
고속 UWB의 상대주파수 차이 보상에 의한 거리추정 성능평가

Ranging Performance Evaluation of Relative Frequency Offset Compensation in High Rate UWB

남윤석*, 임재걸**, 장익현*
동국대학교 정보통신공학부*, 동국대학교 컴퓨터멀티미디어학부**

Yoon-Seok Nam(ysnam@dongguk.ac.kr)*, Jae-Geol Lim(yim@dongguk.ac.kr)**,
Ik-Hyeon Jang(ihjang@dongguk.ac.kr)*

요약

높은 해상도를 갖는 UWB 신호는 무선 개인영역망에서 거리추정 및 위치추정에 사용된다. 이들 노드는 국부클럭으로 동작하고, 노드간의 클럭 주파수 차이는 이동노드의 위치를 추정하는 거리추정 알고리즘에 심각한 영향을 미친다. IEEE802.15.4a의 저속 UWB에서는 추가적인 망동기의 도움 없이 수행하는 TWR 및 SDS-TWR의 비동기 양방향 거리추정 방식을 기술하고 있으나 클럭 주파수차이의 영향을 없애지는 못하고 있다. 그러므로 UWB 물리기능에 두 노드의 수정발진기 주파수 차이를 추정하는 방식이 필요하다. 고속 UWB에서는 추적회로를 사용한 수정발진기 편이 추정이 표준에 별도로 요구되지 않고 있다. 그러나 잡음이 없는 환경에서는 노드간의 수정발진기 편이 추정이 가능하다. 본 논문에서는 상대주파수 편이를 사용하여 TWR 기반의 거리추정 수식을 유도하였으며, 이상적인 수식에서의 잔여 오차를 분석하였다. 또한 시뮬레이션으로 상대주파수 편이 알고리즘의 성능을 평가하고, TWR 횟수에 따른 거리추정오차를 분석하였다. 결과적으로 클럭 해상도가 낮더라도 다수의 TWR을 사용한 상대주파수 편이 보상 방식에 의하여 거리추정오차의 성능이 개선됨을 알 수 있다.

■ **중심어** : | 주파수 편이 | 비동기 거리추정 | 거리추정 | 위치추정 | 무선 개인영역망 | 양방향 거리추정 | 대칭양방향 거리추정 | 고속 UWB |

Abstract

UWB signal with high resolution capability can be used to estimate ranging and positioning in wireless personal area network. The node works on its local clock and the frequency differences of nodes have serious affects on ranging algorithms estimating locations of mobile nodes. The low rate UWB, IEEE802.15.4a, describes asynchronous two way ranging methods such as TWR and SDS-TWR working without any additional network synchronization, but the algorithms can not eliminate the effect of clock frequency differences. Therefore, the mechanisms to characterize the crystal difference is essential in typical UWB PHY implementations. In high rate UWB, characterizing of crystal offset with tracking loop is not required. But, detection of the clock frequency offset between the local clock and remote clock can be performed if there is little noise induced jitter. In this paper, we complete related ranging equations of high rate UWB based on TWR with relative frequency offset, and analyze a residual error in the ideal equations. We also evaluate the performance of the relative frequency offset algorithm by simulation and analyze the ranging errors according to the number of TWR to compensate coarse clock resolution. The results show that the relative frequency offset compensation and many times of TWR enhance the performance to converge to a limited ranging errors even with coarse clock resolutions.

■ **keyword** : | Frequency Offset | Asynchronous Ranging | Ranging | Positioning | Wireless Personal Area Network | TWR | SDS-TWR | High Rate UWB |

* 본 연구는 2007년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음.

접수번호 : #090406-001

심사완료일 : 2009년 04월 23일

접수일자 : 2009년 04월 06일

교신저자 : 장익현, e-mail : ihjang@dongguk.ac.kr

I. 서론

Global Positioning Service(GPS)를 사용한 실외 측위와 더불어 실내측위의 필요성이 다양한 분야에서 요구되고 있다. 실내측위는 주로 고가장비 등 사물에 대한 관리, 노인과 환자 등 사람에 대한 관리(병원, 유치원, 학교 등), 지능형 상황인지 제어(병원, 사무실, 가정 등)[4][5], 그리고 그 외 좁은 지역에서 정확한 위치표시가 필요한 다양한 응용이 예측된다. 실내에서의 위치추정 수단으로 측위 수단은 영상, 압력센서, 적외선, 초음파[3], 수신신호의 세기, Ultra Wideband(UWB)[1][2] 신호 등이 활용되었다[10][11]. 최근 저속 Wireless Personal Area Network(WPAN) 및 고속 WPAN 규격에서는 UWB를 사용한 거리추정 기능을 PHY에서 선택사항으로 수용하고 있다. 저속 WPAN의 IEEE802.15.4a[2]에서는 거리추정 기술과 데이터 전송 속도 등을 포함한 물리계층 기능 개선 표준기술이 연구되었으며, 고속 WPAN에서는 WiMedia Alliance[1]의 Physical(PHY) 규격에 Time of Flight(TOF)를 정확하게 추정할 수 있는 물리계층 기능이 정의되어 있다. 그러나 위치추정에서 수신 신호의 시작으로부터 기준 신호의 시각을 정확히 검출하기 어렵다. 다중경로, 다수의 단말기, 잡음, Line of Sight(LOS) 검출, 표본화능력 등에 대한 연구가 수행되었으며[7][8], Signal to Noise(SNR)에 대한 오류의 특성도[9] 제시되고 있다. 따라서 기준신호의 수신시각 검출에는 다중 경로 등의 영향이 이미 포함된 상태이다.

