

# 펄스 신호 제원에 따른 FDOA 추정 성능 분석

박근호, 김동규, \*박진오, \*\*곽현규, 김형남<sup>Ⓞ</sup>  
 부산대학교, \*LIG Nex1, \*\*국방과학연구소  
 e-mail : <sup>Ⓞ</sup>hnkim@pusan.ac.kr

## Performance Analysis on the FDOA Estimation According to Parameters of Pulsed Signals

Geun-Ho Park, Dong-Gyu Kim, \*Jin-Oh Park, \*\*Kwak Hyun-Gyu,  
 Hyoung-Nam Kim<sup>Ⓞ</sup>

Pusan National University, \*LIG Nex1, \*\*Agency of Defense Development

### Abstract

비협조적 신호원의 위치추정을 위해 다수의 수신단에서 획득한 신호의 TDOA (time difference of arrival)와 FDOA (frequency difference of arrival)를 활용하는 방법이 활발히 연구되고 있다. 전자전 환경에서 획득 가능한 신호 중 하나인 펄스열 (pulse train) 신호는 통신신호 및 CW (continuous wave) 레이더에 비해 짧은 수집시간으로 인해 FDOA 추정오차가 큰 특징을 가진다. 본 논문에서는 TDOA 및 FDOA 추정 알고리즘인 Stein's fine-mode algorithm을 이용하여 펄스 신호의 제원에 따른 FDOA 추정 성능을 도출하고, FDOA 추정이 가능한 펄스 제원의 기준에 대해 분석한다.

### I. 서론

최근 전자전 분야에서 비협조적 신호원의 위치추정을 위해 다수의 수신단에서 획득한 신호의 TDOA (time difference of arrival)와 FDOA (frequency difference of arrival)를 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1][2]. TDOA는 두 수신단에서 획득한 신호의 도착시간차이를 의미하며, FDOA는 두 수신단에서의 주파수 차이를 나타낸다.

신호원의 위치추정은 각 수신단에서 획득한 신호로부터 TDOA와 FDOA를 추정하는 정보추출 단계와 TDOA 및 FDOA를 이용한 위치추정 단계로 나누어진다. TDOA와 FDOA 추정오차에 따라 신호원의 위치 추정 정확도가 결정되므로, 전자전 환경에서 획득 가능한 신호의 TDOA 및 FDOA 추정 성능 분석이 필수

적으로 요구된다.

펄스 신호는 전자전 환경에서 획득 가능한 레이더 신호의 하나로서, 펄스 신호의 짧은 수집 시간으로 인해 통신신호 및 CW 레이더 신호에 비해 FDOA 추정 정확도를 확보하기 어려운 특징을 가진다. 본 논문에서는 무변조 펄스 신호에 대한 FDOA 추정 성능의 기준을 확보하기 위해, CAF (cross ambiguity function) 알고리즘의 연산량 감소 기법인 Stein's fine-mode algorithm을 이용하여 펄스폭, PRI, 펄스 개수에 따른 FDOA 추정 성능을 도출하고, FDOA 추정이 가능한 펄스 제원의 기준을 모의실험을 통해 제시한다.

### II. Stein's fine-mode algorithm을 이용한 펄스 신호의 FDOA 추정

비협조적 신호원으로부터 송신된 신호  $s(t)$ 와  $i$ 번째 수신단에서 수신한 신호  $r_i(t)$ 는 식 (1)과 식 (2)로 정의할 수 있다.

$$s(t) = e^{j2\pi f_c t} \sum_{k=0}^{K-1} p(t - kT_p) = e^{j2\pi f_c t} p_K(t), \quad (1)$$

$$r_i(t) = s\left(\left[1 - \frac{v_i}{c}\right]t - \tau_i\right) = e^{j2\pi f_c(t - \tau_i)} e^{-j2\pi f_c \frac{v_i}{c}} p_K\left(\left[1 - \frac{v_i}{c}\right]t - \tau_i\right). \quad (2)$$

여기서,  $p(t)$ 는  $T$ 의 펄스폭을 가지는 단일 펄스,  $p_K(t)$ 는  $K$ 개의 펄스가  $T_p$ 의 PRI (pulse repetition interval) 로 배치된 펄스열을 나타내며,  $f_c$ 는 반송파

주파수,  $\tau_i$ 와  $\nu_i$ 는 각각  $i$ 번째 수신단에서의 TOA (time of arrival)와 시선속도를 의미한다.

TDOA  $\tau_d$ 와 FDOA  $\nu_d$ 는 각 수신 신호의 시간 지연 차이와 주파수 차이를 통해 유도할 수 있으며, 이를 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\tau_d = \tau_1 - \tau_2, \quad (3)$$

$$\nu_d = \nu_1 - \nu_2 = \frac{f_c}{c}(\nu_1 - \nu_2). \quad (4)$$

Stein's fine-mode algorithm [3]은  $\tau_d$ 와  $\nu_d$ 를 추정하기 위한 cross ambiguity function (CAF)의 연산량 감소 기법으로, 각 수신 신호의 시간 지연과 주파수 이동에 대한 correlation이 최대가 되는 지점으로부터 TDOA와 FDOA를 추정한다. Stein's fine-mode algorithm으로부터 정의되는 CAF  $A(\tau, \nu)$ 는 식 (5)와 식 (6)으로 정의할 수 있다.

