

통신 신호기반 TDOA/FDOA 정보 추출의 목표성능을 위한 최소수집시간 분석

김동규, 박진오*, 이문석*, 박영미**, 김형남

부산대학교, *LIG Nex1, **국방과학연구소

hnkim@pusan.ac.kr[©]

Analysis on the Minimum Required Time of TDOA/FDOA Extraction for Target Performance Based on Communication Signals

Dong-Gyu Kim, Jin Oh Park*, Moon Seok Lee*, Young Mi Park**, Hyoung-Nam Kim[©]

Pusan National University, *LIG Nex1, **Agency for Defense Development

요약

TDOA(time difference of arrival) 및 FDOA(frequency difference of arrival)를 이용한 위치 추정 방법은 최근 전자전 시스템 분야의 핵심 주제로서 이에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. TDOA/FDOA 위치 추정 시스템은 수신신호로부터 TDOA와 FDOA 정보를 획득하는 정보 추출 단계와 추출된 TDOA/FDOA 추정값을 사용하여 비협조적 신호원의 위치를 추정하는 단계로 나뉜다. 전자전 상황에서 위치추정은 수신단으로부터 수백 km 이격된 신호원에 대한 추정 오차가 이격대비 1% 이내의 값이 되는 것을 목표로 한다. 그러므로 이에 대응되는 추출 단계의 목표성능을 만족시키도록 시스템을 설계하여야 한다. 이 때, 수신신호의 정보가 전무한 신호 환경 및 하드웨어의 제한된 신호대잡음비 특성으로 인하여 수집시간이 가장 중요한 변수로 작용하게 된다. 본 논문에서는 CRLB(Cramer-Rao lower bound)를 이용하여 정보 추출 단계의 목표 성능을 만족하기 위해 필요한 최소의 신호 수집시간을 분석하고 그 결과를 제시한다.

I. 서론

최근 전자전 시스템에서 신호원의 위치추정 방법은 기존의 도래각(angle of arrival) 정보를 이용한 방법에 비해 정확도가 높은 TDOA(time difference of arrival) 및 FDOA(frequency difference of arrival)를 이용한 위치추정 방법에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1][2]. TDOA는 비협조적 신호원으로부터 방사되는 신호가 두 수신단에 도착하는 시간의 차이를 의미하며 FDOA는 도플러 주파수로부터 발생하는 두 수신단에서의 주파수 차이를 의미한다. TDOA와 FDOA를 이용한 위치 추정은 원 수신 신호로부터 TDOA 및 FDOA 정보를 추출하는 단계와 추출된 TDOA와 FDOA를 이용하여 신호원의 위치를 추정하는 단계로 구성되며, 각 단계별로 다양한 알고리즘이 제안되었다. 따라서 정밀한 위치 추정을 위해서는 TDOA/FDOA 정보 추출 단계에서부터 정확한 추정 성능이 요구된다.

전자전에서 위치추정은 수신단으로부터 이격 거리가 수백 km에 이르는 비협조적 신호원의 위치를 추정하는 것이 요구되며 이격대비 거리 오차가 1% 이내가 되는 것을 목표로 한다. 따라서 이를 만족시키기 위해서는 추출 단계에서부터 추정 정보의 정확도가 높아야 하고, 수치적으로는 TDOA 추출 오차는 약 10 ns, FDOA 추출 오차는 약 0.1 Hz의 목표성능을 만족시키는 것이 요구된다[3]. 이 때, 수신신호의 정보가 전무한 전자전 상황 및 제한적인 하드웨어 성능으로 인해 고정된 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio; SNR) 환경에서는 설계자가 설정할 수 있는 변수가 제한적이게 된다. 이러한 제한된 변수는 CRLB(Cramer-Rao lower bound)를 이용하여 이론적으로 유도된 식으로부터 확인할 수 있으며, 수집시간이 가장 중요한 변수로 작용한다. 따라서 본 논문에서는 고정된 SNR 환경에서 목표성능을 만족하기 위한 수집시간을 CRLB를 이용하여 분석한다.

II. 본론

비협조적 신호원으로부터 방사되는 신호 $s(t)$ 는 두 수신단에서 수집되며 각 수신단에서 수집된 신호는 식 (1) 및 (2)와 같이 정의된다.

$$r_1(t) = a_1 s(t - \tau_1) e^{j2\pi\nu_1(t - \tau_1)} + n_1(t) \quad (1)$$

$$r_2(t) = a_2 s(t - \tau_2) e^{j2\pi\nu_2(t - \tau_2)} + n_2(t) \quad (2)$$

여기서 a_1 과 a_2 는 전파 감쇠, τ_1 과 τ_2 는 전파시점으로부터 각 수신단에 도착한 시간, ν_1 과 ν_2 는 각 수신단에서의 도플러 주파수이며, $n_1(t)$ 와 $n_2(t)$ 는 백색 가우시안 잡음으로 가정한다.

TDOA/FDOA의 추출 성능은 CRLB를 이용하여 이론적으로 분석할 수 있으며, 이를 식 (1) 및 (2)에 적용하면 TDOA의 CRLB σ_τ^2 과 FDOA의 CRLB σ_ν^2 은 식 (3) 및 식 (4)와 같이 유도된다[4].

