

로버스트한 최소 M-추정기법을 이용한 비가시선 상의 멀티스태틱 레이더 클락 동기 기술 연구

신혁수*, 여광구*, 정명득**, 양훈기***, 정용식***, 정원주°

Clock Synchronization for Multi-Static Radar Under Non-Line-of-Sight System Using Robust Least M-Estimation

Hyuk-soo Shin*, Kwang-goo Yeo*, Myung-deuk Joeng**, Hoongee Yang***, Yongsik Jung***,
Wonzoo Chung°

요 약

논문에서는 최근에 무선 센서 관련 연구에서 제안된 높은 정확도를 가진 센서 간의 클락 동기 기술을 멀티스태틱 레이더 시스템을 위한 무선 시간동기 알고리즘에 적용을 고려하고 특히 비가시선 상에 있는 노드들 간에 적용 될 수 없는 기존 이론의 한계를 극복하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 두 노드에서의 얻어진 타임 스탬프 관찰 결과 정보를 바탕으로 recursive robust least M-estimation (RLM) 기법을 이용하여 두 개의 센서 노드 간의 상대적인 클락 스큐(skew)와 위상 차이를 추정한다. 그 과정에서 NLOS 환경으로 인해 uplink와 downlink시에 발생하는 지연시간의 차이를 추적하여 억제시킴으로써 알고리즘의 성능 향상시킨다. 또한 mean square error (MSE)를 계산하여 알고리즘의 성능을 기존 maximum-likelihood (ML) 기법을 이용한 알고리즘과 비교 분석한다.

Key Words : Recursive least M-estimation(RLM), multi-static Radar, non-line-of-sight, wireless sensor networks(WSNs)

ABSTRACT

In this paper, we propose the algorithm which considers applying recently proposed clock synchronization techniques with quite high accuracy in a few wireless sensor networks researches to time synchronization algorithm for multi-static radar system and especially overcomes the limitation of previous theory, cannot be applied between nodes in non-line of sight (NLOS). Proposed scheme estimates clock skew and clock offset using recursive robust least M-estimator with information of time stamp observations. And we improve the performance of algorithm by tracking and suppressing the time delays difference caused by NLOS system. Futhermore, this paper derive the mean square error (MSE) to present the performance of the proposed estimator and comparative analysis with previous methods.

I. 서 론

최근 몇 년간 피탐지 표적에 대한 탐지가 흥미로운 연구 주제로 대두되면서 멀티스태틱 레이더 관련 연

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

♦ 주저자 : 고려대학교 전파통신공학과 통신신호처리 연구실, shs727@korea.ac.kr, 학생회원
° 교신저자 : 고려대학교 전파통신공학과 통신신호처리 연구실, wchung@korea.ac.kr, 종신회원

* 고려대학교 전파통신공학과 통신신호처리 연구실

** 국방과학연구소

*** 광운대학교 전파공학과

논문번호 : KICS2012-09-416, 접수일자 : 2012년 9월 3일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 16일

구들이 활발히 진행되고 있다. 멀티스태틱 레이더는 기존에 사용하던 모노스태틱 레이더와 다르게 송신기와 수신기가 서로 분리되어있는 기하학적 구조를 가지기 때문에 정확한 신호 처리를 위해서는 정밀한 시간 동기 알고리즘이 필요하다.

멀티스태틱 레이더의 시간 동기화 문제를 해결하기 위한 여러 가지 시도가 있었는데 그 중 한 가지 방법이 방법은 매우 안정적인 pulse per second (PPS) 신호를 제공하는 GPS 위성을 이용하는 방법이다. 특히 Very-Long Baseline Interferometry (VLBI) 기법을 적용한 동기화 기술은 4개 이상의 GPS 위성에서 PPS 신호를 받아 동기화를 함으로써 오차를 10ns 이하로 줄일 수 있다^[1]. GPS를 이용한 기술은 매우 정밀한 시간 동기화가 가능하지만, GPS 위성에 의존하기 때문에 독립적인 시간 동기가 불가능한 단점이 존재한다.

