

GNSS 재밍 신호 모니터링 네트워크 시스템을 위한 독립된 GNSS 수신기 간 시각 동기화 기법

Time Synchronization Technique for GNSS Jamming Monitoring Network System

진 권 규* · 송 영 진** · 원 종 훈***

* 주저자 : 인하대학교 대학원 전기컴퓨터공학과 석사과정

** 공저자 : 인하대학교 대학원 전기컴퓨터공학과 석사과정

*** 교신저자 : 인하대학교 전기공학과 부교수

Gwon gyu Jin* · Young jin Song* · Jong hoon Won**

* Dept. of Electrical and Computer Eng., Graduate School of Inha University

** Dept. of Electrical Eng., Inha University

† Corresponding author : Jong hoon Won, jh.won@inha.ac.kr

Vol.20 No.3(2021)

June, 2021

pp.74~85

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.3.74>

2021.20.3.74

Received 19 February 2021

Revised 14 March 2021

Accepted 9 June 2021

© 2021. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

전파를 수신하여 측위를 수행하는 GNSS 수신기는 본질적으로 재밍에 취약하다. 재밍 발생 검출, 재밍 신호 종류 판별, 재밍원 위치추정 기능을 갖는 GNSS 재밍 모니터링 시스템은 안전한 자율주행 환경구축에 도움을 준다. 이를 위하여 다수의 저가 GNSS 수신기들의 배치로 구성된 GNSS 모니터링 네트워크 구축이 필요하며, 앞서 언급한 3가지 기능 구현을 위하여 네트워크 내 독립된 저가 GNSS 수신기 간 정밀 시각 동기화가 요구된다. 본 논문은 신호영역 TDOA 기술 직접 사용방식의 수신기 간 시각 동기화 기법을 제안한다. 계산 효율성을 위하여 상대적으로 낮은 샘플링 주파수에도 시각 동기 정밀도를 유지하고자 블록 보간법을 추가로 활용한다. 수치적 시뮬레이션을 통하여 제안한 GNSS 수신기 간 시각 동기화 기법의 가용성을 입증한다.

핵심어 : 자율주행, 위성항법시스템, 재밍모니터링

ABSTRACT

Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers are intrinsically vulnerable to radio frequency jamming signals due to the fundamental property of radio navigation systems. A GNSS jamming monitoring system that is capable of jamming detection, classification and localization is essential for infrastructure for autonomous driving systems. For these 3 functionalities, a GNSS jamming monitoring network consisting of a multiple of low-cost GNSS receivers distributed in a certain area is needed, and the precise time synchronizaion between multiple independent GNSS receivers in the network is an essential element. This paper presents a precise time synchronization method based on the direct use of Time Difference of Arrival (TDOA) technique in signal domain. A block interpolation method is additionally incorporated into the method in order to maintain the precision of time synchronization even with the relatively low sampling rate of the received signals for computational efficiency. The feasibility of the proposed approach is verified in the numerical simualtions.

Key words : Self-driving, Autonomous driving, Global Navigation Satellite System, Jamming Monitoring

I. 서 론

최근 자율주행 자동차의 관심이 상승하며 자율주행 자동차에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 중, 자율주행 자동차에서 GNSS¹⁾가 필수 요소 중 하나로 자리함에 따라 GNSS의 정확도 및 강건성이 주요점으로 인식되고 있다. GNSS 정확도는 차선 수준 정확도 기준 0.5m 이내로 자율주행의 안전성을 위하여 요구되지만, 모든 상황에서 GNSS의 강건성은 확보되기 어렵다(Kar et al., 2014).

GNSS 신호는 고도 20,000km 이상의 상공을 선회하는 위성으로부터 송신되는 GNSS 신호를 지상에 위치한 GNSS 수신기가 수신하여 신호 처리를 통해 위치 정보를 계산한다. GNSS 수신기는 낮은 수신감도로 수신되는 특성상 재밍 신호에 취약한 단점을 가진다. 이러한 단점으로 재밍 신호나 스푸핑 신호로 인해 수신기가 GNSS 신호 획득에 방해를 받으며, 오동작을 야기한다(Kaplan and Hegarty, 2006).

GPS²⁾ L1 대역과 L2 대역은 ITU³⁾에 의하여 위성 신호가 송신 및 수신되기 위하여 할당된 주파수 대역이다. L1 대역과 L2 대역은 각 1559~1610MHz, 1215~1260MHz로 GNSS 사용을 목적으로 유지되었다. 2000년에 ITU에 의하여 개최된 WRC⁴⁾-2000에서 향상된 전리층 보정 및 위상 추적 기능 지원을 위하여 L5 대역의 도입이 의논되었으며, 2010년 6월에 방송이 시작되었다(Henri and Matas, 2018).

