

UWB 측위기술의 원리 및 동향

Principles and Trends of UWB Positioning Technology

장 병 준

Byung-Jun Jang

요 약

UWB 기술은 20년 전 근거리 무선통신 기술로 화려하게 등장하였으나, Wi-Fi 등의 경쟁 기술에 밀려 관심에서 멀어져 갔다. 하지만 UWB 기술을 이용하면 무선기기 간에 거리를 측정하는 것이 가능하다는 특징으로 인해 최근 재조명되게 되었다. 특히, NXP, Qorvo 등에서 UWB 칩을 출시하였고, 삼성과 애플 스마트폰에 UWB 기술이 탑재됨으로써 본격적으로 대중화되기 시작하였다. 향후 자동차, 스마트 공장, 스마트 홈 등 위치기반의 다양한 분야에 UWB 기술이 스마트폰과 연동되어 사용될 전망이다. 이와 같이 다양한 분야에서 UWB 기술의 중요성이 높아지고 있지만, 아직까지도 최신 UWB의 측위기술의 원리와 특성에 대한 연구자료가 부족한 상황이다. 이에 본 논문에서는 독자들이 최신 UWB 측위 기술을 체계적으로 이해하는데 도움을 주고자 UWB 측위기술의 원리를 설명하고, 이를 바탕으로 최신 연구개발 및 상용화 동향을 제시하고자 한다.

Abstract

Ultra-wideband (UWB) technology appeared as a short-range wireless communication technology 20 years ago, but competing technologies, such as Wi-Fi, attracted more interest. However, UWB technology has recently been re-evaluated because it makes it possible to measure the distance between wireless devices. In particular, UWB chips were released by NXP and Qorvo, and, as Samsung and Apple began installing UWB technology in smartphones, it began to be popularized. It is expected that UWB technology will be used in connection with smartphones in various location-based fields, such as automobiles, smart factories, and smart homes. Although the importance of UWB technology is increasing in various fields, as described above, the research on the principles and characteristics of the latest UWB positioning technology has been inadequate. Therefore, to help readers systematically understand the latest UWB positioning technology, the principle of UWB positioning technology is explained, and the latest research and development, as well as commercialization trends, are described.

Key words: Direction Finding, Angle of Arrival, Radar, MIMO, Beamforming, Localization

I. 서 론

무선기술 중 UWB(ultra-wide band) 기술만큼 부침이 많은 기술도 드물 것이다. UWB 기술이란 시간영역에서 폭

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

국민대학교 전자공학과(Department of Electrical Engineering, Kookmin University)

· Manuscript received January 3, 2022 ; Revised January 14, 2022 ; Accepted January 28, 2022. (ID No. 20220103-001S)

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

이 좁은 펄스를 이용하는 무선기술을 의미하며, 주파수 영역에서 보면 당시의 기존 무선통신기술보다 대역폭이 매우 넓어 초광대역을 의미하는 UWB란 이름을 갖게 되었다. UWB 기술은 미국에서 1970년대부터 통신 또는 레이다 등에서 군사용으로 개발되었으며, 이후 군사보안이 해제됨으로써 2000년대 들어 상용화되기 시작되었다. 당시 UWB 기술은 주로 근거리 무선개인통신망 (WPAN: wireless personal area network)으로서 관심을 받게 되었고, WPAN 표준화 단체인 IEEE 802.15 위원회에서 표준화가 진행되어 2007년 IEEE 802.15.4a 표준이 발표되었다. 그러나 당시 경쟁기술이었던 Wi-Fi나 Bluetooth 등에 밀려 관심에서 멀어져 갔다^{[1],[2]}.

하지만 UWB 기술을 이용하면 근거리 무선기기 간에 무선통신뿐만 아니라, 무선기기 간의 거리를 측정하는 것이 가능하다는 장점으로 인해 UWB 기술이 재조명되게 되었고, 2019년 애플의 iPhone11에 UWB 칩이 탑재됨으로써 무선통신보다는 측위를 활용한 서비스로 화려하게 부활하게 되었다. 현재는 칩 제조사인 Qorvo와 NXP에서 UWB 측위기능의 칩을 판매하고 있고, 애플과 삼성의 스마트폰에 UWB 기능이 탑재된 스마트폰을 출시하고 있으며, 현대자동차 등 자동차 회사들도 UWB 기능을 이용한 스마트폰으로 차문을 열 수 있는 차량을 출시할 예정에 있다. 특히, 스마트폰이 IT의 핵심 디바이스와 플랫폼 역할을 하고 있는 것을 감안한다면 UWB 기술은 향후 자동차, 스마트 공장, 스마트 홈 등 다양한 분야에서 활발하게 활용될 것으로 전망된다^{[3]~[6]}.

하지만, UWB 기술이 그동안 오랜 시간 침체되어 있었기에 Wi-Fi 등 다른 무선통신 기술에 비해 관련된 연구논문이나 기술자료가 매우 부족한 상태에 있다. UWB 기술을 학술검색하면 2000년대 초반에 연구된 UWB 통신이나 UWB 레이다 연구 등이 주로 검색되며, 최근 관심이 높은 측위와 관련된 최신 UWB 기술은 검색되지 않는다. 그나마 검색이 되는 측위기술은 주로 UWB칩의 응용연구가 대부분이어서 UWB 측위기술의 원리와 기술적인 특성을 이해하기는 어려운 상황이다. 또한, UWB 칩이 주로 스마트폰이나 자동차 등에 탑재되고 있는 상태이므로 Qorvo나 NXP 등의 칩 제조회사들은 보안 등의 문제로 관련 자료를 민간에게 자세히 공개하고 있지 않고 있다^[7].

이에 본 논문에서는 독자들이 최신 UWB 측위 기술을 체계적으로 이해하는데 도움을 주고자, UWB 측위기술의 원리와 미래 방향성을 최신 연구개발 및 상용화 동향과 함께 제시하고자 한다. 이에 따라 먼저, II장에서 UWB 주파수와 국내기술기준을 살펴보고 기술기준을 바탕으로 LRP(low rate pulse repetition) UWB와 HRP(high rate pulse repetition) UWB 기술을 CIR(channel impulse response) 측면에서 살펴본다. 다음으로 III장에서는 CIR을 이용하여 UWB에서 ToF(time of flight)를 이용하여 거리를 측정하는 원리를 살펴본다. IV장에서는 UWB 방향탐지를 포함한 측위기술의 원리를 살펴본다. 특히, UWB 측위기술의 주요 IC 제조사의 기술적 특징과 UWB 측위기술의 향후 전망을 다양한 응용 사례와 함께 살펴보고 결론을 맺는다.

