

신호 보간을 이용한 멀티스태틱 시스템의 위치 추정 성능 분석

김호재, 박도현, 권순영, 박지훈, 김형남[Ⓢ]
부산대학교

hnkim@pusan.ac.kr[Ⓢ]

Analysis of Position Estimation Performance of a Multistatic System Using Signal Interpolation

Ho Jae Kim, Do-Hyun Park, Soon-Young Kwon, Ji Hun Park and Hyoung-Nam Kim[Ⓢ]
Pusan National Univ.

요 약

본 논문은 신호 보간을 이용하여 바이스태틱 시스템의 거리 분해능에 대한 분석을 진행하고 이를 통하여 멀티스태틱 시스템의 위치 추정 성능 향상 방법을 제안한다. 20MHz 대역의 WLAN(wireless LAN) 신호를 사용할 경우 위치 추정 오차가 약 11.6m 발생한 것을 확인하였으며, 동일한 신호를 보간 계수가 4 인 선형 보간을 진행한 경우 위치 추정 오차가 약 2.7m 까지 줄어든 것을 확인하였다. 신호 보간 기법은 대역폭을 넓힐 수 없는 수동형 시스템이나 하드웨어의 한계로 넓은 대역폭을 사용하지 못하는 경우 유용한 대안이 될 수 있다.

I. 서 론

멀티스태틱(Multistatic) 시스템은 그림 1 과 같이 바이스태틱(Bistatic) 시스템을 여러 쌍 사용하는 시스템이다. 바이스태틱 시스템은 모노스태틱(Monostatic) 시스템과 달리 송신기와 수신기가 분리된 시스템으로, 송신 신호인 기준 신호와 개체에 반사된 신호의 시간차(TDOA, Time Difference of Arrival) 및 도플러 차이(FDOA, Frequency Difference of Arrival)를 이용하여 개체를 탐지하는 시스템이다. 바이스태틱 시스템으로부터 수집된 TDOA 및 FDOA 를 이용하여 개체의 위치 및 속도 추정이 가능하다^[1, 2].

바이스태틱 시스템은 일반적으로 FM(frequency modulation), DTV(digital television), WLAN(wireless LAN) 등의 신호를 수동 레이더 및 센서의 신호원으로 사용한다. 신호 환경이 제공되지 못하는 경우는 직접 신호원을 생성하여 사용 가능하다. 사용하는 신호원의 대역폭에 따라 바이스태틱 시스템의 거리 분해능(Range Resolution)이 달라지며, 거리 분해능은 단일 개체 및 다중 개체의 탐지 성능에 영향을 미친다. 이러한 결과는 최종적으로 개체의 위치 추정 성능까지도 영향을 미친다. 이에 본 논문은 신호원의 대역폭이 고정된 경우 수신된 신호의 보간을 이용하여 거리 분해능 향상 방법을 제안하고 멀티스태틱 시스템의 개체 위치 추정 성능을 분석한다.

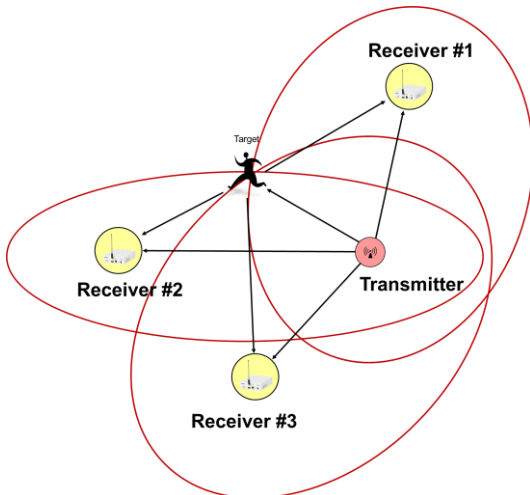


그림 1. 멀티스태틱 시스템 구조

II. 개체 탐지를 위한 모호 함수 및 신호 보간

개체 탐지에 사용되는 모호 함수는 TDOA 와 FDOA 에 대한 수신 신호의 왜곡을 보여주는 함수이며, 수식은 다음과 같다^[3].

$$C(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{ref}(t) s_{surv}(t - \tau)^* e^{-j2\pi f_d t} dt \quad (1)$$

여기서 s_{ref} 는 기준 신호, s_{surv} 는 개체 반사 신호, τ 는 TDOA, f_d 는 FDOA 이다. 이와 같이 탐지된 멀티스태틱의 TDOA 값들은 개체의 위치 추정에, FDOA 값들은 개체의 속도 추정에 사용된다. 본 논문에서는 TDOA 값들을 이용하여 표적의 위치를 추정한다.

