

지구 곡률이 고려된 LOB를 이용하는 NLSE 기반의 고정형 신호원 위치추정

박 병 구*, 김 상 원*, 안 재 민°, 김 영 민*

Stationary Emitter Geolocation Based on NLSE Using LOBs Considering the Earth's Curvature

Byungkoo Park*, Sangwon Kim*, Jaemin Ahn°, Youngmin Kim*

요 약

본 논문은 지구를 구체(Sphere)로 모델링하고, 좌표계 변환 없이 위경도 좌표계에서 지구 곡률이 고려된 곡선형 태의 신호방향선(Line Of Bearing, LOB)을 이용하여 비선형 최소제곱법(Nonlinear Least Squared Estimator, NLSE)으로 고정형 신호원의 위치를 추정하는 방법을 소개한다. 그리고 추가적으로 지구를 타원체(Ellipsoid)로 모델링하여 위치추정성능을 개선하는 방법을 제안한다. 모의실험을 통해 지구 곡률이 고려된 곡선 LOB를 이용하는 NLSE 방법이 기존 삼각측량법(Triangulation Method) 대비 우수한 위치추정 성능을 가짐을 보이고 타원체 모델을 이용하여 위치추정성능을 개선함을 보인다.

Key Words : Triangulation method, Nonlinear least-squares estimator, Geolocation, Map conversion distortion, Line Of Bearing(LOB)

ABSTRACT

This paper introduces the NLSE(Nonlinear Least Squared Estimator) using curved LOBs(Line Of Bearings) considering the earth curvature based on sphere to avoid the map conversion distortion and minimize the estimation error. This paper suggests a method improving a performance of the NLSE using curved LOBs by using an ellipsoid model. The analysis of the simulation results shows that the NLSE using curved LOBs has better performance than the conventional triangulation method and can improve its performance using a suggested method.

I. 서 론

전자전(Electronic Warfare) 분야에서는 신호의 진폭(Amplitude), 위상차(Phase difference), 시간 지연(Time Delay), 주파수 편차(Frequency Shift) 등의 정

보를 이용하여 신호원의 신호방향을 측정하고 신호원의 위치를 추정한다^[1-5,8-14]. 이동하는 플랫폼을 이용하여 고정형 신호원의 위치를 추정하는 경우 플랫폼에 수신기를 장착하고 서로 다른 2곳 이상의 지점에서 신호원의 신호방향을 측정하여 신호원의 위치를 추정

* First Author : Department of Radio & Information Communications Engineering, Chungnam National University, Electronic Warfare PMO, Agency for Defense Development, elcapbk@naver.com, 정회원

° Corresponding Author : Department of Radio & Information Communications Engineering, Chungnam National University, jmahn@cnu.ac.kr, 종신회원

* Electronic Warfare PMO, Agency for Defense Development

논문번호 : KICS2016-10-326, Received October 24, 2016; Revised February 13, 2017; Accepted February 27, 2017

한다. 이 때, 일반적으로 추정하고자 하는 변수, 즉 신호원의 위치 정보(위도, 경도 등)보다 측정된 신호방향 정보가 더 많고 측정 오차를 포함하므로 선형 또는 비선형 최소제곱법(Least Squared Error Method, LSE)을 이용하여 신호원의 위치를 추정한다^[1-5,8-14].

평면 직각 좌표계에서 직선 형태의 신호방향선(Line Of Bearing, LOB)을 이용하여 선형 또는 비선형 최소제곱법으로 신호원의 위치를 추정하는 방법을 일반적으로 삼각측량법이라 부른다^[8-14]. 삼각측량법은 평면 직각 좌표계를 기반으로 하므로 3차원 좌표계의 위치를 평면 직각 좌표계의 위치로 변환하여 신호원의 위치를 추정한 후 다시 3차원 좌표계의 위치로 변환하는 번거로움이 있다. 뿐만 아니라 지구는 평면이 아닌 타원체의 형상을 가지므로 3차원 좌표계를 길이, 각도, 면적 등의 왜곡 없이 2차원의 평면 직각 좌표계로 변환할 수 없으며 반드시 변환에 의한 오차가 발생한다^[6,7]. 그러므로 삼각측량법은 지구 곡률을 고려하지 않은 직선 형태의 LOB를 사용하고 좌표계 변환 왜곡 문제로 인한 위치추정 오차가 발생한다.

본 논문은 좌표계 변환의 번거로움, 좌표계 변환 왜곡, 직선 LOB 이용에 따른 위치추정 오차를 최소화하기 위해 지구를 구체(Sphere)로 가정하고 구체의 곡률을 고려한 LOB를 소개한다. 그리고 이러한 곡선 형태의 LOB와 위경도 좌표의 수신기 위치를 이용하여 Nonlinear Least Squared Estimator (NLSE) 방법으로 좌표계 변환 없이 위경도 좌표계에서 고정형 신호원의 위치를 추정하는 방법을 소개한다^[14]. 이러한 방법은 삼각측량법에 비해 좌표계 변환 과정이 없어 절차가 간소하며 지구 곡률을 고려한 곡선형태의 LOB를 사용하므로 위치추정 오차를 감소시킨다. 본 논문은 소개된 방법^[14]의 성능을 검증하고 추가적으로 현재 추정 위치를 기준으로 실제 측정된 신호방향과의 오차를 계산하는 과정에서 구체가 아닌 타원체(Ellipsoid) 모델을 사용하면서 계산의 복잡도를 최소화하며 위치추정성능을 개선하는 방법을 제안한다.

본문 1장에서는 삼각측량법 중에서 대표적인 위치추정 방법인 Brown 방법을 설명한다^[8]. 본문 2장에서는 지구 곡률이 고려된 곡선 형태의 LOB를 이용하는 Nonlinear Least Squared Estimator(NLSE) 방법에 대해 소개한다^[14]. 본문 3장에서는 모의실험을 통해 실제 신호원의 위치와 추정 위치간의 거리, 위치추정 Bias 오차, Circular Error Probable (CEP) 반경을 비교함으로써 지구 곡률이 고려된 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법이 기존의 삼각측량법에 비해 우수한 위치추정 성능을 가짐을 보인다. 본문 4장에서는

본 논문에서 추가적으로 제안하는 지구 타원체를 고려한 위치추정성능 개선 방법을 설명하고 모의실험을 통해 제안한 방법이 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법의 위치추정성능을 개선함을 보인다.