이러한 단점은 송수신기 간의 양방향 통신 링크를 이용하여 직접 시간 동기를 맞추는 기법을 통해 극복할 수 있다. 송수신기 사이에 무선 통신이 가능한 상황을 가정한다면, 멀티스태틱 레이더 시스템의 송신기와 수신기를 무선 센서 네트워크 (WSNs)의 센서 노드로 취급할 수 있으므로 이 논문에서 소개할 무선 센서 네트워크 (WSNs)의 클락 동기 기술의 적용을 고려해 볼 수 있다.

무선 센서 네트워크 (WSNs)의 시간 동기 기술은 많은 논문에서 소개된 바 있다. 대표적으로 가장 널리 쓰이는 기술은 양방향 메시지 교환 방식을 이용한 방식으로, 두 노드간의 클락 오프셋과 클락 스쿠를 추정할 수 있는 기술과 고정된 지연시간을 알고 있지 않을 때에도 추정할 수 있는 기술이 각각 [2]와 [3]에 소개되어있다. 그러나 레이더 시스템에서는 송신기와 수신기 사이의 가시선상 환경을 보장할 수 없기 때문에 [2]과 [3]의 기술로는 비가시선 환경으로 인한 에러를 제거하지 못한다는 한계가 존재한다. 또한 최근 진행되고 있는 연구들의 대부분 역시 WSNs의 파워 문제만을 고려하고 있기 때문에 비가시선 환경에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 이 논문에서는, 비 가시선상에 있는 노드들 사이의 RLM 추정 기법을 통한 새로운 시간 동기 알고리즘을 제안하고 기존 알고리즘과의 비교분석을 제시한다. 2장에서는 전체적인 시스템 모델을 설계하고 설계된 모델에 대한 솔루션을 제공하는 알고리즘을 제안한다. 3장에서는 제공된 알고리즘에 대한 실험을 통해 성능 분석에 대하여 토의하고 4장에서 결론을 제시한다.

II. 본 론

2.1. 시스템 모델

우리는 그림 1.과 같이 송신기 (또는 수신기) 노드 A와 수신기 노드 B 사이의 양방향 시간 정보 교환 방식을 기반으로 하는 시간 동기화 모델을 고려한다. i 번째 메시지 교환에서, 노드 A에서 노드 B로 동기화 메시지를 전송할 때 노드 A에서 전송한 시간을 $T_{1,i}$ 이라고 하고, 노드 B에서 수신한 시간을 $T_{2,i}$ 라고 한다. 반대로 노드 B에서 노드 A로 메시지 전송할 시, 노드 B에서 메시지를 보낸 시간을 $T_{3,i}$, 노드 A에서 받은 시간을 $T_{4,i}$ 라고 한다. 이러한 메시지 교환을 N 회 반복하게 되면 노드 A와 노드 B에는 각각 $\{T_1, T_2, T_3, T_4\}$ 의 관찰 결과를 얻게 된다. 이때 $T_i = \{T_{i,j}\}_{j=1}^N$ 을 의미한다. 노드에서 메시지를 주고받을 경우 클락 스쿠 f 와 클락 오프셋 θ , 그리고 고정 지연시간 d_1, d_2 및 랜덤 지연시간 X_i 와 Y_i 가 발생하게 되는데, 클락 스쿠가 없는 경우 노드 B에서 받은 시간 $T_{2,i}$ 는 노드 A에서의 전송 시간 $T_{1,i}$ 에 클락 오프셋과 travel 시간을 더한 값을 가지게 되므로 $T_{2,i} = T_{1,i} + d_1 + \theta + X_i$ 와 같은 관계가 성립한다. 마찬가지로 노드 A에서 받은 시간 $T_{4,i}$ 는 노드 B에서의 전송 시간에서 클락 오프셋을 빼주고 travel 시간을 더해서 $T_4 = T_3 + d_2 - \theta + Y_i$ 의 관계가 성립하게 된다. 여기에 클락 스쿠 f 를 고려하여 모델링 하면 다음과 같은 더 복잡한 수식을 도출할 수 있으며 이전 논문에서도 다음과 같이 모델링 한 바가 있으며 이를 도식적으로 표현하면 그림 1.과 같다^[2,3].