위치추정에서는 위치를 알고 있는 소수의 고정노드들과 위치를 추정해야 할 이동노드 간의 거리 추정 또는 거리 차이 추정이 먼저 이루어진다. 거리 또는 거리의 차이를 구하기 위해서는 고정노드간의 동기화가 우선 유지되어야 한다. 나아가 이동노드를 포함하여 동기화가 가능하다면 위치추정이 보다 용이하다. IEEE802.15.4a에서는 고정노드 및 이동노드간에 동기화가 이루어지지 않은 상태에서 거리를 추정하는 Two Way Ranging(TWR) 및 Symmetric Double Sided-TWR(SDS-TWR) 방식을 제안하고 있다[2][6]. 또한 Anchor 노드에서 거리추정을 요구하는 Mode-1

One Way Ranging(OWR) 방식 및 이동노드가 거리추정을 요구하는 Mode-2 OWR 기능을 정의하고 있다[2]. 저속 WPAN에서는 위치추정을 위한 PHY 및 MAC의 기능과 알고리즘을 정의하고 있으며, 상세한 구현은 구현 종속이다. 따라서 TWR, SDS-TWR 또는 OWR 등의 알고리즘이 사용될 수 있다. 반면에 WiMedia의 고속 UWB PHY 및 MAC 표준 기술에서는 위치추정 기능을 MAC 기능에 포함하고 있고, 또한 TWR의 반복으로 명시하고 있다. 따라서 연속적인 TWR은 응답시간이 대칭적이지 못하여 SDS-TWR을 적용하기에 오류가 증가하며, OWR 알고리즘은 정의된 MAC 프로토콜과 호환되기 어렵다.

고속 UWB 규격은 저속 UWB와 달리 PHY 및 MAC 계층의 기능에 주파수차이 추적이 요구되지 않으며, 수신신호의 신호도착시간을 보다 정확하게 추정하는데 표본값의 보간법을 사용하지 않는다. 따라서 반드시 프레임 송수신 시각에 대한 타임스탬프를 사용하여 post-facto synchronization[12] 방식으로 주파수차이를 추정하고, 이를 거리추정에 사용하여야 한다. 규격에서는 상대주파수 편이 사용에 대해서만 언급하고 있으며, 타 연구에서도 이와 관련된 문제점 및 상대주파수 편이 추정에 의한 오류의 정도, 클럭 지터에 의한 영향 분석 등이 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 두 노드의 상대주파수차이를 추정하여 이를 두 노드간의 거리추정에 사용하기 위한 거리추정 관계식을 제시하고, 정확한 주파수 편이와의 관계 및 상대주파수 편이 사용에 포함된 문제점 및 그에 따른 오류의 범위를 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 노드의 클럭 지터가 포함된 상태에서 표본화 주파수 별로 TWR 수행 횟수에 따른 거리추정 오류의 범위를 분석한다.

II. WiMedia 거리추정 기능

2.1 거리추정 절차

WiMedia 규격에서의 거리추정 기능은 MAC 기능으로 정의되어 있다. [그림 1]은 WiMedia의 거리추정 절차

차를 나타낸 것이다. 거리추정 기능은 그림에서와 같이 Ranging measurement ReQuest(RRQ), Ranging Measurement(RM), Ranging Measurement Report(RMR) 메시지에 의하여 수행된다. RRQ에 의하여 송신 및 수신측에서 PHY 소자를 제어함으로써 거리추정 기능이 활성화되고, 거리추정 횟수 등의 정보가 전달된다. 1회 이상의 RM에 의한 거리 추정이 수행되고, RM 수신측은 이전에 발생한 사건에 대한 시각 정보를 RMR 메시지에 실어 전송한다. 즉, MLME-RANGE-MEASUREMENT.request에 의하여 거리추정 사전 설정이 수행되고, 설정이 완료되면 RM 제어프레임이 전송되고, 설정된 횟수만큼 RM이 수행되면 RMR로 결과를 전달되며, 이를 수신한 노드는 MLME-RANGE-MEASUREMENT.confirm의 파라메타에 거리추정 프레임 전송에서 취득한 타임스탬프 등을 전달한다.

프레임 송신 및 수신 시각은 channel estimation sequence preamble 신호의 첫 부호에 대한 안테나의 송신 및 수신 추정시간을 기준으로 한다. 거리추정 시작 노드에서는 자신의 노드에서 발생한 시각정보와 수신한 시각정보로부터 두 노드간의 거리를 추정한다.

2.2 거리추정 기능 규격

표본화 클럭의 주파수는 528MHz, 1056MHz, 2112MHz, 그리고 4224MHz를 사용할 수 있으며, 거리추정 프레임 송신 및 수신시각을 표시하는 타임스탬프는 4224MHz를 기준으로 계수기의 형태가 정의되어 15~32비트를 사용할 수 있다. 반면에 IEEE802.15.4a에서는 표본화 클럭은 499.2MHz를 기본으로 그 이상도 허용하고 있으며, 128 지점 보간법 등에 의한 64GHz의 세밀한 타임스탬프를 표시할 수 있도록 계수기가 정의되어 있다.