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{4\pi^2 B T \gamma \beta^2}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |S(f)| df}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)| df}} \quad (3)$$

$$\sigma_\nu^2 = \frac{1}{4\pi^2 B T \gamma T_e^2}, \quad T_e = \sqrt{\frac{\int_0^T t^2 |s(t)| dt}{\int_0^T |s(t)| dt}} \quad (4)$$

여기서 B 는 잡음 대역폭, T 는 수집시간, β 는 RMS(root mean square) 대역폭, T_e 는 RMS 수집 시간이며 γ 는 effective SNR로 식 (5)와 같다.

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} + \frac{1}{\gamma_1 \gamma_2} \right] \quad (5)$$

여기서 γ_1 과 γ_2 는 수신단 1 및 수신단 2에서의 SNR이다[4].

식 (3)으로부터 TDOA의 추출 성능은 수신기의 잡음 대역폭, 수집시간, SNR, 신호의 RMS 대역폭에 반비례하는 것을 알 수 있으며, 잡음 대역폭은 SNR에 종속적인 변수이며, RMS 대역폭은 방사되는 비협조적 신호원에 따라 다양하게 설정되므로 수신기에서 설정할 수 없는 변수이다. 따라서 SNR이 고정된 경우 수집시간이 고려 가능한 가장 중요한 변수가 된다. TDOA와 유사한 방법으로 식 (4)로부터 FDOA 추출 성능에 관여하는 주요 변수를 알 수 있으며, FDOA 역시 수집시간이 가장 중요한 변수인 것을 확인할 수 있다.

그림 1 및 그림 2는 SNR이 15 dB일 때, TDOA의 CRLB 및 FDOA의 CRLB를 도기한 것으로 통신 신호의 변조방식은 4PSK, 8PSK, 32QAM 및 64QAM을 사용하였다. 이 때, roll-off factor는 0인 이상적인 shaping filter를 적용하였으며, 심볼길이는 25 us로 설정하였다. 그림 1 및 그림 2로부터 모든 변조방식의 성능이 동일한 것을 확인할 수 있으며 FDOA 성능은 수집시간이 약 5ms 이상이면 0.1 Hz를 충분히 만족한다. 하지만 TDOA의 성능은 식 (3)과 같이 신호의 대역폭에 반비례하므로 상대적으로 대역폭이 좁은 특성을 가지는 통신신호가 10 ns의 목표성능을 만족시키기 위해서는 약 1.1초 이상 신호를 수집해야 하는 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 통신 신호의 TDOA/FDOA 정보를 이용한 위치추정 시스템에서 TDOA 및 FDOA 정보를 추출할 때, 설계자가 고려할 수 있는 주요 변수인 수집시간을 CRLB를 통하여 확인하고 SNR이 고정되었을 때, 목표성능을 만족시키는 수집시간을 분석하였다. 본 분석 내용은 향후 TDOA/FDOA 정보 추출 알고리즘을 설계하는 데 유용할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Darko Musicki and Wolfgang Koch, "Geolocating using TDOA and FDOA Measurements," In Proc. of 11th Int. Conf. on Inf. Fusion, pp. 1-8, Cologne, Germany, Jun-July 2008.

[2] Y.-C. Li, D. Oh, J.-H. Kim, J.-W. Chong and J.-D. Kim, "A novel subspace-based joint TDOA and FDOA estimation using chirp signals for mobile multipath environment," International Symposium on Telecommunications (BIHTEL), Sarajevo, pp. 1-5, Oct. 2012.

[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. 746-756, Sep. 2013.

[4] S. Stein, "Algorithm for Ambiguity Function Processing," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., vol. ASSP-29, no. 3, pp. 588-599, Aug. 1993.

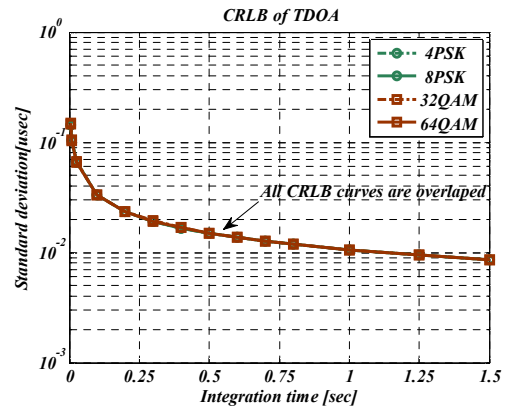


그림 1. 수집시간 대비 TDOA의 CRLB.

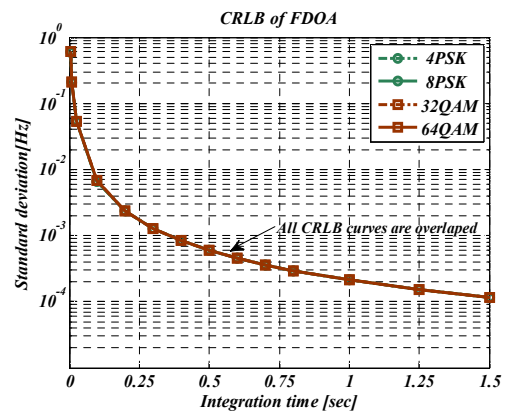


그림 2. 수집시간 대비 FDOA의 CRLB.