

# 고속 UWB에서 주파수 편이 보상을 사용한 거리추정 성능향상

남 윤 석<sup>†</sup> · 장 익 현<sup>†</sup>

## 요 약

WPAN에서는 해상도가 높은 UWB 신호를 사용하여 노드 간의 거리를 추정하고 이로부터 이동노드의 위치를 추정한다. 비동기 거리추정 방식은 고정노드와 이동노드 간에 비동기 상태에서 노드간의 거리를 추정하는 바 각 노드 국부클럭의 주파수 차이에 의한 영향이 심각하다. 고속 UWB에서는 각 노드 국부클럭의 주파수 차이에 의한 영향을 감소시키기 위하여 비동기 TWR 방식을 연속으로 수행하고, 상대주파수 편이 보상방안을 제시하고 있다. 본 논문에서는 고속 UWB의 상대주파수 편이 보상 수식을 완성하고, 이를 적용하는데 대한 문제점을 분석하고, 정확한 주파수편이 보상 방안을 제안한다. 거리추정 방식은 원래의 TWR, 상대주파수 편이 보상 및 정확한 주파수 편이 보상 방식에 의한 TWR에 대하여 시뮬레이션으로 성능을 분석하였다. 상대주파수편이 방식과 정확한 주파수편이 방식은 잡음이 없는 상태에서는 유사한 성능을 나타내었다. 제안된 정확한 주파수 편이 방식은 SNR이 열악한 환경에서 상대주파수 편이 보상 방식보다 정확한 거리를 추정하는 것을 확인하였다.

키워드 : 고속 UWB, 실내측위, 거리추정, 비동기양방향거리추정, 주파수편이

## Ranging Enhancement using Frequency Offset Compensation in High Rate UWB

Yoon-Seok Nam<sup>†</sup> · Ik-Hyeon Jang<sup>†</sup>

### ABSTRACT

UWB signal with high resolution capability can be used to estimate ranging and positioning in wireless personal area networks. The clock frequency differences of nodes have serious affects on asynchronous ranging methods to estimate locations of mobile nodes. The specification of high rate UWB describes successive TWR method with the estimation of a relative clock frequency offset. In this paper, we complete the ranging equations using relative frequency offset and time information, and propose a method to estimate the exact frequency offsets. We evaluate the ranging algorithms with simulation. The results show that the performances of the algorithms using frequency offsets are very close without noise. But, at noise environment, the method of exact frequency offsets shows better performance than that of relative frequency offsets.

Keywords : High Rate UWB, Indoor Positioning, Ranging, Asynchronous Two-Way Ranging, Frequency Offset

### 1. 서 론

실의 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)<sup>[6,7]</sup>, 그리고 그 외 좁은 지역에서 정확한 위치표시가 필요한 다양한 응용이 예측된다. 실내에서의 위치추정 수단으로는 영상, 압력센서, 적외선, 초음파<sup>[2,3]</sup>, 수신신호의 세기<sup>[4,5]</sup>, UWB(Ultra Wideband)

신호<sup>[8,10,13,14]</sup> 등이 활용되었다<sup>[1]</sup>. 최근 저속 WPAN(Wireless Personal Area Network) 및 고속 WPAN 규격에서는 UWB를 사용한 거리추정 기능을 PHY에서 선택사항으로 수용하고 있다. 저속 WPAN의 IEEE802.15.4a<sup>[8]</sup>에서는 거리추정 기술과 데이터 전송속도 등을 포함한 물리계층 기능 개선 표준기술이 연구되었으며, ECMA International에 표준으로 채택된 WiMedia Alliance의 고속 WPAN 규격<sup>[11]</sup>에 TOF(Time of Flight)를 추정할 수 있는 물리계층 기능 및 MAC 계층 절차가 정의되어 있다. 이러한 규격 이외에도 신호수신시각을 추정하는데 영향을 주는 다중경로, 다중 사용자, 잡음, 그리고 주파수 편이 등에 의한 TOF 추정 오류 연구<sup>[11]</sup>, 망동기 설정 및 주파수 편이 보상에 대한 연구<sup>[12,13]</sup> 등이 수행되고 있다.

<sup>†</sup> 중신회원 : 동국대학교 경주캠퍼스 정보통신공학과 부교수  
논문접수 : 2008년 10월 13일  
수정일 : 1차 2008년 12월 2일  
심사완료 : 2008년 12월 5일