$$T_{2,i} = f(T_{1,i} + d_1 + X_i) + \theta \quad (1)$$

$$T_{3,i} = f(T_{4,i} - d_2 - Y_i) + \theta \quad (2)$$

d_1 과 d_2 는 메시지 지연시간의 고정된 부분으로 d_1 은 노드 A에서 노드 B로 전송 시 발생하는 고정 지연 시간이고, d_2 는 노드 B에서 노드 A로 전송 시 발생하는 고정 지연시간이다. 가시선 환경에서 고정 지연시간 d_1 과 d_2 는 같은 값을 가진다. 그러나 비가시선 상의 환경에서는 멀티패스로 인한 에코들이 존재하고 이것은 고정 지연시간에 영향을 준다. 따라서 이 논문에서 제시하는 비가시선 환경 시스템에서는 노드 A 혹은 B에서 전송하여 노드 B 혹은 A에 메인 에코가

도착하기까지 걸리는 시간을 고정 지연시간 d_1 혹은 d_2 로 정의하고 멀티패스 특성으로 인하여 d_1 과 d_2 가 다른 값을 가진다고 가정한다. 시간을 X_i 와 Y_i 는 메시지 랜덤 지연시간을 의미하는데, 랜덤 지연시간은 문헌에서 가우시안 분포, 지수(exponential) 분포, 감마 분포 등의 랜덤변수로 모델링되며 이 논문에서는 랜덤 지연시간이 i.i.d 가우시안일 경우를 고려한다. 두 노드간의 클락 동기화를 위해서 클락 스쿠 f 와 클락 오프셋 θ 를 추정하는 것이 본 논문의 목표이다.

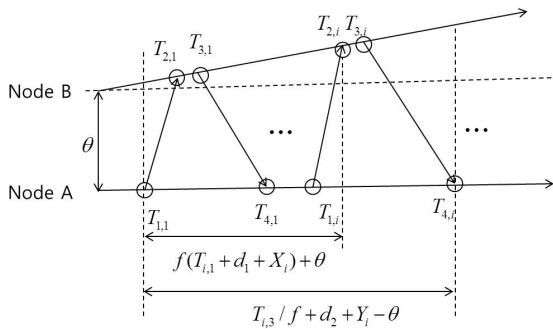


그림 1. 양방향 메시지 교환 방식을 이용한 시스템 모델
Fig. 1. System model using two-way message exchange scheme

기존 연구들에서는 고정 지연시간인 d_1 과 d_2 는 메시지를 생성하고 모듈레이션 및 송수신기 간 신호가 이동하는데 걸리는 전파지연시간을 포함한다. 그러나 통신장비의 하드웨어 스펙을 알고 있다면 전파 지연시간을 제외한 고정 지연시간은 계산을 통해 제거 가능하므로 우리는 고정 지연시간 d_1 과 d_2 를 전파 지연시간(travel time)으로 취급하기로 한다.

위에서 언급했듯이 만약 두 노드가 가시선상에 존재한다면 d_1 과 d_2 는 같은 값을 가지게 되고 이 경우 식 (1)과 (2)를 선형 방정식 형태로 다시 쓴 후 선형

추정 기법을 사용하여 f 와 θ 를 추정할 수 있다. 그러나 그림 2.와 같이 두 노드가 비가시선 상에 존재하게 되면 노드 A에서 노드 B로 전송하는 다운링크와 노드 B에서 노드 A로 전송하는 업링크 간에 전파의 진행 경로의 차이로 인한 경로의 거리 차이가 발생하여 d_1 과 d_2 가 다른 값을 가지게 된다. 특히 레이더 시스템에서는 기존 WSNs를 이용하는 시스템들에 비하여 노드 간의 거리가 매우 길기 때문에 전파 지연시간의 차이는 추정된 f 와 θ 의 mean square error (MSE)를 높이는 주요한 원인이 된다. 따라서 우리는 기존의 알고리즘과 d_1 과 d_2 가 다른 경우의 알고리즘에 대한 분석을 제공한다.