계수기 기능은 소자에서 제공되고, TOF는 안테나 간에서 발생한다. 따라서 계수기에서 얻어진 값으로부터 안테나와 계수기 수행 블록 간의 내부전파시간을 보상해야 한다. 이는 안테나 루프백 등을 수행함으로써 계수기에서 안테나까지의 전파지연시간 T_d 와 안테나에서 계수기까지의 전파지연시간 R_d 를 사전에 추정한다. 따

라서 실제 안테나에서의 송신시각 T_{ic} 및 수신시각 R_{ic} 은 PHY에서 취득한 T_i 및 R_i 값으로부터 다음과 같이 보상된다.

$$T_{ic} = T_i + T_d$$

$$R_{ic} = R_i + R_d$$

RM 메시지 수신에서 Ack 송신까지의 지연은 거리추정 오류에 큰 영향을 미친다. 지연은 RM 메시지의 길이와 전송속도에 의존하는 전송 지연과 Ack 생성 및 송신까지의 응답지연이 포함된다. [그림 1]에서와 같이 RRQ 및 RMR에 대한 응답지연은 거리추정과 무관하다.

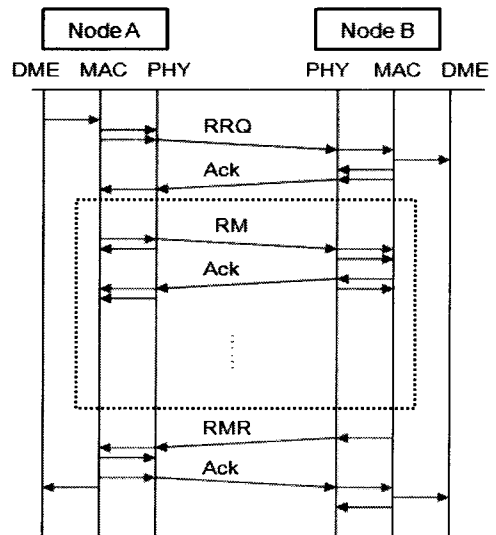


그림 1. WiMedia에서의 거리추정 메시지 전송 절차

[그림 2]는 RM 프레임의 프레임 포맷을 나타낸 것으로 전송지연을 계산함으로써 응답시간을 예측할 수 있다. 그림에서와 같이 preamble은 24 심볼의 packet/frame synchronization sequence와 6 심볼의 channel estimation sequence로 구성되어 30심볼이다. scrambled 및 reed-solomon encoded PLCP Header는 PHY 및 MAC Header와 2바이트 CRC를 포함하며, 39.4Mbps로 전송된다. 프레임의 PSDU는 Payload와 4바이트 CRC를 포함하며, scrambled 되어 전송된다. RM 메시지는 제어프레임으로 전송되고, RM 프레임의

payload는 2 바이트로 구성된다. 따라서 RM 프레임에 의한 전송 지연은 53.3Mbps 전송속도의 경우에도 14 us 이하이다.

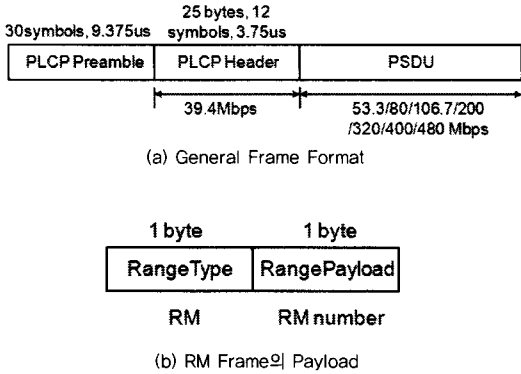


그림 2. Ranging Measurement Frame Format

2.3 상대주파수 차이 추정 방법

무선 TOF를 사용하여 거리를 추정하는 방식에는 무선신호의 전달 특성을 포함한 다양한 원인에 의하여 오차가 포함된다. 원인으로서는 무선신호의 다중경로에 의한 오차, NLOS에 의한 오차, 수신기 잡음에 의한 오차, 해상도에 의한 오차, BS간의 동기 오차, 주파수 편이 오차 등이 있다. 특히, 주파수 편이 오차는 매우 민감하여 IEEE802.15.4a에서는 프레임 수신 동안 수신노드가 국부클럭을 기준으로 상대 클럭과의 주파수 편이를 추적하는 방법을 제공하고 있다. WiMedia에서는 PHY 및 MAC의 기능에 포함하지 않고, 별도 처리하여 보상하는 방법을 제시하고 있다.

노드 A, B의 주파수를 기준주파수부터 편이된 것으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_A &= f_R(1+e_A) \\ f_B &= f_R(1+e_B) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서

f_R : 기준 주파수

f_A, f_B : 노드-A, B의 주파수

e_A, e_B : 노드-A, B의 주파수 편이 (ppm)

노드 A를 기준으로 노드 B의 주파수 편이를 나타내면, 다음과 같다.

