

HRP UWB 채널임펄스응답의 측정 및 분석

Measurement and Analysis of Channel Impulse Response of HRP UWB

차 형 호 · 윤 민 경 · 장 병 준

Hyeong-Ho Cha · Min-Kyoung Yoon · Byung-Jun Jang

요 약

20년 전 등장한 UWB 무선통신기술이 무선통신을 넘어 UWB 기기 간의 정밀한 거리 측정이 가능하다는 특징이 재조명되면서 다양한 분야에서 대중화되고 있다. 현재 상용화된 UWB 기술은 수십 MHz 정도의 고속 UWB 펄스를 이용하는 HRP(high-rate pulse repetition frequency) UWB 기술로 UWB 심볼의 상관(correlation) 특성을 이용하여 복수개의 채널임펄스 응답(channel impulse response, CIR)을 구하고, 이러한 CIR들의 특성 변화를 이용하여 정밀한 거리 측정과 방향 측정이 이루어진다. 따라서 HRP UWB 기술을 이해하기 위해서는 먼저 CIR 특성을 이해하는 것이 선행되어야 한다. 하지만, HRP UWB 기술이 상업적으로 성공함에 따라 기술의 공개가 부족하여 HRP UWB의 CIR의 의미에 대한 이해가 부족한 상황이다. 이에 본 논문에서는 HRP UWB IC의 CIR의 특성을 이론적으로 설명하고, 실제 Qorvo사의 DWM3000 HRP UWB 모듈을 이용하여 다양한 환경에서 CIR을 측정하여 이를 확인하였다. 이러한 연구결과는 향후 UWB 기술을 이해하고, 다양한 분야에 활용하는 데 도움이 될 것이라 기대된다.

Abstract

Ultrawideband (UWB) wireless communication technology, which appeared 20 years ago, is becoming popular in various fields because the ability to measure the precise distance between UWB devices beyond wireless communication is being re-examined. The currently commercialized UWB technology is high-rate pulse repetition frequency (HRP) UWB technology, which uses high-speed UWB pulses of several tens of megahertz, and precise distance and direction measurements are made by using the characteristic changes of the channel impulse responses (CIRs). Therefore, to understand HRP UWB technology, it is necessary to understand the CIR characteristics first. However, because HRP UWB technology is commercially successful, the disclosure of the technology has been insufficient, so the understanding of the meaning of the CIR of HRP UWB technology is inadequate. Therefore, in this study, the CIR characteristics of HRP UWB integrated circuits are explained, and the CIR was measured in various environments using a DWM3000 HRP UWB module (Qorvo). These results are expected to be helpful in understanding UWB technology and applying it to various fields.

Key words: UWB, HRP, Channel Impulse Response(CIR), Localization, DWM3000, TWR, PDoA

「이 연구는 2018년도 삼성전자 미래기술육성센터 연구비(SRFC-IT1801-51)의 지원으로 연구되었음.」

국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received July 5, 2022 ; Revised July 24, 2022 ; Accepted July 28, 2022. (ID No. 20220705-056)

· Corresponding Author: Byung-Jun Jang (e-mail: bjjang@kookmin.ac.kr)

I. 서 론

20년 전 처음 등장한 UWB(ultra wide-band) 무선통신 기술은 무선통신을 넘어 UWB 기기 간의 정밀한 거리 측정이 가능하다는 특징이 재조명되면서 다양한 분야에서 대중화되고 있다. 현재 상용화된 UWB 기술은 20년 전 처음 도입되었던 UWB 기술과는 원리가 다른 HRP(high-rate pulse repetition frequency) UWB 기술로서 2015년에 IEEE 802.15.4-2015 표준에서 표준이 완성되었고, 2020년에 802.15.4z-2020 표준에서 암호화 기능이 추가된 기술이다. HRP UWB 기술을 이용한 반도체 IC(integrated circuit)는 Qorvo와 NXP 등이 주도하여 생산하고 있으며, 각각 애플과 삼성의 스마트폰에 장착되면서 자동차, IoT기기 등 스마트폰과 연동되는 다양한 제품에 HRP UWB 기능의 탑재가 확산되고 있다^{[1]~[3]}.

HRP UWB 기술에서는 종래의 UWB 기술과 달리 개개의 UWB 펄스를 직접 이용하지 않고 일련의 UWB 펄스로 이루어진 UWB 심볼을 사용한다. 종래의 UWB 기술에서는 500 MHz 대역폭을 사용하는 경우, 펄스폭이 2 n/sec에 불과하므로 거리해상도가 수십 cm 정도에 불과하였다^[4]. 하지만 HRP UWB에서는 하나의 UWB 기기가 송신한 일련의 UWB 심볼로부터 상관(correlation) 연산을 수행하여 복수개의 채널임펄스 응답(channel impulse response, CIR)을 구하고, 이러한 CIR의 미세한 변화를 통계적으로 이용함으로써 UWB 펄스의 해상도를 높여 수 cm 이하의 거리 해상도를 얻을 수 있도록 하였다^[5]. 최근에 HRP UWB 기술은 거리측정을 넘어서 복수개의 안테나를 이용하여 안테나에서 수신되는 CIR 특성의 위상 차이를 이용하는 PDoA(phase difference of arrival) 방식의 방향탐지 기능까지도 구현이 가능하게 되었다^[6].

하지만 HRP UWB가 상업적으로 성공하면서 HRP UWB의 거리 해상도 개선이나 방향 탐지 기술은 특허로 보호되고 있을 뿐만 아니라 Qorvo나 NXP의 HRP UWB IC에서 제공하는 CIR 데이터도 제조사가 편집하여 제공하므로 실제 IC 내에서 사용되는 모든 CIR 데이터를 자유롭게 이용하기 어려운 상황이다. 따라서 HRP UWB IC 제조사에서 제안하는 방식 외에 새로운 거리측정 방식이나 방향탐지 방식을 적용하고 검증하기는 매우 어려운

상황이다. 또한, HRP UWB 방식을 활용한 새로운 응용 기술을 만들기도 어려운 상황이다. 예를 들어 최근 HRP UWB를 이용하여 passive UWB radar 등에 응용하려는 연구가 활발히 진행되고 있는데, 현재까지의 연구는 대부분 오래된 Decawave의 DWM 1000 모듈이나 Decawave에서 제공된 개발키트를 활용하는 연구가 대부분이다^{[7]~[9]}. 이러한 모듈은 최신 표준을 따르지 않을 뿐만 아니라, 국내에서 UWB로 할당된 주파수 규격인 채널 9번을 지원하지도 않는다. 따라서 최신 HRP UWB 표준인 IEEE 802.15.4z-2020을 만족하면서도 국내 주파수 기술기준에도 맞는 HRP UWB 시스템을 구현하는 연구가 필요하다. 이러한 연구에서는 반도체 IC에서 제공하는 CIR과 관련된 데이터를 최대한 활용할 수 있도록 프로그램화가 가능해야 한다.

