

# CAF 및 Gauss-newton 기반 위성 환경 간섭신호원 위치 추정 방법 및 성능 분석

정홍석, 강정완, 김선우  
한양대학교 융합전자공학과

{hssjung, rkdwdhks77, remero}@hanyang.ac.kr

## Methodology and Performance Analysis of Interference Signal Source Geolocation Based on CAF and Gauss-Newton in Satellite Environment

Hongseok Jung, Jeongwan Kang, and Sunwoo Kim  
Department of Electronic Engineering, Hanyang University

### 요약

본 논문은 위성 환경에서 cross ambiguity function (CAF)으로 추정된 time difference of arrival (TDOA)/frequency difference of arrival (FDOA)를 측정값으로 Gauss-Newton 기반 간섭신호원 위치 추정 방법 및 위치 추정 성능 분석에 관한 것이다. 국제전기통신연합 (international telecommunication union, ITU) 문서를 기반으로 실제 위성 환경과 유사한 시스템 및 시나리오를 구성한다. 수신 신호로부터 CAF 기법을 사용하여 TDOA 및 FDOA 추정하고, TDOA/FDOA를 측정값으로 Gauss-Newton 기반 간섭신호원 위치 알고리즘을 통해 간섭신호원의 위치를 추정한다. 마지막으로, 시뮬레이션에서 다양한 핵심 파라미터에 따른 위치 성능을 비교/분석한다.

### 1. 서론

Satellite interference reduction group (SIRG) 설문에 따르면 500개의 민간 위성 운영 기업 중 93%가 1년에 최소 1회 이상 간섭 신호 피해 경험 응답이 있고, 이 중 17%는 지속적인 간섭 신호 피해 경험이 있음을 응답했다 [1]. 이와 같은 위성 간섭 신호 피해 예방을 위해 국제전기통신연합 (international telecommunication union, ITU)에서는 위성 환경 간섭신호원 위치 추정 방법에 관련된 내용을 ITU-R SM.2424에 작성했다. 문서에 따르면 간섭신호원 위치 추정 방법에 time difference of arrival (TDOA)와 frequency difference of arrival (FDOA) 측정값을 사용하는 것을 권장한다 [2]. 위성 환경에서 수신된 신호의 TDOA/FDOA 추정에는 두 신호간 상관관계를 분석하는 cross ambiguity function (CAF) 기법이 대표적이다 [3]. 특히 TDOA/FDOA 측정값을 사용한 간섭신호원 위치 추정 방법으로 비선형 최소 자승법 중 최적해를 유도하는 Gauss-Newton 기법이 있다 [4]. 이에 따라, 본 논문은 ITU-R에서 규정하는 간섭신호원 위치 추정 환경에서 CAF를 사용한 TDOA/FDOA 추정 방법과 Gauss-Newton 기법을 사용했을 때, TDOA/FDOA 추정 에러 증가에 따른 위치 추정 정확성을 분석한다.

### 2. 간섭신호원 위치 추정 환경 조건

ITU-R SM.2424에는 위성에 수신된 간섭신호원 위치 추정에 필요한 위성 상태, 주파수대역, 송수신 안테나와 같은 위성 환경 조건이 종합적으로 규정되어 있다. 문서에 따르면, 위성은 주 위성과 인접 위성 최소 두 개 이상의 위성이 요구된다. 여기서 주 위성은 간섭 신호 주엽으로부터 직접적 공격을 받는 위성이며, 인접 위성은 간섭 신호 측엽을 통해 간접적으로 공격받는 위성이다. 특히, 주 위성과 인접 위성은 동일 주파수 대역을 사용해야 하며, 위성 통신에는 X, Ku, Ka 주파수 대역이 사용된다. 주 위성과 인접 위성에 수신되는 동일한 간섭 신호는 두 위성 경로 차이와 위성 궤적 움직임 차이로 서로 다른 time of arrival (TOA) 및 도플러주파수를 가지며, 두 위성의 TOA와 도플러주파수 차이로 TDOA/FDOA 측정이 가능하다. 마지막으로, 간섭신호원 위치 추정 결과는 위도, 경도 지도에 실제 신호원 위치 중심