GNSS는 현대사회의 국가 핵심 인프라의 필수 요소이며 방해 요소들로 인하여 사고가 유발될 가능성이 높아지고 있다. 의도적인 재밍 신호는 아니나 공항 주변 항공기의 이착륙을 보조하는 DME⁵⁾/TACAN⁶⁾ 시스템의 펄스 신호가 GPS L5대역, Galileo E5a/E5b대역을 의도치 않게 간섭하는 사례가 있으며, 간섭 영향을 완화시키는 연구가 보고되었다. Gao et al.(2013)은 DME/TACAN은 주기적인 재밍 신호가 임계치 이상의 펄스를 방출함으로 인해 포화 현상을 야기하는 것으로 기술하였다. 이에 대응하고자 pulse blanking 기법을 제안하고 있으며, 이 기법은 Musumeci et al.(2014)에서 펄스 신호의 간격과 일치하거나 펄스 무무를 판별 및 추정하여 해당 시간 영역 신호를 blanking 처리를 진행하는 기법이 연구되었다.

이와 상반되는 의도적인 재밍 신호를 방출하며 GNSS 수신기의 신호 획득을 방해하는 미약 신호 특성의 재밍 사례들이 해외에서 다양하게 보고되고 있다. 개인 PPD⁷⁾는 온라인과 오프라인에서 수 만원대의 경제적인 가격으로 손쉽게 구할 수 있으며, 휴대성이 우수하여 개인이 휴대하며 사용자를 중심으로 기존 재밍 신호에 대비하여 협소한 범위에 대한 재밍 신호를 방출한다. Tedeschi(2011)은 미 Newark 공항 내의 GBAS⁸⁾ 장비가 마비된 사례를 보고하였다. 트럭 운전자들의 개인 정보 보호의 목적으로 사용된 PPD가 원인으로 규명되었다.

이러한 의도적인 재밍 신호에 대응하기 위하여 다방면으로 항재밍 기법들이 연구되고 있다. Merwe et al.(2018)은 재밍 신호의 간섭 완화를 위하여 세 종류의 항재밍 방법을 설명하였다. 첫 번째 방법으로 ANF⁹⁾가 소개되었다. ANF는 다중 계단식 노치 필터를 이용하여 시간의 흐름에 따라 노치 주파수가 적응하여 적용된다. ANF는 CWI¹⁰⁾ 신호 등의 영향을 최소화하기 위해 고안된 기법이다. 다음으로 FBPB¹¹⁾는 기존 pulse blanking 기법을 다중대역으로 확장한 기법이다. 이 기법은 간섭 신호 대역폭이 신호 대역폭보다 넓은 경우 사용된다. 마지막으로 FDAF¹²⁾는 지정된 데

1) GNSS : Global Navigation Satellite System, 글로벌 네비게이션 위성 시스템

2) GPS : Global Positioning System, 글로벌 포지셔닝 시스템

3) ITU : International Telecommunication Union, 국제 전기 통신 연합

4) WRC : World Radiocommunications Conference, 세계 무선 통신 회의

5) DME : Distance Measuring Equipment, 거리 측정 장비

6) TACAN : TACTical Air Navigation, 전술 항공 항법

7) PPD : Privacy Protection Devices, 개인 정보 보호 장치

8) GBAS : Ground Based Augmentation System, 지상 기반 보강 시스템

9) ANF : Adaptive Notch Filtering, 적응형 노치 필터링

10) CWI : Continuous Wave Interference, 연속파 간섭

11) FBPB : Filter-Blank Pulse Blanking, 필터-블랭크 신호 블랭킹

이터에 FFT¹³⁾를 취하여 주파수 영역에서 blank 처리하고 IFFT¹⁴⁾를 취해 결과를 도출하는 방식이다.