위치추정에서는 위치를 알고 있는 소수의 고정노드들과 위치를 추정해야 할 이동노드 간의 거리 추정 또는 거리 차이 추정이 먼저 이루어진다. 거리 또는 거리의 차이를 구하는데 있어서 고정노드간의 동기화가 설정되면 간단하고 정확한 거리 추정이 가능하다. 나아가 이동노드를 포함하여 동기화가 가능하다면 위치추정 방법이 보다 빠른 절차로 다양한 거리추정 방식을 적용할 수 있으며, 따라서 다양한 기능의 이동노드가 분포된 환경에서도 측위 서비스 제공이 가능하다. IEEE802.15.4a에서는 고정노드 및 이동노드 간에 동기화가 이루어지지 않은 상태에서 양방향 통신에 의하여 거리를 추정하는 TWR(Two Way Ranging) 및 SDS-TWR(Symmetric Double Sided-TWR) 방식을 제안하고 있다<sup>[8,9]</sup>. 또한 동기화 상태에서 단방향 통신에 의하여 거리를 추정하는 OWR(One-Way Ranging) 방식에서 고정노드에서 이동노드로 거리추정 프레임을 전송하는 Mode 1과 이동노드에서 거리추정 프레임을 전송하는 Mode 2를 정의하고 있다<sup>[8]</sup>. 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 보다 정확한 거리추정 값을 얻기 위한 SDS-TWR 및 보다 빠르게 수행하기 위한 OWR 알고리즘을 적용하기에 적합하지 않다.

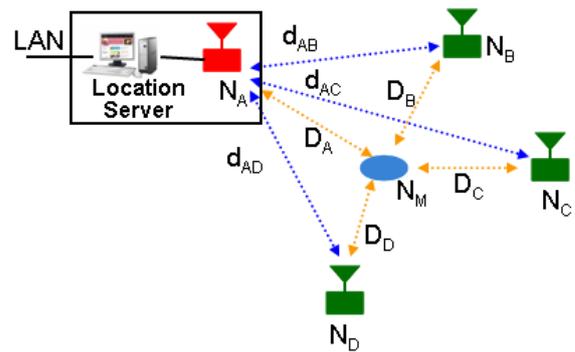
고속 UWB는 저속 UWB와 달리 거리추정에 대한 Frequency Offset Tracking 기능이 별도로 제공되지 않고 있으며, Interpolation 사용에 대한 내용도 없으며, 반면에 다양한 클럭을 허용하고 있다. 본 논문은 WiMedia 규격에서 제시한 상대주파수편이 방식의 거리추정 수식을 완성하였으며, 상대주파수편이 방식에 내포된 거리추정 오류의 문제점을 분석하였다. 또한 정확한 주파수 편이를 추정하여 고속 UWB에 적용할 TWR 알고리즘을 제안한다. 제안된 주파수 편이 방식은 시뮬레이션을 통하여 성능을 분석하였다.

2. 시스템 구성 및 거리추정 기능

2.1 위치추정 시스템의 구성

(그림 1)은 위치추정을 수행하는 시스템의 구성 예를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 일반적으로 알려진 위치에 설치된 소수의 고정노드( $N_A \sim N_D$ )와 위치추정 대상이 되는 다수의 이동노드( $N_M$ ), 그리고 이동노드의 위치를 추정을 전반적으로 관리하는 위치서버로 구성된다.

그림에서와 같이 고정노드간의 거리는 알고 있는 상태이며, 이동노드와 고정노드간의 거리 추정 정보로부터 TOA(Time of Arrival) 또는 TDOA(Time Difference of Arrival) 방식을 이용하여 이동노드의 위치 추정을 수행한다. 고정노드간의 거리  $d_{AB}$ ,  $d_{AC}$ ,  $d_{AD}$ 는 알고 있고, 고정노드와 이동노드간의 거리  $D_A$ ,  $D_B$ ,  $D_C$ ,  $D_D$  또는 이들의 거리 차는 추정이 필요하다.

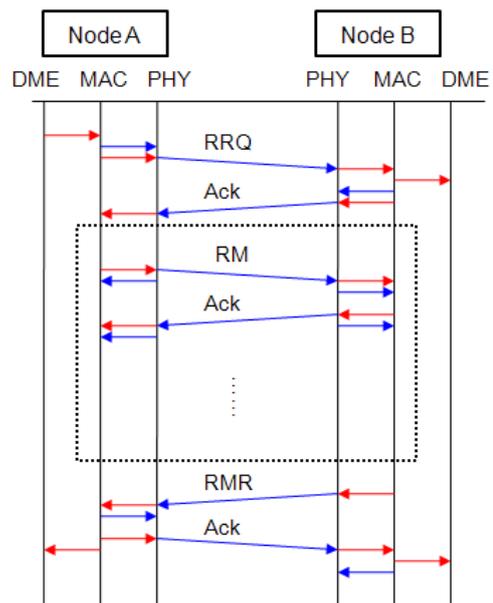


(그림 1) 위치추정 시스템의 구성

2.2 거리추정 절차

WiMedia 규격에서의 거리추정 기능은 MAC 기능으로 정의되어 있다. (그림 2)는 WiMedia의 거리추정 절차를 나타낸 것이다. 거리추정 기능은 그림에서와 같이 RRQ(Ranging measurement ReQuest), RM(Ranging Measurement), RMR(Ranging Measurement Report) 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 Ranging 사전 설정이 수행되고, 설정이 완료되면 RM 제어프레임이 전송되고, 설정된 횟수만큼 RM이 수행되면 RMR로 결과를 전달되며, 이를 수신한 노드는 MLME-RANGE-MEASUREMENT.confirm의 파라미터에 Ranging에서 취득한 Timestamp 등을 전달한다.