$$f_B = f_A(1+e) \quad (2)$$

$$e = \frac{1+e_B}{1+e_A} - 1 = \frac{e_B - e_A}{1+e_A}$$

여기에서

e : 노드-A를 기준한 노드-B의 주파수 편이

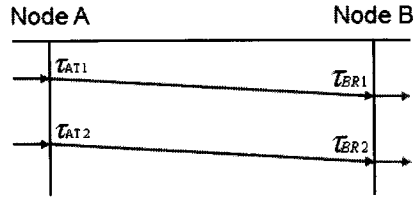


그림 3. 두 노드간의 동일 송신 및 수신 시간 간격

[그림 3]은 두 노드간의 동일 송신 및 수신 시간 간격을 나타낸 것으로 두 노드의 주파수 편이를 추정하는 방식을 설명하기 위한 것이다. 그림에서와 같이 두개의 고정된 위치에 놓인 노드 간에 발생하는 프레임 전송에서 송신간 시간간격과 수신간 시간간격은 실제로 동일하다. 그러나 두 노드는 동작하는 클럭의 주파수 편이가 서로 다르기 때문에 취득하는 시간정보는 서로 다른 값을 나타낸다. 그림에서 τ_{AT1} 의 시간은 계수기 값 n_{AT1} 에, 그리고 τ_{AT2} 은 n_{AT2} 에, τ_{BR1} 은 n_{BR1} 에, τ_{BR2} 은 n_{BR2} 에 각각 대응하는 것으로 가정한다.

두 쌍의 거리추정 프레임 전송으로부터 프레임 송신간의 시간간격과 프레임 수신간의 실제 시간간격은 동일하므로 다음과 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_{AT2} - \tau_{AT1} &= \frac{1}{f_A}(n_{AT2} - n_{AT1}) \\ \tau_{BR2} - \tau_{BR1} &= \frac{1}{f_B}(n_{BR2} - n_{BR1}) \\ \tau_{AT2} - \tau_{AT1} &= \tau_{BR2} - \tau_{BR1} \end{aligned}$$

따라서 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{n_{AT2} - n_{AT1}}{1+e_A} = \frac{n_{BR2} - n_{BR1}}{1+e_B} \quad (3)$$

$$n_{AT2} - n_{AT1} = \frac{n_{BR2} - n_{BR1}}{1+e} \quad (4)$$

III. 상대 주파수 편이 보상 비동기 거리추정 방식

3.1 TWR 알고리즘

[그림 4]는 IEEE802.15.4a에 기술된 TWR에서의 프레임 교환을 나타낸 것이다.

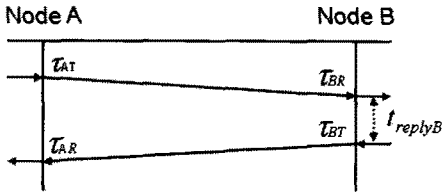


그림 4. TWR에서의 거리추정 프레임 교환

그림에서와 같이 TWR 방식에서 TOF는 노드의 동기화가 이루어진 상태에서는 식 (5)와 같이 표현된다. 계수기에 포함된 주파수 차이를 고려한 추정 TOF는 식 (6)과 같이 표현되고, TOF 추정 오차는 식 (7)과 같이 표현된다. 여기에서 t_{replyB} 는 노드 B에서 프레임 수신을 완료하고 Ack를 전송하는데 걸린 시간으로 프로세서의 성능과 프로그래밍 코드와 관련된 것으로, 실제로는 거리추정 기준 비트를 수신한 이후부터 프레임 수신 완료 및 Ack 송신 준비 및 Ack 프레임의 거리추정 비트 송신 시각 까지의 시간을 의미한다. 따라서 IEEE802.15.4a에서와 같이 0.85Mbps 및 127 바이트 PSDU의 경우, 1ms 이상이 될 수도 있다. 식 (5)과 같이 두 노드의 클럭 주파수가 동일하다는 가정과 식 (6)와 같이 두 장치간의 주파수 차이를 인정하면 주파수 차이와 프로세서 프레임 응답시간에 따라 식 (7)과 같이 거리추정 오류의 크기를 예측할 수 있다.

$$2t_p = (\tau_{BR} - \tau_{AT}) + (\tau_{AR} - \tau_{BT}) \quad (5)$$

$$= (\tau_{AR} - \tau_{AT}) - (\tau_{BT} - \tau_{BR})$$

$$2\hat{t}_p = (\tau_{AR} - \tau_{AT})(1 + e_A) - (\tau_{BT} - \tau_{BR})(1 + e_B) \quad (6)$$

$$= \frac{1}{f_R} \left\{ \frac{n_{AR} - n_{AT}}{1 + e_A} - \frac{n_{BT} - n_{BR}}{1 + e_B} \right\}$$

$$\hat{t}_p - t_p = \frac{1}{2} t_{replyB} (e_A - e_B) + t_p e_A \quad (7)$$

$$\approx \frac{1}{2} t_{replyB} (e_A - e_B)$$

여기에서,

$$\tau_{AR} - \tau_{AT} = 2t_p + t_{replyB}$$

$$\tau_{BT} - \tau_{BR} = t_{replyB}$$

위의 식에서 추정오류는 주파수 차이와 프레임처리 응답시간의 곱으로 표현된다.