또한, GNSS 재밍 신호를 감지 후 재머의 위치를 추정하는 시스템이 다양하게 존재한다. 미 MBARI¹⁵⁾는 회전되는 안테나를 이용하여 AOA¹⁶⁾ 추정으로 재머의 위치를 추정하였다(Clynch et al., 2003). 이 시스템은 안테나를 회전시키며 재밍 신호를 수신하여 다중의 방향 측정치를 획득하고 최소제곱 삼각 측량에 의하여 위치가 추정된다. 하지만 이 시스템과 같은 AOA 추정은 고가 장비가 필요되며 재밍 신호가 비교적 강력한 재밍 신호에 적용된다. 즉, 광역에 영향을 미치는 강력한 재밍 신호가 있을때 고가 AOA 추정 시스템을 사용하여 재밍 신호원의 위치를 추정할 수 있으나, 협역에 영향을 미치는 미약한 재밍 신호원에 대해서는 AOA 추정 방식의 경제성이 극히 떨어진다.

이외에도 다양한 항재밍 기법과 시스템이 존재하지만 이와 같은 항재밍 방법에는 비용적, 시간적 단점이 존재한다. PPD와 같은 수m에서 수백m 재밍 반경을 갖는 비교적 좁은 범위에 적용되는 재머는 제거하는 방법이 적합할 것이며 재머의 위치를 추정하는 기법이 연구되고 있다. Lee et al.(2018a), Kim et al.(2020)에서 다수의 수신기를 배치하여 각 수신기에서 IF¹⁷⁾ 데이터를 클라우드 서버로 전송하여 IF 데이터를 2-D 이미지 결과로 도출한다. 2-D 이미지로 재밍 신호 유무 판별이 가능하며 재밍 신호가 감지될 경우 수신기 간 2-D 이미지와 상관 관계를 따져 재밍 신호원의 위치를 추정하는 단계로 진행된다. 재밍 신호원의 위치는 TDOA¹⁸⁾ 정보로 추정되기 때문에 각 수신기 간 시각 동기화 오차의 최소화가 필요하다.

Yoon et al.(2012)에서 목표의 신호를 항공기에서 받아 TDOA 정보를 도출하여 위치를 추정하는 시뮬레이션이 수행되었다. 고정된 목표 스테이션에서 신호를 방송하며 5대의 항공기는 주변에서 편대 비행한다. 각 항공기는 양방향 통신을 이용한 시각 동기화를 지속적으로 진행하여 목표 스테이션을 기준으로 직선 및 원형으로 비행하여 위치를 추정한다. 최대 20ns, 최소 5ns로 시각 동기화 오차를 가정하였으며, 시각 동기화 오차에 따라 평균적으로 24.2%의 위치 추정 성능 향상을 도출하였다. 하지만 클라우드 서버로 데이터를 전송하여 IF 데이터를 후처리하는 클라우드 데이터 처리 방식 재머 위치추정 기법에 적용하기 까다로울 것으로 고려된다. 따라서 본 논문에서는 GNSS 신호를 이용한 독립된 수신기 간의 시각 동기화 방안에 대하여 시나리오를 작성하고 시뮬레이션을 수행하여 시각 동기화 오차에 대하여 논의한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Lee et al.(2018a), Kim et al.(2020)에서 제안된 클라우드 데이터 처리 방식 재머 위치추정 기법과 정밀 TDOA 기법을 알아보고, 3장에서는 시각 동기화의 시나리오 및 알고리즘을 알아본다. 4장에서는 본 논문에서 제안하는 시각 동기화의 시뮬레이션 수행결과에 대하여 논의한다.

II. 기존 연구 고찰

1. 클라우드 데이터 처리방식 재머 위치추정 기법

Lee et al.(2018a), Kim et al.(2020)에서 클라우드 데이터 처리방식 재머 위치추정 기법은 비교적 좁은 범위에 재밍 신호를 방출하는 미약 재머를 가정하였다. 다수의 저가 GNSS 수신기를 넓은 영역에 조밀하게 배치하여, 수신된 신호를 클라우드 서버로 송신한다. 클라우드 서버는 수신된 신호를 처리하여 2-D 이미지로 변환하여 재밍 신호 유무,