프레임 송신 및 수신 시각은 channel estimation sequence



(그림 2) WiMedia에서의 거리추정 절차

preamble 신호의 첫 symbol에 대한 안테나의 송신 및 수신 추정시간을 기준으로 한다. 거리추정 시작 노드에서는 자신의 노드에서 발생한 시각정보와 수신한 시각정보로부터 두 노드 간의 거리를 추정한다.

2.3 거리추정 관련 규격

표본화 클럭의 주파수는 528MHz, 1056MHz, 2112MHz, 그리고 4224MHz를 사용할 수 있으며, 거리추정 프레임 송신 및 수신시각을 표시하는 Timestamp는 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 Interpolation 등에 의한 64GHz의 세밀한 Timestamp를 표시할 수 있도록 계수기가 정의되어 있다.

계수기 기능은 소자에서 제공되고, TOF는 안테나 간에서 발생한다. 따라서 계수기에서 얻어진 값으로부터 안테나와 계수기 수행 블록 간의 내부전파시간을 보정해야 한다. 이는 antenna loop-back 등을 수행함으로써 계수기에서 안테나까지의 전파시간 *RANGING\_TRANSMIT\_DELAY*와 안테나에서 계수기까지의 전파시간 *RANGING\_RECEIVE\_DELAY*를 사전에 추정한다. 따라서 실제 안테나에서의 송신시각 및 수신시각은 PHY에서 취득한 *T<sub>i</sub>* 및 *R<sub>i</sub>* 값으로 부터 다음과 같이 보정된다<sup>[11]</sup>.

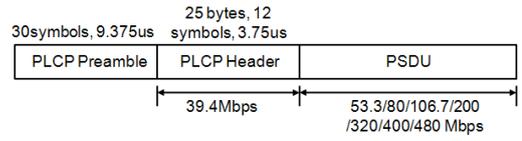
$$T_{ic} = T_i + RANGING\_TRANSMIT\_DELAY$$

$$R_{ic} = R_i - RANGING\_RECEIVE\_DELA$$

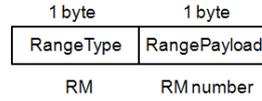
RM 메시지 수신에서 Ack 송신까지의 지연은 거리추정 오류에 큰 영향을 미친다. 지연은 RM 메시지의 길이와 전송 속도에 의존하는 전송 지연과 Ack 생성 및 송신까지의 응답 지연이 포함된다. (그림 2)에서와 같이 RRQ 및 RMR에 대한 응답지연은 거리추정과 무관하다.

(그림 3)은 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<sup>[11]</sup>. 프레임의 PSDU는 Payload와 4바이트 CRC를 포함하며, scrambled 되어 전송된다. RM 메시지는 Command Frame으로 전송되고, RM 프레임의 Payload는 2 바이트로 구성된다. 따라서 RM 프레임에 의한 전송 지연은 53.3Mbps 전송속도의 경우에도 (9.375μs+3.75μs+36/53.3Mbps)로 부터 13.8μs이다.

무선 TOF를 사용하여 거리를 추정하는 방식에는 무선 신호의 전달 특성을 포함한 다양한 원인에 의하여 오류가 포함된다. 원인으로서는 무선신호의 다중경로에 의한 오류, NLOS에 의한 오류, 수신기 잡음에 의한 오류, 해상도에 의한 오류, BS 간의 동기 오류, 주파수 편이 등이 있다. 특히, 주파수 편이는



(a) General Frame Format



(b) RM Frame의 PSDU

(그림 3) 거리추정 프레임 형태

매우 민감하여 IEEE802.15.4a에서는 프레임 수신 동안 수신 노드의 국부클럭을 기준으로 상대 클럭과의 주파수 편이를 추적하는 방법을 제공하고 있다. WiMedia에서는 PHY 및 MAC의 기능에 포함하지 않고, 별도 처리하여 보상하는 방법을 제시하고 있다.

3. 주파수 편이 보상 거리추정 방식

3.1 TWR 알고리즘

(그림 4)는 IEEE802.15.4a에 기술된 TWR에서의 거리추정 프레임 교환을 나타낸 것이다.

노드 A, B의 국부 주파수를 기준주파수부터 편이된 것으로 나타내면 다음과 같다<sup>[12]</sup>.

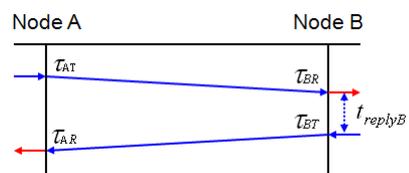
$$f_A = f_R(1 + e_A)$$

$$f_B = f_R(1 + e_B) = f_A(1 + e)$$

여기에서

- f<sub>R</sub>* : 기준 주파수
- f<sub>A</sub>, f<sub>B</sub>* : 노드-A, B의 주파수
- e<sub>A</sub>, e<sub>B</sub>* : 노드-A, B의 주파수 편이 (ppm)
- e* : 노드-A를 기준한 노드-B의 주파수 편이