이에 본 연구에서는 최신 HRP UWB 모듈인 Qorvo사의 DWM 3000 HRP UWB 모듈을 이용하여 다양한 환경에서 CIR 특성을 측정할 수 있는 개발환경을 구현하였다. 이렇게 구현된 HRP UWB 시스템으로 패킷전송과 관련된 다양한 파라미터를 조절하여 실제 무선 환경에서 HRP UWB의 CIR 특성을 추출하고 분석하였다. 분석결과를 통해 HRP UWB를 이용한 다양한 응용기술을 검증할 수 있는 기반을 마련하였다. 본 연구결과는 향후 HRP UWB 기술의 성능 개선이나 다양한 분야에의 활용에 도움이 될 것이라 기대한다.

II. HRP UWB의 CIR과 거리 측정 이론

2-1 HRP UWB 표준과 CIR

최신 UWB 표준인 IEEE 802.15.4-2005와 IEEE 802.15.4z-2020에서는 UWB 펄스의 수를 기준으로 LRP(low-rate pulse repetition frequency) UWB와 HRP UWB로 구분된다. HRP UWB의 거리 측정을 위한 핵심 물리계층 패킷 구조는 그림 1(a)와 같다. 그림에서 정보 데이터는 PPDU 필드에 들어가지만, 거리측정과 관련된 필드는 SYNC 필드와 SFD(start-of-frame delimiter) 필드로 모든 패킷에 동일한 데이터를 갖는다. SFD가 끝나는 시간을 RMARKER라 부르는데, 이 지점이 패킷의 수신되는 기준시간이 된다. IEEE 802.15.4z-2020 표준에서는 SYNC 필드 이외에 STS(scrambled

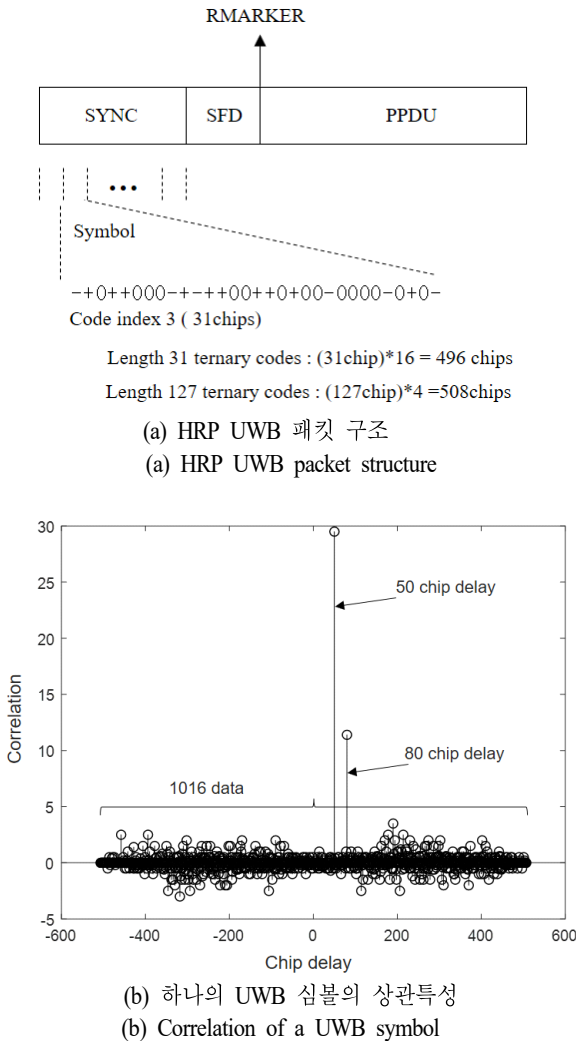


그림 1. HRP UWB 패킷 구조와 UWB 심볼의 상관 특성
Fig. 1. HRP UWB packet structure and correlation characteristics of HRP UWB symbol.

timestamp sequences)라는 필드가 추가되는데 STS 필드는 패킷마다 달라지므로 암호화된 거리 측정은 STS 필드를 이용한다^{[10],[11]}.

HRP UWB에서 거리 측정을 위해서 약속된 SYNC 필드를 이용한다. SYNC 필드는 UWB 심볼(symbol)이 반복되어 존재하며, SYNC 필드의 UWB 심볼의 개수는 16, 64, 1,024, 4,096개 중 선택할 수 있다. 하나의 UWB 심볼은 31개나 127개의 UWB 펄스(칩, chip)로 구성된 코드를 사용하는데, 코드는 '1', '0', 그리고 '-1'의 3가지가 가능

하다. '1'은 양의 크기를 갖는 UWB 펄스를 의미하고 '-1'은 음의 크기를 갖는 UWB 펄스를 나타내며, '0'은 UWB 펄스가 존재하지 않음을 나타낸다. 이러한 UWB 코드에 0을 추가하는데 예를 들어 127 길이를 갖는 코드의 경우, UWB 코드 하나에 0을 3개 더 추가한다. 따라서 127 길이의 코드의 경우 508개($=127 \times 4$)의 UWB 펄스가 존재하도록 한다. 이러한 UWB 심볼은 자기상관(correlation) 연산을 취하게 되면 1,016 chip 길이의 상관결과가 나오게 되는데 송신 심볼과 수신 심볼의 시간차가 없는 경우 당연히 지연이 0인 지점에서 최대값을 갖는다. 상관특성은 이상적이지는 않으므로 델타(delta) 함수의 특성을 갖지 않고 다양한 UWB chip delay에서 잡음 값이 존재한다. UWB 심볼의 상관 특성의 성능을 확인하기 위하여 HRP UWB 표준에서 사용하는 127 길이를 갖는 9번 코드의 UWB 심볼의 상호상관 특성의 한 예를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에서는 그림 1(b)와 같이 전파환경을 임의로 설정하였는데 UWB 심볼이 50 chip과 80 chip 시간지연을 가지고 도착한다고 가정하였고, 80 chip 지연이 있는 UWB 신호는 크기가 50 chip 지연된 신호보다 작다고 가정하였다. 예측과 같이 UWB 심볼의 상관특성은 chip 지연시간만큼 상관특성이 지연되어 출력되며, 신호의 크기가 작으면 상호상관의 최대치가 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 상관특성을 HRP UWB에서는 CIR이라고 부른다. 즉, CIR의 피크의 수와 크기, 지연시간을 통해 UWB 기기 사이의 거리와 무선채널의 특성을 알 수 있게 된다. CIR은 실제 UWB 펄스의 모양과 관련이 없이 상관의 결과이므로 상관이 큰 지점에서의 값만이 중요하며 그 외의 값들은 큰 의미가 없다^[12].