II. 본 론

2.1 Brown 방식의 삼각측량법^[4,8]

그림 1은 2차원 평면 직각좌표계 기반으로 직선 형태의 LOB를 사용하는 삼각측량법을 설명하는 그림이다. Brown은 고정형 신호원의 위치 추정을 위해 최소제곱법을 이용할 때, LOB와 현재 추정 위치(x_e, y_e)와의 거리 차(d_i)를 최소화하는 방법을 제안하였다^[8]. Brown의 방법은 삼각측량법 중에서 대표적인 위치추정 방법인 Stansfield 방법^[1,8]과 수식적으로 동일하다. 수식 (1)은 그림 1의 플랫폼의 이동 경로 상에서 임의의 i 번째 수신기 위치(x_i, y_i)에서의 거리 차(d_i)를 Brown방법^[8]의 최소제곱법으로 표현한 것이다.

$$\min \sum_i^N d_i^2 \tag{1}$$

$$d_i = a_i x_e + b_i y_e - c_i$$

$$a_i = \sin \phi_i$$

$$b_i = -\cos \phi_i$$

$$c_i = x_i \sin \phi_i - y_i \cos \phi_i$$

이러한 측정이 N 번 이루어 졌다면, 수식 (1)은 수식 (2)와 같이 행렬 형태로 정리할 수 있으며 수식 (2)에 대한 최소제곱법의 해는 수식 (3)과 같다.

$$D = HX - C$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots \\ a_N & b_N \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_N \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$X = [H^T W H]^{-1} H^T W C \tag{3}$$

신호방향은 플랫폼이 이동하면서 매번 측정하여 얻는 것이므로 각 측정은 서로 연관성이 없다. 그러나 그림 1을 참고하면, LOB와 현재 추정된 위치(x_e, y_e)와의 거리 차(d_i)는 동일한 LOB이더라도 추정된 위치(x_e, y_e)와 플랫폼 위치(x_i, y_i)간의 거리 r_i 가 멀어질수록 d_i 는 커진다. 그리고 σ_{AOA} 가 클수록 해당 신호방향 측정의 정확도가 떨어지므로 이러한 점을 고

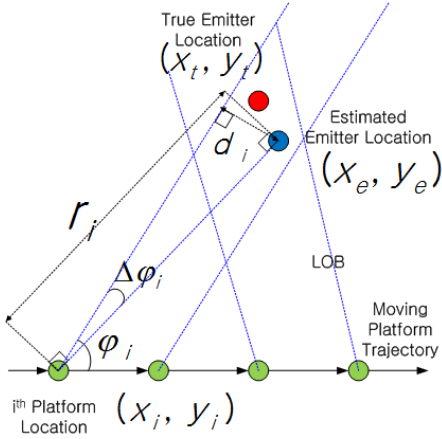


그림 1. 직선형태의 LOB를 이용한 삼각측량법
Fig. 1. Triangular method using straight line LOBs

려하여야 한다.

이를 위해 수식 (3)의 가중치 행렬 W 를 계산할 때 수식 (4)와 같이 r_i 가 클수록, σ_{AOA} 가 클수록 가중치 값이 적어지도록 하였다. 여기서 σ_{AOA} 는 수신기의 신호방향 측정 정확도를 의미하며 측정정확도를 radian 단위의 RMS(Root Mean Square) 형태로 표현한 값이다.

$$W = \frac{1}{\sigma_{AOA}^2} \begin{bmatrix} \frac{1}{r_1^2} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{r_i^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \frac{1}{r_N^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

수식 (3)에 의한 2차원 좌표 위치추정 결과의 공분산(Q)은 수식 (5)^[8]와 같으며 공분산(Q)을 이용하여 추정된 위치(x_e, y_e)를 중심으로 어느 정도 영역 안에 실제 신호원(x_t, y_t)이 있는지를 표현하는 추정영역의 크기를 구할 수 있다.

$$Q = [H^T W H]^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y \\ \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

추정된 위치(x_e, y_e)를 중심으로 신호원(x_t, y_t)이 영역 안에 있을 확률을 p 라고 하고, 영역을 이루는 타원(Ellipse Error Probable, EEP)의 장축을 L_a , 단축을 L_b , 장축의 기울기 θ 라고 하면 각 변수는 수식 (6)^[8]과

같다. 여기서 a, b 는 공분산 행렬 Q 의 고유값을 의미하고 C 는 자유도 2의 카이제곱 분포를 이용하여 추정된 위치(x_e, y_e)를 중심으로 실제 신호원(x_t, y_t)이 p 의 확률로 존재할 값을 의미한다^[8]. 그리고 C 의 값과 각 축의 고유값을 곱하여 p 의 확률에 따른 EEP의 크기를 조절할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_a &= 2\sqrt{aC} \\ L_b &= 2\sqrt{bC} \\ \theta &= \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\rho_{xy}\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C &= -2\ln(1-p) \\ a &= 0.5(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sqrt{(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^2 + 4(\rho_{xy}\sigma_x\sigma_y)^2}) \\ b &= 0.5(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sqrt{(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^2 + 4(\rho_{xy}\sigma_x\sigma_y)^2}) \end{aligned}$$

수식 (6)의 EEP를 기반으로 추정된 위치(x_e, y_e)를 중심으로 동일한 확률 p 로 실제 신호원(x_t, y_t)이 있을 것으로 추정되는 Circular Error Probable (CEP) 영역의 반경 L_r 은 수식 (7)과 같다^[3].

$$L_r = \frac{3}{4} \sqrt{\left(\frac{L_a}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_b}{2}\right)^2} \quad (7)$$

2.2 지구 곡률이 고려된 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 기반의 위치추정[14]

그림 2와 같이 지구상을 이동하는 플랫폼에서 2개 이상의 위치에서 고정형 신호원의 신호방향을 측정하는 경우 i 번째 수신기 위치(위도, 경도)를 $(\phi_{s_i}, \lambda_{s_i})$, 측정된 신호방향을 θ_i , 측정 오차를 $\Delta\theta_i$ 라 하자.

그림 2에 설명한 것과 같이 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법은 LOB와 신호원의 관계가 비선형적이므로 NLSE 방식을 이용하여 반복적으로 추정된 위치를 보정하면서 신호원의 위치를 추정하여야 한다. 이를 위해서는 초기 위치 추정이 필요하며, 초기 위치의 정확도에 따라 위치추정 수렴시간이 달라진다. 그러므로 현재까지 측정된 신호방향 중 2개의 측정 결과를 이용하여 정확도가 높은 초기 위치를 산출한다. 오차가 포함된 신호방향 측정값을 이용하여 초기 위치를 추정하는 것이므로 추정의 정확도를 높이기 위해서는 두 측정값에 포함된 오차가 상관관계를 가지지 않도록 해야 한다. 즉, 2개의 측정값이 직교에 가까울수록 정확도가 좋아지므로 측정된 다수의 신호방향 정보에서 각도 차가 직교에 가장 가까운 2개의 측정값을 선정한다. 그리고 선정된 신호방향 측

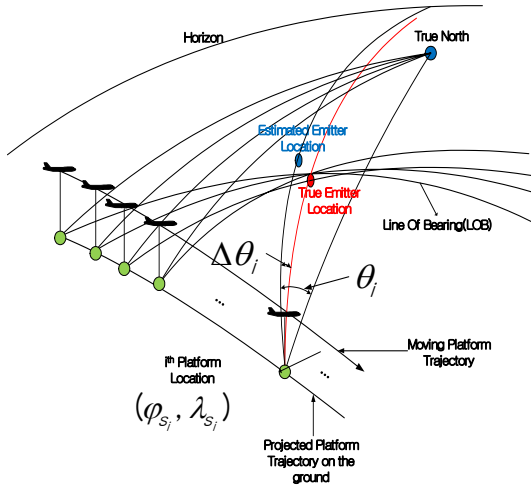


그림 2. 지구 곡률이 고려된 곡선형태의 LOB를 이용한 NLSE 기반의 위치추정
 Fig. 2. Position Estimation Based on NLSE using curved LOBs concerning the Earth curvature

정값을 각각 θ_j, θ_k 로 정의하고 해당 측정 지점의 수신기 위치 $(\phi_{s_j}, \lambda_{s_j})$ 와 $(\phi_{s_k}, \lambda_{s_k})$ 를 구한다.