IEEE802.15.4a의 TWR 방식에서 TOF는 노드의 동기화가 이루어진 상태에서는 식 (2)와 같이 표현된다. 계수기에 포함된 주파수 차이를 고려한 추정 TOF는 식 (3)과 같이 표현되고, TOF 차이는 식 (4)와 같이 표현된다. 여기에서 *r<sub>replyB</sub>*는 Device B에서 프레임을 수신하고 Ack를 전송하는데 걸린 시



(그림 4) TWR에서의 거리추정 프레임 교환

간으로 프로세서의 성능과 프로그래밍 코드와 관련된 것으로 수  $\mu s$  내지 수 ms가 될 수도 있다. 따라서 식 (2)와 같이 두 노드의 클럭 주파수가 동일하다는 가정과 식 (3)과 같이 두 장치간의 주파수 차이를 인정하면 주파수 차이와 프로세서 프레임 응답시간에 따라 식 (4)와 같이 심각한 거리추정 오류가 발생할 수 있다<sup>[8,9]</sup>.

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

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

$$2\hat{t}_p = (\tau_{AR} - \tau_{AT})(1 + e_A) - (\tau_{BT} - \tau_{BR})(1 + e_B) \tag{3}$$

$$= \frac{n_{AR} - n_{AT}}{f_A} - \frac{n_{BT} - n_{BR}}{f_B}$$

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

$$\hat{t}_p - t_p = \frac{1}{2} t_{replyB} (e_A - e_B) + t_p e_A \tag{4}$$

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

여기에서,

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

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

위의 식에서 추정오류는 주파수 차이와 프레임처리 응답시간의 곱으로 표현된다. 식 (4)에서  $(e_A - e_B) = 0$  효과를 내기 위해서는 한 노드를 기준으로 원격노드의 주파수 편이를 계산하여 보상하여야 한다.

$$\tau_{AR} - \tau_{AT} = \frac{n_{AR} - n_{AT}}{f_A} \tag{5}$$

$$\tau_{BT} - \tau_{BR} = \frac{n_{BT} - n_{BR}}{f_A (1 + e)} \tag{6}$$

위의 식으로부터 정확한 TOF는 다음과 같이 표현된다.

$$2t_p = (\tau_{AR} - \tau_{AT}) - (\tau_{BT} - \tau_{BR}) \tag{7}$$

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

측정으로부터 얻어진 Timestamp와 상대적인 주파수 편이를 사용하여 표현되는 추정 TOF는 다음과 같이 표현된다.

$$2\hat{t}_p = (\tau_{AR} - \tau_{AT}) - (\tau_{BT} - \tau_{BR})(1 + e) \tag{8}$$

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

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

따라서 추정오류는 주파수 상대편이와 프레임처리 응답시간의 곱으로 표현된다.

$$\hat{t}_p - t_p = -\frac{1}{2} t_{replyB} \cdot e \tag{9}$$

### 3.2 상대 주파수 편이 추정 방법

(그림 5)는 WiMedia의 연속된 다수의 TWR 수행을 나타낸 것으로 상대주파수 편이 추정 방식을 설명하기 위한 것이다. 그림에서와 같이  $m$ 번의 TWR이 수행되고 있다. 두개의 고정된 위치에 놓인 노드 간에 발생하는 데이터 전송에서 송신간 시간간격과 수신간 시간간격은 실제로 동일하다<sup>[11]</sup>. 그러나 두 노드는 동작하는 클럭의 주파수 편이가 서로 다르기 때문에 취득하는 시각정보는 서로 다른 값을 나타낸다. 그림에서  $\tau_{AT1}$ 의 시각은 계수기 값  $n_{AT1}$ 에, 그리고  $\tau_{ATm}$ 은  $n_{ATm}$ 에,  $\tau_{BR1}$ 은  $n_{BR1}$ 에,  $\tau_{BRm}$ 은  $n_{BRm}$ 에 각각 대응하는 것으로 가정한다.

그림에서 첫 송신과 마지막 송신에 대한 노드 A에서의 프레임 송신간의 시간간격과 노드 B에서의 프레임 수신간의 시간간격은 실제로 동일하므로 다음과 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ATm} - \tau_{AT1} = \frac{1}{f_A} (n_{ATm} - n_{AT1})$$

$$\tau_{BRm} - \tau_{BR1} = \frac{1}{f_B} (n_{BRm} - n_{BR1})$$

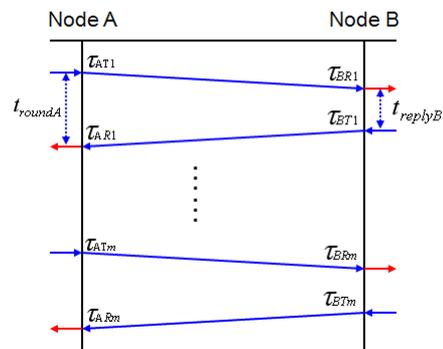
$$\tau_{ATm} - \tau_{AT1} = \tau_{BRm} - \tau_{BR1}$$

따라서

$$\frac{n_{ATm} - n_{AT1}}{1 + e_A} = \frac{n_{BRm} - n_{BR1}}{1 + e_B} \tag{10}$$

