

Noncoherent UWB 시스템에서 Analog Front End 특성에 따른 레인징 성능 분석

정희원 김재운*, 박영진**, 이순우**, 종신회원 신요안*^o

Analysis of Ranging Performance According to Analog Front End Characteristics in a Noncoherent UWB System

Jaewoon Kim*, Youngjin Park**, Soonwoo Lee** *Regular Members*,
Yoan Shin*^o *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 간단한 형태의 적분기와 1-비트 ADC (Analog-to-Digital Converter)로 구성된 AFE (Analog Front End)를 사용하는 Noncoherent IR-UWB (Impulse Radio-Ultra Wide Band) 레인징 (Ranging) 시스템을 제시하고, 레인징 성능에 영향을 주는 AFE 특성에 대해 정의한다. 이 레인징 시스템에서 적분기는 단순히 수신된 신호의 에너지만을 축적하며, 다중 비트 ADC를 필요로 하는 Coherent IR-UWB 시스템과는 달리 1-비트 ADC를 사용하게 되므로, 시스템 구현 측면에서 현실적이고 매우 용이하다고 할 수 있다. 반면, Noncoherent 방식의 특성상 수신 신호를 단순히 제공하여 적분하게 되므로, 잡음과 다중경로 페이딩 등의 채널 특성에 따라 레인징 정밀도는 큰 영향을 받게 된다. 그러나 이러한 현실적인 중요성에도 불구하고, 현재까지의 IR-UWB 레인징 시스템 연구에서는 AFE 특성 변화에 따른 성능 분석에 관한 결과는 거의 제시되지 않고 있다. 이에, 본 논문에서는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템을 사용하는 경우 다양한 무선 채널 환경에서 AFE 특성 변화에 따른 레인징 성능을 분석한다. 또한 이를 통해 실제 UWB 하드웨어를 설계할 경우 규격 설정에 고려해야 할 파라미터들을 제시한다.

Key Words : UWB, Ranging, AFE, ADC, ToA

ABSTRACT

In this paper, we present a noncoherent IR-UWB (Impulse Radio-Ultra Wide Band) ranging system with an AFE (Analog Front End) composed of a simple integrator and an 1-bit ADC (Analog-to-Digital Converter), and define AFE characteristics affecting the ranging performance. This system is realistic and easy to implement, since the integrator simply accumulates signal energies and the simple 1-bit ADC is applied instead of the multi-bit ADCs for coherent IR-UWB systems. On the other hand, its ranging accuracy is largely affected channel environments such as noise, multipath fading and so on, since the noncoherent receiver simply squares and integrates the received signals. However, despite these practical importances, there are few conventional researches on the performance analysis according to AFE characteristics in IR-UWB ranging systems. To this end, we analyze in this paper ranging performance according to AFE characteristics for the noncoherent IR-UWB ranging system in various wireless channel environments, and through these results we also present system parameters to be considered in UWB hardware designs.

※ 본 논문은 서울시 산학연 협력사업 (No. 10544)의 지원으로 이루어짐.

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신 및 정보처리 연구실(ecko99@amcs.ssu.ac.kr, yashin@ssu.ac.kr) (^o : 교신저자)

** 한국전기연구원 전기정보망연구센터(yjpark@keri.re.kr, rheesw@keri.re.kr)

논문번호 : KICS2009-12-625, 접수일자 : 2009년 12월 17일, 최종논문접수일자 : 2009년 12월 28일

I. 서 론

2002년에 있었던 미국 연방통신위원회 (Federal Communications Commission; FCC)의 주파수 할당 및 상업화 승인 이후 UWB (Ultra Wide Band) 통신 기술에 대한 연구와 개발은 전세계적으로 새로운 전기를 맞고 있다^[1]. 특히 정밀한 무선측위 (Wireless Positioning) 기능까지 수반하는 저속 저전력 W-PAN (Wireless Personal Area Network)용 UWB 시스템은 IEEE 802.15.4a^[2] 표준화 그룹을 중심으로 유수 관련 업체들이 경쟁적인 연구 개발 대열에 적극 참여하고 있는 상황이다.

연속적인 정현파를 사용하는 기존의 무선통신 시스템과는 달리, 전형적인 임펄스 라디오 (Impulse Radio) 기반의 UWB 시스템에서는 1 nsec 내외의 매우 좁은 폭을 갖는 펄스 혹은 임펄스를 단속적으로 전송한다^[3,4,5]. 이 때문에 IR-UWB 시스템은 수백 MHz~수 GHz의 대역에 걸쳐 매우 낮은 전력의 초광대역 특성 및 간섭 특성을 갖게 되고, 높은 채널 용량과 데이터 전송률을 지원하며 다중경로에 대한 세밀한 분해가 용이하므로 오차가 수십 cm 이내의 정밀한 무선측위가 가능해진다. 특히 IR-UWB 시스템을 기반으로 한 무선측위 응용은 향후 다수의 센서들이 공존하게 될 유비쿼터스 네트워크를 구축하기 위해 매우 중요한 문제로 부각되고 있다^[3]. 따라서, 정밀한 무선측위 성능을 제공하기 위해서는 앞선 단계인 거리 측정 즉, 레인징 (Ranging)에 대한 연구가 매우 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 Coherent IR-UWB 시스템은 비트오율 (Bit Error Rate) 성능 측면뿐만 아니라 레인징 및 무선측위 정밀도에서도 Noncoherent IR-UWB 방식에 비해 우수하나, 수신단의 상관기 (Correlator)에서 사용될 참조 신호를 발생시킬 별도의 펄스 생성기가 필요하며 이러한 상관기 기반의 Rake 수신기를 사용하여 구조가 크게 복잡해진다. 또한 Coherent IR-UWB 시스템을 구현하기 위해서는 수~수십 GHz 이상의 샘플링 속도를 갖는 고속 ADC (Analog-to-Digital Converter)가 요구되는데, 이러한 고속 ADC는 매우 고가이면서 현재 기술로는 소형화가 어려우므로, 현재까지는 Coherent IR-UWB 시스템을 효과적으로 구현하는 것은 매우 어렵다^[6]. 한편 효율적인 UWB 송수신기 구현을 위해서는 시스템 설계의 핵심 요소인 칩의 소형화, 저전력성, 구현의 용이성, 그리고 다중경로 페이딩에 대한 강인성 등을 고려해야 된다^[7,8]. 따라서, 복잡한