II. UWB 주파수와 기술기준

2-1 UWB 주파수

UWB는 용어가 의미하듯이 초광대역으로 신호를 전송하는 방식으로 미국 연방통신위원회(FCC: Federal Communications Commission)의 정의에 의하면 500 MHz 이상의 주파수 대역폭을 사용하는 경우, UWB라고 정의하고 있다. 주파수 대역은 나라마다 조금씩 다르지만 보통 3.1 GHz에서 10.6 GHz 사이를 500 MHz 단위로 쪼개서 채널을 지정하여 사용한다. 그림 1에 UWB 표준에서 정의하는 주파수대역과 채널번호가 나타나 있다. 주파수는 나라마다 다르게 사용되고 있으므로 그림 1의 UWB 채널을 모든 나라에서 다 사용될 수 있는 것은 아니며, 나라별로 사용가능한 채널이 정해져 있다^[8].

국내에서는 UWB를 비면허무선기기로 지정하고 있으며, 표 1과 같이 ‘신고하지 아니하고 개설할 수 있는 무선

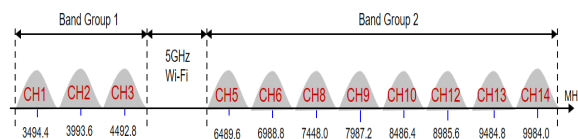


그림 1. UWB 대역과 채널
Fig. 1. UWB band and channel.

표 1. 국내 UWB 기술기준

Table 1. Local regulations for UWB.

구분		기술기준
주파수 대역		4.2~4.8 GHz 6.0~10.2 GHz
전력 밀도	평균전력	-41.3 dBm/MHz
	첨두전력	0 dBm/50 MHz
일반적 조건		항공기, 선박, 위성, 모형비행기에의 적용을 금지함
주파수대역폭		450 MHz 이상일 것 (1MHz RBW, 10 dB 대역폭 기준)
불요발사		- 90 dBm/MHz@1 GHz 미만 - 85 dBm/MHz@1~2.7 GHz - 70 dBm/MHz@2.7~3.735 GHz - 51.3 dBm/MHz@3.735~4.8 GHz - 70 dBm/MHz@4.8~6 GHz - 51.3 dBm/MHz@6~10.2 GHz - 70 dBm/MHz@10.2 GHz 이상
간섭 대책	4.2~4.8 GHz	- 61 dBm 이상 신호감지할 경우 2초 이내 -70 dBm/MHz 이하로 저감
	6.0~7.2 GHz	Duty 규정적용 실의 기기 금지
부차적 전파발사		-54 dBm/MHz이하@사용주파수대역
<ul style="list-style-type: none"> · 7,737 MHz~8,236.8 MHz 대역의 UWB 방식을 지원하는 “이동통신용 무선설비의 이동국 송신장치”는 MCC (mobile country code) 등을 적용한 펄웨어에 대한 자체확인서, 10 초 이내에 UWB 기기의 송신 중지기능을 증명하는 시험 성적서, ‘신고하지 아니하고 개설할 수 있는 무선국용 무선설비의 기술기준’ 제10조제1항제2호에 대한 “제조사 서약서”를 제출받아 확인한다. · 해당기기 또는 사용자 설명서 등에 “항공기, 선박, 위성, 모형비행기에의 적용을 금지한다.”는 문구가 기재되어 있는지를 확인한다. 		

국용 무선설비의 기술기준'에서 UWB 기술기준을 정하고 있다. 국내에서는 4.2~4.8 GHz (CH3)와 6.0~10.2 GHz(CH5~CH12)가 할당되어 있으나, 동일한 주파수대역을 사용하는 무선기기의 간섭을 줄이기 위해 4.2~4.8 GHz(CH3), 6.0~7.2 GHz (CH5와 CH6)는 간섭경감대책을 사용하여야 하여 사용이 어려우므로 주로 7.2~10.2 GHz 대역인 CH8부터 CH14번까지의 주파수대역만이 UWB용으로 사용이 가능하다.

하지만 표 1의 국내기술기준에 따르면 UWB는 항공기,

선박, 위성 등 이동체에서는 전파 간섭의 우려로 사용할 수 없다. 스마트폰이나 UWB 기기는 사람이 휴대하고 항공기나 선박에 승선할 수 있으므로 스마트폰이나 노트북에 장착된 UWB기기는 표 1의 아래와 같은 기술기준을 추가로 만족해야 한다. 즉, 항공기, 선박 등에 UWB 기능이 탑재된 스마트폰은 국내 영역을 벗어나 다른 나라로 이동할 경우 이동통신망으로 이를 확인하여 사용을 멈추는 MCC(mobile country code) 기능을 가져야 한다. 또한, MCC 기능에 해당하는 UWB 주파수로 9번 채널(7,737 MHz~8,236.8 MHz)만을 지정하고 있으므로 국내에서는 9번 채널만을 사용하는 UWB 기술만이 현재 사용 가능하다. 따라서 UWB 기술의 활성화를 위해서는 표 1의 규정을 CH8번이나 CH10번 이상의 UWB 채널로 확장하는 기술기준 개정 절차가 필요할 것으로 보인다^{[9],[10]}.

2-2 UWB 출력과 LRP와 HRP의 구분

UWB 기술기준에서 주파수와 함께 전력밀도도 중요한 파라미터이다. UWB 도입 초기에는 UWB 평균전력밀도(average power spectral density)의 크기가 -41.3 dBm/MHz이며, 이 값이 매우 작다는 것만이 부각되어 UWB기기가 타 무선기기에 간섭을 주지 않는다는 말도 있었으나, 이는 오해가 있는 표현이다. 본 절에서는 UWB 신호의 전력에 대해 자세히 살펴본다.

