

CAF 기반 위성 간 Joint TDOA 및 FDOA 추정 성능 분석

김한빛, 박현우, 정현진, 김선우

한양대학교 융합전자공학과

{dante0813, stark95, hyeonjingo, remero}@hanyang.ac.kr

Performance Analysis of CAF-based
Joint TDOA and FDOA Estimation Between Satellites

Hanvit Kim, Hyunwoo Park, Hyeonjin Chung, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문은 CAF(cross ambiguity function) 기반 위성 간 Joint TDOA 및 FDOA 추정 실험을 진행하고, 실험 결과를 통하여 추정 성능을 분석한다. 실험 이전에 GNU Radio 신호 생성 시뮬레이터를 통하여 위성으로 수신되는 각 신호의 Doppler shift, Time delay, SNR(signal to noise ratio) 등 파라미터 값을 설정 후 벡터 형태로 저장한다. 그리고 MATLAB을 통하여 CAF를 구현 후 각 신호 별 TDOA, FDOA RMSE(root mean square error) 값을 계산하여 추정 성능을 분석한다. 본 논문은 3가지 다른 변조 신호의 Joint TDOA 및 FDOA 추정 결과를 제시하고 결과 분석을 통하여 추정 성능을 비교한다.

I. 서론

위성을 이용한 통신은 짧은 전파 지연, 글로벌 네트워크 구축을 위한 광범위한 배치 영역, 적은 개발 비용으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 특히 위성을 이용한 항법, UAV(unmanned aerial vehicle)탐지, 위치 추적 등의 이동체 측위 기술이 현재 연구되고 있다 [1]. 여기서 이동체의 올바른 위치를 탐지하고 추적하기 위하여 물체와 수신기 사이의 정확한 TDOA(time difference of arrival) 및 FDOA(frequency difference of arrival) 측정값이 요구된다 [2]. 따라서 본 논문은 TDOA 및 FDOA 추정을 진행하기 위하여 CAF를 MATLAB을 통하여 구현하고 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 RMSE 값을 계산하여 서로 다른 3개의 변조 신호에 대한 신호 별 추정 정확도를 제시하고 추정 결과를 분석한다.

II. CAF 알고리즘 기반 Joint TDOA 및 FDOA 추정

CAF 알고리즘은 서로 다른 Doppler shift, Time delay를 갖는 두 신호 사이의 Correlation을 계산 후 피크값을 탐지하여 두 신호 사이의 TDOA 및 FDOA를 추정한다 [3]. 위성에서의 수신신호 $\mathbf{r}_1(t)$, $\mathbf{r}_2(t)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_1(t) &= \alpha_1 \mathbf{s}(t - \tau_1) e^{j2\pi f_1(t - \tau_1)} + \mathbf{n}_1(t), \\ \mathbf{r}_2(t) &= \alpha_2 \mathbf{s}(t - \tau_2) e^{j2\pi f_2(t - \tau_2)} + \mathbf{n}_2(t),\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 $\alpha_1, \alpha_2, \tau_1, \tau_2, f_1, f_2$ 는 각각 위성 1, 2의 Channel gain, Time delay, Frequency를 의미하고 $\mathbf{s}(t)$, $\mathbf{n}_1(t)$, $\mathbf{n}_2(t)$ 는 각각 송신 신호 벡터, 위성 1, 2의 채널 잡음을 의미한다. 두 신호 사이의 Correlation $\mathbf{A}(\tau, f)$ 다음과 같다.

$$\mathbf{A}(\tau, f) = \int_0^T \mathbf{r}_1(t) \mathbf{r}_2^*(t + \tau) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2)$$

여기서 $(\cdot)^*$ 은 conjugate, T 는 Observation length를 의미한다. TDOA, FDOA 추정값에 해당하는 CAF의 피크값 $[\hat{\tau}, \hat{f}]$ 은 다음과 같다.

$$[\hat{\tau}, \hat{f}] \approx \underset{(\tau, f)}{\operatorname{argmax}} |\mathbf{A}(\tau, f)| \quad (3)$$