Coherent IR-UWB 시스템보다는 단순한 형태의 에너지 윈도우 뱅크 (Energy Window Bank) 기반의 수신기를 이용하는 Noncoherent IR-UWB 방식이 이러한 시스템 설계 요구 사항에 근접할 수 있어 최근 주목받고 있다^[9].

이에, 본 논문에서는 Noncoherent IR-UWB 시스템을 기반으로 하는 ToA (Time-of-Arrival) 추정 레인징 방식을 제시한다. 이 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템에서의 수신기는 복잡도를 낮추기 위해 간단한 형태의 적분기와 1-비트 ADC로 구성된 AFE (Analog Front End)를 사용한다. 즉, 이 레인징 시스템에서 적분기는 단순히 수신된 신호의 에너지만을 축적하며, 다중 비트 ADC를 필요로 하는 Coherent IR-UWB 시스템과는 달리 1-비트 ADC를 사용하게 되므로, 시스템 구현 측면에서 현실적이고 매우 용이하다고 할 수 있다. 반면, Noncoherent 방식의 특성상 수신된 신호를 단순히 제공하여 적분하게 되므로, 잡음과 다중경로 페이딩 등의 채널 특성에 따라 레인징 정밀도는 큰 영향을 받게 된다. 그러나 이러한 현실적인 중요성에도 불구하고, 현재까지의 IR-UWB 레인징 시스템 연구에서는 AFE 특성 변화에 따른 성능 분석에 관한 결과는 거의 제시되지 않고 있다. 따라서, 본 논문에서는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템을 사용하는 경우 다양한 무선 채널 환경에서 AFE 특성 변화에 따른 레인징 성능을 분석한다. 또한 이를 통해 실제 UWB 하드웨어를 설계할 경우 규격 설정에 고려해야 할 파라미터들을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템에서 송신 및 수신 신호를 정의하고, 3장에서는 이러한 시스템에서의 ToA 추정 방식과 레인징 오차 요인에 대해 설명한다. 4장에서는 1-비트 ADC 기반의 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템을 제시한다. 이어 5장에서는 AFE 규격 변화에 따른 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템의 성능을 분석하며, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템에서의 송신 및 수신 신호

전형적인 Noncoherent IR-UWB 시스템 송신단에서 다음과 같은 가우시안 모노사이클 펄스 $p(t)$ 를 수신단으로 전송한다고 가정한다^{[3],[5]}.

$$p(t) = 2A\sqrt{\pi e} \left(\frac{t}{\tau_p} \right) e^{-2\pi(t/\tau_p)^2} \quad (1)$$

여기서 A 는 펄스의 크기를 나타내는 상수이고, τ_p 는 펄스폭을 결정하는 파라미터이다. 식 (1)의 전송 펄스 $p(t)$ 가 송신단 및 수신단 안테나의 미분 특성에 의한 영향을 받으면, 수신단의 에너지 윈도우 बैं크에는 이 펄스를 미분한 형태의 새로운 펄스가 입력된다. 따라서, 수신단 에너지 윈도우 बैं크에 입력되는 펄스 $w(t)$ 는 다음 식과 같이 표현될 수 있다 [3],[5].

$$w(t) = A' \left(1 - \frac{4\pi t^2}{\tau_p^2} \right) e^{-2\pi(t/\tau_p)^2} \quad (2)$$

위 식에서 A' 은 크기를 나타내는 적절한 상수이다.

한편, 송신단에서 사용되는 변조 방식은 Noncoherent IR-UWB 레인징 수신기에서 용이하게 검출할 수 있도록 신호를 발생시켜야 한다. 이에, 본 논문에서는 Noncoherent IR-UWB 시스템에 널리 이용되고 있는 OOK (On-Off Keying) 방식^[10]을 고려하였다. 이 방식에 의해 변조된 전송 신호는 다음과 같다^{[6],[10]}.

$$s(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} b_j \cdot w(t - jT_f) \quad (3)$$

여기서 $b_j \in \{0,1\}$ 는 2진 심벌을 나타내며, T_f 는 각 데이터 심벌을 위한 프레임 구간을 의미한다.

일반적인 UWB 다중경로 채널 모델은 전형적으로 탭 지연선(Tap-Delay-Line) 모델링^[11]을 기반으로 하며, 이 채널 임펄스 응답 함수 $h(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$h(t) = \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} \delta(t - \tau_{\ell}) \quad (4)$$

여기서 L 은 다중경로 성분의 수를 나타내며, α_{ℓ} 는 ℓ 번째 경로의 신호 크기를 나타낸다. 또한 $\tau_{\ell} \equiv \tau_0 + \ell T_m$ 은 ℓ 번째 경로의 시간 지연이고, 여기서 T_m 은 다중경로 성분을 분해할 수 있는 최소 시간을 의미한다. 그리고 τ_0 는 송수신기 간 거리로 인한 전송 시간 지연이며, 전체 프레임 구간 T_f 내에서 균일하게 분포한다고 가정하였다. 본 논문에서는 수신 신호 사이의 부분적인 상관 (Partial Correl-

ation)을 피하기 위해 펄스폭 T_p 와 T_m 을 동일하게 설정하였다^[11]. 이 때, UWB 다중경로 채널로부터 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{\ell=0}^{L-1} \alpha_{\ell} \cdot b_j \cdot w(t - jT_f - \tau_{\ell}) + n(t) \quad (5)$$

여기서 $n(t)$ 는 채널 상의 AWGN (Additive White Gaussian Noise)을 나타낸다.

