

# 압축센싱 기반의 UWB 시스템에서 개선된 ToA 추정 기법

준회원 르나탄\*, 김광열\*, 종신회원 신요안\*

## An Improved ToA Estimation in a Compressed Sensing-based UWB System

Tan N. Le\*, Kwangyul Kim\* Associate Members, Yoan Shin\*<sup>o</sup> Lifelong Member

### 요약

UWB(Ultra Wide Band) 다중경로 채널에서 첫번째 경로를 통해 수신되는 신호가 가장 큰 신호가 아닐 경우가 종종 있으며, 이러한 경우 ToA(Time-of-Arrival) 추정의 정밀도를 유지하는 것은 매우 어려운 문제가 된다. 또한 UWB 신호의 초광대역 특성상 동기식 시스템을 구현할 경우 수신기는 매우 높은 표본화율을 이용하여 신호를 수신해야 하기 때문에 복잡도가 증가되는데, 압축센싱(Compressed Sensing) 이론을 이용함으로써 시스템의 복잡도를 효율적으로 낮출 수 있다. 이에 본 논문은 압축센싱 기반의 UWB 수신기의 장점을 이용하면서도 정밀 추정 성능을 제공할 수 있는 개선된 ToA 추정 기법을 제안한다. 모의실험 결과를 통해 광범위한 신호대잡음비 환경에서 제안된 기법이 다른 저복잡도 기법들의 성능보다 우수함을 확인하였다.

**Key Words :** ToA(Time-of-Arrival), Ranging, Compressed Sensing, UWB(Ultra Wide Band)

### ABSTRACT

Since the first arrival path may not be the strongest path of UWB(Ultra Wide Band) multipath channels, this makes ToA(Time-of-Arrival) estimation becomes a challengeable issue. Furthermore, because of ultra bandwidth of received signals, the compressed sensing theory is employed to reduce the complexity caused by very high Nyquist sampling rate in coherent UWB receivers. In this paper, we propose a ToA estimation scheme which provides precise estimation performance, while exploiting the benefits of compressed sensing-based UWB receivers. Simulation results show that the proposed scheme can outperform other low complexity schemes in a wide range of signal-to-noise ratios.

### I. 서론

최근 근거리 실내 무선채널 환경에서 낮은 전력의 신호를 전송하면서도 정밀한 무선측위를 가능하게 하는 UWB(Ultra Wide Band) 시스템이 각광을 받고 있다<sup>[1]</sup>. UWB 시스템 가운데 무선측위에 좀 더 적합한 임펄스 라디오(Impluse Radio) 시스템은 일반적인 무

선통신 시스템에서 전송하는 신호와는 달리 1 nsec 내 외의 매우 좁은 폭을 갖는 가우시안 모노사이클 펄스(Gaussian Monocycle Pulse) 혹은 임펄스 신호를 단속적으로 전송한다<sup>[2]</sup>. 이처럼 UWB 시스템은 매우 좁은 폭의 신호를 전송하기 때문에 실내 무선채널 환경과 같이 다중경로 특성이 강한 곳에서도 다중경로를 세밀하게 분해할 수 있어 수십 cm 이내의 오차를 갖

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과인(NIPA-2011-C6150-1101-0004).

\* 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신 및 정보처리 연구실([lenhattan86; kky1117]@amcs.ssu.ac.kr, yashin@ssu.ac.kr), (° : 교신저자)  
논문번호: KICS2011-04-197, 접수일자: 2011년 4월 25일, 최종논문접수일자: 2011년 6월 8일

는 정밀한 무선측위를 가능하게 한다.

하지만 UWB 신호의 초광대역 특성으로 인해 동기식(Coherent) UWB 수신기를 구현하기 위해서는 수-수십 GHz 이상의 표본화율을 갖는 고속 ADC (Analog-to-Digital Converter)가 요구되며, 일반적인 UWB 수신기로 펄스를 획득하기 위해서는 10 GHz 이상의 표본화율이 필요하기 때문에 현재의 기술로는 구현이 어려운 실정이다. 이것은 UWB 수신기가 원본 신호를 완벽하게 복원하기 위한 필요 조건인 나이퀴스트 표본화 이론을 이용하기 때문이며 이로 인해 시스템의 복잡도가 높아지고 가격의 상승이 불가피하다. 따라서 UWB 수신기의 ADC의 표본화율을 줄이면서도 UWB 시스템의 장점을 유지시킬 수 있는 새로운 기술이 요구되고 있다.