식 (1)로부터 상대주파수 편이와 정확한 주파수 편이의 관계는 다음과 같다.

$$e = \frac{1 + e_B}{1 + e_A} - 1 = \frac{e_B - e_A}{1 + e_A} \tag{11}$$



(그림 5) 연속된 다수의 TWR 수행

따라서 식 (10)은 다음과 같이 표현된다.

$$n_{ATm} - n_{AT1} = \frac{n_{BRm} - n_{BR1}}{1 + e} \quad (12)$$

두 노드간의 TOF는  $m$ 개의 TWR로부터 구할 수 있다.  $r$  번째 TWR에 의한 TOF는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 2\hat{t}_{pr} &= (\tau_{ARr} - \tau_{ATr})(1 + e_A) - (\tau_{BRr} - \tau_{BRr})(1 + e_B) \\ &= \frac{1}{f_R} \left\{ \frac{n_{ARr} - n_{ATr}}{1 + e_A} - \frac{n_{BRr} - n_{BRr}}{1 + e_B} \right\} \\ &= \frac{1}{f_A} \left\{ (n_{ARr} - n_{ATr}) - \frac{(n_{BRr} - n_{BRr})}{1 + e} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

식 (13) 결과에서 사용된  $f_A$  값은 알 수 없으므로 실제 계산에서는  $f_A$  대신  $f_R$ 을 사용한다. 따라서  $f_A$ 가 포함하고 있는  $\pm e_A$  ppm에 의하여 한 주기 차이는 다음과 같이 나타난다.

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

따라서 거리오류는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_{err} &= e_{period} \times \left( \frac{d}{c} \times f_A \right) \times c \\ &= e_{period} \times d \times f_R \times (1 + e_A) \\ &= e_A \times d \quad (15) \end{aligned}$$

여기에서,  $d$ 는 두 노드의 거리,  $c$ 는 전파 속도( $3 \times 10^8$  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 오류가 발생한다.

### 3.3 정확한 주파수 편이 추정 방법

식 (3)과 식 (10)은  $e_A$ 와  $e_B$ 에 관한 수식이다. 그림의 두 노드가 이동노드의 위치를 추정하기 위한 고정노드로서 사전에 알려진 곳에 설치되었다면, 두 노드간의 TOF는 사실상 알려진 값이다. 따라서 식 (3)과 식 (10)으로부터 고정노드의 주파수편이를 추정할 수 있다.

고정노드의 주파수 편이를 알고 있다면, 동일한 방법으로 고정노드와 이동노드간의 수행되는 다수의 TWR에 의하여 이동노드의 주파수편이와 두 노드간의 TOF 추정이 가능하다.

## 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 4.1 시뮬레이션 환경

시뮬레이션은 10m x 10m x 3m 공간에서 이동노드를 x축,

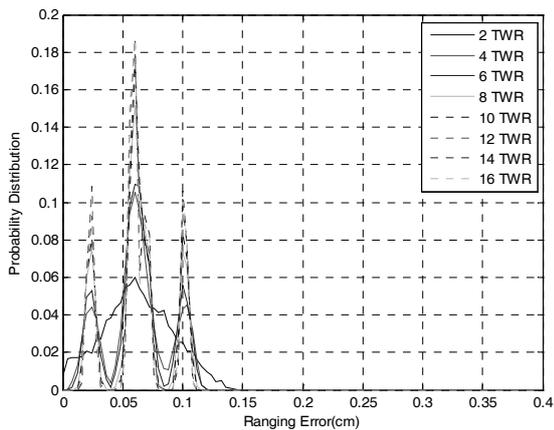
y축 및 z축으로 일정한 거리를 이동하면서 각 지점에 대하여 거리를 추정하고, 위치를 추정하는 것으로 수행하였다. 고정노드의 위치는  $\{(0, 0, 3), (0, 10, 3), (10, 0, 3), (10, 10, 3), (5, 5, 1.5)\}$ 와 같이 설정함으로써 TOA 계산에서 각 축에 대하여 안정적인 특성을 갖도록 하였다. 각 노드의 주파수 차이는 Uniform 분포로부터 발생시켜 5개의 고정노드와 하나의 이동노드가 주파수 편이의 범위  $\pm 1$  ppm에 대하여 차례로  $(-0.101, 0.928, -0.968, -0.478, 0.821, 0.156)$ ppm을 갖도록 설정하였고, 주파수 편이의 범위에 따라 편이에 곱하여 수행하였다. RM 메시지에 대하여 노드의 응답지연시간을  $45 \mu s$ 로 가정하였다. 응답지연시간은 RM 메시지의 전송지연과 RM 프레임수신 후 Ack를 발생하는데 걸리는 처리지연시간의 합이다. 전송지연은 53.3Mbps 전송속도에서 RM 프레임의 길이에 의하여 약  $15 \mu s$ 로 가정하였고, 처리지연시간은 저속 UWB의 실제시스템에서 하드웨어로 빠르게 처리한 경우에 발생한 예로부터  $30 \mu s$ 로 가정하였다. 이동노드는 임의 위치에 대한 경우에 대하여 거리추정을 수행하였다. 위치추정은 TOA의 Matrix를 직접 계산하여 구할 수 있다.