2.2. Maximum Likelihood (ML) 추정 기법 [3]

주어진 관측 결과 $\{T_1, T_2, T_3, T_4\}$ 를 바탕으로 Maximum likelihood (ML) 추정 기법을 이용하여 시스템 모델 (1)과 (2)에서 클락 스쿠와 클락 오프셋 f 와 θ 를 추정하기 위하여 식 (1)과 (2)의 양변을 f 로 나누어 다시 표현하면 다음과 같다.

$$T_{2,i}/f - \theta/f = T_{1,i} + d_1 + X_i \tag{3}$$

$$T_{3,i}/f - \theta/f = T_{4,i} - d_2 - Y_i \tag{4}$$

만약 d_1 과 d_2 가 같다면 (3)식과 (4)을 더하여 고정된 지연시간 값을 제거해줌으로써 고정된 지연시간을 알지 못하여도 변수들을 추정할 수 있다. 두 식을 더하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{2,i}/f + T_{3,i}/f - 2\theta/f \\ = (T_{1,i} + T_{4,i}) + (d_1 - d_2) + (X_i - Y_i) \end{aligned} \tag{5}$$

$d_1 = d_2$ 이므로 $d_1 - d_2 = 0$ 이 되고, 문제를 풀기 위하여 추정할 변수들을 $\alpha_1 = 1/f$, $\alpha_2 = \theta/f$ 로 치환하고 관찰 결과 $\{T_1, T_2, T_3, T_4\}$ 를 쌓아서 행렬 형태로 나타내면 다음을 얻을 수 있다.

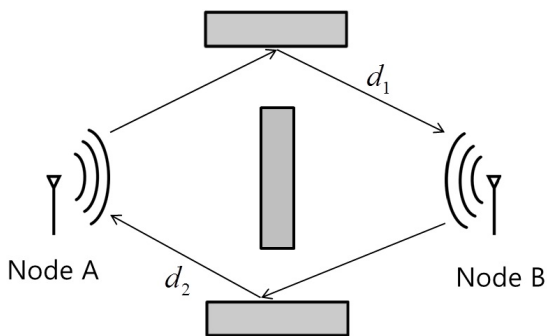


그림 2. 비가시선 환경 시스템
Fig. 2. Non-line-of-sight system

$$\underbrace{\begin{bmatrix} T_{2,1} + T_{3,1} & -2 \\ \vdots & \vdots \\ T_{2,N} + T_{3,N} & -2 \end{bmatrix}}_{T_P} \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}}_A \quad (6)$$

$$= \underbrace{\begin{bmatrix} T_{1,1} + T_{4,1} \\ \vdots \\ T_{1,N} + T_{4,N} \end{bmatrix}}_{T_S} + \underbrace{\begin{bmatrix} X_1 - Y_1 \\ \vdots \\ X_N - Y_N \end{bmatrix}}_Z$$

$$\rho(e) = e^2/2 \quad (10)$$

본 논문에서 제안하는 알고리즘의 목표는 recursive 방식을 통해서 식 (11)과 같이 표현할 수 있는 에러 코스트 함수를 최소화 시키는 것이다.

$$J(A) = \sum_{i=1}^N \rho(e(i)) \text{ where}$$

$$e_i = [T_S]_i - [T_P^H]_i A \quad (11)$$

이 때, $T_P = \begin{bmatrix} T_{2,1} + T_{3,1} & -2 \\ \vdots & \vdots \\ T_{2,N} + T_{3,N} & -2 \end{bmatrix}$, $T_S = \begin{bmatrix} T_{1,1} + T_{4,1} \\ \vdots \\ T_{1,N} + T_{4,N} \end{bmatrix}$