신호원은 수신기의 위치와 신호원의 신호방향으로 결정되는 지구상의 대원(great circle)상에 존재한다^[15]. 두 곳의 위치 $((\phi_{s_j}, \lambda_{s_j}), (\phi_{s_k}, \lambda_{s_k}))$ 에서 신호의 방향이 측정되는 경우 2개 대원의 교점에 신호원이 존재하게 되므로 각 대원을 포함하는 각 평면을 벡터 연산으로 찾고 찾아진 2개의 평면이 만나는 선 중 지면에 해당하는 점을 찾아 신호원의 위치를 추정할 수 있다.

위경도 좌표계에서의 수신기의 위치 $(\phi_{s_j}, \lambda_{s_j})$ 는 수식 (8)와 같이 3차원 직교 좌표계에서의 벡터 v_{s_j} 로 표현된다. 그리고 수신기 위치, 지구 중심 및 자오선이 포함되는 평면을 나타내는 벡터 v_{m_j} 는 수식 (9)와 같이 지구 중심에서 북극 방향을 나타내는 벡터 $v_N = (0, 0, 1)$ 과 지구 중심에서 수신기의 위치를 나타내는 v_{s_j} 의 외적으로 표현된다.

$$v_{s_j} = (v_{s_j \cdot x}, v_{s_j \cdot y}, v_{s_j \cdot z}) = (\cos(\phi_{s_j})\cos(\lambda_{s_j}), \cos(\phi_{s_j})\sin(\lambda_{s_j}), \sin(\phi_{s_j})) \quad (8)$$

$$v_{m_j} = v_N \times v_{s_j} \quad (9)$$

지구 중심 및 신호원의 위치와 j 번째 수신기의 위치를 포함하는 평면을 나타내는 벡터 $v_{t \cdot s_j}$ 는 수식 (10)^[17]과 같이 v_{m_j} 을 v_{s_j} 축으로 신호방향에 해당하는

크기 θ_j 만큼 회전하여 구할 수 있다. 그리고 지구 중심 및 신호원의 위치와 k 번째 수신기의 위치를 포함하는 평면을 나타내는 벡터 $v_{t \cdot s_k}$ 도 수식 (10)과 같이 구할 수 있다.

수식 (11)과 같이 $v_{t \cdot s_j}$ 와 $v_{t \cdot s_k}$ 의 외적을 이용하여 신호원이 존재하는 두 평면이 만나는 선을 나타내는 벡터 v_t 를 구한다. 그러나 두 평면이 이루는 각에 따라 방향이 지구중심을 기준으로 서로 반대 방향인 2가지의 v_t 가 나올 수 있으므로 v_t 에 대한 모호성이 발생한다. 이러한 v_t 의 모호성은 θ_j 와 θ_k 의 신호방향 차이를 이용하는 수식 (12)를 이용하여 해결할 수 있다. 수식 (12)를 이용하여 지구 중심에서 신호원의 위치를 나타내는 벡터 v_t 가 구해지면 이를 이용하여 신호원의 초기 위치 $(\phi_{t_1}, \lambda_{t_1})$ 를 결정하는 방법은 수식(13)과 같다.

$$v_{t \cdot s_j} = (I\cos(\theta_j) + \sin(\theta_j)[v_{s_j}]_{\times} + (1 - \cos(\theta_j))(v_{s_j} \otimes v_{s_j}))v_{m_j} \quad (10)$$

$$[v_{s_j}]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -v_{s_j \cdot z} & v_{s_j \cdot y} \\ v_{s_j \cdot z} & 0 & -v_{s_j \cdot x} \\ -v_{s_j \cdot y} & v_{s_j \cdot x} & 0 \end{bmatrix}$$

$$v_{s_j} \otimes v_{s_j} = \begin{bmatrix} v_{s_j \cdot x}^2 & v_{s_j \cdot x}v_{s_j \cdot y} & v_{s_j \cdot x}v_{s_j \cdot z} \\ v_{s_j \cdot x}v_{s_j \cdot y} & v_{s_j \cdot y}^2 & v_{s_j \cdot y}v_{s_j \cdot z} \\ v_{s_j \cdot x}v_{s_j \cdot z} & v_{s_j \cdot y}v_{s_j \cdot z} & v_{s_j \cdot z}^2 \end{bmatrix}$$

$$v_t = \frac{v_{t \cdot s_j} \times v_{t \cdot s_k}}{\|v_{t \cdot s_j} \times v_{t \cdot s_k}\|} \quad (11)$$

$$v_t = \begin{cases} v_t & , \text{ if } (\theta_j < \theta_k) \text{ or } (\theta_j - \theta_k > 180) \\ -v_t & , \text{ else} \end{cases} \quad (12)$$

$$\phi_{t_1} = \text{atan2}(v_{t \cdot z}, \sqrt{v_{t \cdot x}^2 + v_{t \cdot y}^2}), \quad \lambda_{t_1} = \text{atan2}(v_{t \cdot y}, v_{t \cdot x}) \quad (13)$$

신호원에 대한 초기 위치 $(\phi_{t_1}, \lambda_{t_1})$ 가 결정되면, 현재 추정 위치에서 신호방향 오차 수준을 확인하기 위해 현재 추정 위치에 따른 수신기 위치별 예상 신호방향을 구한다. 지구를 구체로 가정하고 지구 곡률을 고려하여 수신기 (ϕ_s, λ_s) 에서 바라본 신호원 (ϕ_t, λ_t) 의 신호방향을 구하는 신호방향 모델은 수식 (14)와 같다^[15].

$$DOA(\phi_s, \lambda_s, \phi_t, \lambda_t) = \tan^{-1}\left(\frac{doa_1}{doa_2}\right)$$

$$doa_1 = \sin(\lambda_t - \lambda_s)\cos(\phi_t)$$

$$doa_2 = \cos(\phi_s)\sin(\phi_t) - \sin(\phi_s)\cos(\phi_t)\cos(\lambda_t - \lambda_s)$$
(14)

현재 신호원 추정위치를 $(\phi_{t_m}, \lambda_{t_m})$ 이라 하면, 현재 추정위치와 측정된 신호방향 정보를 이용하여 신호방향 오차를 나타내는 행렬 L 을 수식 (15)과 같이 구할 수 있다. 여기서 $\phi_{s_n}, \lambda_{s_n}$ 는 신호를 수신한 수신기의 n 번째 위치의 위도와 경도이며, $\phi_{t_m}, \lambda_{t_m}$ 는 m 번째 추정된 신호원의 위치에 해당하는 위도와 경도이다. 그리고 θ_n 은 수신기의 n 번째 위치에서 측정된 신호방향이다.