UWB 전력은 전력밀도로 표현되는데, UWB 전력밀도는 평균전력밀도와 첨두전력밀도(peak power spectral density)의 2개로 표현되므로 이 2개를 모두 고려해야 한다. 먼저 평균전력밀도를 보자. 평균전력밀도는 1 MHz당 -41.3 dBm(=74 nW)이므로 500 MHz일 경우는 주파수가 곱해져서 -14.3 dBm (=37 uW)이 된다. 이 값은 1 msec 시간 구간 동안의 평균이므로 1 msec에 2 nsec의 펄스 폭을 갖는 UWB 펄스가 하나만 있다고 가정하면 그림 2와 같이 펄스의 첨두전력은 42.7 dBm(=18 W)의 큰 전력값이 될 수 있다. 이는 비록 시간 구간은 작지만 해당 시간구간 동안 타 무선기기에 큰 간섭을 줄 수 있다. 따라서 UWB 기술기준으로 하나의 펄스에서 큰 전력을 사용하는 것을 막을 필요가 있다. 이를 위해 UWB에서는 첨두전력밀도에 대한 규정을 두고 있다. 기술기준에 따르면 첨두전력밀도는 50 MHz일 경우, 1 mW(=0 dBm)이므로 500 MHz

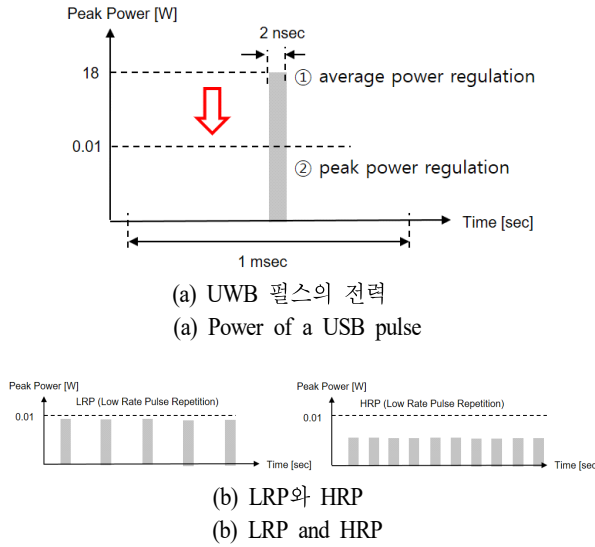


그림 2. UWB 펄스의 전력 특성
Fig. 2. Characteristics of UWB pulses.

로 변환하면 10 mW(=10 dBm)가 되므로 평균전력밀도 기술기준 규정에 의해 너무 큰 전력의 펄스를 사용하는 것을 막을 수 있게 된다^[11].

UWB 기술은 반드시 기술기준을 만족해야 하므로 평균전력밀도와 침투전력밀도에 대한 기술기준으로부터 UWB에서 사용할 수 있는 펄스의 수와 하나의 펄스의 크기가 결정되게 된다. 예를 들어 그림 2(b)와 같이 침투전력밀도 기술기준에 따라 최대 10 dBm의 크기를 갖는 펄스는 평균전력밀도 규정에 따라 1 msec 동안 최대 1,862 개의 펄스가 포함될 수 있다. 반면, 펄스의 크기가 더 작다면 더 많은 펄스가 포함될 수 있게 된다. 펄스의 수를 줄이면 전력이 커져 통신 환경이 커지지만, 펄스의 수가 적어지므로 펄스를 통해 송신할 수 있는 정보의 양은 작아지게 되므로 펄스의 수와 펄스의 크기는 상호 보완(trade-off)의 관계를 갖는다.

최신 UWB 표준인 IEEE 802.15.4-2005와 IEEE 802.15.4z-2020에서는 UWB 펄스의 수를 기준으로 LRP와 HRP로 구분된다. LRP는 HRP보다 출력이 높지만 펄스의 수는 적으며, HRP는 펄스의 수가 많지만 상대적으로 출력은 낮게 된다. 보통 출력이 높은 경우, RF CMOS IC 설계 시 송신기 설계에 부담이 될 수 있고, 저전력 동작이 어려우므로 최근 관심이 집중되어 스마트폰에 내장된 기술은

표 2. LRP와 HRP UWB 표준(IEEE 802.15.4z)

Table 2. LRP and HRP UWB standard of IEEE 802.15.4z.

Division			Mean PRF
LRP	Long range mode		2 MHz
	Extended mode		1 MHz
	Base mode		1 MHz
	Dual frequency mode		1/2/4 MHz
	Extended dual frequency mode		1/2/4 MHz
	Dual frequency mode /w EPC		1/2 MHz
HRP	RDEV		3.9/15.6/62.4 MHz
	ERDEV	BPRF	62.4 MHz
		HRPF	124.8/249.6MHz

- EPC: Enhanced payload capacity
- RDEV: Ranging device
- ERDEV: Enhanced ranging device
- BPRF: Base pulse repetition frequency
- HPRF: Higher pulse repetition frequency

HRP UWB 기술이다. 반면, UWB 레이다는 목표물에 반사되는 반사파를 수신해야 하므로 출력이 높아야 한다. 따라서 UWB 레이다에서는 LRP 방식의 UWB 기술을 사용하는 것이 일반적이다. 표 2는 IEEE 802.15.4z에서 정의하는 LRP와 HRP의 PRF(pulse repetition frequency) 주파수를 나타낸다. LRP의 경우, 1/24 MHz의 낮은 주파수를 사용하는 데 반하여 HRP UWB의 경우 수십 MHz의 높은 PRF를 사용하고 있음을 알 수 있다^{[12],[13]}.