III. ToA 추정 방식 및 레인징 오차의 요인

일반적으로 수신 신호의 최초 도착 시간을 추정해야 하는 레인징 기법에서 정밀도를 열화시키는 요소로는 경로 손실, 섀도잉, 다중경로 페이딩, 잡음, 타 무선 시스템에 의한 간섭, 부정확한 동기, 타이밍 지터 등을 들 수 있다. LoS (Line of Sight) 특성이 강한 즉, DDP (Detected Direct Path) 채널 환경에서도 레인징 오차가 다중경로 페이딩에 의해 커지게 된다. 특히, NLoS (Non-Line of Sight) 특성이 강한 UDP (Undetected Direct Path) 채널 환경에서는 DDP 채널 환경에서와 같이 다중경로 페이딩에 의한 레인징 오차가 발생되기도 하지만, 이러한 상황에서는 UDP 오차에 의해 최초 도착 다중경로 성분이 잡음 레벨 아래로 묻혀버리게 되어 레인징 정밀도를 심각하게 저하시키게 된다. 그림 1에서는 이러한 UDP 다중경로 채널을 통과하여 수신되는 신호에 대한 레인징 오차의 예를 들어 보여준다.

한편, 그림 2에서는 에너지 검출 기반의 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템에서 정밀 레인징을 위해 널리 사용되는 ToA 추정 기법^[12]의 탐색 방식에 대해 도사하고 있다. 여기서 “Actual ToA”는 이상적으로 완벽히 추정된 시간 정보를 의미한다. 표 1에서는 이러한 MES (Maximum Energy Selection) 기반의 ToA 추정 방식, MES-SB (Search Back) 기반의 ToA 추정 방식, TC (Threshold Comparison) 기반의 ToA 추정 방식 등에 대해 간략히 요약 정리하고 있다.

본 논문에서는 여타 방식에 비해 효율적인 TC 기반의 ToA 추정 방식을 사용하는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템을 고려한다. 하지만, 그림 1를 통해 알 수 있듯이 UDP 다중경로 채널 환경에서의 레인징 정밀도는 수신 신호의 최초 도착 시간 정보, 즉 최초 도착 다중경로 성분을 얼마나 정확하게 추정하느냐에 따라 그 성능이 결정된다. 또한 다

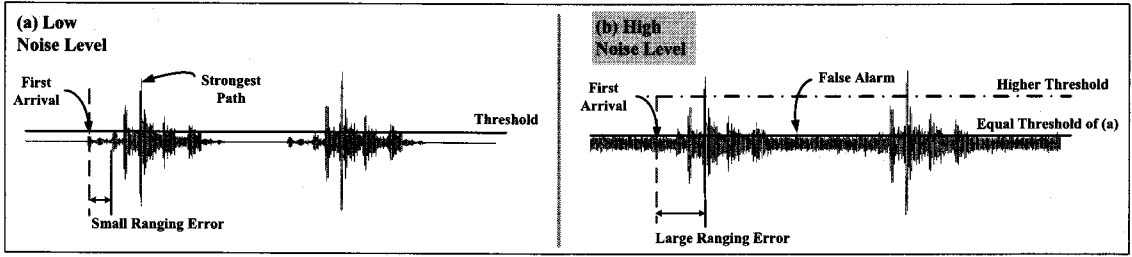


그림 1. UDP 다중경로 채널 환경에서 레인징 오차의 예
Fig. 1. An example of ranging errors in an UDP multipath channel environment

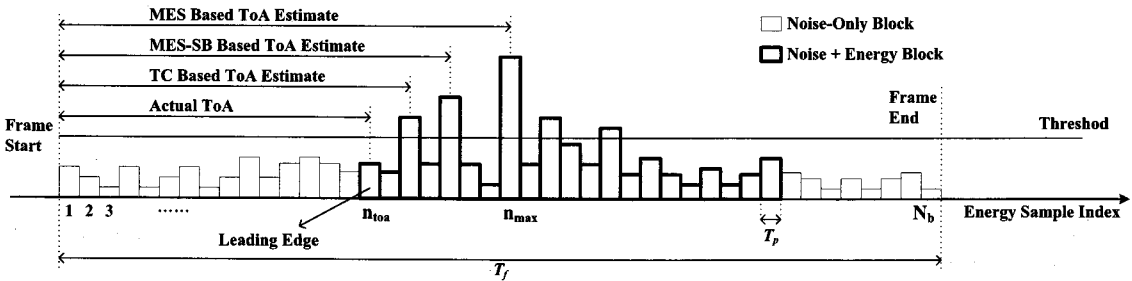


그림 2. Noncoherent IR-UWB 시스템에서의 정밀 레인징을 위한 ToA 추정 방식들
Fig. 2. ToA estimation methods for precise ranging in noncoherent IR-UWB systems