$$L = \begin{bmatrix} \theta_1 - DOA(\phi_{s_1}, \lambda_{s_1}, \phi_{t_m}, \lambda_{t_m}) \\ \theta_2 - DOA(\phi_{s_2}, \lambda_{s_2}, \phi_{t_m}, \lambda_{t_m}) \\ \vdots \\ \theta_n - DOA(\phi_{s_n}, \lambda_{s_n}, \phi_{t_m}, \lambda_{t_m}) \end{bmatrix}$$
(15)

신호방향 오차 행렬 L 을 이용하여 현재 추정 위치 $(\phi_{t_m}, \lambda_{t_m})$ 를 보정하기 위해서는 보정량 X_m 을 구해야 한다. 신호원의 위치와 수신기의 위치에 따른 신호 방향의 관계는 비선형 관계이므로 비선형 LSE방식으로 해를 구한다. 현재 추정위치 $(\phi_{t_m}, \lambda_{t_m})$ 에서의 수식 (14)의 신호방향 모델을 이용하여 수식 (16)과 같이 Jacobian 행렬 H 를 구한다. 이 때, Jacobian 행렬은 각 추정변수에 대한 테일러 시리즈의 1차 항을 이용하여 구성한다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ \vdots & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} \end{bmatrix}$$

$$h_{n1} = \left. \frac{\partial DOA(\phi_s, \lambda_s, \phi_t, \lambda_t)}{\partial \phi_t} \right|_{t=t_m, s=s_1}$$

$$h_{n2} = \left. \frac{\partial DOA(\phi_s, \lambda_s, \phi_t, \lambda_t)}{\partial \lambda_t} \right|_{t=t_m, s=s_1}$$
(16)

측정값에 오차가 포함되어 있고 추정하고자 하는 위치변수보다 측정값이 많은 경우이므로 행렬 L 과 행렬 H 를 이용하여 수식 (17)과 같이 최소제곱법을 이용하여 보정값 X_m 을 구한다.

보정값 X_m 의 크기에 제한을 두어 추정 위치가 수렴하지 못하고 발산하는 경우를 방지하고 수식 (18)과

같이 보정값을 이용하여 현재 추정 위치를 보정한다. 그리고 보정값이 특정 임계치 이하로 수렴하거나 보정 횟수가 K_TH 를 초과할 경우 위치 추정을 종료한다.

$$X_m = (H^T H)^{-1} H^T L, \quad X_m = \begin{pmatrix} \phi_{X_m} \\ \lambda_{X_m} \end{pmatrix}$$
(17)

$$\phi_{t_{m+1}} = \phi_{t_m} + \phi_{X_m}, \quad \lambda_{t_{m+1}} = \lambda_{t_m} + \lambda_{X_m}$$
(18)

그림 3은 구체의 지구 곡률이 고려된 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 위치 추정 방법의 흐름을 설명하는 그림이다.

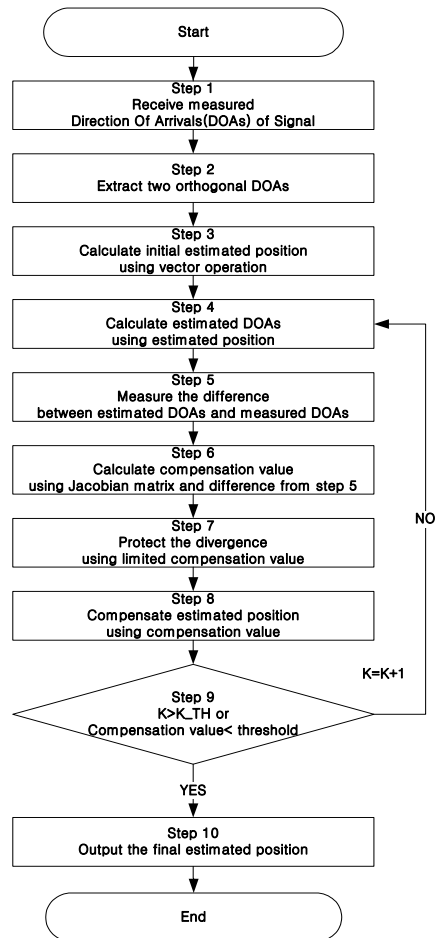


그림 3. 지구 곡률이 고려된 LOB를 이용한 위치추정 흐름도
Fig. 3. Position Estimation Flowchart using LOBs concerning the Earth curvature

III. 모의실험을 통한 위치추정성능 비교

MATLAB을 활용한 모의실험을 통해 삼각측량법 기반의 Brown 방법과 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법의 위치추정성능을 비교한다. 본 논문에서는 위치추정성능 비교를 위해 실제 신호원의 위치와 추정된 위치간의 거리, 위치추정 Bias 오차, 신호원이 영역 안에 있을 확률을 50%로 가정한 CEP 반경을 활용하였다.

실제 신호원의 위치와 추정 위치간의 거리를 계산하기 위해 수식 (19)와 같은 Haversine formula^[15]를 이용하여 지구 표면상이 두 지점간의 최단거리 즉, 두 지점사이의 대원 거리를 계산하였다. 여기서 ϕ 는 위도, λ 는 경도, $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$ 는 두 지점간의 위도 차, 경도 차, R 은 지구 반경, c 는 광속을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 a &= \sin^2(\Delta\phi/2) \\
 &+ \cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\sin^2(\Delta\lambda/2) \\
 c &= 2\text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \\
 d &= Rc
 \end{aligned} \tag{19}$$

신호방향 측정 오차가 없는 경우는 반복적으로 Monte Carlo Simulation을 수행하여도 동일한 결과가 산출되므로 1회의 Simulation을 수행하고 수식 (19)를 이용하여 실제 신호원과 추정 위치간의 거리를 계산하여 위치추정 Bias 오차로 활용하였다.

실제 신호원 위치를 중심으로 확률이 50%에 해당하는 CEP 반경을 구하기 위해서는 추정된 위치를 중심으로 실제 신호원이 존재할 영역을 산출하는 수식 (6)과 수식 (7)을 사용할 수는 없다. 그러므로 본 논문에서는 100회의 Monte Carlo Simulation을 수행한 후 수식 (19)를 이용하여 실제 신호원과 추정 위치간의 거리를 계산 후 50번째로 먼 거리를 CEP의 반경으로 활용하였다.

지구상에 존재하는 신호원의 좌표를 표시하기 위해 3차원 좌표계로는 위경도 좌표계를 사용하였으며 2차원의 평면 직각좌표계로는 나라마다 서로 다른 좌표계를 사용하는데 따른 불편함을 해소하기 위해 국제기준으로 만든 UTM 좌표계를 사용하였다.

기존의 삼각측량법은 등각/등거리의 평면 직각좌표계를 기반으로 하므로 위경도 좌표계로 표현된 수신기 위치를 UTM 좌표계로 변환하여야 한다. 그리고 최소제곱법을 이용하여 UTM 좌표계에서 신호원의 위치를 추정한 후, 다시 위경도 좌표계의 추정 위치로 변환하는 과정이 필요하다.