2-3 UWB와 CIR

UWB는 폭이 좁은 펄스를 사용하므로 UWB 원리를 이해하기 위하여 그림 3과 같이 UWB 송신기가 하나의 UWB 펄스를 보낸다고 가정하고, 이를 해석해 보자. UWB 신호는 펄스폭이 작으므로 하나의 송신펄스를 이상적인 임펄스 신호 $\delta(t)$ 로 가정할 수 있다. 이제 수신기에는 송신신호가 시간이 지연되어 수신되는 직접파(LoS: line of sight)와 주변 환경에 의한 반사되어 수신되는 반사파(NLoS: non-line of sight)의 중첩되어 수신된다. 이러한 수신신호는 송신신호가 임펄스 신호이므로 수신신호는 바로 채널의 특성을 나타내는 채널임펄스 응답(CIR: channel impulse response) 신호가 된다. 직접파는 모든 반사파보다

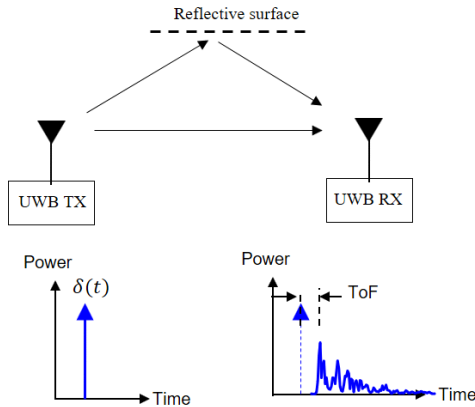


그림 3. UWB 송신신호와 채널임펄스응답
Fig. 3. UWB signal and channel impulse response.

먼저 수신되므로 CIR의 첫 번째 피크까지의 시간지연이 바로 송신기에서 떠난 전파가 수신기에 도착한 직접파의 도달시간(ToF)이 된다. 이 신호는 송신기와 수신기 간의 거리에 비례하므로 이 시간을 정확히 측정할 수 있다면 UWB 송신기와 수신기 간의 거리를 계산할 수 있다.

실제 상용화된 HRP UWB는 크기가 작은 여러 개의 펄스를 사용하므로 그림 3과는 차이가 있다. HRP UWB에서는 펄스 하나의 크기가 작으므로 하드웨어 구현이 용이한 장점이 있는 반면에, 펄스의 크기가 작아 그림 3과 같이 하나의 펄스를 직접 수신하는 것이 어려울 뿐만 아니라, 펄스 간의 간격이 짧으므로 펄스 간에 인접심볼 간섭(ISI: inter-symbol interference)이 발생하게 된다. 따라서 HRP UWB 수신기에서는 펄스 하나로부터 CIR을 구하지 않고, 송신기에서 STS(secure training sequence)라는 약속된 암호화된 펄스열을 이용하여 송신하고, 수신기는 자체적으로 계산한 STS 파형과 상관(correlation) 연산과정을 거쳐 CIR을 계산한다. 이렇게 되면 여러 개의 크기가 작은 펄스로도 CIR을 구할 수 있을 뿐만 아니라, UWB 기기에 대한 보안을 강화할 수 있는 장점이 있어 이러한 방식이 IEEE 802.15.4z-2020 표준으로 채택되었다^{[14]~[16]}.

III. UWB 거리측정기술

3-1 UWB 상용 칩에서 제공하는 CIR

앞에서 설명한 UWB의 펄스 생성과 CIR 계산은 UWB

IC 내부에서 하드웨어적으로 이루어진다. 따라서 자세한 연산과정이나 회로 구성 등은 회사 기밀이라 자세히 알려져 있지는 않다. 대신 UWB IC 제조회사인 Qorvo와 NXP에서는 UWB IC를 사용하는 사용자를 위해 CIR과 관련된 다양한 정보를 레지스터에 저장하여 놓고, 사용자가 SPI(serial peripheral interface)로 추출하여 사용할 수 있도록 하고 있으므로 CIR을 통해 HRP UWB의 특성을 유추할 수 있다. 표 3은 Qorvo의 DWM1000 UWB IC에서 제공하는 CIR 정보의 레지스터의 정보를 보여주고 있다. 그림 4는 이러한 레지스터의 CIR 정보를 이용하여 LoS 환

표 3. Qorvo(Decawave) DWM1000의 CIR 정보
Table 3. CIR informations of DWM1000.

ID	Length (octets)	Mnemonic	Description
0x15	14	RX_TIME	Receive time stamp
RX_STAMP (40 bit) : Fully adjusted time of reception FP_INDEX (16 bit) First path index FP_AMPL1 (16 bit): First path amplitude point 1 RX_RAWST (40 bit) : Raw timestamp of the frame			
0x12	8	RX_FQUAL	Rx frame quality information
STD_NOISE (16 bit) : Standard deviation of noise FP_AMPL2 (16 bit) First path amplitude point 2 FP_AMPL3 (16 bit) : First path amplitude point 3 CIR_PWR (16 bit) : CIR power			
0x25	4,064	ACC_MEM	Accumulated CIR

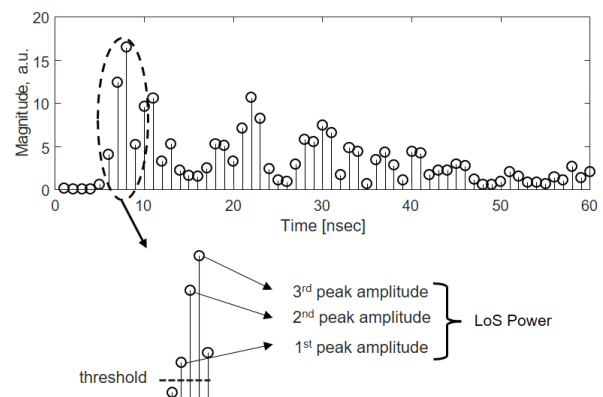


그림 4. 전형적인 UWB CIR 측정 데이터
Fig. 4. Measurement data of typical UWB channel impulse response (CIR).

경에서 측정된 CIR 데이터의 예를 보여준다. CIR 데이터는 I와 Q신호의 복소수로 표현되는데, 그림 4는 I와 Q신호를 이용해 크기만을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 UWB 수신기는 펄스폭이 2 nsec이고, 1 GHz로 샘플링하므로 CIR 데이터는 1 nsec의 간격을 갖게 되며, 1 nsec 간격으로 일련의 상관값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 펄스폭이 2 nsec인 직접파 펄스에 대한 상관값은 기준값(threshold)보다 큰 3개의 펄스(FP_AMPL1, FP_AMPL2, FP_AMPL3)에만 영향을 주므로 3개의 펄스의 상관값을 이용하여 수신전력 레벨을 예측할 수 있다.