이러한 UWB 심볼에 대한 상관특성은 UWB 심볼마다 하나의 값을 가지며, 시간으로 환산하면 1 nsec 간격의 값을 갖는다. 이를 거리로 환산하면 30 cm가 되므로 하나의 CIR을 이용하면 거리 해상도가 30 cm밖에 되지 않음을 알 수 있다. HRP UWB 표준에서는 이러한 거리해상도의 한계를 극복하기 위하여 SYNC 필드 내에 UWB 심볼을 반복하여 전송하게 된다. 각각의 UWB 심볼의 CIR은 무선환경이 동일할 경우 동일하겠지만, 실제 UWB 하드웨어는 내부 클럭의 미세한 변화가 존재하므로 CIR의 샘플링 순간이 달라져 CIR값의 변화가 존재한다. 만약 64개

의 UWB 심볼을 사용한다면 64개의 미세한 차이를 갖는 CIR 데이터를 가지게 되며, 이러한 CIR 데이터를 통계적으로 활용하여 1/64 nsec의 해상도를 갖도록 할 수 있다. 이러한 알고리즘을 LED(leading edge detection) 알고리즘이라 하고 보통 UWB IC 회사의 고유의 특허로 자세한 내용을 공개하지 않고 있다. 또한 사용자에게는 계산된 모든 CIR을 제공하지 않으며, UWB 패킷당 하나의 CIR값만을 가공하여 제공하고, 대신 LED 알고리즘으로 구한 기준시간과 관련된 파라미터로 FP_INDEX라는 값으로 제공한다^[13].

여기서 FP_INDEX의 의미를 알기 위해서는 HRP UWB에서 거리 측정의 원리를 이해해야 하는데, 그 원리가 그림 2에 나타나 있다. UWB에서 거리 측정을 위해서는 UWB 기기들끼리 패킷을 상호 교환하고, 이때 시간(timestamp)을 기록할 필요가 있다. 그림 2와 같이 2개의 HRP UWB 기기가 있다고 가정하고, UWB1이 UWB2까지의 거리 측정을 한다고 하자. UWB1 기기는 내부 클럭(clock)을 가지고 있는데, 이 클럭은 1/64 nsec(=15.625 psec)마다 하나씩 카운터(counter)의 크기가 커지도록 되어 있다. 이제 거리측정을 하고자 하는 UWB1 기기는 UWB2 기기로 메시지를 송신하는데, 송신할 때 패킷의 RMAKER 시간 t_1 에 해당하는 카운터의 값을 기록한다. 이 메시지를 수신한 UWB2 기기는 RMARKER를 기준으로 약속한 t_{reply} 시간 후에 응답패킷을 보낸다. 이제 UWB1은 HRP UWB 심볼을 이용하여 일련의 CIR을 계산하고, LED 알고리즘을 이용하여 UWB2가 보낸 패킷의 도착시간을 추정한다. UWB IC에서 추정된 시간은 RMAKER를 기준으로 t_2 에 해당되는 카운터의 값을 기록

한다. 이제 두 UWB 기기 간의 거리는 전파도달시간(ToF: time of flight)의 1/2이므로 식 (1)로 주어지게 된다.

$$R = c \times \frac{t_2 - t_1 - t_{reply}}{2} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도를 의미한다. 식 (1)에서 시간은 1/64 nsec의 해상도를 가지므로 HRP UWB의 거리해상도는 0.5 cm의 해상도를 갖게 된다. 하지만 실제로는 알고리즘에 의한 추정값이므로 오차를 고려하면 실제 수 cm의 해상도를 갖는다고 알려져 있다^[14]. 그림 2와 같이 두 무선기기 간의 거리를 계산하는 방식을 두 개의 UWB 기기 간에 정보를 교환한다는 의미에서 TWR(two-way ranging)이라고 한다. HRP UWB의 TWR을 이용한 거리 측정에서 UWB 패킷을 수신할 때 CIR이 발생하므로 UWB1 기기와 UWB2 기기는 각각 다른 일련의 CIR을 가지게 된다. UWB1 기기에서 얻어지는 일련의 CIR로부터 얻어지는 FP_INDEX는 RMARKER의 수신시간 t_2 에 해당되는 카운터값을 칩 내부에서 결정하는 데 사용되며, FP_INDEX가 바로 ToF를 의미하는 것은 아님에 주의해야 한다. UWB IC 회사에서도 FP_INDEX를 레지스터로 사용자에게 제공하기는 하지만, 이는 CIR 데이터와 비슷하게 참고용으로만 사용하도록 가공하여 제공한다^[15].

2-2 IQ 기반의 CIR 데이터

HRP UWB는 레이더 기술이 아니라 통신기술을 기반으로 하므로 동기(synchronization)에서 자유롭지 못하다. 따라서 HRP UWB IC에서는 주파수 오차와 위상오차를 줄이기 위해 동위상(in-phase) I신호와 직교위상(quadrature-phase)의 Q신호 2개를 이용하는 직교수신기로 구성되며, IQ 기반의 송수신기의 구조는 그림 3(a)와 같다. 그림 3(a)와 같이 송신기에서는 UWB 심볼신호에 반송파 주파수를 곱하여 UWB 채널로 주파수 상향 변환하여 전송하게 되며, 수신기에서는 IQ 복조기 구조를 갖는 수신기를 이용하여 주파수 하향 변환하여 I채널과 Q채널의 신호를 만든다. 보통 일반적인 무선통신에서는 전송속도를 높이기 위하여 I채널과 Q채널에 각각 별개의 정보를 전송하는 데 반하여 HRP UWB IC에서는 I채널과 Q채널은 IQ 다이버시티 역할로 사용된다. 따라서 CIR 데이터는 복소수 형태로 표현되며,

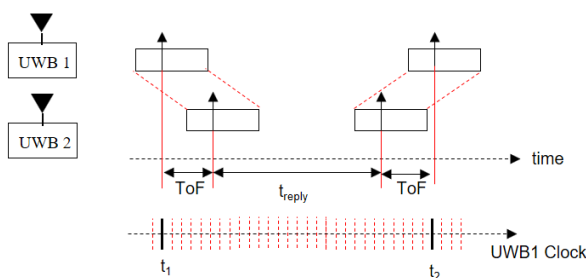


그림 2. HRP UWB의 거리 측정 원리
Fig. 2. Principle of HRP UWB two-way ranging.