이런 상황에서 최근 정보이론 분야에서 압축센싱 (Compressed Sensing) 기술이 제안됨에 따라 UWB 신호처럼 성감(Sparsity) 특성을 갖는 신호를 나이퀴스트 표본화율보다 작은 표본화율로도 완벽하게 복원할 수 있게 되었다<sup>[3]</sup>. 특히, 이 압축센싱 기법을 UWB 시스템에 적용하면 수신된 신호를 임의 행렬로부터 완벽하게 복원할 수 있기에 ADC를 위한 표본화율을 현저히 줄일 수 있으며, 이러한 이유로 압축센싱 기반의 UWB 시스템에 대한 연구가 최근 들어 활발히 진행 중이다<sup>[4,5]</sup>.

한편, UWB 시스템에서 ToA(Time-of-Arrival) 추정은 첫번째 경로의 수신 신호를 정확하게 검출해야 하는데, 이 신호가 다중경로 신호 가운데 가장 큰 신호가 아닌 경우가 종종 발생한다<sup>[6]</sup>. 이런 상황에서 최대 우도(Maximum Likelihood; ML) 기법은 높은 정확도는 제공할 수 있지만, 송신 신호에 대한 사전 정보와 높은 표본화율의 ADC를 사용해야 하기 때문에 ML 기법을 이용하여 실질적인 동기식 UWB 시스템을 구현하기는 어렵다<sup>[7]</sup>. 반면에 비동기식(Noncoherent) UWB 시스템에서 첫번째 도착 경로를 에너지 블록을 이용하여 검출하는 저복잡도 레인징 기법에 대한 선행 연구가 다수 이루어졌으나<sup>[8,9,10]</sup>, 이러한 기법들은 정확한 측위 성능을 보장하지 못한다. 이에 본 논문에서는 저복잡도의 구조를 가지는 다른 기법들보다 성능이 우수한 뿐만 아니라, 압축센싱 기반의 UWB 수신기의 낮은 표본화율을 이용한 고정밀 ToA 추정 기법을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 다중경로 채널에서의 ToA 추정을 위한 압축센싱 기반의 UWB 수신기에 대해서 설명하고, III 장에서는 본 논문에서 제안하는 기법에 대해 설명한다. 그리고 IV장에서는 일반적인 추정 기법과 비교하여

제안 기법의 성능을 모의실험을 통해 제시한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 내린다.

## II. 다중경로 채널에서 ToA 추정을 위한 압축센싱 기반의 UWB 수신기

### 2.1 다중경로 채널에서의 UWB 신호

전형적인 임펄스 라디오 기반의 UWB 시스템 송신단에서는 식 (1)과 같은 임펄스  $p(t)$ 를 수신단으로 전송한다고 가정한다<sup>[2]</sup>.

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

여기서  $A$ 는 펄스의 크기를 나타내는 상수이고,  $\tau_p$ 는 펄스폭을 결정하는 파라미터이다. 이 때 식 (1)에서의 임펄스  $p(t)$ 가 송신단과 수신단 안테나의 미분 특성에 영향을 받으면, 수신단의 상관기에서는 식 (2)와 같은 새로운 임펄스  $w(t)$ 가 수신된다고 모델링 된다<sup>[2]</sup>.

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

여기서  $A'$ 는 크기를 나타내는 적절한 상수이다.

ToA 추정을 위해 UWB 시스템 송신단에서는 프레임 길이  $N_f$ 의 비트열(Bit Stream)  $B = 0101 \dots 01$ 을 송신한다고 가정하며, 이 때 전송 신호  $s(t)$ 는 식 (3)과 같이 등가적으로 모델링 될 수 있다.

$$s(t) = \sum_{i=1}^{N_f} b_i w(t - (i-1)T_f) \quad (3)$$

여기서  $b_i$ 는 비트열  $B$ 의  $i$ 번째 칩(Chip)을 나타내며,  $T_f$ 는 프레임 구간을 나타낸다. 또한, 각각의 비트가 하나의 프레임이므로  $N_f$ 는 프레임의 개수로 표현될 수 있다.

일반적인 UWB 다중경로 채널 모델을 위해 전형적인 탭지연선(Tap-Delay-Line) 모델링을 기반으로 하였으며, 이 경우의 채널 임펄스 응답  $h(t)$ 는 식 (4)와 같다<sup>[11]</sup>.