다음으로 ToF는 CIR값이 threshold값을 넘는 순간이라고 볼 수 있는데, 그림 4에서 볼 수 있듯이 샘플링이 1 nsec이므로 해당 순간에서의 ToF를 바로 알 수는 없다. 즉, CIR 데이터의 인덱스를 통해서 거리를 추정한다면 1 nsec 간격이므로 거리 측정 해상도는 15 cm가 되어 거리오차가 너무 크다. 따라서 보통 상용화된 UWB 수신기는 여러 개의 CIR 데이터를 이용하여 ToF를 추정하는 알고리즘을 사용하게 된다^{[7],[17]}.

3-2 UWB ToF 정밀 추정

UWB에서 대역폭을 500 MHz보다 넓게 사용하여 펄스의 폭을 좁히게 되면 ToF 해상도를 높일 수 있으나, 이는 기술기준의 제약과 실제 구현 시 어려움이 많으므로 주파수를 넓히지 않고 해상도를 높일 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 사용한 방법은 LED(leading edge detection) 알고리즘이다. LED 알고리즘은 여러 개의 CIR의 통계적인 특성을 이용하여 ToF 해상도를 높이는 방법이다. UWB 송신기와 UWB 수신기는 떨어져 있으므로 아무리 정밀한 클럭(clock)을 사용하더라도 클럭 오차(clock error)에 의해 CIR을 구할 때마다 샘플링 시간이 조금씩 변화하는 현상이 발생한다.

만약 CIR을 여러번 측정하는 동안 전파환경이 변화하지 않는다고 가정하고, UWB 송신기가 일련의 펄스열을 송신하고 UWB 수신기가 이를 바탕으로 CIR 데이터를 연속적으로 구한다고 하자. CIR 데이터를 구하는 시간에 미소한 차이에 의해 UWB 송신기와 수신기의 발진기의 클럭은 미소하게 변할 것이고, 이에 따라 CIR의 샘플링 순간이 그림 5와 같이 조금씩 흔들릴 것이다. 이러한 혼

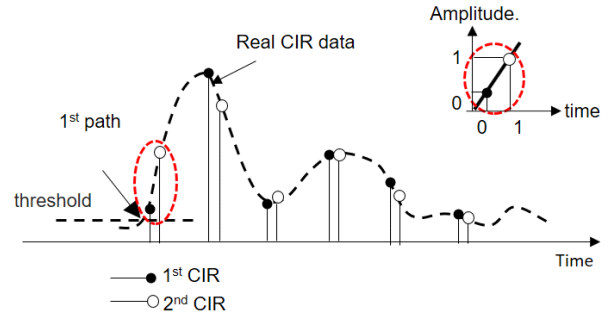


그림 5. UWB ToF 추정 알고리즘의 원리
Fig. 5. Principle of UWB ToF estimation algorithm.

들림은 통계적으로 독립적이라고 볼 수 있으므로 CIR에서 첫 번째 직접파의 크기만을 따로 모아서 그 크기의 변화를 관찰하면 통계적으로 균일한 분포를 가질 것이다. 따라서 CIR별로 첫 번째 직접파의 크기를 모아 그 평균값을 구하면 이 값은 CIR 하나로 구하는 크기보다 더 정확한 첫 번째 직접파의 크기값으로 볼 수 있다. 이제 첫 번째 직접파의 CIR 데이터는 시간이 지남에 따라 크기가 언제나 커지는 1차 함수의 형태를 가지므로 크기의 평균값과 첫 번째 직접파의 도착시간(ToF)의 평균값은 비례할 것이다. 즉, 이 평균값이 여러 개의 CIR로부터 정밀하게 ToF를 추정한 값이라 볼 수 있다. 이러한 방식으로 UWB에서는 ToF 시간을 추정하는데 하나의 CIR의 경우, 분해능이 1 nsec인데 반하여 여러개의 CIR을 사용하므로 1/64 nsec의 분해능으로 ToF를 정밀하게 추정할 수 있다. 단, 위와 같이 여러개의 CIR을 이용하기 때문에 ToF 추정에 시간이 걸리게 된다^{[18],[19]}.

3-3 UWB TWR 거리 측정과정

앞에서 CIR과 ToF 추정에 대해 살펴보았다. 하지만 CIR과 ToF를 안다고 하여 바로 UWB 기기가 다른 UWB 기기와의 거리를 알 수 있는 것은 아니다. UWB에서 거리 측정을 위해서는 UWB 기기들끼리 CIR을 패킷을 통해 교환하고, 이때 시간을 기록할 필요가 있다. 본 절에서는 실제 UWB 표준에서 어떻게 거리를 측정하는지 살펴보자. 이를 위해 그림 6과 같이 2개의 UWB기기가 있다면 가정하고 거리를 측정하고자 하는 UWB 기기를 Anchor, Anchor에 응답하는 UWB기기를 Tag라 하자. UWB Anchor

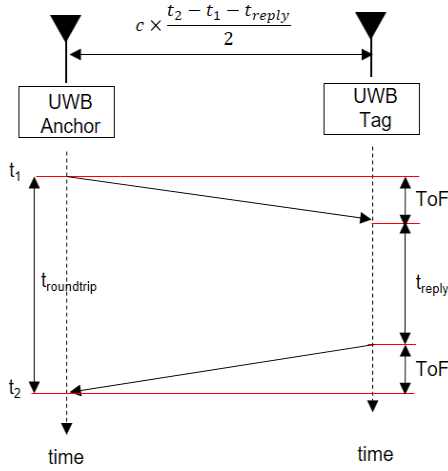


그림 6. UWB TWR의 원리

Fig. 6. Principle of UWB two-way ranging.

는 UWB Tag로 메시지를 송신하고, 이때 송신시작시간 t_1 을 기록한다. 시간기록은 타임스탬프(timestamp)라 하는데 시간을 나타내는 문자열을 의미한다. 메시지를 수신한 UWB Tag 기기는 t_{reply} 시간 후에 응답메시지를 보낸다. 이제 UWB Anchor는 이 메시지를 수신한 타임스탬프 t_2 을 기록한다. 이제 두 UWB 기기간의 거리는 전파도달시간(ToF)의 1/2이므로 식 (1)로 주어진다.

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

여기서 c 는 빛의 속도를 의미한다. 식 (1)에서 각각의 타임스탬프는 3-2절에서 설명한 것처럼 CIR 데이터를 이용하여 ToF를 추정하는 방법으로 계산한다.