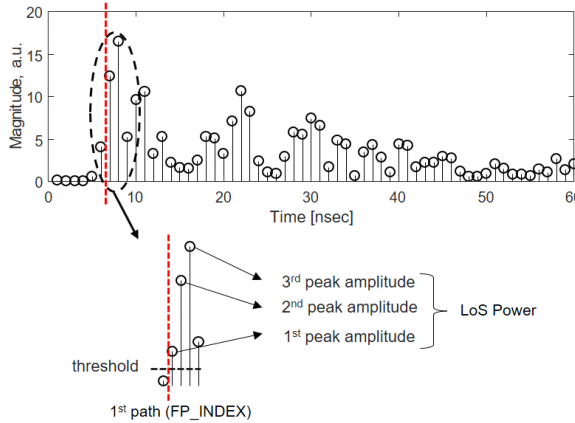
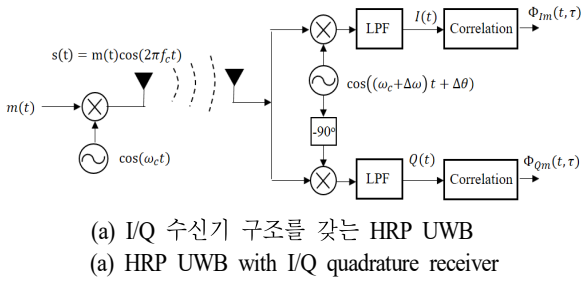


그림 3. HRP UWB의 구조 및 CIR 데이터
Fig. 3. Block diagram of HRP UWB and CIR data.

CIR 데이터로 거리측정을 할 때는 크기로 변환할 필요가 있다.

시간영역에서 UWB 심볼 신호를 $m(t)$ 라고 하고, 반송파 주파수를 f_c 라고 하면 송신신호 $s(t)$ 는 식 (2)와 같다.

$$s(t) = m(t)\cos(2\pi f_c t) \quad (2)$$

편리를 위해 크기의 감쇄는 고려하지 않고, 송신기와 수신기의 발진기가 주파수 오차 Δf (또는 각주파수오차 $\Delta\omega$)와 위상오차만 $\Delta\theta$ 가 있다고 하면 I채널만 있을 때 수신신호는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$I(t) = m(t)\cos(2\pi\Delta f t + \Delta\phi) \quad (3)$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 주파수 오차와 위상오차에 의해 수신신호는 송신신호 $m(t)$ 와 달라지게 된다. 이러한 주파수오차와 위상오차를 줄이기 위해서 I신호가 직교

위상 특성을 가진 또 다른 Q신호가 필요하다. 각각 식 (3)과 식 (4)로 주어지는 I채널과 Q채널로부터 식 (5)와 같이 신호의 크기를 구하게 되면 주파수오차와 위상오차에 상관없이 신호를 정확히 복조할 수 있음을 알 수 있다^[13].

$$Q(t) = m(t)\sin(2\pi\Delta f t + \Delta\phi) \quad (4)$$

$$\sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} = m(t) \quad (5)$$

이제 HRP UWB에서는 UWB 펄스 하나하나를 이용하지 않고 UWB 심벌신호의 상관을 이용하므로 상관과정을 거칠 때 주파수 변환과정에서 주파수오차와 위상오차가 어떤 영향을 미치는지 살펴보자. 이를 위해 $m(t)$ 를 통계적으로 stationary한 랜덤과정이라고 가정하고, $m(t)$ 의 자기상관함수를 $\Phi_m(\tau)$ 라고 할 때 식 (3)의 I신호와 $m(t)$ 의 상호상관함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_{Im}(t, \tau) &= E[I(t)m(t+\tau)] \\ &= E[m(t)\cos(\Delta\omega t + \Delta\theta)m(t+\tau)] \\ &= E[m(t)m(t+\tau)]\cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \\ &= \Phi_m(\tau)\cos(\Delta\omega t + \Delta\phi) \end{aligned} \quad (6)$$

즉, I신호의 상관특성은 $\Phi_m(\tau)$ 에 주파수오차와 위상오차가 추가된 형태이다. 식 (6)과 마찬가지로 Q신호의 상관함수를 구하면 식 (7)로 주어진다.

$$\Phi_{Qm}(t, \tau) = \Phi_m(\tau)\sin(\Delta\omega t + \Delta\phi) \quad (7)$$

이제 식 (6)과 식 (7)로부터 식 (8)을 구할 수 있다.

$$\sqrt{\Phi_{Im}^2(t, \tau) + \Phi_{Qm}^2(t, \tau)} = \Phi_m(\tau) \quad (8)$$

식 (8)로부터 CIR의 I신호와 Q신호를 이용하면 직교수신기와 마찬가지로 CIR 데이터의 주파수오차와 위상오차의 영향을 제거할 수 있음을 알 수 있다^[16].

이상의 이론을 확인하기 위하여 HRP UWB의 대표 IC 중의 하나인 DWM1000 모듈이 제공하여 구한 CIR 데이터의 일부를 그림 3(b)에 나타내었다. 실험은 실내 LoS 환경에서 측정하였으며, 식 (8)을 이용하여 CIR의 크기만을 그렸다. 그림에서 알 수 있듯이 다중경로신호 등에 CIR의 크기는 그림 1(b)와 같이 이상적인 상관특성과는 차이가 있으나, 첫 번째 도래한 신호를 최대값으로 하는 상관특성을 보임을 확인할 수 있다.

정리하면 HRP UWB는 하나의 UWB 패킷을 수신할

때마다 제공하는 1,016개의 CIR 데이터를 제공하며 이는 UWB 신호의 상관특성을 나타낸다. 이 때 주파수 오차와 위상오차를 없애기 위해 수신기에서 직교변조기 구조를 이용하여 CIR 데이터를 계산한다. CIR 데이터는 해상도가 낮으므로 여러 개의 CIR을 이용하여 CIR 해상도보다 높은 FP_INDEX를 내부적으로 계산한다. 1,016개의 CIR의 데이터 중에 중요한 데이터는 FP_INDEX 주변의 CIR 데이터이며, UWB의 동작반경이 10 m 내외인 점을 고려하면 FP_INDEX 이후의 수십 개 데이터만이 의미가 있다고 할 수 있다.