개체의 위치 추정에는 바이스태틱 거리 정보를 위치 추정에 사용하므로, 모호 함수를 통하여 획득한 τ 를 이용하여 송신기와 i 번째 수신기로부터 발생하는 개체의 바이스태틱 거리 R_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = R_T + R_{Ri} = c\tau_i + L_i \quad (2)$$

여기서 c 는 빛의 속도, R_T 는 송신기와 개체 사이의 거리, R_{Ri} 는 개체와 i 번째 수신기 사이의 거리, L_i 는 송신기와 i 번째 수신기 사이의 거리이다.

앞서 획득한 바이스태틱 거리 정보 R_i 의 정확도는 신호원의 대역폭에 영향을 받는다. 예를 들어 20MHz 의 신호원을 사용할 경우 바이스태틱 거리 분해능은 약 7.5m 이며, 이는 최대 7.5m 의 오차가 발생할을 의미한다. 거리 분해능 향상을 위해 가장 간단한 방법은 신호원의 대역폭을 넓히는 방법이 있다. 그러나 수동형으로 사용하여 신호원의 대역폭 변경이 불가능하거나, 사용하는 시스템 하드웨어의 한계로 인하여 대역폭을 넓힐 수 없는 경우에도 신호 보간을 이용하여 거리 분해능을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 선형 보간을 사용하였으며, 선형 보간의 경우 그림 두 점 사이의 직선을 그어 일정한 비로 직선 위에 새로운 점을 생성하는 기법이다. s_{ref}, s_{surv} 신호에 선형 보간을 적용하면 동일한 수집 시간 내에 데이터가 증가하므로 신호원의 대역폭이 넓어지는 효과를 볼 수 있다. 이로 인하여 바이스태틱 거리 분해능이 향상되며, 바이스태틱 거리 오차가 줄어든다. 예를 들어 보간 계수 4 를 이용할 경우, 80MHz 대역폭을 가지는 신호원을 사용하는 것과 동일한 효과를 볼 수 있으며, 이 경우 바이스태틱 거리 분해능은 약 1.875m 이 된다.

III. 멀티스태틱 시스템의 위치 추정 기법^[3]

송신기의 위치 $\mathbf{x}_T = [0, 0, 0](m)$, i 번째 수신기 위치 $\mathbf{x}_{Ri} = [x_i, y_i, z_i](m)$, 개체의 위치 $\mathbf{x}_{tg} = [x_{tg}, y_{tg}, z_{tg}](m)$ 로 정의할 경우 식 (2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = \sqrt{x_{tg}^2 + y_{tg}^2 + z_{tg}^2} + \sqrt{(x_{tg} - x_i)^2 + (y_{tg} - y_i)^2 + (z_{tg} - z_i)^2}. \quad (3)$$

앞서 정의한 식 (3)을 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$x_i x_{tg} + y_i y_{tg} + z_i z_{tg} = \frac{1}{2}(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - R_i^2) + R_i R_T. \quad (4)$$

이후 3 대의 수신기를 사용하는 경우의 수신기 위치 벡터 \mathbf{S} , 추가 벡터 \mathbf{g} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}, \mathbf{g} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - R_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - R_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - R_3^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

이후 개체 위치 추정값의 norm 의 제곱은 R_T^2 과 동일함을 이용하여 R_T 의 추정치 \hat{R}_T 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{R}_T = \frac{-\mathbf{a}^T \mathbf{b} + \sqrt{(\mathbf{a}^T \mathbf{b})^2 - (\mathbf{b}^T \mathbf{b} - 1) \mathbf{a}^T \mathbf{a}}}{(\mathbf{b}^T \mathbf{b} - 1)}. \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{a} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{g}$, $\mathbf{b} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{r}$ 이며, $\mathbf{r} = [R_1 \ R_2 \ R_3]^T$ 은 바이스태틱 거리 벡터를 나타낸다. 마지막으로 식 (4)에 추정치 \hat{R}_T 를 대입한 후, 3 대의 수신기로부터 발생하는 정보를 이용하여 연립방정식을 전개하면 개체의 위치 추정 결과값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{tg} = \mathbf{a} + \mathbf{b} \hat{R}_T \quad (7)$$