### 4.2 잡음이 없는 4224MHz 시뮬레이션 결과

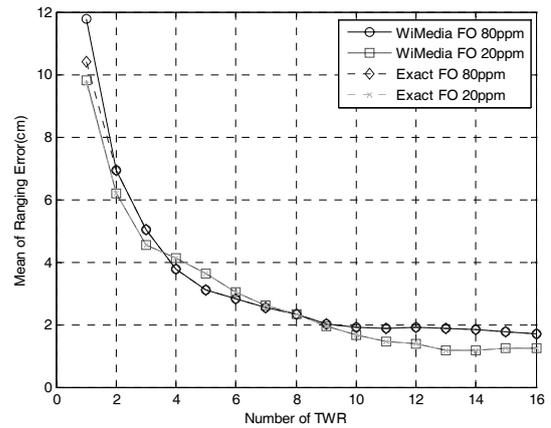
(그림 6)은 잡음이 없는 환경에서 4224MHz 표준화 클럭을 사용하여 TWR을 16회까지 수행한 결과에 대한 거리추정 오류이다. (a)는  $\pm 40$  ppm의 주파수 편이를 보상하지 않은 원래의 TWR에 대한 거리추정 오류의 PDF를 나타낸 것이다. 수행횟수가 증가할 수록 거리추정 오류의 최대값은 약간씩 감소하고, 더욱 뚜렷한 Peak가 나타난다.  $\pm 1$  ppm에 대하여 이동노드의 주파수 편이가 0.156ppm, 그리고 고정노드의 주파수 편이가 각각  $(-0.101, 0.928, -0.968, -0.478, 0.821, 0.156)$ 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 정확한 주파수 편이를 보정한 거리추정 오류의 PDF를 나타낸 것이다. 주파수 편이가 보정된 형태로 수행횟수가 증가할 수록 거리오류의 분포가 좁아진다. (c)는  $\pm 10$ ppm 및  $\pm 40$ ppm에 대한 TWR의 횟수에 대한 원래의 TWR과 정확한 주파수 편이(FO)를 보정한 TWR의 거리추정 오류 평균값을 나타낸 것이다. 주파수편이 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.

### 4.3 잡음이 없는 주파수 편이 보상 비교

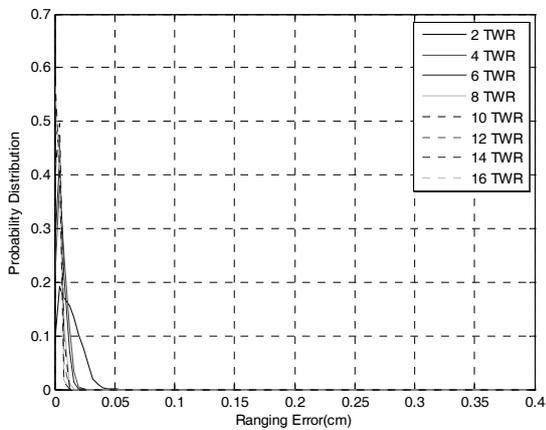
(그림 7)은  $\pm 10$ ppm 및  $\pm 40$ ppm에 대한 1~16회 TWR 수행에 대한 상대 주파수 편이 보상 및 정확한 주파수 편이 보상의 TWR에 대한 거리추정 오류 평균값을 나타낸 것이다. 상대주파수편이 보상의 경우, 1회 TWR에서는 편이 보상이 불가능하다. 따라서 2회 이상에서부터 성능 개선이 이루어진다. (a)의 528MHz에 대한 결과와 (b)의 4224MHz에 대한 결과에서 WiMedia 방식의 상대 주파수 편이 보상 및 본 논문



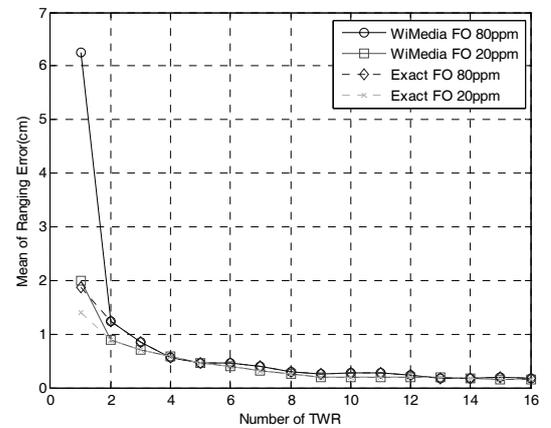
(a) Original TWR의 거리오류 분포



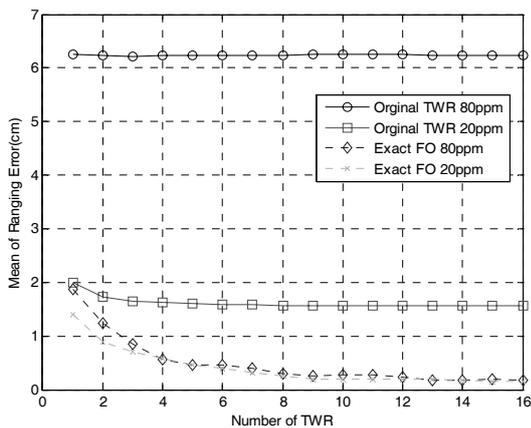
(a) 528GHz



(b) 정확한 주파수 편이보상 TWR의 거리오류 분포



(b) 4224GHz



(c) TWR 수행횟수에 따른 거리오류

(그림 6) 4224GHz에서의 TWR 성능 비교

서 제안한 정확한 주파수 편이 보상에 대하여 유사한 특성을 보이고 있다.