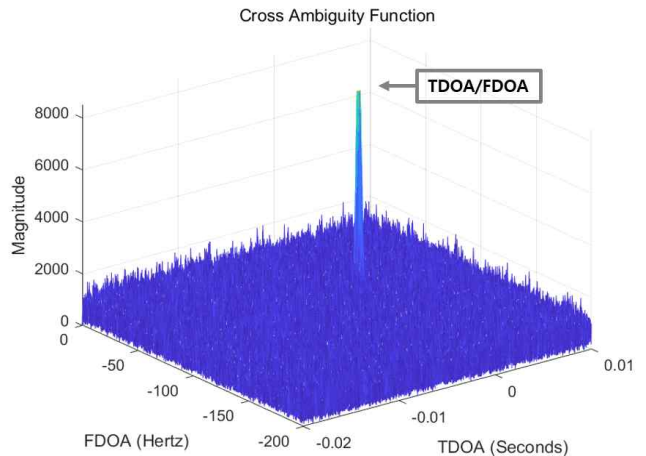


그림 1. CAF 기반 TDOA/FDOA 추정

분포 범위로 위치 추정 결과 표기하는 것을 제안한다. 이에 따라 본 논문은 ITU-R SM.2424에서 규정하는 위성 환경 간섭신호원 위치 추정 환경을 시뮬레이션에 동일하게 적용한다.

### 3. CAF 기반 간섭신호원 위치 추정

위성 환경에서 주 위성과 인접 위성에 수신된 두 신호를 CAF 기법을 사용해 상관관계(cross correlation)를 분석하는 방법으로 TDOA/FDOA를 추정할 수 있다. 주위성에서 수신한 신호  $s_1(t)$ 와 인접 위성에서 수신한 신호  $s_2(t)$  신호 모델은 다음과 같다 [5].

$$s_1(t) = s(t - \tau_1) e^{jf_1 w_o(t - \tau_1)} + n_1, \quad (1)$$

$$s_2(t) = s(t - \tau_2) e^{jf_2 w_o(t - \tau_2)} + n_2, \quad (2)$$

여기서,  $\tau_i$ 는  $i$  번째 신호에서 발생한 시간지연이며,  $f_i$ 는  $i$  번째 신호에서 발생한 도플러 주파수 그리고  $n_i$ 는  $i$  번째 신호의 가우시안 노이즈이다. 두 수신 신호를 이용하여 TDOA/FDOA를 추정하는 CAF

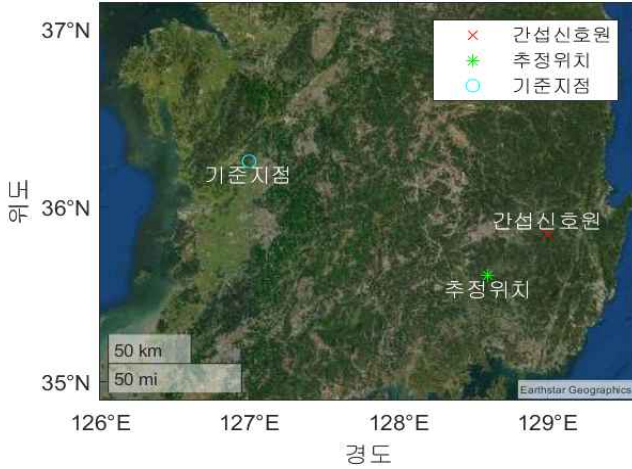


그림 2. Gauss-Newton 기반 미상신호원 위치추정

시스템 모델은 다음과 같다[5].

$$A_{xy}(\tau, f) = \int_0^T s_1(t) s_2^*(t + \tau) e^{-j2\pi f t} dt \quad (3)$$

여기서  $j = \sqrt{-1}$ 으로 허수이며,  $*$ 는 복소 켤레,  $T$ 는 관측 시간으로 TDOA와 FDOA 추정 값의 정확도를 결정하는 파라미터이다.

신호  $s_1(t)$ 와 시간 이동 및 주파수 이동을 수행한  $s_2(t)$ 간의 상관관계의 최댓값이 TDOA/FDOA 추정치이다. 그림 1은 주 위성과 인접 위성에서 수신 받은 두 신호를 CAF 기법으로 상관관계를 분석했을 때 확인 가능한 그래프로 최댓값이 위치한 x, y 축 index가 TDOA/FDOA 추정 값이 된다. CAF 기법을 사용해 수집한 TDOA/FDOA 추정 값을 비선형 최소 자승법 중 Gauss-Newton 기법에 적용하면 간섭신호원 위치 추정이 가능하다. Gauss-Newton 기법은 기준이 되는 측정값과 추정한 측정값의 차이를 비교해 오차가 0이 되는 때를 찾는 최적화 기법으로, 두 측정값의 오차가 최소가 되는 때를 간섭신호원 위치로 추정할 수 있다. Gauss-Newton 기법을 사용한 위치 추정 관련 연구는 [4]에서 확인 가능하다.