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

여기서  $L$ 은 분해 가능한 다중경로 성분의 수를 나타내며,  $\alpha_\ell$ 은  $\ell$ 번째 경로의 크기를 나타낸다. 또한  $\tau_\ell \equiv \tau_1 + (\ell - 1)T_m$ 은  $\ell$ 번째 경로의 지연 시간으로,  $T_m$ 은 다중경로 성분을 분해할 수 있는 최소 시간, 랜덤변수  $\tau_1$ 은 첫번째 경로의 시간 지연을 각각 의미한다. 그리고 수신된 신호 사이에서 발생할 수 있는 부분 상관(Partial Correlation)을 피하기 위하여 펄스폭  $T_p$ 는  $T_m$ 과 같다고 가정하였다<sup>[11]</sup>.

한편, 일반성을 잃지 않고 UWB 수신기는 타임 스탬프  $t_0 = 0$ 으로부터 신호를 관측한다고 가정한다. UWB 다중경로 채널을 통과하여 수신단으로 입력되는 수신 신호  $r(t)$ 는 식 (3)과 (4)를 이용하여 식 (5)와 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{\ell=1}^L b_i \alpha_\ell w(t - (i-1)T_f - \tau_\ell - \tau_{ToA}) + n(t) \quad (5)$$

여기서  $n(t)$ 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)을 나타내며,  $\tau_{ToA}$ 는 우리가 추정해야 할 수신 신호의 ToA로서  $T_a$ 를 최대 가능한 값이라 할 때  $[0, T_a]$ 의 범위 내에서 균일하게 분포하는 랜덤변수라고 가정한다.

### 2.2 압축센싱

여기서는 압축센싱 이론에 대해 간략히 설명한다<sup>[3,12]</sup>.  $N$ 차원의 실수 벡터 신호 공간인  $R^N$  내의  $N \times 1$  크기의 이산 신호 열벡터  $x$ 를 고려하자.  $R^N$ 에 있는 어떠한 신호라도  $N \times 1$  크기의  $N$ 개 열벡터  $\{\psi_n\}_{n=1}^N$ , 즉 기저 함수들의 선형 결합으로 표현할 수 있기 때문에, 신호  $x$ 를 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$x = \sum_{n=1}^N \theta_n \psi_n \quad \text{or} \quad x = \Psi \theta \quad (6)$$

여기서  $\Psi$ 는 벡터  $\{\psi_n\}_{n=1}^N$ 로 구성된  $N \times N$  크기의 기저 행렬이며,  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_N]^T$ 은 가중치 계수로 구성된  $N \times 1$  크기의 열벡터이다. 따라서  $x$ 는 시간 영역에서의 신호를 나타내며,  $\theta$ 는  $\Psi$  영역에서의 신호 표현을 나타낸다.

만일 신호  $x$ 가 오직  $K$ 개 ( $K < N$ ) 기저 벡터들의 선형 결합으로 표현될 경우  $K$ -sparse라 한다. 이것은

오직  $K$ 개의 계수  $\theta$ 가 0이 아니라는 것이고, 남아있는  $N - K$ 개가 0이 된다는 것을 의미한다. 만일  $K$ 가 작은 수이고 이에 해당하는 계수들의 크기가 크며, 다수의 나머지 계수들의 크기를 무시할 만 하다면  $x$ 를 압축 가능(Compressible)이라고 부른다.

압축센싱 기법은  $y_m = \langle x, \phi_m \rangle$ 와 같이  $x$ 와 측정 벡터  $\{\phi_m\}_{m=1}^M$  사이의  $M$ 개 내적(Inner Product)을 계산하여 신호를 측정한다.  $M$ 개의 측정값  $y_m$  ( $m = 1, \dots, M$ )을  $M \times 1$  크기의 벡터  $y$ 로 구성하고 측정 벡터  $\phi_m^T$ 을  $M \times N$  크기의 행렬  $\Phi$ 의 행들로 정렬하면, 식 (7)과 같이 행렬  $\Phi$ 에  $x$ 를 투영(Projection) 시킴으로써  $y$ 를 도출할 수 있다.

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \theta = \Theta \theta \quad (7)$$

단, 여기서  $\Theta = \Phi \Psi$ 은  $M \times N$  크기의 행렬이다.