로, $A = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}$ 정의하고, X_i 와 Y_i 는 i.i.d이고 분산이 σ^2 인 가우시안 분포를 따르므로 $Z_i = X_i - Y_i \sim N(0, 2\sigma^2)$ 이 성립한다. 따라서 로그 likelihood 함수는 다음과 같이 쓸 수 있다⁴⁾.

$$\ln f(T_P, T_S | A) = -\frac{N}{2} \ln 4\pi\sigma^2 - \frac{|T_P A - T_S|^2}{4\sigma^2} \quad (7)$$

식 (7)에서 $\ln f(T_P, T_S | A)$ 가 최댓값을 가지게 하는 \hat{A}_{ML} 는 다음과 같다.

$$\hat{A}_{ML} = (T_P^H T_P)^{-1} T_P^H (T_S) \quad (8)$$

2.3. 제안된 알고리즘

가시선상인 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 고정 지연시간 $d_1 = d_2$ 이므로 이 경우에는 위의 방법으로 추정하여도 의미있는 결과를 얻을 수 있다. 그러나 두 노드가 비가시선 상에 있을 경우 고정 지연시간의 차이로 인한 에러가 발생하게 된다. 따라서 이 논문에서는 식 (5)에서 $d_1 - d_2$ 를 제거하기 위해 $d_1 - d_2$ 를 비가시선 상의 환경으로 인해 발생하는 양의 상수 에러로 취급하고 recursive M-estimator를 이용하여 이것을 억제하고자 한다.

M-estimators는 통계학에서 outlier로 인한 burst 에러를 바로 잡는 목적으로 개발되었으며 에러 criterion 함수를 사용하여 outlier에 대한 민감도를 높인다. 에러 criterion 함수에는 the Hampel's three parts redescending M-estimation 함수, Huber M-estimation 함수 등 여러 가지가 있는데 이 논문에서는 최소 제곱 에러 criterion을 사용하였다^{5,6)}.

위의 식 (11)을 최소화하는 최적의 솔루션을 찾기 위해 위 식을 A에 대하여 first order 편미분을 취하여 0으로 놓으면 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N q(e(i)) [T_P]_i [T_P]_i^H A = \sum_{i=1}^N q(e(i)) [T_S]_i [T_P]_i$$

$$\text{where } q(e) = \frac{d\rho(e)}{de} / e \quad (12)$$

식 (11)은 식 (12)와 같이 M-estimation을 적용하기 위한 형식으로 표현 할 수 있다.

$$R(n)A = P(n) \text{ where } R(n)$$

$$= \sum_{i=1}^n q(e(i)) [T_P]_i [T_P]_i^H \text{ and } P(n)$$

$$= \sum_{i=1}^n q(e(i)) [T_S]_i [T_P]_i \quad (13)$$

식 (13)을 M-estimate normal equation이라고 하며, 이 식을 성립하게 하거나 혹은 그와 가장 근사한 A 벡터를 찾기 위한 알고리즘은 iteratively reweighted least square (IRLS) 알고리즘, recursive least M-estimation (RLM) 알고리즘 등 여러 가지가 있는데, 이 논문에서는 낮은 복잡도를 가지는 RLM 알고리즘을 사용하였다. RLM 알고리즘을 위한 업데이트 파라미터들은 다음과 같이 구할 수 있다. 업데이트 파라미터를 구하기 위해 식 (13)의 $R(n)$ 을 다음과 같이 표현한다.

$$R(n) = \sum_{i=1}^n q(e(i)) [T_P]_i [T_P]_i^H \quad (14)$$

$$= R(n-1) + q(e(n)) [T_P]_n [T_P]_n^H$$

식 (14)에서 $R(n)$ 를 B 로 놓고 $x = y = [T_p]_n$, $\mu = q(e(n))$ 으로 놓으면 역행렬 정리 $(B + \mu xy^T)^{-1} = B^{-1}(I - (\mu xy^T B^{-1}) / (1 + \mu y^T B^{-1} x))$ 를 적용함으로써 $R(n)$ 의 역행렬 $V(n)$ 을 구할 수 있다.