마지막으로 HRP UWB IC는 CIR로부터 크기를 예측할 수 있도록 하는데, FP_INDEX 이후의 3개의 상관데이터의 크기를 이용하여 수신신호의 세기를 식 (9)와 같이 제공한다.

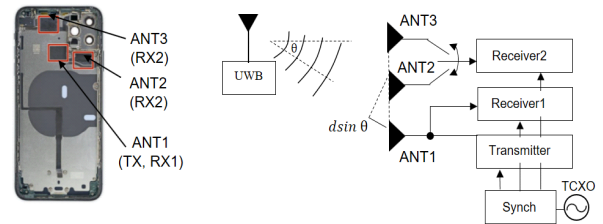
$$RSS = 10 \log_{10} \left(\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{N^2} \right) + 6D - A \quad (9)$$

식 (9)에서 F_1 , F_2 및 F_3 는 FP_INDEX 이후 3개의 상관값의 크기를 의미하며, N 은 SYNC 필드의 UWB 심볼의 개수를, D 는 수신기 튜닝과 관련된 값, A 는 offset 값이다.

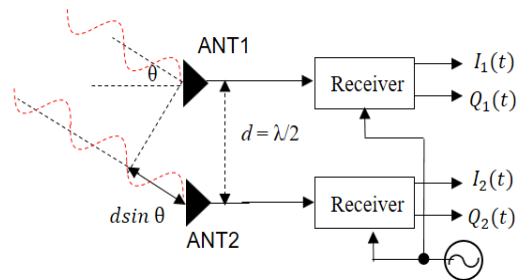
III. HRP UWB의 PDoA 방향탐지 이론

최근 HRP UWB IC는 거리 측정 능력에 추가하여 방향을 측정하려는 시도가 활발하다. 보통 방향탐지는 배열 안테나 기술로 HRP UWB에서 표준으로 정하는 사항은 아니다. 하지만, 실제 응용에서 거리와 방향을 동시에 측정해야 UWB 기기의 상대적인 위치를 정확히 판별할 수 있기 때문에, Qorvo와 NXP 등 HRP UWB IC를 공급하는 회사에서는 방향탐지 기능이 없는 IC와 방향탐지 기능을 갖는 HRP UWB IC의 2종류를 제공하는 것이 일반적이다. HRP UWB에서는 복잡한 알고리즘 없이 방향탐지를 할 수 있도록 2개의 안테나에 입사되는 신호의 위상을 비교하는 PDoA(phase difference of arrival) 방식을 사용한다^{[17]~[20]}.

현재 출시된 HRP UWB는 PDoA를 기반으로 하며, 이는 그림 4(a)와 같다. 그림 4(a)는 실제 스마트폰에 배치된 UWB 안테나의 사진과 블록 다이어그램을 보여주고 있다. 그림 4(a)에서 알 수 있듯이 UWB 태그에서 송신되는



(a) I/Q 수신기 구조를 갖는 HRP UWB
(a) HRP UWB with I/Q quadrature receiver



(b) 이중 안테나를 갖는 UWB IC
(b) Dual antenna UWB IC

그림 4. 스마트폰 UWB 안테나 배치와 블록 다이어그램
Fig. 4. Smartphone UWB antennas and block diagram for direction finding.

반송파 신호는 스마트폰 안테나와 이루는 각도가 θ 만큼 차이가 나고, 안테나 사이의 간격이 d 일 경우, 두 안테나에서 반송파주파수의 위상차는 $d \sin \theta$ 가 난다. 이 위상차를 측정하여 UWB 태그의 방향을 찾는 방식이 PDoA라 한다. PDoA는 2개의 안테나만 있으면 도래각을 측정할 수 있다. 하지만, 우리가 3차원 공간에 살고 있어 상하좌우의 방향을 측정해야 하므로 스마트폰에서는 상하 방향을 위해 수직으로 배치된 2개의 안테나, 좌우방향을 위해 수평으로 배치된 2개의 안테나를 사용하여야 하고, 이 중 하나의 안테나는 공통으로 사용하므로 최소 3개의 UWB 안테나가 필요하다. 보통 안테나 배치는 스마트폰의 아래부분을 사람의 손을 잡고 사용하므로 위쪽의 카메라 옆 공간에 3개의 UWB 안테나를 배치하게 된다. 보통 안테나별로 UWB 수신기를 연결하면 전력소모 등의 문제가 있으므로 PDoA 기능의 UWB IC 내에는 수신기를 2개만 내장하고, 이를 안테나 3개와 연결할 수 있는 스위치 회로를 통해 UWB 안테나와 연결한다. 따라서 그림 4(a)의 오른쪽 그림과 같이 스위치 회로를 이용하여 좌우와 상

하방향으로 한 번씩 시간차를 두고 위상차를 측정하게 된다. 위상차를 측정할 때 UWB IC와 UWB 안테나 연결 시 시간지연 등을 일정하게 유지하여 위상오차를 줄이는 것이 중요하다.

이제 HRP UWB에서 CIR 데이터를 이용하여 방향탐지하는 원리를 확인하기 위하여 그림 4(b)와 같이 수신기를 모델링하였다. 수신기는 앞에서 설명한 IQ 수신기를 사용하고 송신기와 수신기는 동기가 맞았다고 가정한다. 이 경우, 수신기별로 CIR을 구하고 CIR의 I신호와 Q신호의 위상차를 구하면 식 (10)과 같이 주어진다.

$$\tan^{-1}\left(\frac{Q_2(t)}{I_2(t)}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{Q_1(t)}{I_1(t)}\right) = \frac{\lambda}{2} \sin\theta(t) \quad (10)$$

식 (10)에서 $\theta(t)$ 는 HRP UWB 송신기에서 날아오는 전파의 입사각도의 시간에 따른 변화를 의미한다. 식 (10)이 성립하기 위해서는 두 HRP UWB 수신기가 전파의 입사각도를 제외하고는 주파수오차나 위상오차가 동일해야 한다. 이를 위해 수신기는 동일한 clock을 공유해야 하며, PDoA 계산 전에 위상 교정작업이 반드시 필요하다.