성감 기저  $\Psi$ 와 행렬  $\Phi$ 이 Incoherent일 때, 압축센싱 이론은 원래의 성감 계수들이  $\ell_1$ -norm 기반의 Convex 최적화 해법인 식 (8)과 같은 최소  $\ell_1$ -norm 복원을 통해 압축 측정  $y$ 로부터 잘 복원될 수 있음을 보여준다.

$$\hat{\theta} = \arg \min \|\theta'\|_1, \quad \text{단} \quad \Theta \theta' = y \quad (8)$$

여기서  $\theta'$ 은  $\Theta \theta' = y$ 를 만족시키는  $N \times 1$  크기의 벡터이고,  $\hat{\theta}$ 은 복원된  $K$ -sparse 계수이다.

### 2.3 ToA 추정을 위한 압축센싱 기반의 UWB 수신기

식 (4)에서 주어진 것처럼 UWB 다중경로 채널 모델은 실수이며 펄스 왜곡을 가지고 있지 않기 때문에 시간 영역에서  $L$ -sparse이다. 따라서 전송 신호의 크기가 변하고 시간 지연되었다고 하더라도 수신된 UWB 신호는 전송 신호처럼 성감 특성을 가지고 있다. UWB 수신 펄스  $w(t)$ 를 최소 간격  $\Delta$  만큼씩 이동함에 따라 식 (9)와 같이 UWB 수신 신호의 특성을 분석할 수 있는 기저 함수의 Dictionary  $D$ 를 발생시킬 수 있다.

$$D = \{d_n(t)\}_{n=1}^N = \{w(t - (n-1) \times \Delta)\}_{n=1}^N \quad (9)$$

여기서 Dictionary의 원소(Atom)  $d_n(t)$ 는 UWB 수신 펄스  $w(t)$ 의 시간 지연된 형태이다.

압축센싱 기반의 UWB 시스템의 선행 연구<sup>4,5)</sup>를 바탕으로, 여기서는 ToA 추정을 위한 압축센싱 기반의 UWB 수신기를 제안한다. 제안된 수신기는 그림 1에서 도시한 것처럼 임의 투영(Random Projection)과 저속의 ADC를 포함하는 압축센싱 측정 블록, 압축센싱 복원 블록, ToA 추정 블록으로 구성된다.

압축센싱 측정 블록에서의 임의 투영은 아날로그 영역에서 수행할 수 있기 때문에, 임의 투영으로 전달되는 UWB 수신 신호는 아날로그 형태가 될 수 있다<sup>14)</sup>. 다음으로 저속의 ADC는 임의 투영되는 신호를 나이퀴스트 표본화를 이하의 속도로 표본화한다.

압축센싱 복원 블록에서는 임의 투영되는 신호를 복원하기 위해, 빠르게 동작하면서도 쉽게 구현할 수 있는 신호 복원 최적화 알고리즘인 OMP(Orthogonal Matching Pursuit)를 이용한다고 가정한다. 이것은 OMP와 같은 그리디 알고리즘(Greedy Algorithm)이 전형적으로 다른 알고리즘보다 식 (8)과 같은 선형 문제를 쉽게 풀 수 있기 때문이다<sup>13)</sup>. 식 (8)로부터 복원 알고리즘은 다양한 전파 경로들의 기여 정도를 나타내는 성감 벡터  $\hat{\theta} = [\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_N]^T$ 를 산출한다. Dictionary  $D$ 의 각 원소는 UWB 수신 펄스  $w(t)$ 의 이동된 형태이므로, '0' 비트 전송의 경우에  $\hat{\theta}$ 의 각 원소는 추정 채널  $\hat{h}(t)$ 의 추정 경로 이득  $\hat{\alpha}_k$ 에 해당한다<sup>5)</sup>. 추가적으로 성감 벡터  $\hat{\theta}$  각 요소의 인덱스를 기반으로 경로 시간 지연  $\hat{\tau}_k$ 이 정해진다. 여기서 추정 채널  $\hat{h}(t)$ 는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\hat{h}(t) = \sum_{k=1}^K \hat{\alpha}_k \delta(t - \hat{\tau}_k) \quad (10)$$

$K$ 가 OMP로 인해 복원되는 0이 아닌 계수들의 개수이기 때문에,  $K$ 는 동시에 OMP의 반복 횟수를 나타낸다<sup>13)</sup>. 하지만 실제 다중경로 채널  $h(t)$ 의 첫번째 도착 경로는  $\tau_{ToA}$ 만큼 지연되기 때문에,  $\hat{h}(t)$ 의 첫번째 도착 경로는 실제 다중경로 채널  $h(t)$ 의 첫번째 도착 경로가 아니다. 이에 본 논문에서는 ToA 추정을 위하여 복원된 가중치 계수 벡터  $\hat{\theta}$ 를 관측함으로써

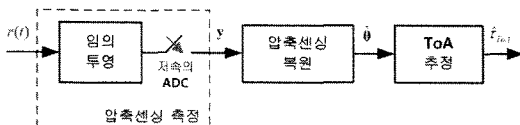


그림 1. ToA 추정을 위한 압축센싱 기반의 UWB 수신기 구조도

다중경로 채널  $h(t)$ 의 첫번째 도착 경로를 검출하는 ToA 추정 블록을 제안하며, 다음 장에서 제안된 ToA 추정 기법을 설명한다.