$$V(n) = (I - K(n)X(n)^H) V(n-1) \quad (15)$$

식 (15)에서 Kalman gain벡터 $K(n)$ 은 다음과 같다.

$$K(n) = \frac{q(e(n))V(n-1)X(n)}{1 + q(e(n))X(n)^H V(n-1)X(n)} \quad (16)$$

위의 식 (15), (16)을 이용하여 개발된 recursive 알고리즘은 다음과 같으며 레퍼런스 [5, 7]의 논문들에서도 이와 같은 방식을 사용한 바 있다.

for $i = 1 : N$

$$\begin{aligned} X(i) &= [T_p]_i \\ Y(i) &= [T_s]_i \\ e(i) &= Y(i) - X(i)^H A(i-1) \\ K(i) &= \frac{q(e(i))V(i-1)X(i)}{1 + q(e(i))X(i)^H V(i-1)X(i)} \\ A(i) &= A(i-1) + e(i)K(i) \\ V(n) &= (I - K(i)X(i)^H) V(i-1) \end{aligned}$$

end

위 알고리즘에서는 $A(0) = [0, 0]^H$, $V(0) = 10I$ 의 초기 값을 사용하였고, 연산 과정을 N 회 반복함으로써 얻어지는 $A(N)$ 값이 알고리즘을 통해 추정하고자 하는 클락 스큐와 오프셋의 솔루션이 된다. 추정된 솔루션을 통해 비가시선 환경으로 인한 업링크/다운링크 시의 고정 지연시간의 차이를 역으로 추정할 수 있다.

III. 실험

이번 장에서는 알고리즘의 성능 검증을 위한 실험을 수행하였다. 제안된 알고리즘 반복 횟수에 따라 에러를 추적해서 억제시키는 과정을 보이고 이를 통해 얻어진 클락 스큐와 클락 오프셋을 ML 추정 기법을 이용해 추정된 클락 스큐와 클락 오프셋과 각각 mean square error (MSE)를 계산함으로써 비교하였다.

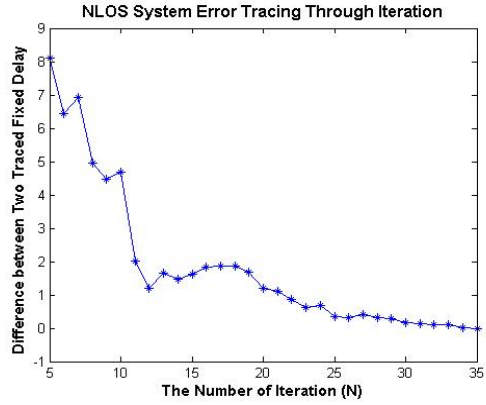


그림 3. 반복 횟수에 따른 에러의 추적 과정 예시
Fig. 3. example of error tracking process as the number of iteration

그림 3. 에서는 $f = 1$, $\theta = 1.5$, $d_1 - d_2 = 0.5$ 인 경우에 반복 횟수에 따른 비가시선 환경 에러 $d_1 - d_2$ 를 추적하는 과정 예시로 보였다. 제안된 알고리즘에서는 그림 3.과 같은 에러 추적 과정을 통해 클락 스큐와 클락 오프셋을 추정하게 된다.