보통 식 (10)과 같은 PDoA 방식의 HRP UWB 방향측정은 CIR에 포함된 직접파에 대해서만 위상차를 계산한다. 직접파 이외의 CIR값들은 여러 반사파가 중첩되는 경우 위상차를 측정하기 어렵다. 거리측정과 마찬가지로 방향측정에서도 그림 3(b)와 같은 CIR 신호가 사용되는데, CIR 데이터 중 직접파와 관련된 데이터는 상관 기준값(threshold)을 넘는 첫 번째 CIR의 I/Q 데이터를 통해 arctangent 연산으로 위상을 구하게 된다.

IV. 실험 및 결과

4-1 DWM3000 HRP UWB 모듈을 이용한 측정환경

앞에서 설명한 HRP UWB의 CIR 계산과 이를 기반으로 하는 거리측정 및 방향측정은 UWB IC 내부에서 하드웨어적으로 이루어진다. 따라서 자세한 연산과정이나 회로 구성 등은 회사 기밀이라 자세히 알려져 있지 않다. 대신 UWB IC 제조회사인 Qorvo와 NXP에서는 UWB IC를 사용하는 사용자를 위해 CIR과 관련된 몇 가지 정보를 레지스터에 저장하여 놓고, 사용자가 SPI(serial peripheral

interface) 인터페이스를 이용하여 추출할 수 있도록 하고 있으므로 이렇게 추출한 CIR을 통해 HRP UWB의 특성을 확인할 수 있다.

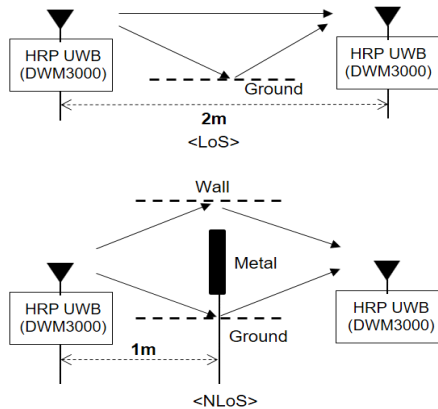
현재 사용가능한 HRP UWB IC의 동향은 표 1과 같다. Apple의 U1칩은 Qorvo와 DWM3000 시리즈와 협력하여 제조되었으므로, 크게 Qorvo와 NXP로 나눌 수 있다. 칩은 PDoA 방향탐지 기능이 있는 경우 수신기가 2개가 필요하므로, TWR 거리측정만 가능한 IC와 거리측정과 방향측정이 동시에 이루어진 칩으로 나누어 출시하고 있다. 이 중에서 최초로 출시된 HRP UWB IC인 DWM1000 모듈의 경우 방향탐지 기능이 없는 단일 수신기 구조이고, 현재 전 세계에서 HRP UWB로 사용되는 채널 9번을 지원하지 않지만 HRP UWB가 스마트폰에 장착되기 전에 출시된 IC이기 때문에 관련 자료가 풍부하고 쉽게 구할 수 있다. 또한, PC에서 동작하는 개발 kit가 존재하고 open software가 다수 존재하여 아두이노로 사용자가 쉽게 프로그래밍할 수 있어 학계에서는 지금도 많이 사용하고 있다. 하지만 본 연구에서는 국내 전파법에 맞을 뿐만 아니라, 최신 표준을 따르는 HRP UWB 표준인 IEEE 802.15.4z-2020을 지원하는 DWM3000 모듈을 이용하였다. DWM3000 모듈은 2개의 주파수(CH5와 CH9)를 지원하므로 2개의 주파수의 CIR을 LoS 환경과 NLoS 환경에서 비교할 수 있다.

측정환경은 그림 5와 같다. 먼저 DWM3000모듈을 마이크로 보드인 Nordic nRF52840과 연결하였고, 마이크로 보드는 PC상에서 프로그래밍하여 채널, 패킷 전송 속도 등 HRP UWB와 관련된 파라미터를 조정할 수 있도록 하였다. 패킷마다 발생하는 대표 CIR값과 FP_INDEX값은 SPI

표 1. HRP UWB 주요 IC

Table 1. Overview of HRP UWB chips.

Design	Model	Function	Channel	Standard
Apple	U1	TWR+PDoA	5,9	w/STS
Qorvo	DW1000	TWR	1-5	NO STS
	DW3000 family	TWR+PDoA	5,9	w/STS
NXP	SR040	TWR	5,9	w/STS
	SR150	TWR+PDoA	5,9	w/STS



(a) 가시선환경과 비가시선환경 측정 시나리오
(a) LoS and NLoS measurement scenario



(b) LoS 환경의 측정 사진
(b) Photograph of LoS measurement

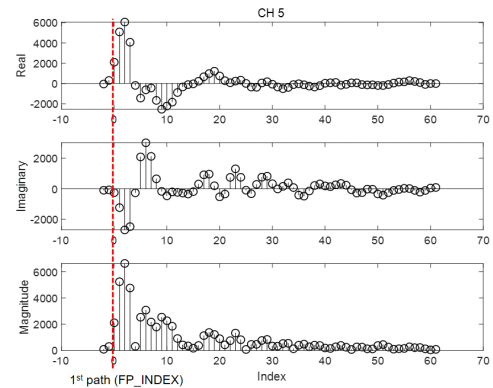
그림 5. HRP UWB CIR 측정 환경
Fig. 5. Measurements environments of HRP UWB CIR.

인터페이스로 PC로 전송하도록 하였고, 데이터가 수집된 후 특성은 MATLAB으로 분석할 수 있도록 하였다. 가시선(line-of-sight: LoS)과 비가시선(non line-of-sight: NLoS) 환경 모두 거리는 2 m로 고정하였으며, NLoS 환경을 만들기 위하여 UWB 기기 사이의 1 m² 크기의 금속반사판을 만들어 직접파를 차단하였다. 측정위치는 대학 실험실이며, 한쪽에 벽이 있어 반사파가 만들어지며, 지면 반사파는 1 m 높이의 삼각지대에 위치시켜 최소화하였다.