### III. 압축센싱 기반 UWB 시스템에서 제안된 ToA 추정 기법

아날로그 UWB 수신 신호의  $i$ 번째 프레임에 대한 이산 시간 표현을  $N \times 1$  크기의 열벡터  $x_i$ 로 나타내자. 앞서 ToA 추정을 위해  $N_f$  길이의 비트열  $B = 0101 \dots 01$ 을 보낸다고 가정했으므로,  $x_{2j-1}$ 와  $x_{2j}$ 은 각각 '0' 비트 프레임과 '1' 비트 프레임을 나타낸다. 여기서  $j = 1, \dots, N_f/2$ 이고,  $N \times N$  크기의 기저 행렬  $\Psi$ 는 식 (7)에서 이산 시간에 따른 Dictionary  $D$ 를 표현한다. 또한, 평균 0이고 분산 1인 가우시안 랜덤변수들로 구성된  $M \times N$  크기의 행렬  $\Phi$ 을 고려하자. 이 때 ToA 추정을 위하여 제안된 기법은 다음과 같이 2 단계로 나누어진다.

#### 3.1 1단계: 임계값 추정

이 단계에서 제안된 기법은 각각의 '0' 비트 프레임으로부터 압축센싱 측정을 취하고, 식 (11)과 같이 이들 압축센싱 측정값들로부터 평균을 얻는다.

$$y_0 = \frac{1}{N_f/2} \sum_{j=1}^{N_f/2} \Phi x_{2j-1} \quad (11)$$

여기서 AWGN의 평균은 0이고 가우시안 분포를 가지기 때문에, 평균 연산을 통해 잡음의 영향을 완화시킨다.

제안된 기법은 평균 압축센싱 측정값  $y_0$ 로부터 '0' 비트 프레임의 복원을 위해 OMP 알고리즘을 이용한다. 앞서 언급한 것처럼 이 알고리즘의 결과는  $N \times 1$  크기의 성감 벡터  $\sigma = [\sigma_1, \dots, \sigma_N]^T$ 이다. 만일 프레임 구간  $T_f$ 가  $T_f \geq \tau_L + T_a$ 을 만족시킬 수 있을 정도로 크게 설정할 수 있다면, 송신기는 '0' 비트를 위하여 어떠한 UWB 펄스도 전송하지 못하기 때문에 벡터  $\sigma$ 는 다중경로 채널 이득 집합을 표현하지 못한다. 따라서 수신기가 '0' 비트 프레임을 수신할 때에는 오로지 잡음만 수신한다. 그러므로 벡터  $\sigma$ 은 잡음 레벨과 신호의 임계값을 결정할 수 있는 정보를 제공한다. 식 (12)는 제안된 임계값 계산을 위해 제안하는 식이다.

$$\xi = R_{TH} \times \zeta_{\max} \quad (12)$$

여기서  $\xi$ 은 임계값,  $R_{TH}$ 은 주어진 임계값 비율이고, 임계 최대값  $\zeta_{\max} \equiv \max\{|\sigma_1|, \dots, |\sigma_N|\}$ 이다.

3.2 2단계 : 첫번째 도착 경로 검출

1단계와 비슷하게 이 단계에서는 각 '0' 비트 프레임의 압축센싱을 취하고, 식 (13)과 같이 모든 측정값들의 평균을 얻는다.