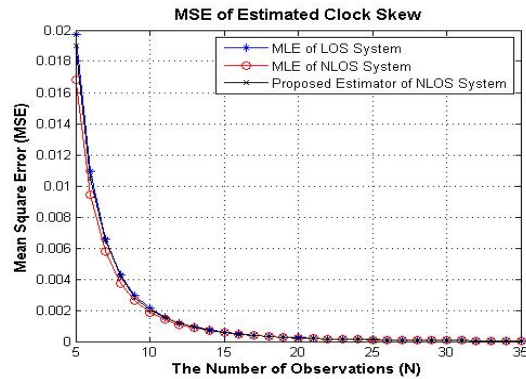


그림 4. 추정된 클락 스큐의 MSE
Fig. 4. MSE of estimated clock skew

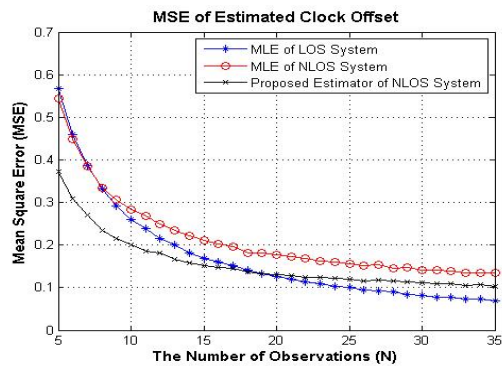


그림 5. 추정된 클락 오프셋의 MSE
Fig. 5. MSE of estimated clock offset

각 실험에 쓰인 값들은 $d_1, d_2 \in (0, 5]$, $f \in [0.9, 1.1]$, $\theta \in [-3, 3]$ 이다. 이 실험을 위해 d_1, d_2, θ 에 쓰인 상수 값들은 상대적인 시간이므로 단위를 생략하였다[8]. 그림 4.과 그림 5. 는 가시선 환경에서의 MLE, 비가시선 환경에서의 MLE, 비가시선 환경에서의 제안된 알고리즘 3가지에 대하여 각각 추정된 클락 스큐와 클락 오프셋에 대한 mean square error (MSE)를 나타내었다. 그림 3.과 그림 4., 그림 5. 에서 반복 회수 N과 관측 결과의 수 N은 실제로는 다른 의미를 가지는 값이지만 이 실험에서는 같은 값을 사용하였으므로 같은 기호로 표기하였다. 그림 4.에서 볼 수 있듯이 클락 스큐는 대부분의 노드에서 1에 매우 가까운 값을 가지기 때문에 세 가지 알고리즘 모두 유의미한 차이를 보이지 않는 반면, 클락 오프셋의 경우에는 가시선 상의 MLE와 비가시선 상의 MLE 두 경우의 MSE가 고정 지연시간의 차이 때문에 발생하는 에러로 인해 큰 차이가 발생함을 볼 수 있었다. 제안된 알고리즘은 관측 결과수가 적은 부분에서 반복 연산을 통한 추정을 통해서 더 좋은 성능을 보였고, 관측 결과의 수가 충분한 부분에서도 가시선 과 비가시선 환경의 차이로 인해 발생한 MSE 차이를 근소한 차이로 좁혀지는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

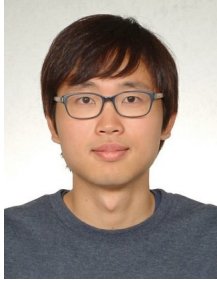
이 논문에서는 RLM 추정 기법을 이용하여 두 노드가 비가시선 상에 있는 경우에 발생하는 에러를 반복 연산을 통해 추적하여 억제하고 멀티스태틱 레이더의 클락 동기화를 위한 변수들을 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 기존 ML 추정 기법을 이용한 알고리즘과 그 성능을 비교 분석하여 제시하였다. 그 결과, 추가적인 정보 없이도 RLM 알고리즘의 반복 연산을 통한 에러 억제를 통해 비가시선 상에서 기존 ML 추정방식을 이용한 알고리즘 보다 더 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있었다. 이 연구에서 주목할 점은 기존 ML추정 방식을 통해서 풀 수 없었던 비선형적인 문제를 recursive한 알고리즘을 도입함으로써 해결하고자 한 바이며, 또한 추후 이 연구를 바탕으로 최적의 에러 criterion 함수 설정을 통한 성능 향상에 대한 연구 가능성을 제시하였다.