그림 6과 같이 두 무선기기 간의 거리를 계산하는 방식을 두 개의 UWB 기기 간에 정보를 교환한다는 의미에서 TWR(two-way ranging)이라고 한다. 참고로 GPS 측위는 GPS위성에서 단말기로만 정보가 전달되므로 One-Way Ranging이라고 부른다. TWR은 UWB만의 고유의 방법은 아니며, Wi-Fi나 LoRa 등 다른 통신방식에서도 도입이 된 기술이다. 예를 들어 Wi-Fi에서는 FTM(fine timing measurement)이라고 부르며, 대표적인 표준으로 IEEE 802.11 mc가 있다. 특별히, UWB에서 TWR이 부각되는 이유는 UWB가 광대역 펄스를 사용함으로써 ToF 측정이 타 통신방식에 비해 보다 정밀하기 때문이다^{[8][9]}.

그림 6과 같이 TWR을 계산하기 위해서는 식 (1)과 같이 한번만 패킷을 교환하면 되지만, 실제로는 UWB Tag가 UWB Anchor에 페어링을 위한 데이터 송신과정(discovery phase)이 별도로 있어야 하며, 페어링이 된 후에 UWB 기기들 간에 TWR이 가능하다. 또한 UWB에서는 UWB 기기에서 발생하는 클럭오차(clock drift)나 주파수 오차(frequency drift)를 줄일 필요가 있다. 이를 위해 UWB 표준에서는 3번의 패킷(poll-response-final)을 교환하는 거리측정단계(ranging phase)를 사용한다. 그림 7에 실제 UWB 기기들이 거리 측정을 위해 패킷을 교환하는 과정을 보여준다.

페어링되지 않은 UWB Tag는 주기적으로 'Blink' 메시지를 송신하고 UWB Anchor의 응답을 기다린다. UWB Anchor는 주변에 페어링을 원하는 Tag가 있는지 알기 위하여 Tag의 'Blink' 메시지를 수신하게 되면 'Ranging Init' 메시지를 보내게 된다. 'Ranging Init'를 수신한 태그는 Anchor와 페어링이 끝났으므로 정보교환 및 거리측정이 가능하다. 만약 태그가 거리측정을 원하는 경우를 가정하여 Tag에서 'Poll' 메시지를 송신함으로써 거리측정 과정이 시작되는 경우를 보자. Tag는 타임스탬프 t_1 을 기록하고 Anchor로 Poll 메시지를 송신한다. 이제 Anchor에서는 수신한 Poll 메시지를 이용하여 타임스탬프 t_2 를 기록한 후 t_{reply1} 시간 후에 Response 메시지를 보낸다. 이제 UWB Tag는 Response메시지를 수신하여 타임스탬프 t_4 를 기록함으로써 한 번의 round가 끝난다. 이제 UWB Anchor는 UWB Tag로부터 Final 메시지를 받음으로써 두 번째 round를 완료한다. 이러한 TWR과정에서 2개의 round 과정에서 동일한 패킷을 사용하여 시간이 동일한 경우를 SDS-TWR(symetric double-sided two way ranging)이라고 하며, 두 개의 round과정의 시간이 다른 경우를 ADS-TWR(aymmetric double-sided two way ranging)이라고 한다. 대칭 TWR 과정에서 거리에 대한 식은 식 (2)로 주어지며, 비대칭 과정에서 거리계산은 식 (3)으로 주어진다.

$$R = c \times \frac{(t_{round1} - t_{reply1}) + (t_{round2} - t_{reply2})}{4} \quad (2)$$

$$R = c \times \frac{t_{round1} \times t_{round2} - t_{reply1} \times t_{reply2}}{t_{round1} + t_{round2} + t_{reply1} + t_{reply2}} \quad (3)$$

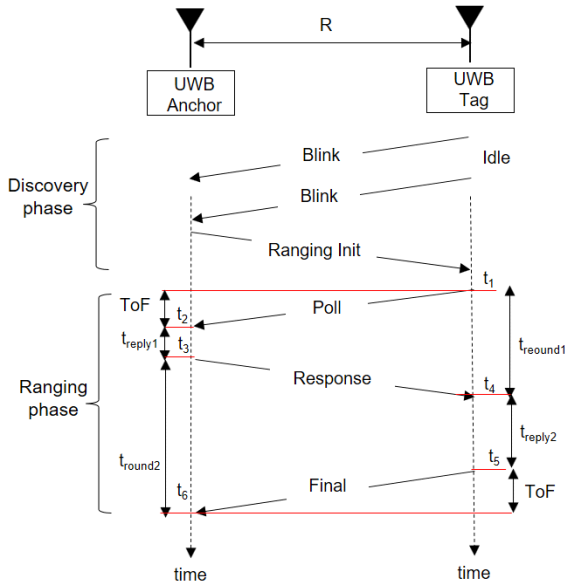


그림 7. UWB 거리측정 과정
Fig. 7. Principle of UWB two-way ranging.

그림 7은 UWB Tag가 Poll 과정을 시작하는 것으로 그렸으나, Ranging phase는 UWB Anchor가 시작해도 된다. 식 (2) 또는 식 (3)에서 각각의 시간(timestamp)은 3-2절에서 설명한 바와 같이 CIR의 첫 번째 펄스의 도착시간으로 측정하는데 CIR을 여러번 측정하여야 해상도가 높아지므로 실제 UWB에서는 그림 7의 메시지 교환이 여러번 반복되며, 만약 UWB Tag가 여러 개 있다면 각각의 Tag별로 timestamp를 저장해야 하므로 UWB 거리 측정의 속도를 높이는 것이 중요하여 이와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다^{[20],[21]}.

IV. UWB 측위기술의 원리

앞에서 UWB에서 거리를 측정하는 원리와 방법을 살펴보았다. 이제 IV장에서는 앞에서 설명한 거리 측정원리를 이용하여 UWB로 측위(positioning)하는 방법을 살펴보자. UWB 측위는 여러 개의 UWB 기기를 이용하여 거리를 계산하여 위치를 계산하는 측위 방법과 UWB 거리측정에 안테나를 이용한 방향탐지 기술을 결합하여 상대적인 위치를 측정하는 두 가지 방법으로 나눌 수 있다.