3.2 WiMedia의 주파수차이 보상 방안

식 (2)에서와 같이 두 노드간의 상대 주파수 편이를 적용하면, 식 (4)와 유사한 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$\tau_{AR} - \tau_{AT} = \frac{n_{AR} - n_{AT}}{f_A}$$

$$\tau_{BT} - \tau_{BR} = \frac{n_{BT} - n_{BR}}{f_A(1 + e)}$$

위의 식으로부터 정확한 TOF는 다음과 같이 표현된다.

$$2t_p = (\tau_{AR} - \tau_{AT}) - (\tau_{BT} - \tau_{BR}) \quad (8)$$

$$= \frac{1}{f_A} (n_{AR} - n_{AT} - \frac{n_{BT} - n_{BR}}{1 + e})$$

$$= \frac{1}{f_R} \left\{ \frac{n_{AR} - n_{AT}}{1 + e_A} - \frac{n_{BT} - n_{BR}}{1 + e_B} \right\}$$

추정으로부터 얻어진 타임스탬프와 상대적인 주파수 편이를 사용하여 표현되는 추정 TOF는 다음과 같이 표현된다.

$$2\hat{t}_p = (\tau_{AR} - \tau_{AT}) - (\tau_{BT} - \tau_{BR})(1 + e) \quad (9)$$

$$= \frac{1}{f_A} \{ (n_{AR} - n_{AT}) - (n_{BT} - n_{BR}) \}$$

$$= 2t_p - t_{replyB} \cdot e$$

따라서 추정오류는 주파수 상대편이와 프레임처리 응답시간의 곱으로 표현된다.

$$\hat{t}_p - t_p = -\frac{1}{2} t_{replyB} \cdot e$$

3.3 Double TWR 알고리즘

[그림 5]는 Double TWR에서의 메시지 교환을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 [그림 3]에서 나타낸 두 노드간의 동일 송신 및 수신 시간 간격 사건과 두개의 TWR을 포함하고 있다.

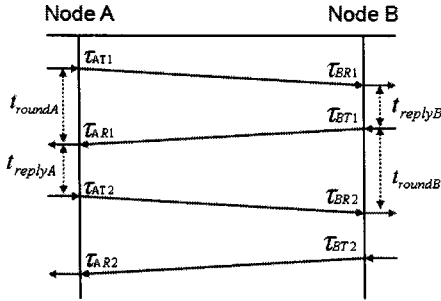


그림 5. Double TWR에서의 메시지 교환

[그림 4]로부터 다음 관계는 항상 성립한다.

$$n_{AT2} - n_{AT1} = \frac{n_{BR2} - n_{BR1}}{1+e}$$

$$n_{AR2} - n_{AR1} = \frac{n_{BT2} - n_{BT1}}{1+e}$$

위의 관계로부터 A를 기준으로 B의 주파수 차이를 얻을 수 있다.

$$e = \frac{n_{BR2} - n_{BR1}}{n_{AT2} - n_{AT1}} - 1 \quad (10)$$

DTWR 방식에서 TOF는 식 (10)을 이용하면 식 (11)과 (12)와 같이 표현된다.

$$2\hat{t}_{p1} = (\tau_{AR1} - \tau_{AT1})(1+e_A) - (\tau_{BT1} - \tau_{BR1})(1+e_B)$$

$$= \frac{1}{f_R} \left\{ \frac{n_{AR1} - n_{AT1}}{1+e_A} - \frac{n_{BT1} - n_{BR1}}{1+e_B} \right\}$$

$$= \frac{1}{f_A} \left\{ (n_{AR1} - n_{AT1}) - \frac{(n_{BT1} - n_{BR1})}{1+e} \right\} \quad (11)$$

$$2\hat{t}_{p2} = (\tau_{AR2} - \tau_{AT2})(1+e_A) - (\tau_{BT2} - \tau_{BR2})(1+e_B)$$

$$= \frac{1}{f_A} \left\{ (n_{AR2} - n_{AT2}) - \frac{(n_{BT2} - n_{BR2})}{1+e} \right\} \quad (12)$$

따라서 Double TWR로부터 식 (10)에 의한 상대주파수편이를 구하고, 식 (11) 및 (12)로부터 2개의 TWR에 의한 TOF를 계산할 수 있다. 단, 식 (11)과 (12)에서 정확한 f_A 값은 추정하지 않고 있다. 따라서 f_A 대신 f_R 을 적용할 수 있으나, 약간의 오차가 포함된다. 식 (13)은 식 (11)과의 관계를 나타낸 것이다.

$$2\hat{t}_{p1} = \frac{1}{f_A} \left\{ (n_{AR1} - n_{AT1}) - \frac{(n_{BT1} - n_{BR1})}{1+e} \right\} \quad (13)$$

$$\approx \frac{1}{f_R} \left\{ (n_{AR1} - n_{AT1}) - \frac{(n_{BT1} - n_{BR1})}{1+e} \right\}$$

식 (13)에 연유하여 $\pm e_A$ ppm의 경우의 한 주기 오차는 다음과 같이 나타난다.

$$e_{period} = \frac{1}{f_A} - \frac{1}{f_R} = \frac{1}{f_R} \left(\frac{1}{1+e_A} - 1 \right) \quad (14)$$

$$= -\frac{1}{f_R} \frac{e_A}{1+e_A}$$

따라서 거리오류는 다음과 같다.

$$d_{err} = e_{period} \times \left(\frac{d}{c} \times f_A \right) \times c \quad (15)$$

$$= e_{period} \times d \times f_R \times (1+e_A)$$

$$= e_A \times d$$

여기에서, d 는 두 노드의 거리, c 는 전파 속도(3×10^8 m/sec), $f_R = 528 \times n$ MHz, ($n=1, 2, 4, 8$)이다. 거리가 10m이고 기준한 노드의 주파수 편이가 40ppm 인 경우, 0.04cm의 오차가 발생한다.