$$y_1 = \frac{1}{N_f/2} \sum_{j=1}^{N_f/2} \Phi x_{2j} \quad (13)$$

$N \times 1$  크기의 성감 벡터  $\rho = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T$ 은  $y_1$ 을 처리했을 때의 OMP 알고리즘의 결과이다. UWB 수신기는 시간  $t_0 = 0$ 에서 UWB 신호의 관측을 시작하기 때문에, 벡터  $\rho$ 의 처음  $n_{ToA} - 1$ 개 원소들은 전송된 '1' 비트 프레임에 해당되지 않는다. 여기서  $n_{ToA}$ 은 첫번째 '1' 비트 프레임에 대한 인덱스이다. 앞서 말한 것처럼 임계값  $\xi$ 을 바탕으로 첫번째 도착 경로 이득  $\rho_{n_{ToA}}$ 을 검출할 수 있으며, 각  $\rho_n$ 의 절대값을 임계값과 비교함으로써 첫번째 임계값 초과 인덱스를 첫번째 도착 경로 이득의 인덱스로 추정할 수 있다. 식 (14)는 이러한 인덱스 추정값을 나타낸다.

$$\hat{n}_{ToA} = \underset{n}{\operatorname{argmin}} (|\rho_n| \geq \xi) \quad (14)$$

마지막으로 ToA 추정값  $\hat{\tau}_{ToA}$ 은 식 (15)를 통해 계산된다.

$$\hat{\tau}_{ToA} = \frac{T_f}{N} \times (\hat{n}_{ToA} - 1) \quad (15)$$

IV. 모의실험 결과

제안된 기법의 성능을 평가하기 위해, 정규화된 임계값을 이용하여 첫번째 에너지 블록을 검출하는 기존 기법인 TC(Threshold Comparison)<sup>[9]</sup>와 MES-SB(Maximum Energy Selection Search Back)<sup>[9]</sup>을 제안된 기법과 비교하였다. 모의실험 환경을 위해 IEEE 802.15.4a CM1 UWB 채널 모델을 이용하였으며<sup>[14]</sup>, 기존의 기법들인 TC와 MES-SB는 에너지 블록 구간  $T_b = 1$  nsec,  $N_f/2$  비트의 '1' 프레임으로 모의실험

하였다. 그리고 UWB 펄스 에너지와 잡음 전력 스펙트럼 밀도의 비율로 정의되는 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)에 따른 MAE(Mean Absolute Error)를 성능 지표로서 고려하였다. 아래 표 1은 모의실험을 위한 주요 파라미터를 정리한 것이다.

표 1. 모의실험 파라미터

파라미터	값
프레임 개수 ( $N_f$ )	100, 200, 400, 600, 800, 1,000
프레임 구간 ( $T_f$ )	200 nsec
펄스 폭 ( $T_p$ )	1 nsec
최대 ToA ( $T_a$ )	100 nsec
압축센싱 비율 ( $M/N$ )	0.24, 0.36, 0.5
OMP 반복 횟수 ( $K$ )	70
모의실험 횟수	10,000
MES-SB의 SB-창 길이	30 nsec

4.1 임계값 비율에 따른 제안된 기법의 성능

그림 2는  $N_f = 200$ 이고  $M/N = 0.24$ 일 때 임계값 비율  $R_{TH}$ 에 따른 제안된 ToA 추정의 SNR 대비 MAE 성능을 도시한다. 낮은 SNR 일 때 (7.5 dB 이하), 임계값 비율  $R_{TH} = 1.0$ 에서 다른 값들보다 조금 향상된 성능을 보이지만, 높은 SNR 일 때는 오히려 성능이 가장 나빠졌다. 반면 높은 SNR 일 때 (17.5 dB에서 30 dB까지), 임계값 비율  $R_{TH} = 1.4, 1.6$  이거나 1.8에서 비슷한 정확도를 보이지만, 임계값 비율  $R_{TH} = 1.4$ 일 경우에는 SNR이 7.5 dB에서 17.5 dB까

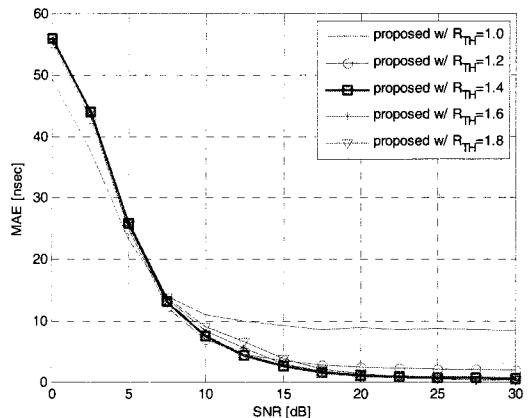


그림 2. 임계값 비율에 따른 제안된 기법의 MAE 성능 ( $N_f = 200, M/N = 0.24$ )

지 최고의 성능을 얻을 수 있었다. 따라서 다음 단계에서 기존 기법들과의 비교를 위해 제안 기법에서의 임계값 비율은  $R_{TH}=1.4$ 을 사용하기로 한다.