먼저, UWB 기술의 장점인 거리 측정을 측위로 확장하

는 방법을 살펴보자. 이 방법은 그림 8의 왼쪽 그림과 같이 위치를 알고 있는 고정된 3개 이상의 UWB 태그로부터 거리를 측정하여 자신의 위치를 삼각법으로 계산하는 것이다. 이러한 방식은 보통 실내 네비게이션 등이나 물류창고 등에서 재고 관리를 위한 사물 추적(asset tracking) 등의 응용에 사용되어 왔으며, 일반적으로 RTLS(real time location service)라 불린다. RTLS는 보통 Wi-Fi, RFID, Bluetooth 등의 다양한 무선기술을 이용하여 연구가 진행되었고, 상용화된 사례도 많이 있다. 이러한 기존의 RTLS 기술과 최근 각광받고 있는 UWB 기술의 가장 큰 차이는 측정반경과 거리해상도의 차이라 할 수 있다. 과거 RTLS 기술은 신호세기(RSSI) 등을 이용하므로 상대적으로 거리해상도가 나쁜 반면에 통신 반경은 크다. 이에 반해 UWB는 낮은 펄스 전력에 의해 통신반경은 작지만 수십 cm 이하의 정밀한 거리 측정이 가능하다. 이러한 UWB 특성을 이용하여 자동차 등에 응용한 예가 그림 8의 오른쪽에 나와 있다. 차의 왼쪽과 오른쪽, 차 내부, 차 뒤에 UWB 태그 4개를 부착하면 차량 주변에 사용자의 위치를 알 수 있다. UWB 태그의 동작영역은 점선과 같이 주어질 것이다. 만약 스마트폰이 차량 뒤편에서 차의 오른쪽 문으로 움직인다면 차 뒤편에 위치한 UWB 기기 및 차의 오른쪽 문에 부착된 UWB 기기와의 거리는 시간에 따라 변하게 되므로 차량은 스마트폰을 들고 있는 사람이 차의 어느 쪽으로 다가오는지 정확히 알 수 있다. 이러한 UWB 특성을 이용하여 자동으로 사람이 접근하는 차량문이 자동으로 열리는 서비스 등이 가능하다. 또한, 자동차 이외에도 UWB 기술로 스마트폰에 중요 물건(핸드백 등)을 등록하면, 주변 물건의 위치를 모를 때 이를 찾아주는 “Find Things” 서비스나 주변 IT기기의 위치 정보를 활

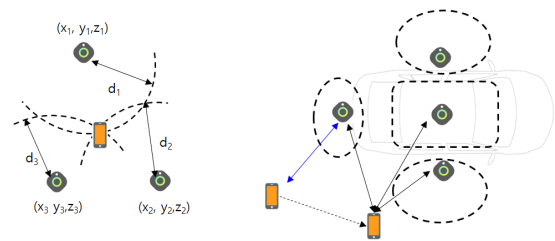


그림 8. UWB 응용 예
Fig. 8. Application of UWB positioning.

용하여 IT기기와 스마트폰의 연동을 쉽게 해주는 서비스 등이 가능하다. 이러한 서비스는 UWB 안테나를 여러 개 붙일 수 있는 차량과 달리 여러 개의 UWB 태그를 붙이기 어렵다. 따라서 UWB 태그를 여러 개 붙이기 어려운 서비스를 위해서는 스마트폰의 UWB에 거리뿐만 아니라, 연결하고자 하는 UWB기기가 위치한 방향까지 측정할 필요가 있다. 이렇게 되면 스마트폰을 중심으로 주변의 다양한 UWB 태그의 상대 위치를 알 수 있으므로 다양한 위치기반 서비스가 가능하다. 이런 목적으로 최근 스마트폰에 내장된 UWB 기기는 방향탐지 기능을 추가하는 것이 일반화되고 있다.

UWB 측위기술에서 방향측정은 UWB 파형과 크게 상관이 없고, 안테나를 기반으로 한 방향탐지 기술이므로 UWB 기술에 맞는 안테나 설계와 방향탐지 알고리즘을 사용해야 한다. 일반적으로 방향탐지 알고리즘을 위해서 복수의 안테나를 반파장($\lambda/2$) 간격으로 배열하는 선형배열안테나나 원형배열안테나를 사용해야 하지만, 스마트폰에 여러개의 안테나를 배치하는 것은 스마트폰 크기의 문제로 어렵다. 따라서 상용화된 UWB 방향 측정에서는 단지 2개의 안테나만으로 전파의 입사각도를 측정할 수 있는 PDoA(phase difference of arrival) 방식을 사용하는 것이 일반적이다. 그림 9와 같이 UWB 태그에서 송신되는 반송파 신호는 스마트폰 안테나와 이루는 각도가 θ 만큼 차이가 나고, 안테나 사이의 간격이 d 일 경우, 구 안테나에서 반송파주파수의 위상차는 $d \sin \theta$ 가 난다. 이 위상차를 측정하여 UWB 태그의 방향을 찾는 방식이 PDoA이다. PDoA는 2개의 안테나만 있으면 도래각을 측정할 수 있다. 하지만, 우리가 3차원 공간에 살고 있어 상하좌우의 방향을 측정해야 하므로 스마트폰에서는 상하 방향을

위해 2개의 안테나, 좌우방향을 위해 2개의 안테나를 사용해야 하고, 이중 하나의 안테나는 공통으로 사용하므로 최소 3개의 UWB 안테나가 필요하다. 보통 안테나 배치는 스마트폰의 아랫부분을 사람의 손을 잡고 사용하므로 위쪽의 카메라 옆 공간에 3개의 UWB 안테나를 배치하게 된다. 그림 9에 실제 스마트폰에 배치된 UWB 안테나의 사진과 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

보통 안테나 별로 UWB 수신기를 연결하면 전력소모 등의 문제로 UWB IC 내에 있는 수신기를 한 개 또는 2개를 내장하고, 이를 안테나 3개와 연결할 수 있는 스위치 회로를 통해 UWB 안테나와 연결한다. 이 때 UWB IC와 UWB 안테나 연결 시 시간지연 등이 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 실제 Qorvo UWB에서는 수신기가 1개 있으므로 crystal oscillator를 공유하는 2개의 UWB 칩을 사용하며, NXP의 UWB IC에서는 IC 내부에 2개의 수신기가 있으므로 그림 9의 오른쪽 그림과 같이 스위치 회로를 이용하여 연결하게 된다.