표 1. ToA 추정 방식의 탐색 방법 비교
Table 1. Comparison of searching algorithms for ToA estimation

| 방식 | 탐색 방법 | 특징 |
|----------------------|--|---|
| MES 기반의 ToA 추정 방식 | 전체 프레임 구간에서 가장 큰 에너지 값을 나타내는 시간 위치를 탐색 | DDP 채널에 적합, False Alarm 발생률 낮음, NLoS 채널에서 레인징 오차 증가 등 |
| MES-SB 기반의 ToA 추정 방식 | 전체 프레임 구간에서 가장 큰 에너지 값을 나타내는 시간 위치를 기준으로 이보다 앞선 시간에서 큰 에너지 값을 나타내는 시간 위치를 탐색 | UDP 채널에 비교적 강인함, False Alarm 발생률 비교적 낮음, UDP 채널에서 레인징 오차 감소, 처리 시간 증가 등 |
| TC 기반의 ToA 추정 방식 | 신호의 위치를 추정할 수 있는 적정의 임계값을 설정하고 순서대로 비교하여 이 임계값보다 큰 에너지 값을 나타내는 시간 위치를 탐색 | UDP 채널에 상당히 강인함, False Alarm 발생률 비교적 낮음, UDP 채널에서 레인징 오차 최소화, 처리 시간 최소화 등 |

중경로 채널을 통과한 수신 신호에 잡음이 인가될 경우 레인징 오차를 더욱 크게 만드는 요인으로 작용하게 된다. 너무 낮은 레인징 임계값을 사용하면 잡음의 영향으로 인해 전혀 다른 위치를 ToA 정보로 오판하게 됨으로써 오경보 (False Alarm)가 발생되며, 반면 오경보를 피하기 위해 높은 임계값을 사용하면 수신 신호의 최초 도착 시간에서 멀어져 레인징 오차가 더욱 커지게 된다. 이에, 본 논문에서는 다양한 무선 채널 환경에서 TC 기반의 ToA 추정 방식을 사용하는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템의 성능을 이러한 임계값 설정을 포함한 AFE 특성의 변화에 따라 분석한다.

IV. 1-비트 ADC 기반의 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템

본 논문에서는 실제 구현의 용이성을 고려하기 위해 TC 기반의 ToA 추정 방식을 사용하는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템을 제시한다. 이 레인징 시스템에서의 수신기는 복잡도를 낮추기 위해 간단한 형태의 적분기와 1-비트 ADC로 구성된 AFE를 사용한다. 그림 3에서는 본 논문에서 제시하는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템의 수신기 구조를 도시한다. 여기서 수신되는 신호 $r(t)$ 는 앞서 2장에서 설명된 바와 같이 UWB 펄스가

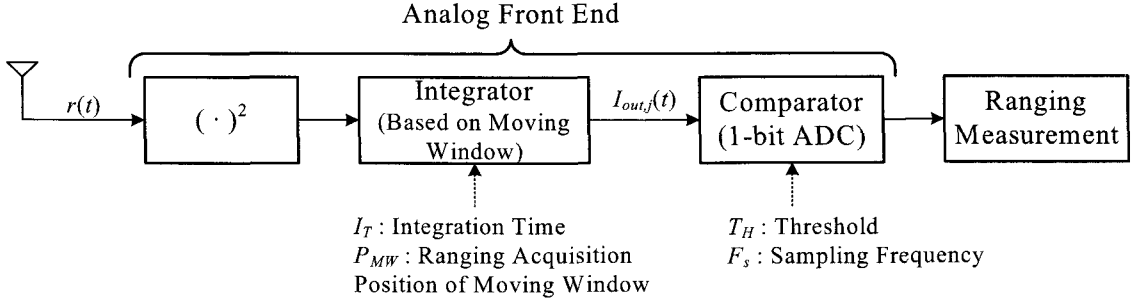


그림 3. 1-비트 ADC 기반의 Noncoherent IR-UWB 레인지 시스템의 수신기 구조
 Fig. 3. Receiver structure of the noncoherent IR-UWB ranging system based on 1-bit ADC

다중경로 채널을 통과하여 수신된 형태로 식 (5)와 같다. 이 Noncoherent IR-UWB 레인지 시스템은 제곱기, 이동 윈도우 (Moving Window) 기반의 적분기, 1-비트 ADC로 구성된 비교기 (Comparator), 레인지 측정기 등을 포함한다. 수신된 신호는 매우 간단한 제곱기를 거쳐 적분기로 들어가게 되고, 이 적분기의 출력값을 가지고 비교기는 미리 결정된 임계값 T_H 보다 큰 경우 비트를 “1”로, 작은 경우 비트를 “0”으로 결정한다. 마지막으로, 레인지 측정기는 수신되는 비트 중 첫 번째 “1” 비트의 도착 시간 정보를 ToA 정보로 추정한다. 한편, j 번째 프레임에서 적분기의 출력 $I_{out,j}(t)$ 은 미리 정해진 적분 구간 (Integration Duration) I_T 을 가지고 다음과 같이 계산된다.

$$I_{out,j}(t) = \int_{jT_f}^{jT_f + I_T} r^2(t) dt \quad (6)$$

본 논문에서는 AFE 규격 변화에 따른 레인지 시스템의 성능을 분석하고자 하므로, AFE에서 조절 가능한 파라미터를 정의한다. 그림 3의 AFE 부분은 제곱기, 적분기, 비교기 등을 포함하므로, 적분기에서 조절할 수 있는 파라미터로 우선 적분 구간 I_T 와 레인지 획득 위치 (기준 시각) P_{MW} 를 고려할 수 있다. 두 번째로, 1-비트 ADC 기반의 비교기에서 조절할 수 있는 파라미터는 임계값 T_H 과 ADC의 샘플링 주파수 F_s 가 있다. 여기서 임계값 파라미터 T_H 도 임의로 조절하여 성능 변화를 측정할 수 있는데, 이 값은 적분기의 최대 출력값 $I_{max} \equiv \max_t \{I_{out,j}(t)\}$ 를 기준으로 설정된다. 즉, $R_{TH} (\geq 1)$ 를 최대값 I_{max} 에 대한 임계값의 비율을 조절하는 파라미터라 할 때, 임계값 T_H 은 아래의