References

- [1] Matthias weiB, "Synchronisation of Bistatic Radar System", *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp.1750-1753, Wachtberg, Germany, Sept 2004
- [2] K.-L. Noh, Q. M. Chaudhari, E. Serpedin, and B. W. Suter, "Novel clock phase offset and skew estimation using two-way timing message exchanges for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 4, pp. 766 - 777, Apr. 2007.
- [3] Mei Leng, Yik-Chung Wu, "On Clock Synchronization Algorithms for Wireless Sensor Networks Under Unknown Delay", *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol. 59, no. 1, pp.182-190, JANUARY 2010.
- [4] Simon Haykin, Michael Moher, *Modern Wireless communication*, NJ: Prentice-Hall, 2005.
- [5] S. H. Zhao and S. C. Chan, "A novel algorithm for mobile station location estimation with none line of sight error using robust least M-estimation," in *Proc. IEEE ISCAS*, pp. 1176 - n1179., Seattle, WA, May 2008,
- [6] S. C. Chan and Y. Zou, "recursive least M-estimate algorithm for robust adaptive filtering in impulsive noise: fast algorithm and convergence performance analysis," *IEEE Trans. Signal Proces.*, vol 52, pp. 975-991, Apr. 2004.
- [7] R. E. Frank and M. Hampel, *Robust Statistic: The Approach Based on Influence Fucntions*, New York:John Wiley & Sons Inc., 1986.
- [8] Miklós Maróti, Branislav Kusy, Gyula Simon, Ákos Lédeczi, "The Flooding Time Synchronization Protocol", *SenSys '04*, pp.39-49 NY, USA, Nov. 2004
- [9] Yik-Chung Wu, Qasim Chaudhari, and Erchin Serpedin "Clock Synchronization of Wireless Sensor Networks", *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, pp.124-138, JAN 2011.

[10] Jang-Sub Kim, Jaehan Lee, Erchin Serpedin, and Khalid Qaraqe, "Robust Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks Through Noise Density Estimation", *IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING*, vol. 59, no. 7, pp.3035-3047, July 2011.

신 혁 수 (Hyukssoo Shin)



RADAR

2011년 2월 고려대학교 컴퓨터통신공학부 졸업
2011년 3월~현재 고려대학교 전파통신공학과 석사박사 통합과정
<관심분야> digital signal processing, MIMO

여 광 구 (Kwang-goo Yeo)



2012년 2월 고려대학교 컴퓨터통신공학부 졸업
2012년 3월~현재 고려대학교 전파통신공학과 석사박사 통합과정
<관심분야> digital signal processing, MIMO RADAR

정 명 득 (Myung-deuk Joeng)



계, 능동 위상배열 시스템

1991년 2월 경북대학교 전자공학과 석사
2003년 2월 충남대학교 마이크로파 및 광파 박사
1991년 2월~현재 국방과학연구소 책임연구원
<관심분야> 초고주파 회로설계, 능동 위상배열 시스템

양 훈 기 (Hoongee Yang)



1985년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업
1987년 2월 State University of NY at Buffalo 전기공학 석사
1992년 2월 State University of NY at Buffalo 전기공학 박사
1992년~1993년 SUNY at Buffalo 근무
2001년 Univ. British Columbia 교환교수
2009년 한국전자통신연구소 초빙연구원
1993년~현재 광운대학교 전파공학과 교수
<관심분야> electric wave engineering, MIMO RADAR

정 용 식 (Yongsik Jung)



1989년 2월 서울대학교 전기공학 졸업
1991년 2월 서울대학교 전기공학 석사
2000년 2월 서울대학교 전자공학 박사
1996년 LG전자 LSL 연구소 주임 연구원
2003년 Syracuse 대학교 박사후 연구원
2006년 명지대학교 통신공학과 조교수
2007년~현재 광운대학교 전파공학과 부교수
<관심분야> electric wave engineering, signal processing, MIMO RADAR

정 원 주 (Wonzoo Chung)



1989년 2월 고려대학교 수학과 졸업
1999년 2월 Cornell University Electrical Engineering 석사
2002년 2월 Cornell University Electrical Engineering 박사
2002년~2005년 주식회사 Dotcast에서 Senior System Architect로 근무
2005년~현재 고려대학교 컴퓨터통신공학부 부교수
<관심분야> digital signal processing for digital communications systems, MIMO RADAR