#### 4.2 프레임 개수에 따른 기존 기법들과의 성능 비교

그림 3과 같이 프레임 개수  $N_f=100$ 일 때에는 SNR이 5 dB 이상일 경우에만 다른 3가지 기법들보다 제안된 기법이 우수한 것을 볼 수 있다. 하지만 프레임 개수  $N_f$ 가 400으로 증가하였을 때에는 대부분의 SNR에서 제안된 기법의 성능은 모든 기존 기법들의 성능보다 우수한 것을 그림 4로부터 확인할 수 있다. 특히, 기존의 “TC optimum”과 “MES-SB optimum” 기법은 각 SNR에 따라 동적으로 바뀌는 정규화 임계값을 사용하기 때문에 실질적인 구현은 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 게다가 전형적인

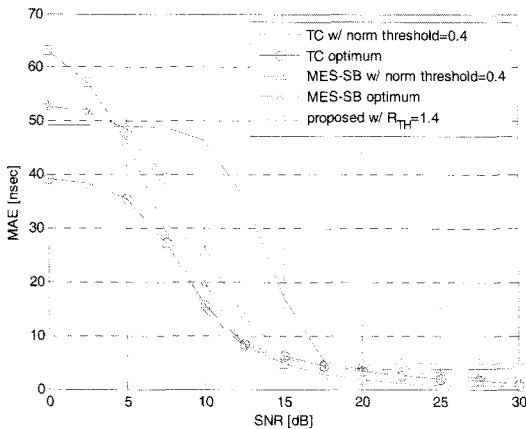


그림 3. 프레임 개수  $N_f=100$ 일 때 MAE 성능 비교

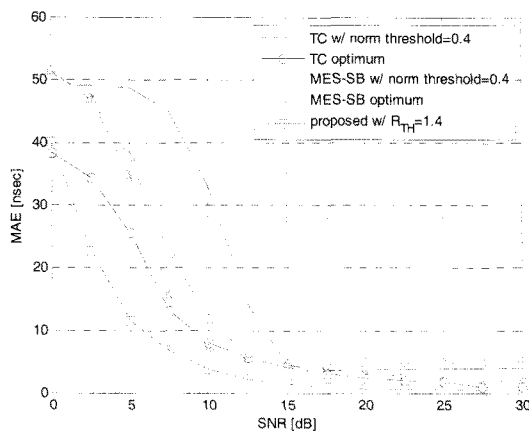


그림 4. 프레임 개수  $N_f=400$ 일 때의 MAE 성능 비교

저복잡도 기법은 에너지 블록을 이용함으로써 정확도가 낮은 반면에, 제안된 기법은 높은 SNR (17.5 dB 이상)에서  $N_f=400$  일 때 MAE 성능을 1 nsec 아래로 낮출 수 있어 매우 높은 정확도를 얻을 수 있다.

그림 5는 프레임 개수  $N_f$ 가 100, 200, 400, 600, 800 그리고 1,000 일 때 제안된 기법의 성능을 나타낸다. 이 그림으로부터 프레임 개수가 증가함에 따라 제안된 기법의 성능이 더욱 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 충분한 프레임 개수를 이용할 제안된 기법이 SNR의 크기에 상관없이 잘 적용될 수 있음을 의미한다.

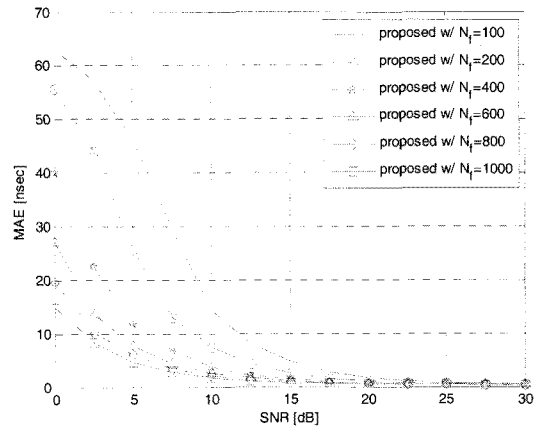


그림 5. 프레임 개수에 따른 제안된 기법의 MAE 성능

#### 4.3 압축센싱 비율에 따른 제안된 기법의 성능

그림 6은 다양한 압축센싱 비율에 따른 제안된 기법의 성능을 나타낸다. 결과를 통해 압축센싱 비율이 증가함에 따라 성능 또한 향상되는 것을 관찰할 수 있