식과 같이 결정된다.

$$T_H = I_{max} / R_{TH} \quad (7)$$

그림 4에서는 이동 윈도우의 레인지 획득 위치 (기준 시각)를 정의하기 위한 파라미터 P_{MW} 에 대해 설명한다. 그림에서 알 수 있듯이, P_{MW} 가 0인 경우 (Case #1)는 레인지 정보를 획득하는 기준 시각이 이동 윈도우의 맨 처음 위치에 존재하는 것이고, P_{MW} 가 $I_T/2$ 인 경우 (Case #2)는 기준 시각이 이동 윈도우의 중간에 위치하는 것을 의미한다. 본 논문에서는 P_{MW} 를 Case #2로 항상 고정하였다.

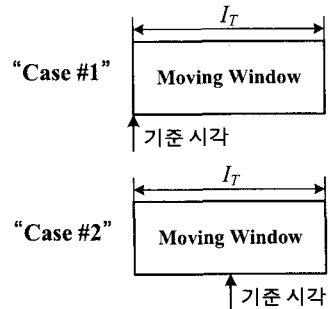


그림 4. P_{MW} 에 따른 이동 윈도우의 레인지 획득 위치 정의
 Fig. 4. Definition of ranging acquisition position of moving window according to P_{MW}

V. 모의실험 결과 및 분석

본 논문에서는 AFE 규격의 변화에 따른 레인지 시스템의 성능 분석을 위해 IEEE 802.15.4a CM1 (UDP 특성이 존재하는 “Residential”)과 CM7 (DDP 특성이 강한 “Industrial LoS”) 채널 모델^[13]을 고려하였다. IEEE 802.15.4a에서 제시한 UWB

다중경로 채널 모델은 두 개의 Poisson 분포를 기반으로 하는 변형된 Saleh-Valenzuela 모델^[14]에 기초하고 있으며, 각각의 채널 계수는 Nakagami 분포^[15]에 의해 결정된다. 또한, 펄스폭이 1 nsec인 가우시안 모노사이클 펄스를 사용하였고, 이 펄스는 0.01 nsec 간격으로 샘플링 되었으며, 펄스의 평균 전력은 1로 정규화 시켰다. 이 UWB 펄스는 송신단에서 OOK 변조되어 송신된다. 송신단에서의 UWB 펄스의 전송 전력 스펙트럼 밀도는 FCC 기준에 따라 -41.3 dBm/MHz로 설정하였으며, 수신단에서 더해지는 AWGN의 전력 스펙트럼 밀도는 -174 dBm/Hz로 고정하였다. 전송 거리에 따른 경로 손실을 설정하기 위해 참조 거리 1 m를 기준으로 결정된 초기 경로 이득은 -40 dB로 적용하였으며, 경로 손실 지수 (Path Loss Exponent) n 은 각 실험에서 1.0~4.0 사이에서 적절히 설정하였다. 성능 측정을 위한 기준은 평균 레인징 에러 (Mean Ranging Error)와 레인징 실패 확률 (Probability of Ranging Failure)로 정의하였다. 여기서 레인징 실패 확률은 정해진 프레임 신호 구간 내에서 레인징 정보를 획득하지 못할 확률을 의미한다. 따라서 레인징 정보를 획득하지 못한 경우에는 평균 레인징 에러를 산출시 제외된다.

5.1 적분 구간에 따른 레인징 성능

적분 구간 I_T 에 따른 레인징 성능을 분석하기 위해, 송수신단간의 전송 거리는 10 m로 고정하였으

며 경로 손실 지수 n 은 2.0으로 설정하였다. 또한, 임계값을 결정하기 위한 파라미터 R_{TH} 는 1.5로 적용하였고, ADC의 샘플링 주파수 F_s 는 0.1~10 GHz 사이에서 다양하게 설정하였다.

그림 5와 6에서는 각각 IEEE 802.15.4a CM7과 CM1 채널 모델에서 적분 구간에 따른 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템의 레인징 오차 성능과 레인징 실패 확률을 도시하고 있다. DDP 특성이 강한 CM7 채널 모델의 경우, 적분 구간이 짧을수록 평균 레인징 오차는 줄어들지만 매우 높은 샘플링 주파수를 갖는 ADC가 제공되는 시스템에서만 레인징 실패 확률이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 높은 샘플링 주파수를 갖는 ADC는 저가로 구현하기 용이하지 않으므로, 어느 정도 레인징 오차가 높아질지라도 적분 구간을 약 5 nsec 정도로 설정할 경우 250 MHz 이하의 상당히 낮은 샘플링 주파수를 갖는 저가의 ADC를 사용할 수 있을 것으로 보인다. UDP 특성이 존재하는 CM1 채널 모델에서는 비록 레인징 오차가 높아지긴 하지만, 평균 레인징 오차와 레인징 실패 확률이 CM7과 거의 유사한 추이를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템은 적정 적분 구간 (본 논문의 경우 5 nsec)을 설정하게 되면, 높은 레인징 정밀도를 제공하면서 매우 낮은 샘플링 주파수를 갖는 저가의 1-비트 ADC를 사용할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