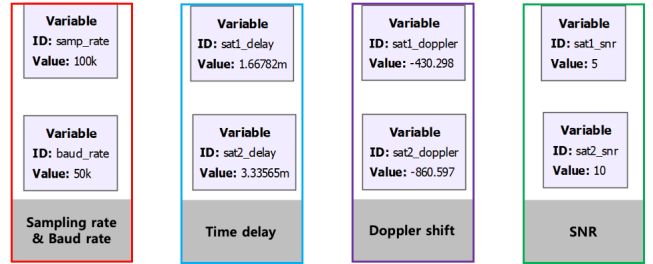


그림 1. GNU Radio 신호 생성 시뮬레이터의 파라미터 값 설정 모식도

III. GNU Radio 신호 데이터를 이용한 실험 결과

본 실험의 목표는 위성으로 수신된 신호 데이터의 CAF 기반 TDOA 및 FDOA를 추정하고 RMSE 그래프를 통하여 성능을 분석하는 데 있다. 먼저 그림 1과 같이 GNU Radio 신호 생성 시뮬레이터를 통하여 Sampling rate, Baud rate, Time delay, Doppler shift, SNR 등의 파라미터 값을 임의로 설정한 변조 신호를 생성하였다. 변조 신호는 BPSK(binary phase shift keying), QPSK(quadrature phase shift keying), GMSK(gaussian minimum shift keying)의 3가지 종류를 사용하였다. 세부적인 파라미터 설정 값은 표 1에 정리하였다. 이후 MATLAB을 이용하여 CAF를 구현 후 그림 2와 같이 단일 시뮬레이션을 통하여 결과 그래프를 확인하였다.

표 2. CAF 기반 Joint TDOA 및 FDOA 추정 신호 파라미터

파라미터	설정값
Sampling rate	100 KHz
Baud rate	50 KHz
Monte Carlo Runs	300
Center Frequency	430 MHz
Modulation type	GMSK, QPSK, BPSK
SNR	-6~10 dB