4.4 잡음이 있는 주파수 편이 보상 비교

(그림 8)은 잡음이 있는 상태에서 4224MHz, ±40ppm에 대한 1~16회 TWR 수행에 대한 원래의 TWR, 상대 주파수

(그림 7) 주파수편이 보상의 TWR 횟수에 따른 거리오류

편이 보상 및 정확한 주파수 편이 보상의 TWR에 대한 거리 추정 오류 평균값을 나타낸 것이다. 잡음은 거리추정 프레임의 수신시각이 계수기에 반영될 때 나타나는 오류 특성이 Yihong Qi<sup>[14]</sup>의 결과에 따라  $N(0, \sigma^2)$  분포되고, 여기에서 분산은 SNR(Signal to Noise Ratio)과 유효대역에 의하여 다음과 같은 표현된다고 가정하였다.

$$\sigma^2 = \frac{1}{4\pi^2 \beta^2 R}$$

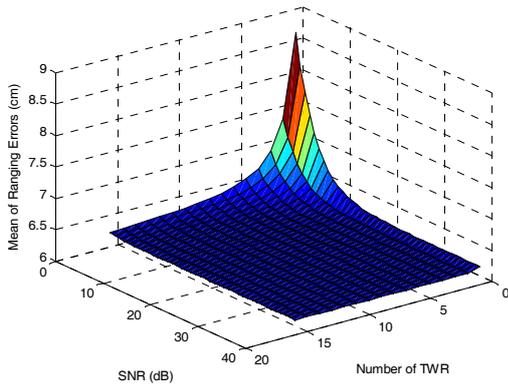
여기에서,

$\beta$  : Effective Bandwidth

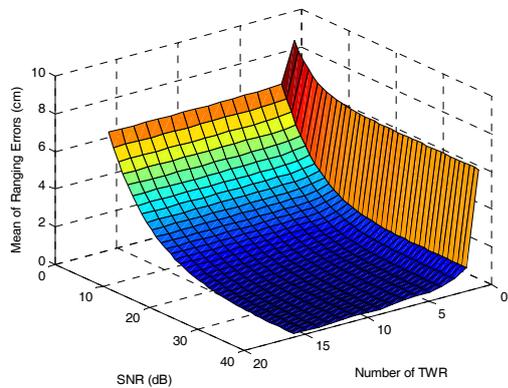
$R$  : SNR (dB)

WiMedia 규격에서 유효 대역은 528MHz이고, SNR은 0~40dB에 대하여 적용하였다.

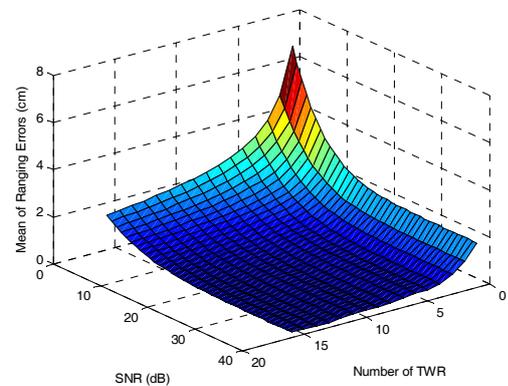
(그림 8)의 (a)에서와 같이 원래의 TWR은 TWR 횟수 및 SNR에 대하여 영향이 거의 없이 6cm 이상의 오류를 갖는 것



(a) 원래의 TWR



(b) 상대주파수편이 보상 TWR



(c) 정확한 주파수편이 보상 TWR

(그림 8) TWR 횟수 및 SNR에 따른 거리 오류

으로 나타났다. (b)에서와 같이 상대주파수편이 보상방법은 SNR에 큰 영향을 받으며, 특히 SNR이 나쁠 때 원래의 TWR 과 거의 유사한 특성을 갖는 것으로 나타났다. (c)에서와 같이 정확한 주파수편이 보상 방법은 SNR의 변화에도 작은 영향을 받으면서 거리추정오류도 양호한 것으로 나타났다.

### 5. 결론

본 논문은 비동기 거리추정 알고리즘에서 주파수 편이의

영향을 연구하였다. 상대주파수 편이 추정은 WiMedia 규격에서와 방법이 제안된 바, 본 논문에서는 이를 반영한 거리추정 수식을 완성하고, 기준노드의 주파수 편이에 의한 문제점을 지적하였다. 정확한 주파수편이 추정은 미리 알려진 위치에 설치된 고정노드들 간에 연속된 2회 이상의 TWR을 수행함으로써 각 고정노드의 정확한 주파수편이를 추정하고, 이를 이용하여 고정노드와 이동노드 간의 2회 이상의 TWR로부터 이동노드의 정확한 주파수 편이와 거리를 추정한다.