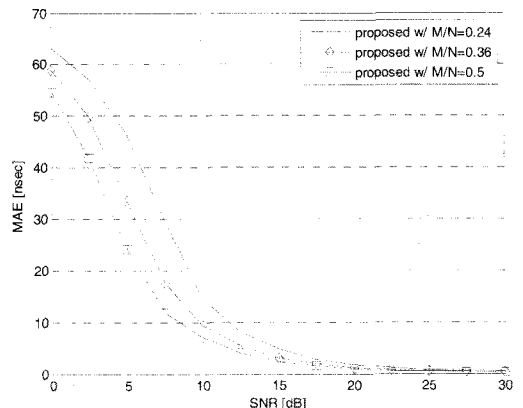


그림 6. 다양한 압축센싱 비율에 따른 제안된 기법의 MAE 성능 ( $N_f=100$ )

다. 이 결과로부터 프레임 개수를 많이 사용할 수 없는 환경에서, 비록 성능 이득은 크지 않지만 제안된 기법의 성능을 향상시킬 수 있는 또 다른 방법으로 활용 가능하다.

### V. 결 론

일반적인 ADC는 매우 높은 표본화율을 필요로 하기 때문에 복잡도가 상승하고 고가의 특성을 갖지만, 압축센싱 이론을 이용함으로써 UWB 수신기의 ADC 연산량을 줄일 수 있다. 따라서 이 논문에서 우리는 압축센싱 기반의 UWB 수신기의 표본화율을 줄이면서도 고정밀의 측위 성능을 제공하는 ToA 추정 기법을 제안하였다. 한정된 프레임 개수 안에서의 모의실험 결과를 통해 제안된 기법이 SNR의 크기에 상관없이 기존의 저복잡도 기법들보다 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

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

[3] D. L. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol. 52, No. 4, pp. 1289-1306, Apr. 2006.

[4] J. L. Parades, G. R. Arce, and Z. Wang, "Compressed sensing for ultrawideband impulse radio," *Proc. IEEE ICASSP 2007*, Vol. 3, pp. 553-556, Honolulu, USA, Apr. 2007.

[5] J. L. Paredes, G. R. Arce, and Z. Wang, "Ultra-wideband compressed sensing: Channel estimation," *IEEE Jour. Signal Proc.*, Vol. 1, No. 3, pp. 383-395, Oct. 2007.

[6] J. Y. Lee and R. A. Scholz, "Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link," *IEEE Jour. Selected Areas in Commun.*, Vol. 20, No. 9, pp. 1677-1683, Dec. 2002.

[7] I. Guvenc, S. Gezici, and Z. Sahinoglu, "Ultra-wideband range estimation: Theoretical limits and practical algorithms," *Proc. IEEE*

*ICUWB 2008*, Vol. 3, pp. 93-96, Hannover, Germany, Sept. 2008.

[8] D. Dardari, C. C. Chong, and M. Z. Win, "Threshold-based time-of-arrival estimators in UWB dense multipath channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 56, No. 8, pp. 1366-1378, Aug. 2008.

[9] 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.

[10] I. Guvenc, Z. Sahinoglu, A. F. Molisch, and P. Orlik, "Non-coherent TOA estimation in IR-UWB systems with different signal waveforms," *Proc. IEEE BROADNETS 2005*, Vol. 2, pp. 1168-1174, Boston, USA, Oct. 2005.

[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] R. G. Baraniuk, "Compressive sensing," *IEEE Signal Proc. Mag.*, Vol. 24, No. 4, pp. 118-121, July 2007.

[13] J. Tropp and A. C. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Trans. Info. Theory*, Vol. 53, No. 12, pp. 4655-4666, Dec. 2007.

[14] IEEE 802.15 TG 4a Channel Model Subcommittee, "IEEE 802.15.4a channel model - Final report," available at <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>.

르 나 탄 (Tan N. Le)

준회원

한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조

김 광 열 (Kwangyul Kim)

준회원

신 요 안 (Yoan Shin)

종신회원



2007년 2월 공주대학교 정보통신공학과 졸업

2007년~2009년 한국전자통신연구원 위촉연구원

2009년 9월~현재 송실대학교 정보통신공학과 석박사통합과정

한국통신학회논문지 Vol. 34, No. 1 참조

<관심분야> 무선통신 시스템, 무선측위 시스템