이렇게 구성된 PDoA 방식의 UWB 방향측정은 CIR에 포함된 직접파의 방향을 통해 위상차를 계산한다. 직접파 이외에는 여러개의 반사파가 중첩되어 CIR이 나타나므로 위상차를 측정하기 어렵다. 거리측정과 마찬가지로 그림 4와 같은 CIR 신호가 사용되는데, CIR 데이터 중 직접파와 관련된 데이터는 상관 기준값(threshold)을 넘는 3개의 CIR I/Q 데이터를 통해 arctangent 연산으로 위상을 구한다. 이때 매 패킷마다 clock oscillator의 위상의 변화에 따른 offset을 프리앰블의 SYNC 필드를 이용하여 보정해야 한다. 이러한 UWB 방향탐지 기술은 그 응용가능성에 비해 기술개발은 초기 단계이므로 앞으로 지속적으로 연구되어야 하는 분야이다^{[22]~[25]}.

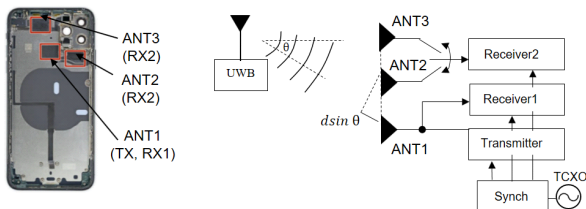


그림 9. 스마트폰 UWB 안테나 배치와 블록 다이어그램
Fig. 9. Smartphone UWB antennas and block diagram for direction finding.

V. 결 론

본 논문에서는 최근 관심이 집중되고 있는 UWB 기술을 핵심원리부터 최신 응용까지 살펴보았다. 먼저, UWB 주파수와 국내기술기준을 살펴보고, 이러한 기술기준을 바탕으로 다양한 UWB 기술의 특징을 설명하였다. 다음으로 UWB에서는 상관연산과 CIR을 이용하여 거리를 추정하며, 여러 개의 CIR을 이용하여 추정 정확도를 높이는

원리를 살펴보았다. 또한, UWB 측위기술의 칩 제조사인 Qorvo와 NXP에서 사용하는 UWB 칩의 특징도 살펴보았다. 마지막으로 UWB 방향탐지를 포함한 측위기술의 원리와 미래 방향성을 다양한 응용 사례와 함께 살펴보았다. 이를 통하여 향후 UWB 기술은 스마트폰을 중심으로 다양한 위치기반서비스가 출현할 예정임을 알 수 있었다.

References

- [1] J. D. Heo, H. J. Lee, G. R. Park, and Y. S. Nam, "WiMedia UWB standardization and technology," *The Magazine of the IEIE*, vol. 34, no. 2, pp. 17-28, 2007.
- [2] R. J. Fontana, E. A. Richley, "Observations on low data rate, short pulse UWB systems," in *2007 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, Singapore, Sep. 2007, pp. 334-338.
- [3] A. Bahr, A. Feldman, J. Colli-Vignarelli, S. Robert, C. Dehollain, and A. Martinoli, "Modeling and benchmarking ultra-wideband localization for mobile robots," in *2012 IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB)*, Syracuse, NY, Sep. 2012, pp. 443-447.
- [4] A. R. Jiménez, F. Seco, "Comparing decawave and bespoon UWB location systems: Indoor/outdoor performance analysis," in *Proceedings of the 2006 International Conference on Indoor Positioning Indoor Navigat (IPIN)*, Alcalá de Henares, Oct. 2016, pp. 1-8.
- [5] 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.
- [6] 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, 2009.
- [7] Decawave, *DW1000 User Manual, Version 2.11*, Dublin, UK, 2017.
- [8] Federal Communications Commission, "Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems," *ET Docket*, pp. 98-153, May 2002.
- [9] C. Chong, F. Watanabe, and H. Inamura, "Potential of UWB technology for the next generation wireless communications," in *2006 IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, Manaus, Aug. 2006, pp. 422-429.
- [10] National Radio Research Agency Standard, "Conformity assessment test methods for radio equipments," *KS X*, vol. 3123, p. 2020, 2020.
- [11] 3db, "Impulse radio UWB principles and regulation," Nov. 2019.
- [12] L. Fluieratoru, S. Wehrli, M. Magno, and D. Niculescu, "On the energy consumption and ranging accuracy of ultra-wideband physical interfaces," in *GLOBECOM 2020 ~2020 IEEE Global Communications Conference*, Taipei, pp. 1-7, Dec. 2020.
- [13] 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.
- [14] 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, pp. 1-6.
- [15] 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.
- [16] M. Singh, M. Roeschlin, E. Zalzal, 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.
- [17] 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 (IDAACCS-SWS)*, Offenburg, Sep. 2016, pp. 97-104.
- [18] 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, 2020.
- [19] 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, pp. 268-271.
- [20] D. Schepers, M. Singh, and A. Ranganathan, "Here, there, and everywhere: Security analysis of wi-fi fine timing measurement," in *Proceedings of the 14th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, Abu Dhabi, Jun. 2021, pp. 78-89.
- [21] P. Corbalán, G. P. Picco, "Ultra-wideband concurrent ranging," *ACM Transactions on Sensor Networks(TOSN)*, vol. 16, no. 4, pp. 1-41, Nov. 2020.
- [22] 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," in *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, New York, NY, Sep. 2021, vol. 5, no. 3, pp. 1-31.
- [23] 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.
- [24] I. Dotlic, A. Connell, H. Ma, J. Clancy, and M. McLaughlin, "Angle of arrival estimation using deca-wave DW1000 integrated circuits," in *2017 14th Workshop on Positioning, Navigation and Communications(WPNC)*, Bremen, Oct. 2017, pp. 1-6.
- [25] N. Smaoui, M. Heydariaan, and O. Gnawail, "Single-antenna AoA estimation with UWB radios," in *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Nanjing, Mar.-Apr. 2021, pp. 1-7.

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 무선방송연구소

2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원

2013년 9월~2015년 8월: 미래창조과학부 민간전문가(CP)

2005년 9월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수

[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용