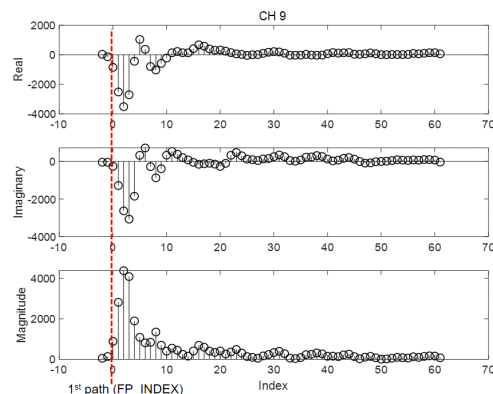
4-2 측정 결과 및 분석

먼저 UWB 송신기와 UWB 수신기를 LoS 환경에서 CIR 데이터의 특성을 살펴보았다. 실험이 전자파 무반향실이 아니라 실험실 환경이므로 완벽한 LoS 환경으로 볼

수 없으며, 주변 벽면에 의한 간접파가 다수 존재하므로 CIR 데이터에 여러 개의 peak가 있을 것으로 예측할 수 다. LoS 환경에서 주파수 채널의 차이에 따른 CIR의 실수, 허수, 크기를 그림 6에 나타내었다. 원래 CIR 데이터는 1,016개가 있지만 의미 있는 데이터는 FP_INDEX 이후의 데이터이므로 1,016개의 CIR 데이터 중에서 64개의 데이터만을 사용하였다. 그림 6과 같이 64개의 데이터를 FP_INDEX 다음의 CIR값을 0의 인덱스에 위치시키고, FP_INDEX 이전 2개 데이터부터 64개의 데이터를 나타내었다. 그림 6(a)는 채널 5번(중심주파수 6,489.6 MHz)인 경우이고, 그림 6(b)는 채널 9번(중심주파수 7,987.2 MHz)인 경우이다. 식 (6)과 식 (7)에서 예측할 수 있듯이 상관



(a) 5번 채널의 경우
(a) Frequency channel 5



(b) 9번 채널의 경우
(b) Frequency channel 9

그림 6. LoS 환경에서의 HRP UWB의 주파수별 CIR
Fig. 6. HRP UWB CIR data as a function of frequency.

신호의 I신호와 Q신호는 주파수오차와 위상오차에 의해 측정할 때마다 크기와 부호가 랜덤하게 변하지만 I신호와 Q신호로부터 크기를 구하면 식 (8)에서 예측한 바와 같이 FP_INDEX 주변에서 최대값을 갖는 일정한 상관 특성을 보임을 알 수 있다. 채널 5번보다 채널 9번의 경우, 직접파 외에 간접파에 의한 상관의 크기가 작은 것을 알 수 있는데, 이는 주파수가 올라갈수록 경로손실, 반사손실 등에 의해 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

다음으로 시간의 변화에 따라 CIR의 특성 변화를 확인하였다. 이를 위하여 HRP UWB 모듈을 고정된 채 지속적으로 패킷을 전송하여 각 패킷별로 DWM3000 모듈에서 제공하는 CIR의 특성이 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 측정하였다. 마이컴으로 HRP UWB 패킷을 보내는 시간을 제어하여 CIR을 추출할 수 있는 최소시간인 1 msec 임을 확인하였으며, 이에 따라 1 msec 간격으로 50번 측정하여 식 (9)에 의한 수신신호의 크기의 변화와 식 (6)과 식 (7)을 이용한 CIR 신호의 FP_INDEX 바로 다음 인덱스에 위치한 상관값의 위상이 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 CH5와 CH9에 대해 각각 측정하였다. 측정 결과는 그림 7과 같다. 먼저 식 (9)로 계산한 신호의 크기는 상관값으로부터 추정하는 것으로 정확하지는 않지만 LoS 환경에서는 그 크기를 어느 정도 추정하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다. 단, CH5의 경우 4 dB 내외, CH9의 경우 6 dB 내외의 분산을 가지는 것을 실험적으로 확인

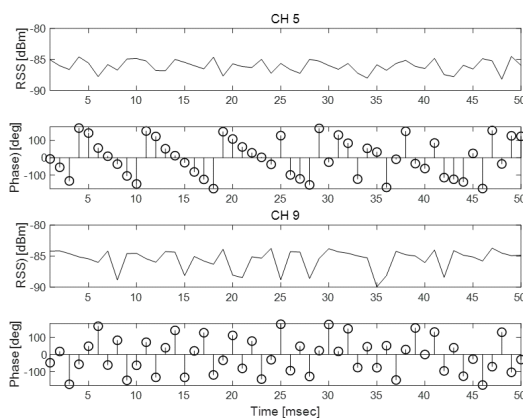


그림 7. 시간변화에 따른 HRP UWB CIR 변화

Fig. 7. Measurements of HRP UWB CIR variation as a function of time in LoS channel.

하였다.

또한, 시간에 따른 FP_INDEX 다음 인덱스의 CIR 상관값의 위상값의 변화를 살펴보았을 때, 주파수오차와 위상오차에 의해서 위상이 지속적으로 변하는 것을 확인하였다. 예를 들어 그림 7과 같이 CH5의 경우 위상이 시간에 따라 변하는 주파수 차이가 발생하고, 이러한 주파수 차이는 지속적으로 변함을 알 수 있다. 주파수 차이와 함께 위상오차도 발생하는데 일정한 패턴을 보이지는 않았다. 반면, CH9의 경우 일정한 주파수오차는 보이지 않지만 랜덤한 위상오차가 발생하였다. 즉, CH9의 경우 주파수오차는 상대적으로 적게 나타났으나, 랜덤한 위상오차가 발생함을 알 수 있다. 이는 특별한 순간의 값일 뿐이며, 시간이 지나 다시 측정하면 또 다른 불규칙한 특성을 보이므로 재현은 불가능하다. 따라서 시간변화에 따른 주파수오차와 위상오차는 짧은 시간을 제외하고는 예측하기 어려우므로 적절히 제어되어야 하는 값임을 알 수 있다.

마지막으로 그림 8과 같이 LoS 환경과 NLoS 환경에서 채널별 CIR 측정을 진행하였다. LoS의 경우와 NLoS 환경에서의 CIR 결과의 차이가 그림 8에 나타나 있다. CIR을 이용하여 식 (9)로 전력을 구해 보면 같은 거리에서 30 dB 정도 수신전력의 차이가 발생할 뿐만 아니라, LoS 환경에서는 FP_INDEX 다음에 하나의 직접파를 나타내는 피크만이 있는 데 반하여 NLoS 환경에서는 직접파가 없고 2개의 간접파가 입사됨을 알 수 있다. 크기도 첫 번째 입사되는 반사파보다 2번째 입사되는 반사파가 조금 더 큰 신호가 입사되는 경우가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

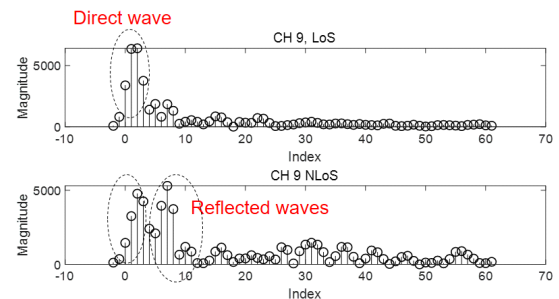


그림 8. LoS와 NLoS 환경에서의 HRP UWB CIR 비교

Fig. 8. Comparison of HRP UWB CIR in LoS and NLoS environments.