표 1. 신호원 및 수신기 위치

Table 1. Signal Source and Receiver Position

Location(Latitude, Longitude)	
Signal source 1	(37°, 127°)
Signal source 2	(38°, 127°)
Receiver start position	(36°, 126°)
Receiver end position	(36°, 128°)

모의실험에서 수신기와 신호원의 거리가 멀어짐에 따른 위치추정 오차를 관찰하기 위해 신호원의 위치를 위도 1°(degree 단위) 간격으로 남북방향으로 표 1과 같이 두 곳으로 가정하였다. 수신기를 탑재한 플랫폼은 신호원 위치 기준으로 동서가 대칭이 되도록 출발점에서 도착점까지 서쪽에서 동쪽으로 이동하도록 가정하였다. 수신기가 탑재된 플랫폼은 이동하면서 경도 0.2°(degree 단위) 간격으로 신호원에 대한 신호방향을 측정하며, 신호방향 측정정확도는 1°(degree 단위) RMS로 가정하였다. 그리고 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법의 경우 보정값(X_m)의 크기는 1°(degree 단위) 이내, 보정 반복횟수(K_TH)는 100회로 제한하였다.

신호방향 측정 결과를 수신하는 그림 3의 [단계 1]의 과정을 모의하기 위해 지구 타원체는 세계적으로 많이 사용되는 WGS84 타원체를 사용하였고 MATLAB의 azimuth함수^[16]를 이용하여 수신기와 신호원의 위치에 따라 측정 오차가 없으면서 타원체의 곡률이 반영된 이상적인 신호방향을 산출하였다. 모의실험은 이상적인 신호방향에 전자전 분야에서 일반적으로 사용하는 측정 오차인 1° RMS (degree 단위)^[15]의 측정 오차를 추가하는 것(With Noise)과 추가하지 않는 것(Without Noise)으로 구분하였으며 측정 오차가 없는 경우는 1회, 측정 오차가 있는 경우는 100회 Monte Carlo Simulation을 수행하였다.

3.1 신호방향 측정 오차가 없는 경우

신호방향 측정 오차가 없는 조건에서 삼각측량법 기반의 Brown 방법과 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법의 모의실험 결과를 위치추정 Bias 오차에 대한 관점으로 표 2, 그림 4, 그림 5에 정리하였다. 알고리즘에 대한 위치추정 Bias 오차를 고려하는 이유는 측정 오차가 없는 경우는 여러 번 모의실험을 하여도 그 결과는 동일하므로 CEP 관점으로 분석하기 보다는 알고리즘의 Bias 오차 관점으로 결과를 분석하는 것이 타당하기 때문이다.

표 2, 그림 4, 그림 5의 모의실험 결과를 보면 신호

표 2. 위치추정 Bias 오차 (신호원 1, 2, 측정 오차 없음)
Table 2. Estimation Bias Error(km) (Signal source 1, 2, Without Noise)

Estimation Bias Error (km)		
Brown method[1,8]	signal source 1	3.391
	signal source 2	8.155
Curved LOB based on NLSE[14]	signal source 1	0.479
	signal source 2	0.939

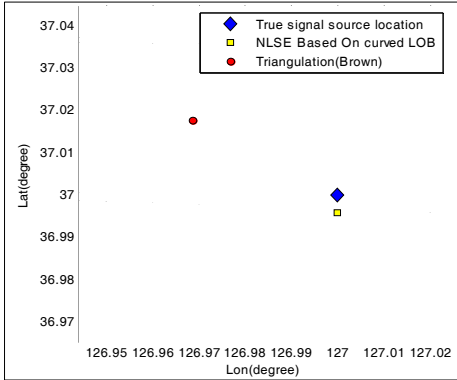


그림 4. 추정 위치 (신호원 1, 측정 오차 없음)
Fig. 4. Estimated Position(Signal source 1, Without Noise)

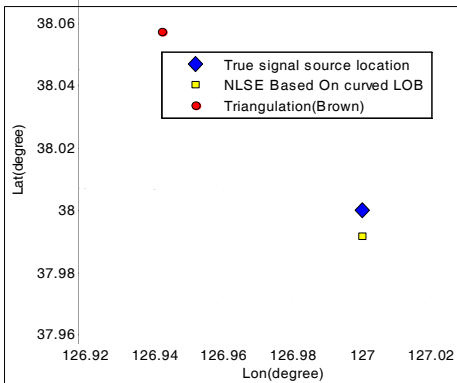


그림 5. 추정 위치 (신호원 2, 측정 오차 없음)
Fig. 5. Estimated Position (Signal source 2, Without Noise)

방향 측정 오차가 없음에도 실제 신호원과 추정 위치의 오차가 발생한다. 기존의 삼각측량법은 좌표계 변환 과정의 오류와 타원체 형태의 지구 곡률을 고려하지 않은 직선 형태의 LOB를 사용하기 때문이며 곡선 형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법은 좌표계 변환 과정의 오류는 없으나 지구를 타원체가 아닌 구체로 가정하고 구체 곡률이 반영된 LOB를 사용하였기 때문이다.

삼각측량법의 경우 신호원과 수신기의 거리가 멀어질수록 위치추정 Bias 오차가 커진다. 이것은 좌표계 변환 오차가 신호원과 수신기간 거리가 멀어질수록 커지고, 직선 형태의 LOB를 사용하여 신호원과 수신기간의 거리가 멀어질수록 위치추정 오차가 증가하기 때문이다.

곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법의 경우도 신호원과 수신기의 거리가 멀어질수록 위치추정 Bias 오차가 커진다. 이것은 좌표계 변환 오차는 없으나 지구를 타원체가 아닌 구체로 가정하고 곡률을 고려하여, 수신기와 신호원간의 거리가 멀어질수록 이러한 오차가 증가하기 때문이다. 그러나 이러한 오차는 기존의 방법에 비해 적음을 알 수 있다.

표 2, 그림 4, 그림 5의 결과를 살펴볼 때, 신호방향 측정 오차가 없는 조건에서 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법이 기존의 삼각측량법에 비해 우수한 위치추정성능을 가짐을 알 수 있다.

3.2 신호방향 측정 오차가 있는 경우

1° RMS(degree 단위)의 신호방향 측정 오차가 있는 조건에서 삼각측량법 기반의 Brown 방법과 곡선 형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법의 모의실험 결과를 실제 신호원의 위치와 추정한 위치간의 거리 및 CEP 반경의 관점으로 그림 6부터 그림 9에 정리하였다.

그림 6부터 그림 9까지의 모의실험 결과를 살펴보면 신호방향 측정 오차에 의해서 두 방법 모두 위치추정성능이 나빠짐을 볼 수 있다.