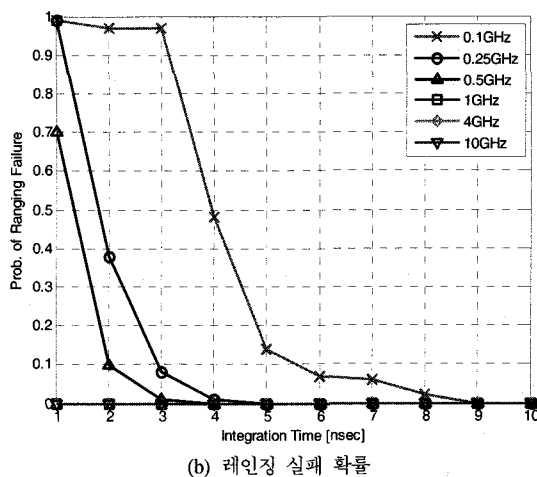
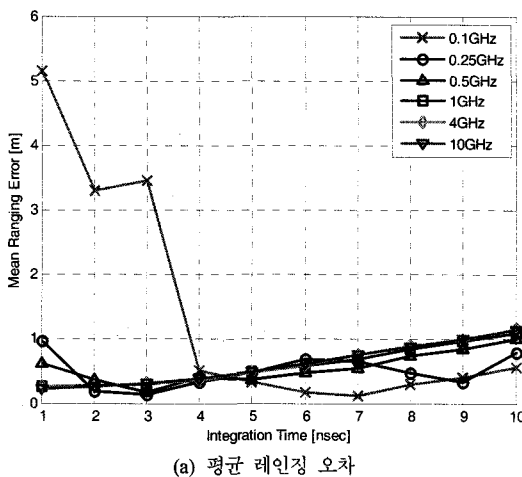


그림 5. IEEE 802.15.4a CM7 채널 모델에서 적분 구간 I_T 에 따른 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템의 성능
 Fig. 5. Performance of the noncoherent IR-UWB ranging system according to integration duration I_T in IEEE 802.15.4a CM7 channel model

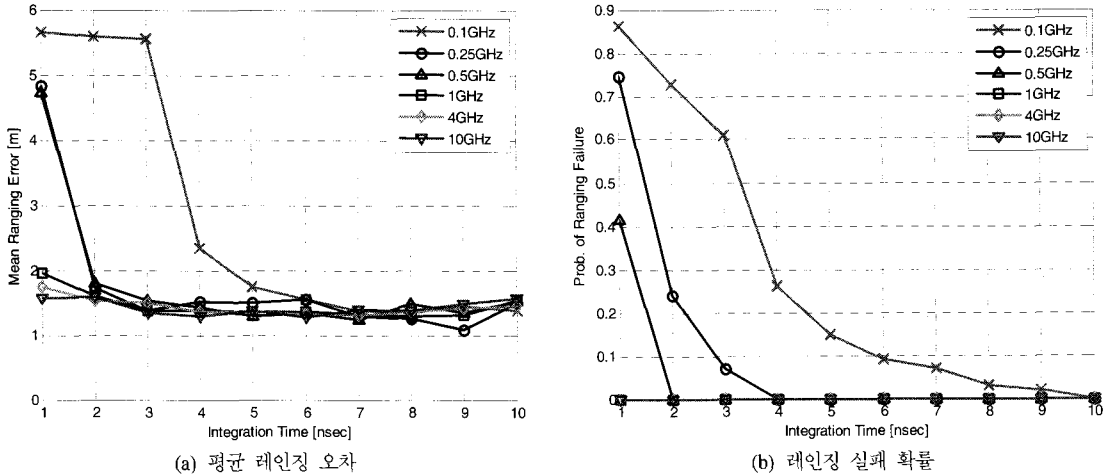


그림 6. IEEE 802.15.4a CM1 채널 모델에서 적분 구간 I_T 에 따른 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템의 성능
 Fig. 6. Performance of the noncoherent IR-UWB ranging system according to integration duration I_T in IEEE 802.15.4a CM1 channel model

5.2. 임계값에 따른 레인징 성능

1-비트 ADC 기반의 비교기에서 사용하는 임계값 파라미터 R_{TH} 에 따른 레인징 성능을 분석하기 위해 전송 거리는 10 m로 고정하였으며, 경로 손실 지수 n 는 2.0 혹은 2.5로 설정하였고, 적분기에서 사용하는 적분 구간 I_T 은 앞 절의 결과 분석을 토대로 5 nsec로 적용하였다. 한편, ADC의 샘플링 주파수 F_s 는 0.1~10 GHz 사이에서 다양하게 설정하였다.

그림 7과 8에서는 각각 IEEE 802.15.4a CM7과 CM1 채널 모델에서 임계값에 따른 Noncoherent

IR-UWB 레인징 시스템의 레인징 오차 성능과 레인징 실패 확률을 도출하고 있다. 단, 그림 7과 8에서 (b) 레인징 실패 확률은 n 이 2.0인 경우에 대해서만 나타내고 있다. 이들 그림에서 임계값 파라미터 R_{TH} 를 작게 할수록 (즉, 임계값이 적분기의 최대 출력 I_{max} 에 가까워질수록), 평균 레인징 오차는 작아지는 것을 확인할 수 있다. 다만, R_{TH} 를 너무 작은 1.5 이하로 설정할 경우에는 평균 레인징 오차도 매우 높아지고 레인징 실패 확률도 급격히 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 경로 손실 지수 n 이 높아짐에 따라 신뢰도 높은 레인징 성능을 제공