12) FDAF : Frequency-Domain Adaptive Filtering, 주파수 영역 적응형 필터링

13) FFT : Fast Fourier Transform, 고속 푸리에 변환

14) IFFT : Inverse Fast Fourier Transform, 고속 푸리에 역변환

15) MBARI : Monterey Bay Aquarium Research Institute, 몬터레이만 아쿠아리움 연구소

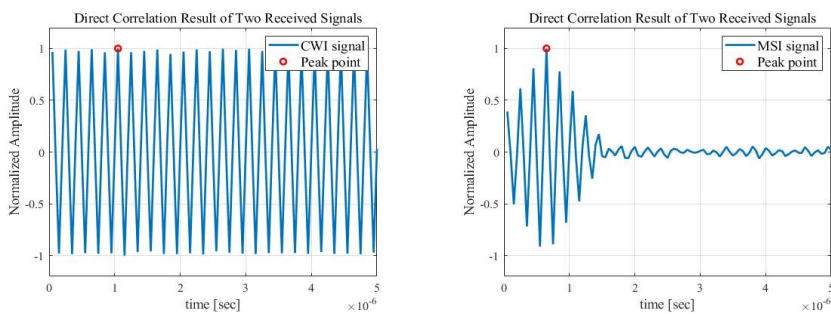
16) AOA : Angle Of Arrivals, 도착 각도

17) IF : Intermediate Frequency, 중간 주파수

18) TDOA : Time Difference Of Arrivals, 도착 시간 차이

종류를 판별하고 신호 세기에 대한 정보를 획득한다. 그리고 재밍 신호를 수신한 수신기 간 TDOA 정보를 이용하여 재머의 위치추정이 가능하다.

〈Fig. 1(a)〉는 CWI 신호가 포함된 두 수신기의 상관 결과이다. CWI 재밍 신호는 정현파이기 때문에 일정한 형태의 파형을 보인다. 따라서 독립된 수신기에서 수신된 신호 간의 상관을 적용하더라도 〈Fig. 1〉과 같이 일정한 주기를 갖는 정현파의 형태가 유지된다. 〈Fig. 1〉에서 최대 상관 값이 적색원으로 표기되어 있다. 〈Fig. 1(b)〉는 MSI¹⁹⁾ 신호에 대하여 독립된 두 수신기에서 수신된 신호 사이의 상관 결과이다. 최대 상관 값이 적색의 원형으로 표기되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 위성 신호 간의 상관 값을 상회하는 값이므로 재머까지의 거리를 추정할 수 있으며, 이를 복수 개로 확장 적용하여 재머의 위치를 추정할 수 있다. 즉, 앞서 언급한 바와 같이 GNSS 재밍 모니터링 네트워크에서 수신된 정보를 중앙에서 처리하여 재밍 신호 유무(monitors), 재밍 신호 종류 판단(classification), 재밍 신호 원의 위치추정(localization)이 가능하다. 이때 재밍 신호의 종류에 따라 재밍 신호원 위치추정 가능성이 결정된다.



〈Fig. 1〉 Correlation between receivers

이와 같이 두 GNSS 수신기 간의 TDOA 정보를 기반으로 위치추정을 수행하므로 수신기 간 시각 차이는 추정 결과와 밀접하게 관계된다. 하지만 기존의 시각 동기화 기법은 수신기 간 양방향 통신을 이용하여 클라우드 데이터 처리방식 재머 위치추정 기법에 적용됨에 어려움이 존재했다. 또한, 일반적으로 두 GNSS 수신기 간 시각 동기화는 이미 알고 있는 코드 정보를 활용하여 얻은 pseudorange 영역에서 이루어지는 것에 비해 본 논문에서 제시하는 기법은 보다 더 정확한 결과를 위하여 신호영역에서 시각 동기화를 수행한다.

2. 정밀 TDOA 기법

Lee et al.(2018b)는 긴급 상황에 처한 사용자가 비콘을 활성화하여 위성을 통하여 지상 긴급 구조 운영 센터에 수색 및 구조 신호를 송신하는 재난 구조 통신 프로그램 COSPAS²⁰⁾-SARSAT²¹⁾의 정확도 향상에 대하여 기술하였다. 두 위성 신호의 상관 피크 값을 사용하여 TDOA 및 FDOA를 이용하여 사용자의 위치를 추정한다. COSPAS-SARSAT의 성능을 향상하기 위하여 정밀 TDOA 기법을 제안하였다. 신호 상관 단계에서 샘플 간격으로 인한 최대 상관 값보다 이르거나 늦은 상관 값을 추정한다. 여기서 일반적인 TDOA 기법은 최대 상관 값에서 이전 데이터와 다음 데이터를 이용하여 최대 상관 값을 추정한다. 따라서 일반적인 TDOA 기법의 정확도는 신호 세기 및 샘플링 주파수에 비례한다. C/N_0 가 44dB-Hz이상인 경우, 약 93%의 정밀도 향상이 예견된다. 이를 확장하여 Lee et al.(2018b)는 정밀 TDOA를 얻기 위하여 추가적으로 보간법(interpolation)을 적용한 BIS²²⁾ 기법을 사용한다.

