문에서 제안한 기능 블록을 추가하여 구현한 802.11a 수신기이다.

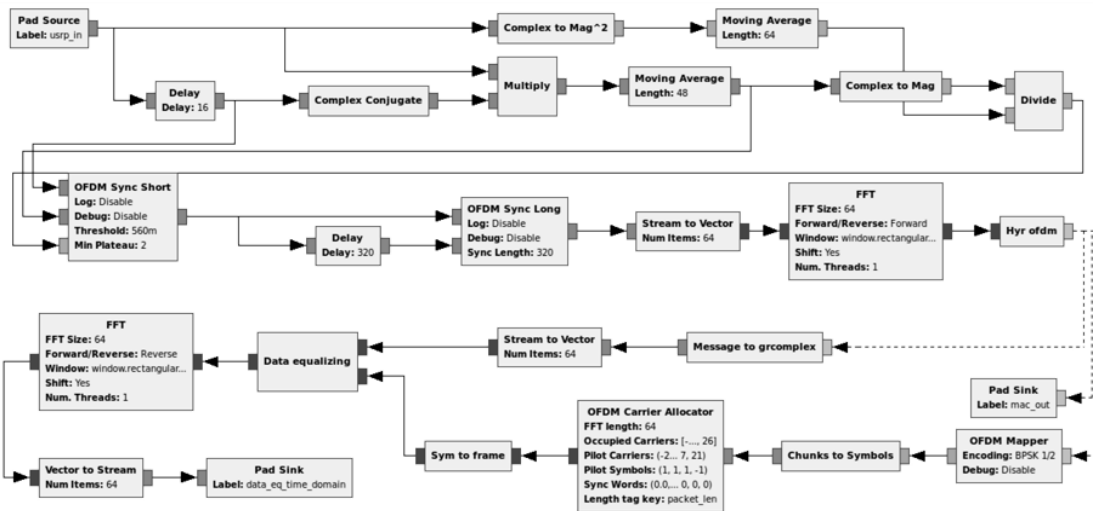


Fig. 11 802.11a GNU Radio receiver for improving resolution on frequency domain

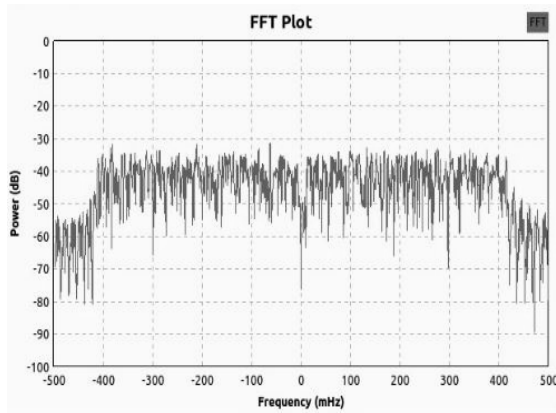


Fig. 12 Original FFT plot

그림 12 기존의 Wi-Fi 송신기의 주파수 영역 스펙트럼이다. 도플러 주파수를 관찰하기에는 주파수 영역의 해상도가 낮은 것을 확인할 수 있다.

그림 13은 GNU Radio에서 제공하는 페이딩 채널 모델을 이용하여 시뮬레이션 모델을 구현한 GNU Radio Companion이다. 여기서 HYR_PHY_Hier 블록은 주파수 영역 해상도 향상 기능이 추가된 802.11a 송수신기이다. 또한 사용한 페이딩 모델은 NLOS(Non-Line-of-Sight) 레일리 페이딩 채널 모델이다.

그림 14는 시뮬레이션에 대한 주파수 영역 스펙트럼으로 해상도가 향상되었음을 알 수 있다. 수신된 메시지를 [9], [10]의 블록을 이용해 복호하여 해상도 향상 기능뿐만 아니라 수신기로써의 기능도 효과적으로 동작하는지 확인하였다.

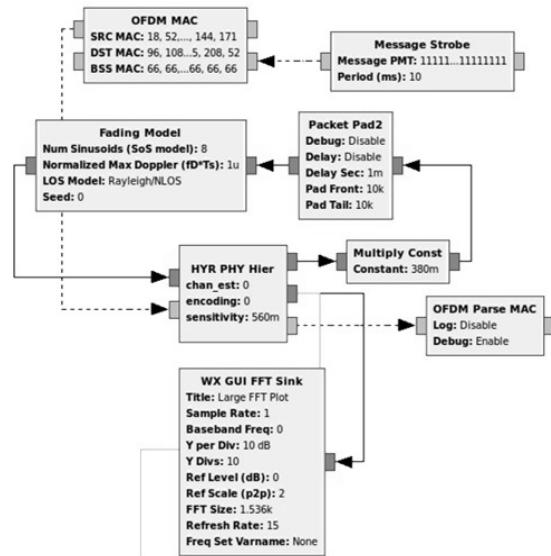


Fig. 13 GNU Radio transceiver for improving resolution on frequency domain

그림 15는 USRP를 사용하여 실험 모델을 구현한 GNU Radio Companion이다. 이때 하나의 USRP로 실험을 진행하여 송신, 수신 안테나의 거리가 매우 짧아 채널에 의한 왜곡이 크지 않았다. 하지만 시뮬레이션에 비하여 수신 세기가 조금 줄어들음을 확인할 수 있었다. 그림 16에서 확인 가능하듯이 주파수 영역 해상도 또한 향상되었음을 확인할 수 있었다. 이 때 역시 수신된 메시지를 [9], [10]의 블록을 이용해 복호하여 수신기의 기능도 수행함을 확인하였다.