주파수편이 보상 방식은 노드간의 주파수 차이와 거리추정 프레임 응답시간과 거리추정 프레임 응답시간의 차이에 대하여 영향을 거의 받지 않기 때문에 하드웨어 및 소프트웨어가 다른 노드를 사용하거나, 주파수 편이가 큰 값싼 발진기 사용 등의 노드 선택 및 망 구성이 수월하며, 또한 거리추정 및 위치추정이 정확하여 별도의 후처리가 거의 불필요한 장점을 갖는다. 또한, 제안된 정확한 주파수편이 보상방식은 잡음이 있는 환경에서 상대주파수편이 보상방식에 비하여 개선된 성능을 나타내었다. 특히, SNR이 15dB 이하에서 성능 개선이 크게 이루어진 바, 실제 시험환경이 15dB 이하인 것을 감안하면 제안된 정확한 주파수편이 보상방식이 구현에 더 적합한 것으로 평가할 수 있다.

본 논문에서 제안한 정확한 주파수편이 보상방식에 따라 무선 상태에서도 가상의 망동기 구축도 가능할 것이다. 이를 바탕으로 각 노드는 비동기로 동작하면서 주파수 편이를 적용한 가상의 망동기 유지가 가능할 것이며, 단방향 거리추정 방식도 연구될 수 있을 것이다. 또한 각 노드의 클럭 주파수는 지터와 Aging에 의한 장시간의 변화가 있을 수 있으며, 이를 적용적으로 적용하는 연구가 필요할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] 김학용, 김성덕, 서동길, 지정강, 장현태, “근거리 위치추적 기술 동향,” 주간기술동향, 통권1322호, 1-12쪽, 2007년 11월.
- [2] N. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan, “The Cricket Location-Support System,” Proc. of the ACM Int’l Conf. on MobiCom, Aug., 2000.
- [3] M. Addlesee, R. Curwen, S. Hodges, J. Newman, P. Steggles, A. Ward, and A. Hopper, “Implementing a Sentient Computing System,” IEEE Computer Magazine, Vol.34, No.8, pp.50-56, Aug., 2001.
- [4] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan, “RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system”, INFOCOM, pp.775-784, Mar., 2000.
- [5] J. Hightower, R. Want, and G. Borriello, “Spoton: An Indoor 3d Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength,” Technical Report 00-02-02, University of Washington, 2000.
- [6] Andy Harter, Andy Hopper, Pete Steggles, Andy Ward and Paul Webster, “The anatomy of a Context-Aware Application,” In Wireless Networks, Vol.8, pp.187-197, Feb., 2002.

[7] Seungho Baek, Hyunjeong Lee, Shinyoung Lim, and Jaedoo 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, May, 2005.

[8] 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," Aug., 2007.

[9] Zafer Sahinoglu and Sinan Gezici, "Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard," IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Dec., 2006.

[10] ECMA-368, "High Rate Ultra Wideband Physical and MAC Standard," 2nd Edition, Dec., 2007.

[11] 남윤석, 허재두, "무선센서망에서의 주파수 차이 추정 비동기 Ranging 방식," 정보처리학회논문지, 제15-C권, 제1호, 31-36쪽, 2008년 2월.

[12] 이영규, 양성훈, 이승우, 이창복, 김영범, 최성수, "실내측위를 위한 새로운 클럭 동기 방안," 한국통신학회논문지, 제32권, 제3호, 237-246쪽, 2007년 3월.

[13] Bin ZHEN, Huan-Bang LI, Ryuji KOHNO, "Clock Offset Compensation in Ultra-Wideband Ranging," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E89-A, No.11, pp.3082-3088, Nov., 2006.

[14] Yihong Qi and Ruiji Kohno, "Mitigation of sampling-induced errors in delay estimation," IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICU2005), pp.402-407, Sep., 2005.



### 남 윤 석

e-mail : ysnam@dongguk.ac.kr

1984년 경북대학교 전자공학과(공학사)

1987년 경북대학교 전자공학과(공학석사)

1995년 경북대학교 전자공학과(공학박사)

1987년~2000년 한국전자통신연구원 책임 연구원

2000년~현 재 동국대학교 경주캠퍼스 정보통신공학과 부교수

2004년~현 재 한국전자통신연구원 초빙연구원

관심분야: 트래픽제어, 성능평가, 위치추정, 저속 WPAN, 고속 WPAN, WBAN 등



### 장 익 현

e-mail : ihjang@dongguk.ac.kr

1984년 서울대학교 계산통계학과(이학사)

1986년 한국과학기술원 전산학과(공학석사)

1998년 한국과학기술원 전산학과(공학박사)

1986년~1999년 (주)데이콤 책임연구원

1999년~현 재 동국대학교 경주캠퍼스 정보통신공학과 부교수

관심분야: 컴퓨터통신, 분산시스템, 인터넷 프로토콜 등