동일한 방법으로 2번 이상의 TWR에 대하여 첫 번째 TWR과 마지막 TWR에서 발생하는 결과로부터 두 노드간의 동일 송신 및 수신 시간 간격에 의한 상대주파수 편이와 수행된 각각의 TWR에 의한 TOF로부터 평균 TOF를 구할 수 있다. 표본화 주파수로 528MHz를 사용할 경우, 한 클럭 오차에 의한 거리추정 오차는 최대 약 ± 56.8 cm이다. 1056MHz, 2112MHz, 그리고 4224MHz에 대해서는 각각 ± 28.4 cm, ± 14.2 cm, ± 7.1 cm 정도이다. 따라서 두 노드간의 거리에 대하여 여러번의 TWR을 수행함으로써 거리오차는 감소한다.

[그림 5]에서 2번의 TWR은 독립적으로 수행되며, SDS-TWR에서 요구하는 연속적인 관계가 성립하지 않을 수도 있다. 따라서, 두 노드가 동일 하드웨어 및 소프트웨어에 의한 동일 기반이더라도 $t_{roundA} \neq t_{roundB}$ 및 $t_{replyA} \neq t_{replyB}$ 관계가 일반적인 것이다.

IV. 시뮬레이션 및 고찰

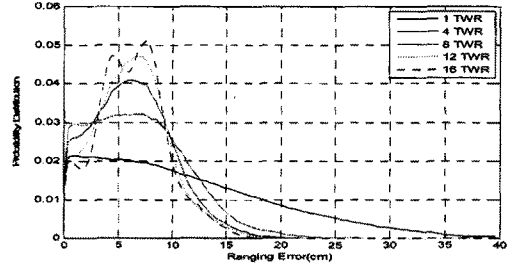
4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 10m x 10m x 3m 공간에서 이동노드의 위치를 임의로 선정하고, 다수의 TWR을 수행하였다. 고정노드의 위치는 ((0, 0, 3), (0, 10, 3), (10, 0, 3), (10, 10, 3), (5, 5, 1.5))와 같이 설정함으로써 TOA(Time of Arrival) 계산에서 각 축에 대하여 안정적인 특성을 갖도록 하였다. 각 노드의 주파수 차이는 균등 분포로부터 발생시켜 5개의 고정노드와 하나의 이동노드가 주파수 편이의 범위 ± 1 ppm에 대하여 차례로 (-0.101, 0.928, -0.968, -0.478, 0.821, 0.156)ppm을 갖도록 설정하였고, 주파수 편이의 범위에 따라 편이에 곱하여 수행하였다. RM 메시지에 대하여 노드의 응답 지연시간을 45us로 가정하였다. 응답지연시간은 53.3Mbps 전송속도에서 RM 프레임에 대하여 발생하는 전송지연 15us와 처리지연시간 30us로 가정하였다.

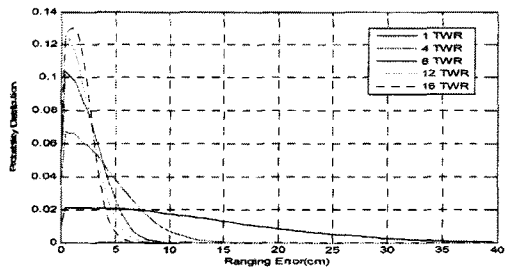
4.2 528MHz 시뮬레이션 결과

[그림 6]은 잡음이 없는 환경에서 528MHz 표준화 클럭을 사용하여 TWR을 16회까지 수행한 결과에 대한 거리추정 오차이다. (a)는 ± 40 ppm의 주파수 편이를 보상하지 않은 원래의 TWR에 대한 거리추정 오차의 PDF(Probability density function)를 나타낸 것이다. 수행횟수가 증가할수록 거리추정 오차의 최대값은 감소하고, 더욱 뚜렷한 Peak가 나타난다. 수행 횟수 1회의 경우 주파수 편이에 의한 영향 보다 표준화 해상도에 의한 영향이 더 크게 나타난 것이다. (b)는 상대 주파수 편이를 보정한 거리추정 오차의 PDF를 나타낸 것이다. 1회 수행에서는 상대주파수 편이를 계산할 수 없으므로 (a)와 동일한 형태이며, 2회 이상부터는 주파수 편이가 보상된 형태로 수행횟수가 증가할수록 거리오차가 감소한다. (c)와 (d)는 ± 10 ppm 및 ± 40 ppm에 대한 TWR의 횟수에 대한 거리추정 오차의 평균값과 최대값을 나타낸 것이다. (c)에서 상대주파수편이 보상의 경우 주파수 편이에 따라 차이가 있지만 2cm 이내로 수렴한 반면, 원래의 TWR은 주파수 편이에 따라 확연한 성능 차이를 나타내었다. 또한 아래의 3개 그래프가 유사한 값을 갖는 것은 표준화 주파수의 해상도에서 원인을 찾을 수 있다. (d)에서와 같이 거리추정 오차의 최대값 또한 수행횟수가 증가함에 따라 감소하지만, 평균

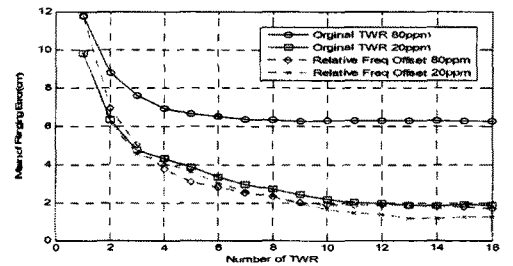
값에 비하여 매우 큰 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다.