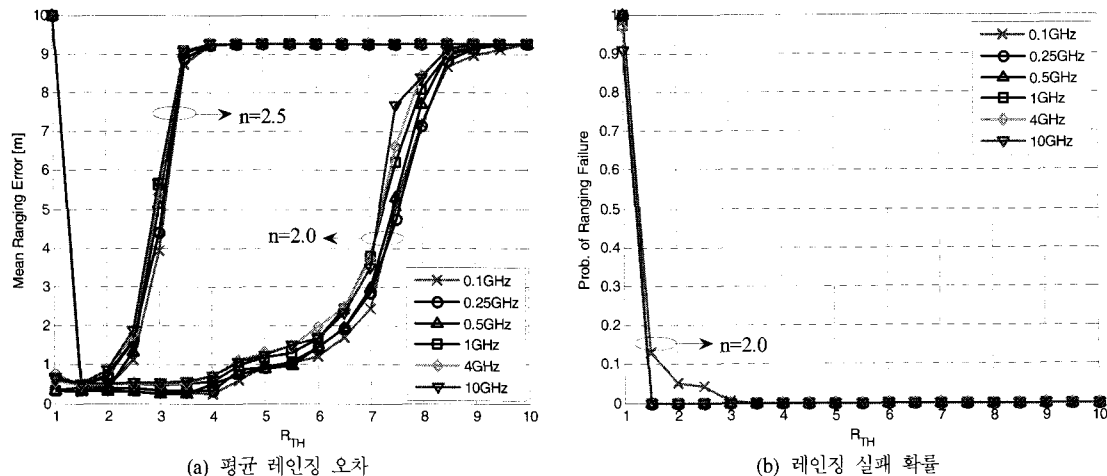
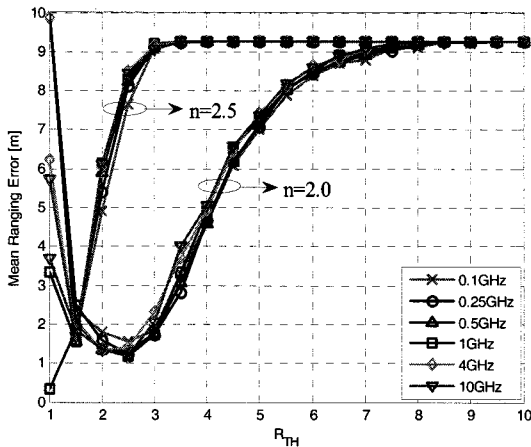
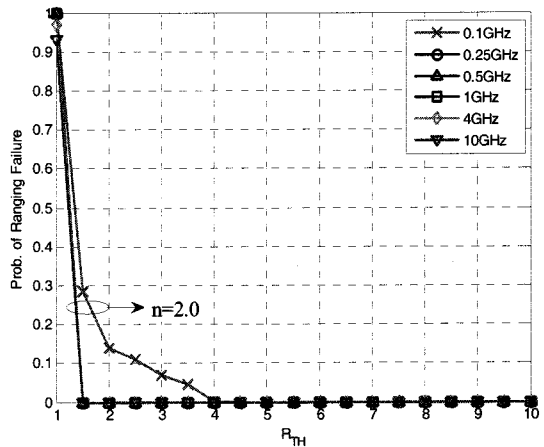


그림 7. IEEE 802.15.4a CM7 채널 모델에서 임계값 파라미터 R_{TH} 에 따른 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템의 성능
 Fig. 7. Performance of the noncoherent IR-UWB ranging system according to threshold parameter R_{TH} in IEEE 802.15.4a CM7 channel model



(a) 평균 레인지 오차



(b) 레인지 실패 확률

그림 8. IEEE 802.15.4a CM1 채널 모델에서 임계값 파라미터 R_{TH} 에 따른 Noncoherent IR-UWB 레인지 시스템의 성능

Fig. 8. Performance of the noncoherent IR-UWB ranging system according to threshold parameter R_{TH} in IEEE 802.15.4a CM1 channel model

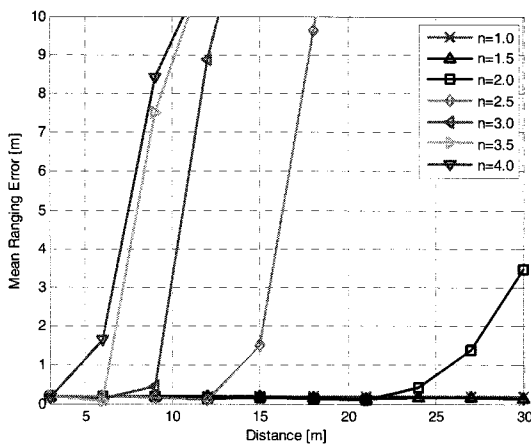
할 수 있는 R_{TH} 의 범위는 점차 좁아지는 것을 알 수 있다. 따라서, 낮은 샘플링 주파수를 갖는 ADC를 사용하면서 임계값 파라미터 R_{TH} 를 경로 손실 지수 n 에 관계없이 레인지 정보 획득에 실패하지 않을 정도의 낮은 값으로 설정 (본 논문의 경우 1.5~2.0)할 경우 효율적인 레인지 시스템을 구축할 수 있을 것으로 보인다.

5.3 전송 거리에 따른 레인지 성능

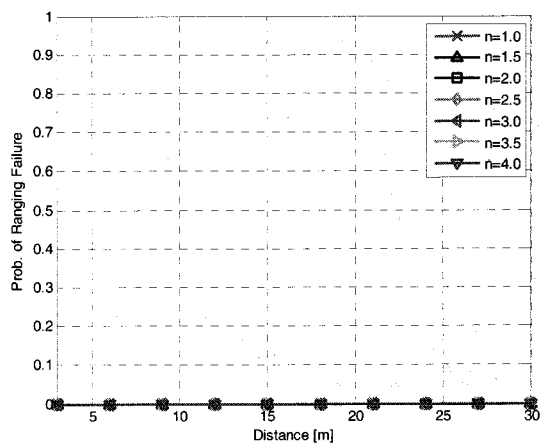
송수신단간 거리에 따른 레인지 성능을 분석하기 위해 적분기에서 사용하는 적분 구간 I_T 은 앞서와

같이 5 nsec으로 적용하였으며, 임계값 파라미터 R_{TH} 는 앞 절의 결과 분석을 토대로 1.5로 설정하였고, ADC의 샘플링 주파수 F_s 는 상당히 낮아 저가로 구현 가능한 0.5 GHz로 고정하였다. 경로 손실 지수 n 는 1.0에서 4.0 사이로 다양하게 설정하였다.