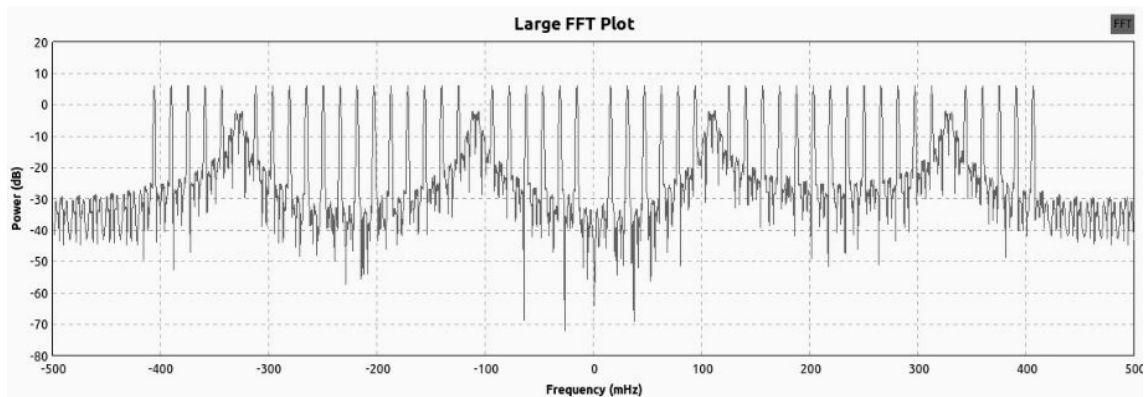


Fig. 14 802.11a transceiver Loop Back Simulation FFT plot for improving frequency resolution