IV. 모의실험 결과

모의실험에서는 송신기의 위치 $\mathbf{x}_T = [0, 0, 0](m)$, 수신기 위치 $\mathbf{x}_{R1} = [-13, -2, -0.5](m)$, $\mathbf{x}_{R2} = [2, -2, -0.5](m)$, $\mathbf{x}_{R3} = [2, 8, -0.5](m)$ 개체의 위치 $\mathbf{x}_{tg} = [-18, 10, -0.5](m)$ 로 할당하였다. 개체의 속도는 $\mathbf{v}_{tg} = [1.5, 0.2, 0](m/s)$ 로 설정하였다. 신호원은 IEEE 802.11a 의사 WLAN 신호를 사용하였으며, 대역폭은 20 MHz 로 설정하였다. 신호 수집 시간은 0.2 초로 고정하였다. 신호 보간 방법은 선형 보간법을 사용하였으며, 보간 계수는 4 를 사용하였다.

그림 2 는 보간을 하지 않은 신호의 위치 추정 결과이며, 평균 오차는 약 11.6m 정도 발생하였다. 20 MHz 의 경우 바이스태틱 거리 분해능이 약 7.5m 이며, 개체가 움직이더라도 탐지된 바이스태틱 거리 결과가 동일한 위치에 표시되는 것을 확인하였다.

그림 3 은 보간 계수가 4 인 선형 보간을 이용하여 생성한 신호의 위치 추정 결과이며, 평균 오차는 약 2.7m 정도 발생하였다. 이 경우 바이스태틱 거리 분해능이 약 1.875m 이며, 더욱 정밀한 위치 추정 결과를 획득하는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 신호원의 대역폭이 고정된 경우 선형 보간을 이용하여 멀티스태틱 시스템의 위치 추정 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 선형 보간을 이용하여 모호 함수에서 획득한 바이스태틱 거리 정보의 분해능을

향상시켜 위치 추정 오차가 줄어드는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 활용하면 수동형 멀티스태틱 시스템의 성능을 향상시킬 수 있으며, 능동형 시스템의 경우에도 하드웨어의 한계로 인하여 넓은 대역폭을 사용할 수 없는 상황에서 유용할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1060025).

참고 문헌

- [1] 박근호, 손소영, 김형남, "FM 방송 기반 수동형 레이더 구현 및 표적 탐지 결과 분석," *한국통신학회논문지*, vol. 44, no. 6, pp. 1201-1209, 2019년 6월.
- [2] N. J. Wills and H. D. Griffiths, *Advances in Bistatic Radar*, SciTech Inc., 2007
- [3] 손소영, 박근호, 안준일, 송규하, 김형남, "FM 기반 PCL 시스템에서 표적탐지 성능 개선을 위한 바이스태틱 거리 부엽 억제 기법," *한국통신학회논문지*, vol. 44, no. 6, pp. 1128-1139, 2019년 6월.
- [4] M. Malanowski "Algorithm for Target Tracking Using Passive Radar," *INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*, VOL. 58, NO. 4, PP. 345-350, Nov. 2012

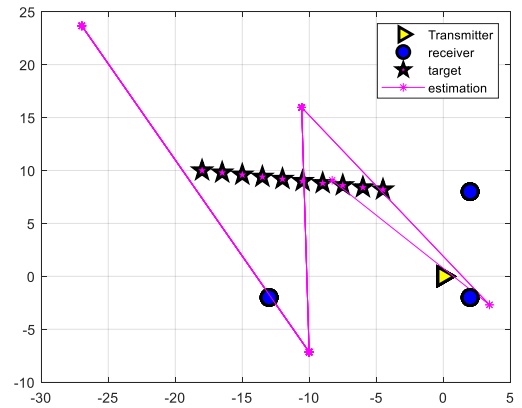


그림 2. 보간하지 않은 신호의 위치 추정 결과

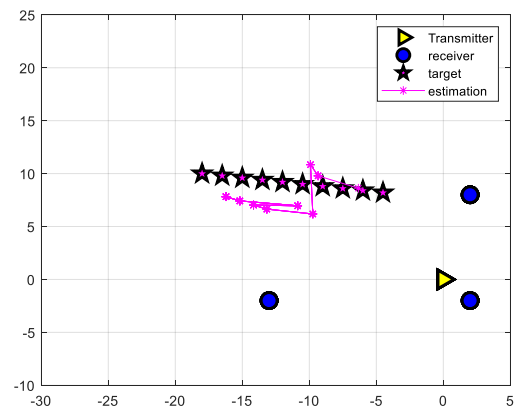


그림 3. 선형 보간을 적용한 신호의 위치 추정 결과 - 보간 계수:4