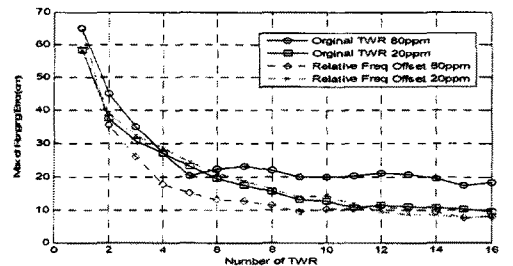
(a) 원래 TWR의 거리추정 오차 분포 (± 40 ppm)



(b) 상대주파수 편이 보상 TWR의 거리추정 오차 분포 (± 40 ppm)



(c) TWR 수행횟수에 대한 거리추정 오차의 평균값

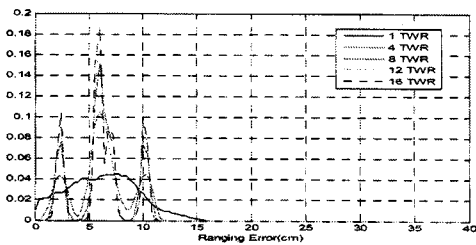


(d) TWR 수행횟수에 대한 거리추정 오차의 최대값

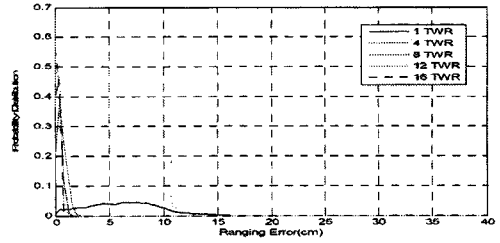
그림 6. 528MHz에 대한 거리추정 성능 평가

4.3 4224MHz 시뮬레이션 결과

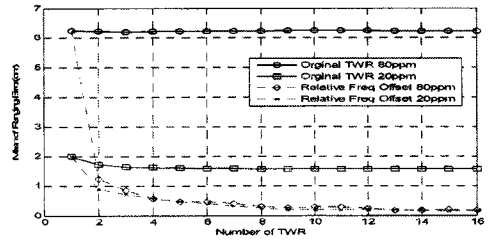
[그림 7]은 잡음이 없는 환경에서 4224MHz 표준화 클럭을 사용하여 TWR을 16회까지 수행한 결과에 대한 거리추정 오차이다. (a)는 ± 40 ppm의 주파수 편이를 보상하지 않은 원래의 TWR에 대한 거리추정 오차의 PDF를 나타낸 것이다. 수행횟수가 증가할수록 거리추정 오차의 최대값은 약간씩 감소하고, 더욱 뚜렷한 peak가 나타난다. ± 1 ppm에 대하여 이동노드의 주파수 편이가 0.156ppm, 그리고 고정노드의 주파수 편이가 각각 (-0.101, 0.928, -0.968, -0.478, 0.821, 0.156)ppm 등으로 이동노드와 각 고정노드간의 상대 주파수 편이는 차례로 0.257, 0.634, 0.675, 0.772, 1.24ppm 만큼 존재한다. 이 차이만큼 떨어져서 5개 고정노드에서 균등하게 20% 정도의 분포값을 갖는다. (b)는 상대 주파수 편이를 보상한 거리추정 오차의 PDF를 나타낸 것이다. 2회 이상부터는 주파수 편이가 보상된 형태로 수행횟수가 증가할수록 거리오차가 감소한다. (c)와 (d)는 ± 10 ppm 및 ± 40 ppm에 대한 TWR의 횟수에 대한 거리추정 오차의 평균값과 최대값을 나타낸 것이다. (c)에서 상대주파수편이 보상의 경우 주파수 편이의 크기에 무관하게 0.2cm 이내로 수렴한 반면, 원래의 TWR은 주파수 편이에 따라 6.2cm 및 1.7cm 등으로 확연한 성능 차이를 나타내었다. (d)에서와 같이 거리추정 오차의 최대값 또한 수행횟수가 증가함에 따라 감소하고, 평균값에 비하여 매우 큰 값을 유지하지만, 상대주파수 편이 보상의 경우 주파수 편이의 크기에 무관하게 유사한 작은 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 원래 TWR의 거리추정 오차 분포(± 40 ppm)



(b) 상대주파수 편이 보상 TWR의 거리추정 오차 분포(± 40 ppm)



(c) TWR 수행횟수에 대한 거리추정 오차의 평균값

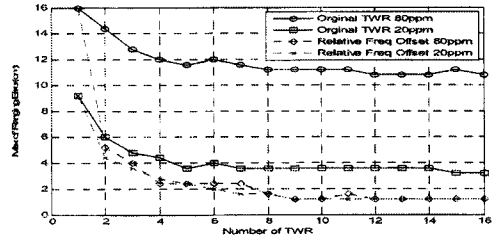


그림 7. 4224MHz에 대한 거리추정 성능 평가

V. 결론

WiMedia의 표준규격에서는 TWR 방식을 포함한 비동기 거리추정 방식 및 절차, 그리고 상대주파수편이 사용에 대하여 기술하고 있다. 본 논문에서는 WiMedia에서 추천한 상대주파수 편이를 사용한 거리추정 수식을 정립하고, 정확한 주파수 편이와의 관계를 정의하였다. 상대주파수 편이는 한 노드의 주파수를 기준으로 다른 노드의 주파수 편이를 추정하는 것으로 실제로는 기준한 노드의 주파수를 알지 못하므로 주파수 편이가 없는 기준주파수로 계산하게 된다. 이에 대한 오류는 노드간의 거리와 기준한 노드의 주파수 편이의 곱으로

표현되었으며, 10m 거리와 ± 40 ppm 등의 환경에서 영향이 거의 없는 것으로 분석되었다.