그림 9에서는 IEEE 802.15.4a CM7 채널 모델에서 송수신단간 거리에 따른 Noncoherent IR-UWB 레인지 시스템의 레인지 오차 성능과 레인지 실패 확률을 도시하고 있다. 이 결과는 앞서 분석된 결과



(a) 평균 레인지 오차



(b) 레인지 실패 확률

그림 9. IEEE 802.15.4a CM7 채널 모델에서 송수신단간 거리에 따른 Noncoherent IR-UWB 레인지 시스템의 성능

Fig. 9. Performance of the noncoherent IR-UWB ranging system according to distance between transmitter and receiver in IEEE 802.15.4a CM7 channel model

를 토대로 설정된 AFE 규격 (적분 구간, 임계값 파라미터, ADC 샘플링 주파수)에 대한 검증 결과라고 할 수 있다. 이 그림으로부터, 앞서 분석된 결과를 토대로 설정된 파라미터를 사용하는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템은 레인징 획득 실패가 전혀 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 반면 전송 거리에 따라 실제 신호 특성에서 나타나는 것처럼 레인징 오차는 점차 증가하고, 특히 이러한 증가 정도는 경로 손실 지수에 따라 더욱 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 본 논문에서 제시한 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템은 실제 하드웨어 측면을 고려하여 저가로 구현 가능한 0.5 GHz 샘플링 주파수의 1-비트 ADC를 사용함에도 불구하고, 수신 신호의 신뢰성을 확보할 수 있는 송수신 거리만 확보된다면 0.1 m 이하의 매우 낮은 레인징 오차를 나타낼 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 실제 하드웨어 구현의 효율성을 고려하여 TC 기반의 ToA 추정 방식을 사용하는 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템을 제시하였고, 이러한 레인징 성능에 영향을 주는 AFE 특성에 대해 정의하였다. 이 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템에서의 수신기는 복잡도를 낮추기 위해 매우 간단한 형태의 적분기와 1-비트 ADC로 구성된 AFE를 사용한다. 본 논문에서는 모의실험을 통해 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템을 사용하는 경우 다양한 무선 채널 환경에서 AFE 규격의 변화에 따른 레인징 성능을 분석하였고, 이를 통해 시스템의 복잡도와 레인징 성능 모두를 고려할 수 있는 적분 구간 및 임계값 등의 AFE 규격에 대한 설정 방안을 제시하였다. IEEE 801.15.4a UWB 다중경로 채널 모델에서의 모의실험 결과, 본 논문에서 제시된 Noncoherent IR-UWB 레인징 시스템은 실제 하드웨어 측면을 고려하여 저가로 구현 가능한 0.5 GHz 이하 낮은 샘플링 주파수의 1-비트 ADC를 사용함에 불구하고 매우 낮은 레인징 오차를 나타내는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 레인징 및 무선측위 기능을 포함하는 UWB 하드웨어 규격을 설정할 때 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Federal Communications Commission,

“Revision of Part 15 of the Commission’s rules regarding ultra-wideband transmission,” ET Docket 98-153, Apr. 2002.

[2] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>

[3] K. Siwiak and D. McKeown, *Ultra-Wideband Radio Technology*, John Wiley & Sons, 2004.

[4] Z. Sahinoglu, S. Gezici, and I. Guvenc, *Ultra-wideband Positioning Systems*, Cambridge University Press, 2008.

[5] M. Z. Win and R. A. Scholtz, “Impulse radio: How it works,” *IEEE Commun. Lett.*, Vol.2, No.2, pp.36-38, Feb. 1998.

[6] 이순우, 박영진, 김관호, “다중 경로 환경에 적합한 저전력 저복잡도 IR-UWB 수신기 설계 및 구현,” *대한전자공학회논문지*, TC편, 제44권, 제6호, pp.24-30, 2007년 6월.

[7] I. D. O’Donnell and R. W. Brodersen, “An ultra-wide-band transceiver architecture for low power, low rate, wireless systems,” *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, Vol.54, No.5, pp.1623-1631, Sept. 2005.

[8] P. Datta, X. Fan, and G. Fischer, “A transceiver front-end for ultrawide-band applications,” *IEEE Trans. Circuits & Syst. II*, Vol.54, No.4, pp.362-366, Apr. 2007.

[9] J. Kim, S. Kim, Y. Park, S. Lee, and Y. Shin, “An effective selective detection scheme based on pulse repetition for noncoherent UWB systems,” *IEEE Trans. Circuits & Syst. II*, Vol.55, No.9, pp.952-954, Sept. 2008.

[10] L. Yang and G. B. Giannakis, “Ultra-wideband communications: An idea whose time has come,” *IEEE Signal Proc. Mag.*, Vol.21, No.11, pp.26-54, Nov. 2004.

[11] J. R. Foerster, “The effects of multipath interference on the performance of UWB systems in an indoor wireless channel,” *Proc. IEEE VTC 2001-Spring*, pp.1176-1180, Rhodes, Greece, May 2001.

[12] I. Guvenc and Z. Sahinoglu, “Threshold-based ToA estimation for impulse radio UWB systems,” *Proc. IEEE ICU 2005*, pp.420-425, Zurich, Switzerland, Sept. 2005.

[13] IEEE 802.15.4a Channel Modeling Subcommittee, “IEEE 802.15.4a channel model -