#### 4. 간섭신호원 위치 추정 결과 및 분석

##### 가. 시나리오 환경

시뮬레이션을 위한 시나리오를 실제 한국에서 사용 중인 위성을 기반으로 구성했다. 주 위성은 위도 0°, 경도 113°에 위치한 KOREASAT-5A 그리고 인접 위성은 위도 0°, 경도 116°에 위치한 KOREASAT-6을 적용하였고, 두 위성은 위성 통신에 Ku-band를 사용한다. 간섭신호원 위치는 위도 35°, 경도 129°으로 대구시청 부근에 위치시켰으며, Gauss-Newton 기법에 사용할 기준이 되는 TDOA/FDOA 측정을 위해 기준지점을 위도 36°, 경도 127°에 구성했다.

##### 나. 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 2는 CAF 기법으로 수집한 TDOA/FDOA 추정 값을 Gauss-Newton 기법에 사용하여 간섭신호원 위치를 추정한 결과이다. 이때, 실제 간섭신호원의 TDOA/FDOA 값과 CAF 기법으로 수집한 TDOA/FDOA 추정 오차는 0.036ms, 0.323Hz 차이를 가지며, Gauss-Newton 기법을 사용한 위치 추정 오차는 실제 간섭신호원 위치와 44km 차이를 보인다. Gauss-Newton 기반 간섭신호원 위치 추정 성능은 TDOA/FDOA 추정 오차에 영향을 받으며 그림 3에

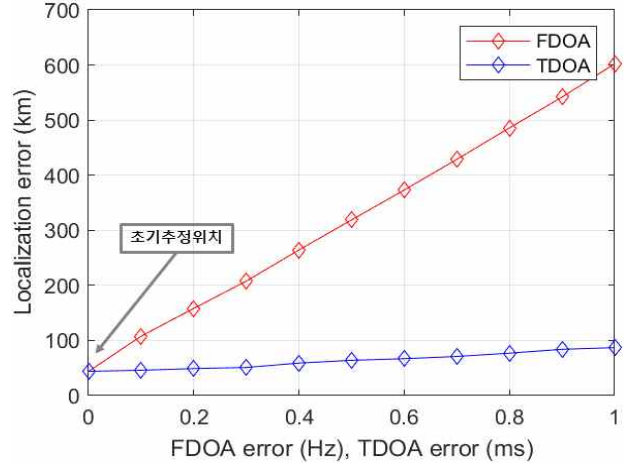


그림 3. TDOA/FDOA 추정 오차에 따른 위치추정 성능 분석

TDOA/FDOA 추정 오차에 따른 위치 추정 성능 결과가 있다. 본 시나리오에서 CAF 기법으로 TDOA/FDOA 추정 시 발생하는 오차는 TDOA 0.1ms 단위, FDOA 0.1Hz 단위를 확인했기에 TDOA와 FDOA 단일 추정 값에 추정 에러 0부터 1까지 0.1단위로 증가시키는 방법으로 위치 추정 성능을 분석했다. 그 결과 TDOA 추정 에러를 0부터 1까지 0.1ms 단위로 증가시켰을 때, 위치 추정 에러는 44km에서 87km까지 증가하고, FDOA 추정 에러를 0부터 1까지 0.1Hz 단위로 증가시켰을 때, 위치 추정 에러는 44km에서 602km까지 증가했다. 이에 따라 FDOA 추정 오차가 Gauss-Newton 기반 간섭신호원 위치 추정 성능에 더 큰 영향이 있는 것을 확인했다.

#### 5. 결론

본 논문은 CAF와 Gauss-Newton 기반 위성 환경에서 간섭신호원 위치 추정 방법을 설명하고 TDOA/FDOA 추정 오차에 따른 위치 추정 성능을 분석했다. 시나리오에는 실제 위성 환경을 고려하기 위해 ITU-R SM.2424에서 제공하는 위성 환경 간섭신호원 위치 추정 환경 조건을 적용하며, 국내에서 실제 사용 중인 위성을 시나리오에 구성했다. Gauss-Newton 기반 신호원 위치 추정 성능은 TDOA/FDOA 추정 오차에 영향을 받으며, 특히 FDOA 추정 오차에 위치 추정 에러가 크게 증가하는 것을 확인했다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Anritsu, "Resolving Interference Issues at Satellite Ground Stations", *Anritsu*, 2020.
- [2] ITU-R, "ITU-R SM.2424 report", *ITU*, 2018.
- [3] R. Ulman and E. Geraniotis, "Wideband TDOA/FDOA processing using summation of short-time CAF's" *IEEE Trans. Signal Process.*, 1999.
- [4] J. Yan, C. Tiberius, G. Bellusci and G. Janssen, "Feasibility of Gauss-Newton method for indoor positioning," *IEEE Position, Location and Navigation Symposium*, 2008.
- [5] D. G. Kim, J. O. Park, Y. M. Park and W. H. Shin, "Computationally Efficient TDOA/FDOA Estimation for Unknown Communication Signals in Electronic Warfare Systems," *IEEE Trans. Aero. Elec. Syst.*, 2018.