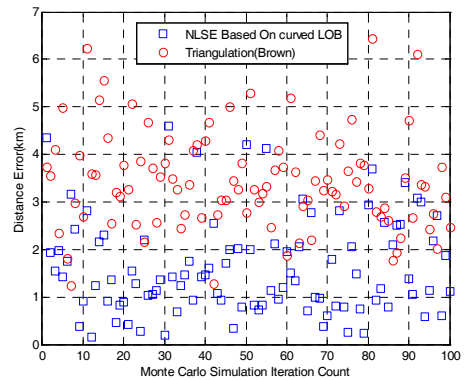


그림 6. 실제 위치와 추정 위치간 거리 (신호원 1, 1° RMS 측정 오차 있음)
Fig. 6. Distance between original position and estimated position (Signal source 1, With 1° RMS Noise)

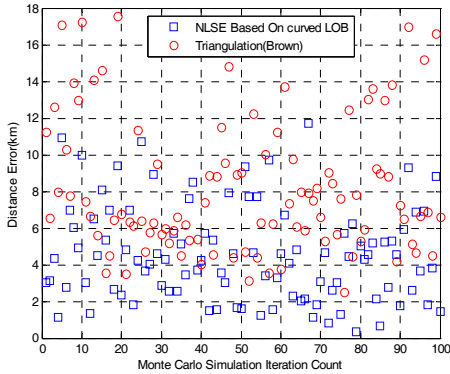


그림 7. 실제 위치와 추정 위치간 거리 (신호원 2, 1° RMS 측정 오차 있음)
 Fig. 7. Distance between original position and estimated position (Signal source 2, With 1° RMS Noise)

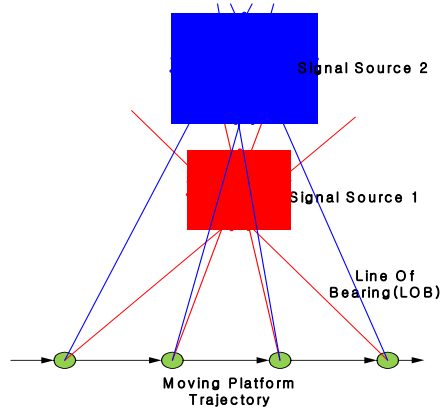


그림 10. 수신기와 신호원의 거리에 따른 CEP 반경 (측정 오차 있음)
 Fig. 10. CEP Radius according to distance between receiver and signal source(with Noise)

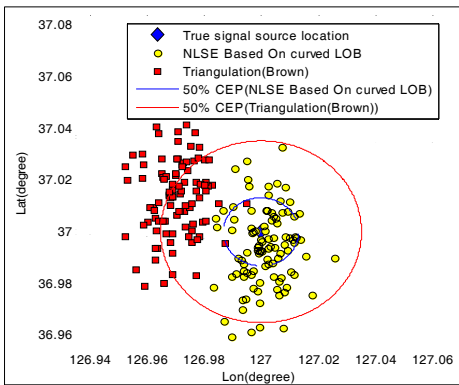


그림 8. 추정 위치 및 CEP 반경(km) (신호원 1, 1° RMS 측정 오차 있음)
 Fig. 8. Estimated Position and CEP Radius (km) (Signal source 1, With 1° RMS Noise)

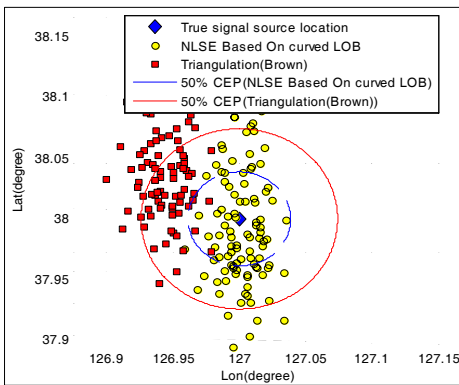


그림 9. 추정 위치 및 CEP 반경(km) (신호원 2, 1° RMS 측정 오차 있음)
 Fig. 9. Estimated Position and CEP Radius (km) (Signal source 2, With 1° RMS Noise)

그리고 그림 10의 설명과 같이 신호방향 측정 정확도가 동일한 조건에서 수신기와 신호원간의 기하학적 배치 거리가 멀어질수록 처음 LOB와 마지막 LOB간에 이루는 각도가 좁아져 CEP 반경이 커진다⁸⁾. 그림 8 및 그림 9를 살펴보면 수신기와 신호원간의 기하학적 배치 거리가 멀어질수록 CEP 반경이 커짐을 볼 수 있다.

실제 위치와 추정 위치간의 거리에 대한 결과(그림 6, 그림 7)와 CEP 반경에 대한 결과(그림 8, 그림 9)를 살펴볼 때, 신호방향 측정 오차가 있는 조건에서도 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법이 기존의 삼각측량법에 비해 우수한 위치추정 성능을 가짐을 알 수 있다.

3.3 위치추정 성능 개선 방법

본 논문은 그림 3의 [Step 4] 과정에서 구체 모델 대신에 세계적으로 사용되는 WGS84 또는 우리나라에 적합한 Bessel 1841의 타원체 모델을 사용함으로써 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법의 위치추정성능 개선하기 위한 방법을 제안한다.

모의실험을 위해 신호방향 측정 오차가 없는 이상적인 신호방향은 WGS84 타원체를 사용하여 MATLAB의 azimuth함수를 이용하여 산출하였고 현재의 추정 위치를 이용하여 신호방향을 산출하는 그림 3의 [Step 4] 과정에서는 WGS84와 Bessel 1841의 타원체 모델을 사용하여 신호방향 정보를 산출하였다. 그리고 측정 오차가 없는 경우, 전자전 분야에서 일반적으로 사용하는 측정 오차인 1° RMS (degree 단위)¹⁵⁾의 측정 오차가 있는 경우, 1° RMS (degree 단

표 3. 위치추정 Bias 오차 (신호원 1, 측정 오차 없음)
Table 3. Estimation Bias Error(km) (Signal source 1, Without Noise)

Signal Source 1, Estimation Bias Error (km)	
Curved LOB based on NLSE[14](Sphere)	0.4790
Proposed Method (WGS84)	0.0
Proposed Method (Bessel 1841)	0.0014

$$T_r = \frac{E_{time}}{S_{time}} \tag{20}$$

위)와의 비교를 위해 상대적으로 측정오차가 적은 0.1° RMS(degree 단위)의 측정 오차가 있는 경우를 가정하고 신호원 1의 위치를 추정하는 모의실험을 수행하였다.

측정오차가 없는 경우는 1회 Simulation을 통해 위치추정 Bias 오차를 살펴봄으로써 위치추정성능을 비교하였으며 측정 오차가 있는 경우는 100회 Monte Carlo Simulation을 수행한 후 실제 신호원과 추정위치간의 거리 및 50% CEP의 반경을 살펴봄으로써 위치추정성능을 비교하였다.

3.3.1 신호방향 측정 오차가 없는 경우

측정오차가 없는 경우에 대한 모의실험 결과는 표 3과 같으며 측정의 오차가 없는 경우, 구체 모델을 사용한 모의실험 결과(표 2)에 비해 정확하게 신호원의 위치를 추정함을 볼 수 있다.