표본화 주파수에 의한 해상도가 충분하지 못할 경우 균등 분포의 거리추정 오류가 포함된다. 다수의 TWR에 의한 거리추정 오류는 균등 분포의 convolution에 의하여 정상 분포에 가깝다. 따라서 다수의 TWR에 의한 거리추정 오차의 분포는 표본화 주파수의 해상도 범위에서 정상 분포를 갖는다. 시뮬레이션 결과에서와 같이 TWR 수행횟수가 증가할수록 거리추정 오차의 평균은 감소하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 결과에서와 같이 WiMedia 규격에서는 2번 이상의 TWR 사용이 필요하며, 모든 표본화 주파수의 해상도에서 처음 6회까지는 계속 성능이 개선되며, 12회 정도에서는 수렴의 한계에 도달하는 것으로 분석된다.

WiMedia의 고속 UWB 규격은 TWR 기반의 비동기 양방향 거리추정 방식이다. 소수의 고정노드를 사용하여 다수의 이동노드에 대한 위치를 빠르게 추정하기 위해서는 단방향 거리추정 방식이 요구된다. WiMedia의 규격의 수행 절차를 따르면서 단방향거리추정 효과를 낼 수 있는 방식에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] A. WiMedia, "Multiband OFDM Physical Specification," Version 1.2, 2007(2).
- [2] IEEE802.15.4a/D7, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs): Amendment to add alternate PHY," 2007(8).
- [3] N. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, "The Cricket Location-Support System," Proc. of the ACM Int'l Conf. on MobiCom, 2000(8).
- [4] H. Andy, H. Andy, S. Pete, W. Andy and W. Paul, "The anatomy of a Context-Aware Application," In Wireless Networks, Vol.8, pp.187-197, 2002(2).
- [5] S. H. Baek, H. J. Lee, S. Y. Lim, and J. D. Huh, "Managing Mechanism for Service Compatibility and Interaction Issues in Context-Aware Ubiquitous Home," IEEE Trans. Consumer Electronics, Vol.51, No.2, pp.524-528, 2005(5).
- [6] S. Zafer and G. Sinan, "Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard," IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2006(12).
- [7] Z. N. Low, J. H. Cheong, C. L. Law, W. T. Ng, and Y. J. Lee, "Pulse detection algorithm for line-of-sight(LOS) UWB ranging applications," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., Vol.4, pp.63-67, 2002.
- [8] J. Y. Lee and S. Y. Yoo, "Large error performance of UWB ranging in multipath and multiuser environments," IEEE Trans. On Microwave and Techniques, Vol.54, No.4, pp.1887-1895, 2006(4).
- [9] Q. Yihong and K. Ruij, "Mitigation of sampling-induced errors in delay estimation," IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICU2005), pp.402-407, 2005(9).
- [10] 김학용, 김성덕, 서동길, 지정강, 장현태, "근거리 위치추적 기술 동향", 주간기술동향, 통권1322호, pp.1-12, 2007.
- [11] 조영수, 조성운, 김병두, 이성호, 김재철, 최완식, "실내의 연속측위 기술 동향", 전자통신동향분석, 제22권, 제3호, pp.20-28, 2007.
- [12] S. Ganerwal, R. Kumar, M. B. Strivastava, "Timing-sync protocol for Sensor Networks," Proceeding on Embedded Networked Sensor Systems, pp.138-149, 2003.

저자 소개

남 윤 석(Yoon-Seok Nam)

정회원



- 1984년 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1987년 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 : 경북대학교 전자공학과 (공학박사)

• 1987년 ~ 2000년 : 한국전자통신연구원 책임연구원
 • 2000년 ~ 현재 : 동국대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> : 트래픽제어, 성능평가, 위치추정, 저속 WPAN, 고속 WPAN, WBAN

임 재 결(Jae-Geol Yim)

정회원

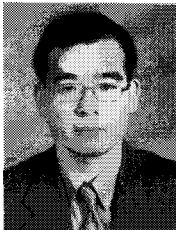


- 1974년 : 인천교육대학(학사)
- 1981년 : 동국대학교(공학사)
- 1987년 : 일리노이대 시카고 캠퍼스(공학석사)
- 1990년 : 일리노이대 시카고 캠퍼스(공학박사)

• 1992년 ~ 현재 : 동국대학교 컴퓨터학과 교수
 <관심분야> : 페트리넷 이론과 응용, 컴퓨터 네트워크, 시스템 설계 분석, 인공지능

장 의 현(Ik-Hyeon Jang)

정회원



- 1984년 : 서울대학교 계산통계학과(이학사)
- 1986년 : 한국과학기술원 전산학과(공학석사)
- 1998년 : 한국과학기술원 전산학과(공학박사)

• 1986년 ~ 1999년 : (주)데이콤 책임연구원
 • 1999년 ~ 현재 : 동국대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> : 컴퓨터통신, 분산시스템, 인터넷 프로토콜