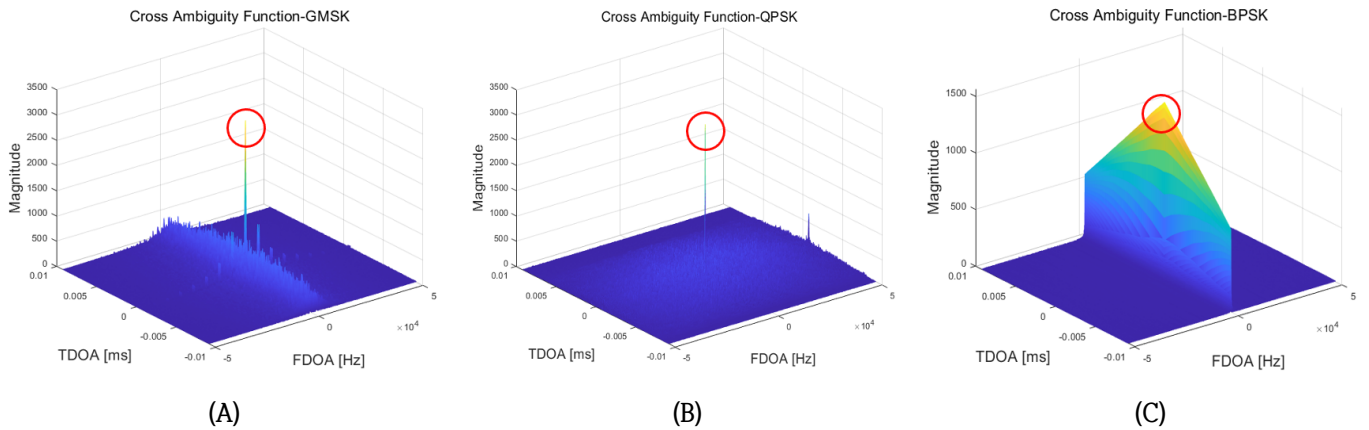


그림 2. CAF 기반 Joint TDOA 및 FDOA 추정 테스트 결과 (A) GMSK, (B) QPSK, (C) BPSK

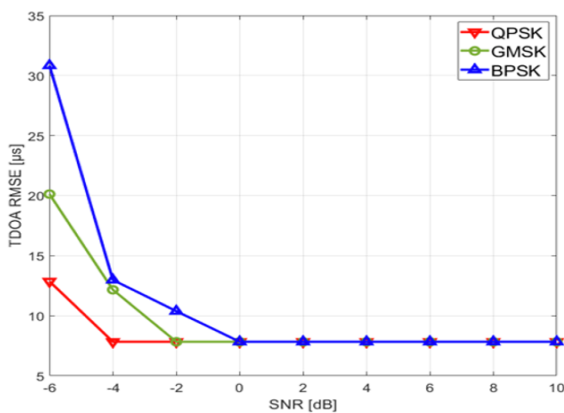


그림 3. CAF 기반 TDOA 추정 RMSE 결과

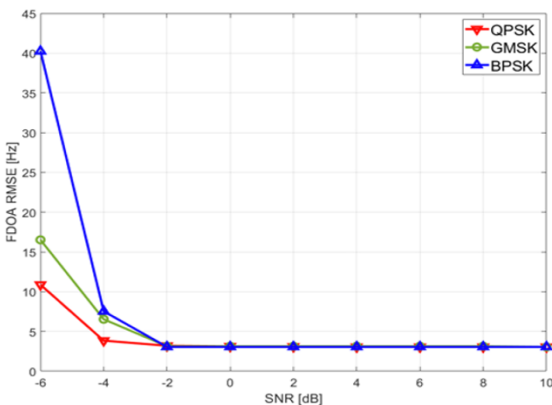


그림 4. CAF 기반 FDOA 추정 RMSE 결과

그림 2는 구현한 MATLAB CAF 알고리즘의 동작 여부를 확인하기 위하여 진행한 테스트 시뮬레이션의 결과 그래프이다. 시뮬레이션 결과 GMSK, QPSK, BPSK 모두 피크값이 검출되어 구현한 CAF 알고리즘이 오류 없이 동작함을 확인하였다.

CAF 알고리즘의 MATLAB 구현 이후 추정 정확도를 분석하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 TDOA 및 FDOA RMSE 값을 계산하였다. 그림 3, 4는 GMSK, QPSK, BPSK 변조신호의 TDOA 및 FDOA RMSE 그래프이다. TDOA 추정 결과 QPSK, GMSK, BPSK 순서로 높은 추정 정확도를 보였다. 특히 QPSK의 TDOA 추정 성능이 다른 두 종류에 비해 뛰어나고 GMSK, BPSK의 TDOA 추정 성능 차이는 QPSK와 GMSK

사이의 추정 성능과 비교 시 상대적으로 적은 차이를 보였다. 이는 신호의 대역폭이 QPSK, GMSK, BPSK 순서로 크기 때문에 추정된다. Correlation 기반 TDOA 추정 정확도는 신호의 대역폭과 비례하며, 따라서 TDOA 추정 결과 역시 이와 같이 나온 것으로 보인다. FDOA의 경우 TDOA와 동일하게 QPSK, GMSK, BPSK 순서로 높은 추정 정확도를 보였다. 그 이유는 TDOA와 FDOA를 Joint하게 추정하는 CAF 알고리즘 특성으로 인하여 TDOA 추정 정확도가 증가함에 따라 FDOA 추정 정확도 또한 증가하기 때문으로 판단된다.

IV. 결론

본 논문에서는 위성으로 수신된 신호 사이의 CAF 기반 Joint TDOA 및 FDOA 추정을 통해 변조 신호 별 추정 성능을 분석하고 결과를 비교한다. GNU Radio 신호 생성 시뮬레이터를 통하여 신호 데이터를 생성하고 MATLAB을 이용하여 CAF 함수를 구현 후 Monte Carlo 시뮬레이션을 통하여 추정 정확도를 제시한다. 시뮬레이션 결과 QPSK, GMSK, BPSK 순서로 높은 TDOA 및 FDOA 추정 정확도를 보였으며, 이는 신호의 대역폭과 관련이 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 '4단계 두뇌한국21 사업(4단계 BK21 사업)에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

- [1] Trier R. Mortlock, Zaher M. Kassas, "Performance Analysis of Simultaneous Tracking and Navigation with LEO Satellites," *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation.*, pp. 2416 - 2429, Sep. 2020.
- [2] Arie Yeredor, Eyal Angel, "Joint TDOA and FDOA Estimation: A Conditional Bound and Its Use for Optimally Weighted Localization," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 59, pp. 1612-1623, Apr. 2011.
- [3] S.Stein, "Algorithms for ambiguity function processing," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. 29, pp. 588-599, June. 2021.