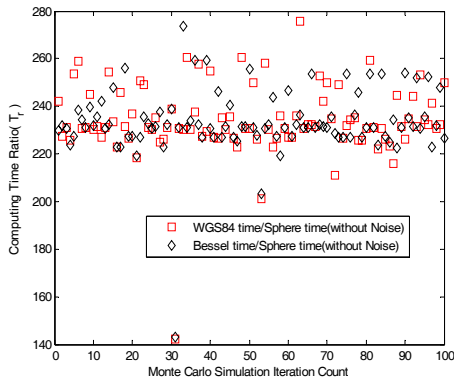


그림 11. 그림 3의 [Step 4] 과정의 연산시간 비율 비교
Fig. 11. Computing time ratio comparison (Step 4 in Fig. 3)

그리고 추정위치에서 신호방향 정보를 산출하는 과정에서의 연산시간 차이를 알아보기 위해 MATLAB의 tic, toc 함수¹⁶⁾를 이용하여 100회 Monte Carlo Simulation을 수행한 후, 구체 모델을 사용한 연산시간(S_{time}) 대비 타원체 모델을 사용한 연산시간(E_{time})의 비율(T_r) 관점으로 그림 11에 정리하였다.

표 3의 결과를 살펴보면 신호방향 측정 오차가 없는 조건에서 그림 3의 [Step 4] 과정에서 구체 모델 대신에 WGS84 또는 Bessel 1841의 타원체를 사용하는 것이 위치추정성능을 개선함을 확인할 수 있다.

그림 3의 [Step 4]의 과정에서 타원체 모델을 사용한 경우 그림 11의 결과와 같이 구체 모델을 사용하는 것에 비해 약 200배 이상의 연산시간이 증가됨을 볼 때, 지구를 타원체로 모델링하고 타원 곡률이 고려된 LOB를 이용하여 NLSE 방법으로 신호원의 위치추정을 수행하는 경우 위치추정 정확도는 개선되나 현재 추정 위치에서 신호방향정보를 산출하는 과정(그림 3의 [Step 4]), 현재 추정 위치에서 Jacobian 행렬을 구하는 과정(그림 3의 [Step 6])에서 연산시간이 증가하는 상충관계(Trade-Off)가 있을 것으로 판단된다.

그러므로 본 논문에서는 타원체 모델 사용에 의한 연산시간 증가를 최소화하면서 추가적인 위치추정 성능개선 하는 방법으로 그림 3의 [Step 4] 과정에서만 타원체 모델을 사용하는 것을 제안한다.

3.3.2 신호방향 측정 오차가 있는 경우

측정오차가 있는 경우에 대한 모의실험 결과는 실제 위치와 추정 위치간의 거리 및 CEP 반경의 관점으로 표 4부터 표 5, 그림 12부터 그림 15에 정리하였다. 표 4, 그림 12 및 그림 13은 0.1° RMS(degree 단위)의 측정 오차가 포함된 실험결과이며, 표 5, 그림 14 및 그림 15는 1° RMS(degree 단위)의 측정 오차가 포함된 실험결과이다.

표 4부터 표 5 및 그림 12부터 그림 15까지의 모의 실험 결과를 살펴보면 신호방향 측정 오차가 있는 경우에도 그림 3의 [Step 4] 과정에서 구체 모델 대신에 WGS84 또는 Bessel 1841의 타원체를 사용함으로써 위치추정성능을 개선시킴을 확인할 수 있다. 그러나 표 5의 CEP 반경을 살펴보면 신호방향 측정 오차가 증가할수록 구체 모델을 사용하는 경우와 타원체 모델을 사용하는 경우의 차이가 약 0.3km에서 약 0.1km로 위치추정성능의 개선 효과가 적어진다. 그 이유는 그림 3의 [Step 4] 과정에서 타원체 모델을 사용하여 성능을 개선시키는 효과보다 신호방향 측정 오차가 증가하여 위치추정성능이 나빠지는 효과가 크기 때문이다.

표 4. CEP 반경 (신호원 1, 측정 오차 0.1° RMS)
Table 4. CEP Radius(km) (Signal source 1, With 0.1° RMS Noise)

Signal Source 1, CEP radius(km)	
Curved LOB based on NLSE[14] (Sphere)	0.4587
Proposed Method (WGS84)	0.1124
Proposed Method (Bessel 1841)	0.1112

표 5. CEP 반경 (신호원 1, 측정 오차 1° RMS)
Table 5. CEP Radius(km) (Signal source 1, With 1° RMS Noise)

Signal Source 1, CEP radius(km)	
Curved LOB based on NLSE[14] (Sphere)	1.2288
Proposed Method (WGS84)	1.1348
Proposed Method (Bessel 1841)	1.1334

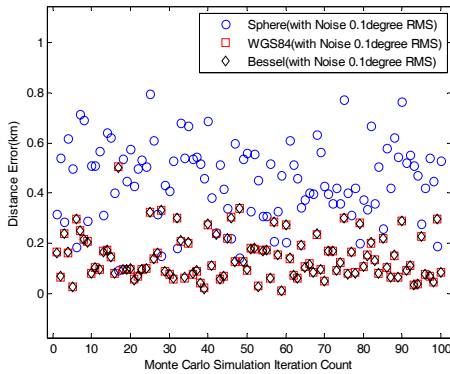


그림 12. 실제 위치와 추정 위치간 거리 (신호원 1, 측정 오차 0.1° RMS)
Fig. 12. Distance between original position and estimated position (Signal source 1, With 0.1° RMS Noise)

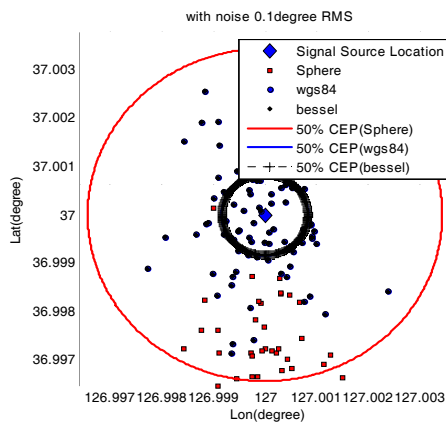


그림 13. 추정 위치 및 CEP 반경(km) (신호원 1, 측정 오차 0.1° RMS)
Fig. 13. Estimated Position and CEP Radius (km) (Signal source 1, With 0.1° RMS Noise)

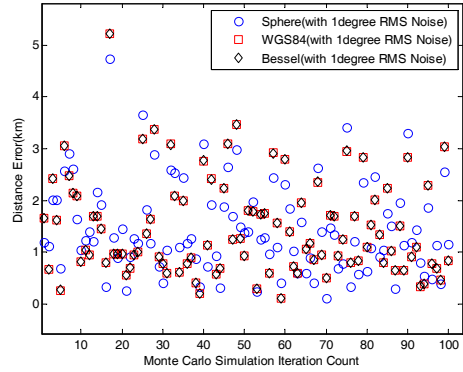


그림 14. 실제 위치와 추정 위치간 거리 (신호원 1, 측정 오차 1° RMS)
Fig. 14. Distance between original position and estimated position (Signal source 1, With 1° RMS Noise)