도플러 주파수 관찰을 위한 무선 신호의 주파수 영역 해상도 향상

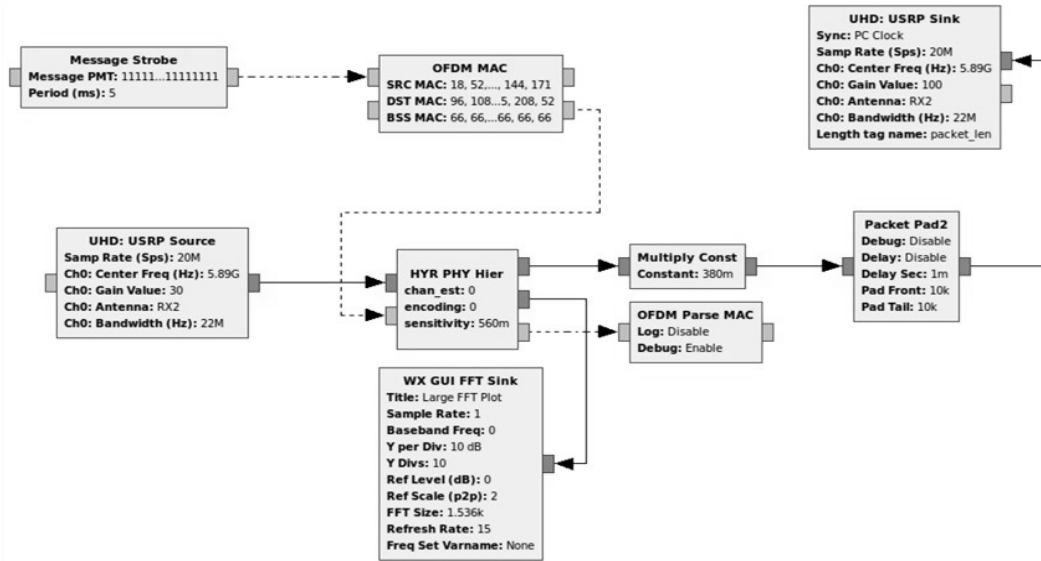


Fig. 15 802.11a transceiver architecture for improving frequency resolution

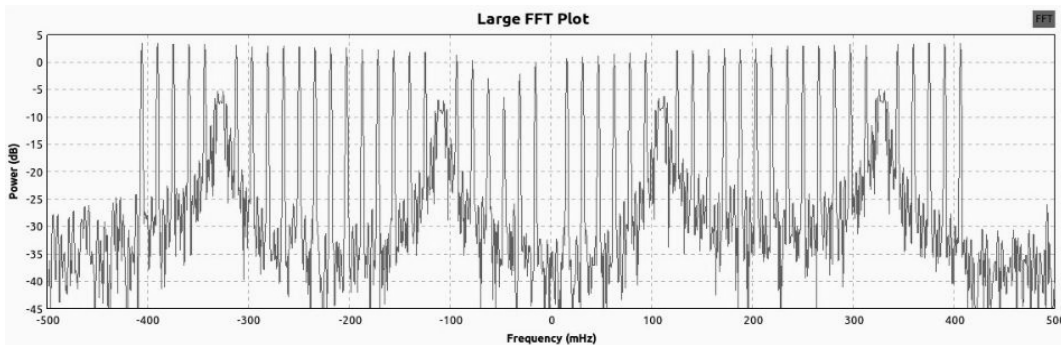


Fig. 16 802.11a transceiver USRP FFT plot for improving frequency resolution

V. 결론

본 논문에서는 Wi-Fi 무선 신호에서 물체 혹은 사람의 움직임을 인식하기 위한 선행 연구를 진행하였다. 도플러 주파수를 관찰하기 위하여 주파수 영역 해상도를 향상하는 방법을 제안하고 실험하였다.

앞 절에서 확인할 수 있듯이 주어진 데이터에 대하여 주파수 영역 해상도가 효과적으로 향상되었다. 하지만 실제 사용되는 Wi-Fi 데이터 패킷을 이용하여 본 논문에서 소개하는 방법을 구현하기에는 문제점이 발생한다. CSMA/CA 방식을 사용하는 Wi-Fi 시스템에서는

무선 신호가 연속적으로 데이터 패킷을 전송하지 않기 때문에 해상도를 높이기 위해 필요한 데이터 패킷이 부족하다. 이를 극복하기 위해 선행 보간법을 도입할 수 있다. 하지만 이 역시 데이터의 사용량이 일정 수준 이상이어야 가능해 한계점이 있을 것으로 보인다.

이러한 단점에도 불구하고, 상용화된 Wi-Fi 시스템을 이용하여 주어진 인프라 내에서 저가로 개발될 수 있다는 장점으로 인해 향후 위치 측정, 움직임 인식, 생체 신호 검출 등 다양한 사물 인터넷 분야에서 유용하게 사용되어 활발한 연구가 진행될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 201430300 11710) and it has been conducted by the Research Grant of Kwangwoon University in 2017.

REFERENCES

- [1] J. M. Park, Y. G. Kim, "Fingerprint Recognition matching method using statistical," *Journal of Security Engineering*, vol.12, no.3 (2015), pp.273-282, May 2015.
- [2] I. K. Lee, Y. G. Park. "Analysis on Coexistence between Unlicensed Wireless Device based on 802.11ah and LTE User Equipment," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol.21, no.11, pp.2015-2021, Nov. 2017.
- [3] G. E. A. Franken, H. Nikookar, P. V. Genderen. "Doppler tolerance of OFDM-coded radar signals," *Radar Conference, EuRAD 2006. 3rd European .IEEE*, pp. 108-111, 2006.
- [4] Sturm, Christian, et al. "A novel approach to OFDM radar processing," *Radar Conference, 2009 IEEE*. pp. 1-4, 2009.
- [5] F. Adib, D. Katabi. "See through walls with wifi!," *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM*, vol. 43. no. 4, pp. 75-86, 2013.
- [6] K. Ali, A. X. Liu, W. Wang, M. Shahzad. "Keystroke recognition using wifi signals," *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. pp. 90-102, 2015.
- [7] H. Abdelnasser, M. Youssef, and K. A. Harras. "Wigest: A ubiquitous wifi-based gesture recognition system," *2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), IEEE*, pp. 1472-1480, 2015.
- [8] LAN/MAN Standards Committee, "Part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications," *IEEE-SA Standards Board*, 2003.
- [9] B. Bloessl, M. Segata, C. Sommer, F. Dressler. "An IEEE 802.11 a/g/p OFDM Receiver for GNU Radio," *Proceedings of the second workshop on Software radio implementation forum. ACM*, pp. 9-16, 2013.
- [10] B. Bloessl, M. Segata, C. Sommer, F. Dressler. "Towards an open source IEEE 802.11 p stack: a full sdr-based transceiver in gnu radio," *2013 IEEE Vehicular Networking Conference. IEEE*, pp. 143-149, 2013.
- [11] D. T. Nguyen, F. Safaei, P. J. Vial. "An experimental study of OFDM in software defined radio systems using GNU platform and USRP2 devices," *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2014 International Conference on. IEEE*, pp. 657-662, 2014.



홍예린(Yerin Hong)

2016년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 학사
 2016년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 석사과정
 ※관심분야 : 디지털통신, 무선통신, 딥러닝



오혁준(Hyukjun Oh)

1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
 1995년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
 1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
 1999년 9월 ~ 2000년 12월: 미국 Stanford University 박사후과정
 2001년 1월 ~ 2004년 8월: 미국 퀄컴 QCT 3GPP 사업부
 2004년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 교수
 ※관심분야 : 무선통신, 통신신호처리, 군통신시스템, 데이터신호처리