$$A(\tau, \nu) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{L-1} b_\tau(kL+i) \exp(-j2\pi \frac{k\nu}{N}), \quad (5)$$

$$b_\tau(n) = r_1(n)r_2^*(n+\tau). \quad (6)$$

여기서,  $L$ 은 decimation factor,  $N$ 은 주파수 빈 (frequency bin)의 개수를 의미한다. TDOA와 FDOA는  $|A(\tau, \nu)|$ 의 최대값이 나타나는 위치로부터 추정할 수 있으며, 이를 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\{\tau_d, \nu_d\} = \arg \max_{\tau, \nu} |A(\tau, \nu)|. \quad (7)$$

### III. 모의실험 결과

본 논문에서는 비협조적 신호원이 방사하는 무변조 펄스 신호의 제원에 따른 Stein's fine-mode algorithm의 FDOA 추정 성능을 분석하였다. 펄스 신호는 펄스 개수  $K=10$ , PRI  $T_p=2\text{ms}$ , 펄스폭  $T=50\mu\text{s}$ 의 제원을 기준으로 생성되었으며, 각 제원의 변화에 따른 FDOA 추정 성능을 그림 1, 그림 2, 그림 3에 나타내었다. 펄스 신호가 주파수 대역에서 광대역 신호의 형태를 나타내기 때문에 일정 SNR 이상에서 급격히 추정오차가 감소하는 형태를 나타내었으며, 펄스 개수와 펄스폭이 증가함에 따라 추정오차가 급격히 줄어드는 SNR 구간이 감소하는 경향을 보였다.

### IV. 결론

본 논문에서는 펄스 신호의 제원에 따른 FDOA 추

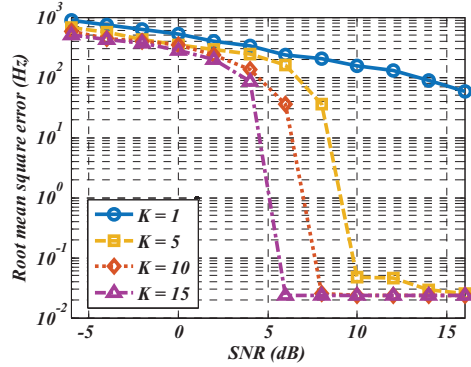


그림 1. 펄스 개수에 따른 FDOA 추정 성능

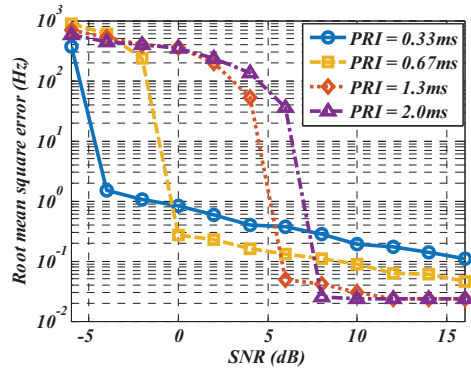


그림 2. PRI에 따른 FDOA 추정 성능

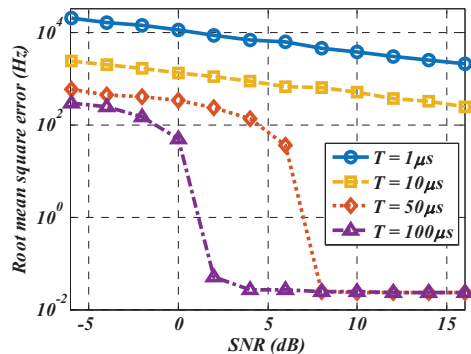


그림 3. 펄스폭에 따른 FDOA 추정 성능

정 성능을 Stein's fine-mode algorithm을 이용하여 분석하였다. 펄스폭, 펄스 개수, PRI가 증가함에 따라 FDOA 추정오차가 감소하는 경향을 나타냈으나, 펄스폭이  $10\mu\text{s}$  이하 혹은 펄스 개수가 1개인 경우에는 SNR 16 dB에서 FDOA 추정오차가 100 Hz 이상으로 높게 나타났다. Stein's fine-mode algorithm은 협대역 수신 신호 모델을 기준으로 하는 CAF 기반의 TDOA 및 FDOA 추정 알고리즘이므로, 펄스 신호의 FDOA 추정을 위해서는 펄스 신호의 광대역 특성에 적합하고 다양한 변조 방식에 강건한 알고리즘 개발이 요구된다.

## 참고문헌

- [1] 김동규, 박진오, 이문석, 박영미, 김형남, “통신 신호에서 TDOA/FDOA 정보 추출을 위한 2-단계 전역 최적화 알고리즘,” *전자공학회논문지*, vol. 52, no.4, pp. 649-657, 2015년 4월.
- [2] A. Yeredor, and E. Angle, “Joint TDOA and FDOA estimation: a conditional bound and its use for optimally weighted localization,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, no. 4, pp. 1612-1623, Apr. 2011.
- [3] S. Stein, “Algorithms for Ambiguity Function Processing,” *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Process.*, vol. ASSP-29, no. 3, June. 1981.