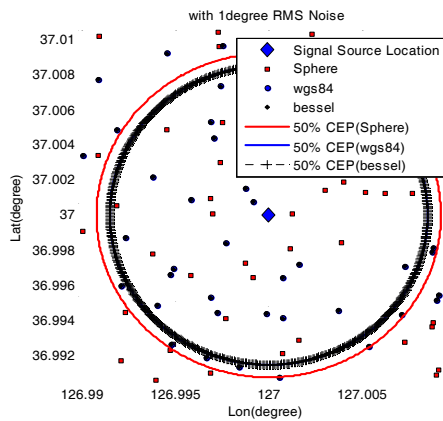


그림 15. 추정 위치 및 CEP 반경(km) (신호원 1, 측정 오차 1° RMS)
Fig. 15. Estimated Position and CEP Radius (km) (Signal source 1, With 1° RMS Noise)

IV. 결론

이동하는 플랫폼에 탑재된 수신기를 이용하여 고정형 신호원의 위치를 추정하기 위해 기존의 삼각측량법을 적용하는 경우에는 수신기와 신호원과의 거리가 멀어질수록 지구의 곡률에 따른 위치추정 오차가 발생하게 된다. 본 논문은 이러한 오차를 최소화하기 위해 지구를 구체로 모델링하고 지구의 곡률이 고려된 곡선형태의 LOB를 이용하는 NLSE 방법을 소개하였다. 그리고 모의실험을 통해 지구 곡률이 고려된 곡선형태의 LOB를 이용한 NLSE 방법이 기존 삼각측량법 기반의 Brown 방법에 비해 위치추정성능이 우수함을 확인하였다.

본 논문은 지구 곡률이 고려된 곡선형태의 LOB를

이용하는 NLSE 방법의 위치추정성능을 추가적으로 개선하기 위해 현재 추정 위치에서 신호방향정보를 산출하는 과정(그림 3의 [Step 4])에서만 타원체 모델을 사용하는 방법을 제안하였고 모의실험을 통해 연산시간이 증가하는 반면에 위치추정 성능이 개선됨을 확인하였다.

표 4 및 표 5의 모의실험 결과를 볼 때 신호방향 측정 정확도가 나빠질수록 위치추정성능의 개선효과가 약해지므로 신호방향 측정 오차를 최소화시키는 연구가 필요하며, CEP 반경이 100m에서 300m정도 개선되는 것을 고려할 때 제안한 알고리즘을 활용하면 적의 신호원을 무력화시키기 위해 필요한 소요 무기를 감소시키는 효과가 있을 것으로 판단된다.

그리고 지구를 구체로 모델링하는 대신 타원체로 모델링하는 경우에 위치추정성능 개선 정도 및 연산시간 증가 정도에 대한 상세한 분석을 위해서는 추가적인 연구가 필요하며 추가적으로 실제 측정된 신호방향정보를 이용하여 제안한 위치추정 방법의 성능을 분석하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] R. G. Stansfield, "Statistical Theory of DF Fixing," *J. IEE*, vol. 94, no. 15, pp. 762-770, Mar. 1947.
- [2] L. R. Paradowski, "Microwave emitter position location: present and future," in *Proc. Microwaves and Radar(MIKON '98)*, vol. 4, pp. 97-116, Krakow, Poland, May 1998.
- [3] D.-G. Kim, Y.-H Kim, J.-W. Han, K.-H. Song, and H.-N. Kim, "Emitter geolocation based on TDOA/FDOA measurements and its analysis," *J. KICS*, vol. 38C, no. 9, pp. 746-755, Sept. 2013.
- [4] J. Lee, M. Kim, S. Cho, Y. Jin, and D. Lee, "Performance comparison of LOB-based emitter localization algorithms," *J. KIMST*, vol. 12, no. 4, pp. 437-445, Aug. 2009.
- [5] J. Lee, M. Kim, S. Cho, and S. Kim, "Performance of LOB-based emitter localization using linear LSE algorithms," *J. KIMST*, vol. 13, no. 1, pp. 36-40, Feb. 2010.
- [6] J. Jeon and K. Cho, "A study on map projection and distortion," *J. Korean Soc. Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, vol. 16, no. 2, pp. 327-335, Dec. 1998.
- [7] Y. Song, J. Heo, H. Sohn, and W. Kim, "Analysis of map projection distortion for UTM-K," *J. Korean Soc. Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, vol. 24, no. 4, pp. 313-318, Oct. 2006.
- [8] Richard A. Poisel, *Electronic Warfare Target Location Methods*, Artech House, 2005.
- [9] R. G. Wiley, *ELINT: The Interception and Analysis of Radar Signals*, Artech House, 2006.
- [10] A. Kawalec, M. A. Kojdecki, and B. Wajszczyk, "Least-squares algorithm for determining emitter position from passive radar bearings," *2008 Int. Radar Symp.*, pp. 1-4, Wroclaw, Poland, May 2008.
- [11] J. Jeon, S. Kim, D. Lee, and S. Lee, "Performance comparison of bearing-only position location algorithms," *11th Conf. Commun. Electron.*, pp. 124-129, Sept. 2007.
- [12] B. Son, S. Jeong, and J. Lee, "AOA based localization on LSE algorithm," in *Proc. KICS ICC 2014*, pp. 800-801, Jeju, Korea, Jun. 2014.
- [13] B. Son, S. Jeong, and J. Lee, "Performance analysis LSE based localization using CEP, EEP," in *Proc. KICS ICC 2014*, pp. 802-803, Jeju, Korea, Jun. 2014.
- [14] S. Kim, D. Lee, K. Lee, and K. Lee, *Signal source location determine method using earth radius and signal directional information*, Korea Patent 10-1509569, 2015.
- [15] *Calculate distance, bearing and more between latitude and longitude points*, Retrieved Aug., 26, 2016, from <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- [16] *MathWorks Korea*, Retrieved Aug., 26, 2016, from <http://kr.mathworks.com/help/index.html>
- [17] *Rotation Matrix*, Retrieved Aug., 26, 2016, from https://en.wikipedia.org/wiki/Rotation_matrix

박 병 구 (Byungkoo Park)



2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 학사
2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 석사
2005년 2월~현재: 국방과학연구소
2016년 3월~현재: 충남대학교

전자전파정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 전자전, 신호처리

안 재 민 (Jaemin Ahn)

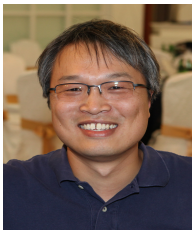


1987년: 서울대학교 전자공학과 졸업
1989년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1994년~1999년: 삼성전자

1999년~현재: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 교수

<관심분야> 차세대 이동통신 물리계층 및 Radio resource management

김 상 원 (Sangwon Kim)



1995년 2월: 경북대학교 컴퓨터공학과 학사
1997년 2월: 경북대학교 컴퓨터공학과 석사
2003년 3월~2007년 2월: 한국과학기술원 전산학 박사
1997년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

<관심분야> 전자전, 신호처리

김 영 민 (Youngmin Kim)



2007년 2월: 연세대학교 컴퓨터과학과 학사
2009년 2월: 연세대학교 컴퓨터과학과 석사
2009년 3월~2012년 9월: LG 전자 주임연구원
2012년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

<관심분야> 전자전, 레이더 신호처리