또한, NLoS 환경에서는 수신신호 크기가 작아짐에 따라 상대적으로 CIR에서의 잡음값도 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 최근 관심이 집중되고 있는 HRP UWB 기술의 CIR 특성을 측정하고 분석하였다. 일반적인 무선 통신기술과 달리 HRP UWB는 정밀한 거리측정과 방향 측정을 위해 CIR이라는 새로운 개념을 사용하므로 이에 대한 정확한 이해가 매우 중요하다. 이에 본 논문에서는 HRP UWB IC의 CIR의 특성을 수식과 함께 자세히 설명하였다. 특히, 수신기에서 IQ 다이버시티 기반으로 CIR의 주파수오차와 위상오차를 줄이는 방법에 대한 이론적인 기반을 정리할 수 있었다. 이러한 이론을 바탕으로 상용화된 실제 Qorvo사의 DWM 3000 HRP UWB 모듈을 이용하여 다양한 환경에서 CIR을 측정하여 이를 분석하였다. 분석 결과, CIR 데이터의 정확한 의미를 이해할 수 있었고, 이를 바탕으로 CIR을 이용한 알고리즘의 개선이나 HRP UWB 수동레이다 등 향후 활발하게 진행될 HRP UWB 기술을 활용하는 데 도움이 될 것이라 기대된다.

References

- [1] B. J. Jang, "Principle and trends of UWB positioning technology," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2022.
- [2] P. Sedlacek, M. Slanina, and P. Masek, "An overview of the IEEE 802.15. 4z standard its comparison and to the existing UWB standards," in *2019 29th International Conference Radioelektronika(RADIOELEKTRONIKA)*, Pardubice, Apr. 2019.
- [3] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*, IEEE 802.15.4-2015, Apr. 2016.
- [4] *Characteristics of Ultra-Wideband Technology*, SM. 1755 -0, May 2006.
- [5] M. J. Kuhn, J. Turnmire, M. R. Mahfouz, and A. E. Fathy, "Adaptive leading-edge detection in UWB indoor localization," in *2010 IEEE Radio and Wireless Symposium(RWS)*, New Orleans, LA, Jan. 2010.
- [6] I. Dotlic, A. Connell, H. Ma, J. Clancy, and M. McLaughlin, "Angle of arrival estimation using decawave DW1000 integrated circuits," in *2017 14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications(WPNC)*, Bremen, Oct. 2017, pp. 1-6.
- [7] I. Domuta, T. P. Palade, E. Puschita, and A. Pastrav, "Timestamp estimation in P802.15.4z amendment," *Sensors*, vol. 20, no. 18, p. 5422, Sep. 2020.
- [8] J. H. Choi, J. E. Kim, and K. T. Kim, "People counting using IR-UWB radar sensor in a wide area," *IEEE Internet Things Journal*, vol. 8, no. 7, pp. 5806-5821, Apr. 2021.
- [9] A. Chehri, P. Fortier, and P. M. Tardif, "Uwb-based sensor networks for localization in mining environments," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, pp. 987-1000, Jul. 2009.
- [10] S. Ahmed, S. H. Cho, "Hand gesture recognition using an IR-UWB radar with an inception module-based classifier," *Sensors*, vol. 20, no. 2, p. 564, Jan. 2020.
- [11] M. Singh, M. Roeschlin, E. Zalzala, P. Leu, and S. Čapkun, "Security analysis of IEEE 802.15.4z/HRP UWB time-of-flight distance measurement," in *Proceedings of the 14th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, Abu Dhabi, Jun. 2020, pp. 227-237.
- [12] A. Moschevikin, E. Tsvetkov, A. Alekseev, and A. Sikora, "Investigations on passive channel impulse response of ultra wide band signals for monitoring and safety applications," in *2016 3rd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems(IDAACS-SWS)*, Offenburg, Sep. 2016, pp. 97-104.
- [13] Qorvo, "DW1000 user manual: How to use, configure and program the DW1000 USB transceiver," 2017. Available: <https://www.qorvo.com/products/d/da007967>
- [14] S. Pala, S. Jayan, and D. G. Kurup, "An accurate UWB

localization system using modified leading edge detection algorithm," *Ad Hoc Networks*, vol. 97, p. 102017, Feb. 2020.

- [15] Decawave, "Decawave is now part of Qorvo." Available: <https://www.decawave.com/support>
- [16] B. J. Jang, H. J. Song, "A study on the phase diversity and optimal I/Q signal combining methods on a UHF RFID receiver," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 4, pp. 442-450, Apr. 2008.
- [17] M. Zhao, T. Chang, A. Arun, R. Ayyalasomayajula, C. Zhang, and D. Bharadia, "ULoc: Low-power, scalable and cm-accurate UWB-tag localization and tracking for indoor applications," *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*,

vol. 5, no. 3, p. 140, Sep. 2021.

- [18] A. Ledergerber, M. Hamer, and R. D'Andrea, "Angle of arrival estimation based on channel impulse response measurements," in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, Macau, Nov. 2019, pp. 6686-6692.
- [19] I. Dotlic, A. Connell, H. Ma, J. Clancy, and M. McLaughlin, "Angle of arrival estimation using decawave DW1000 integrated circuits," in *2017 14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications(WPNC)*, Bremen, Oct. 2017, pp. 1-6.
- [20] N. Smaoui, M. Heydari, and O. Gnawali, "Single-antenna AoA estimation with UWB radios," in *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC)*, Nanjing, Mar. 2021, pp. 1-7.

차 형 호 [국민대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0001-6232-0569>



2016년 3월~현재: 국민대학교 전자공학부 학부생
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용

장 병 준 [국민대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5295-6050>



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주)
1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원

구원 무선방송연구소

2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원
2013년 9월~2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가(CP)
2005년 9월~현재: 국민대학교 전자공학부 교수
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용

윤 민 경 [국민대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0002-3331-5223>



2018년 3월~현재 : 국민대학교 전자공학부 학부생
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용