19) MSI : Matched Spectrum Interference, 일치된 스펙트럼 간섭

20) COSPAS : Cosmicheskaya Sistyema Poiska Avariynich Sudov, 조난 선박 수색을 위한 우주 시스템

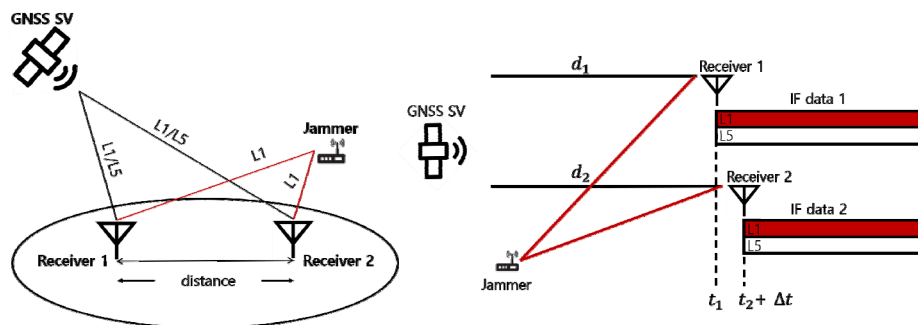
21) SARSAT : Search and Rescue Satellite-Aided Tracking, 위성을 이용한 수색 및 구조

Ⅲ. 시각 동기화 시나리오 및 알고리즘

1. 시각 동기화 시나리오

GNSS 수신기를 이용한 시각 동기화 방법은 우선, 위성의 1msec 주기의 신호를 사용하여 지상-위성간 신호 동기화가 존재한다. 예를 들어 스마트그리드 등 거대 네트워크 시스템에서 이용하는 방법이 대표적이다. 다음으로 거리측정치(의 사거리, 반송파 위상차 등) 영역에서 두 수신기 간 시각 동기하는 방법이 있다. 지상 원거리에 위치하는 시스템 간 시각 동기 방법이 대표적인 예시이다. 단, 위 2가지 방법 모두 재밍이 없는 안전한 신호환경에서 신호처리가 성공적으로 동작한다는 가정하에 C/A²³⁾코드 1msec 주기에 따른 펄스 출력을 이용하거나, 측정치 영역에서 차분을 이용하는 방법이다. 본 논문은 재밍 신호가 존재하는 지역에서의 모니터링 네트워크 간 시각 동기를 목적으로 신호영역에서 직접 시각 동기를 수행한다. 즉, 우주 수신 신호를 이용하여 기선(baseline)간 측지/측량을 수행하는 VLBI²⁴⁾(Very Long Baseline Interferometry) 기법에서 사용되는 수신 신호 간 상관 기법을 지상에 위치한 GNSS 재밍 신호 모니터링 수신기에서 수신한 IF 신호에 적용한 것이다. 이에 대한 적절한 이전 연구결과는 존재치 않으며, 이를 본 논문을 통하여 사용 가능성을 확인하였다. 즉, 신호영역에서 상관 기법을 적용하는 방식은 여러 응용에 사용되지만 IF 데이터를 이용하여 직접 시각 동기화하는 방안은 발표된 바는 없다(Defraigne 2017).

(Fig. 2)는 본 논문에서 가정한 시각 동기화 시나리오를 도식화한 것이다. 2대의 수신기가 L1 대역과 L5 대역 신호 처리가 가능한 GNSS 수신기라 가정하고, L1 대역에만 재밍 신호가 존재하여 신호 획득에 방해받으며 L5 대역에서 재밍 신호가 존재치 않는 위성 신호를 취득한다 가정하였다. 이는 현재까지 보고된 각종 GNSS 재밍 사례 중에서 GNSS L1/L2/L5 모든 대역이 동시에 강하게 재밍이 걸리는 사례는 극히 드물거나 없었으며, 3개의 신호 대역 중 최소 1개 이상의 대역에는 재밍이 걸리지 않아 신호 처리가 가능한 시나리오를 가정한 것이다. 수신기 1과 2는 공통 위성으로부터 각각 d_1 , d_2 만큼 떨어져 있으며 수신기들은 각각 t_1 , t_2 시각에 신호를 수신한다. 이때 수신기 1 대비 수신기 2에 시각 오차(Δt)가 존재한다고 가정한다. d_1 과 d_2 의 거리만큼 차이에 의하여 t_1 과 t_2 의 시각 차이가 존재한다. 하지만 2번 수신기에서 수신된 IF 데이터에서 시각 오차만큼 t_2 에 오차가 가산된다. 이를 각 수신기에서 위성까지의 기하학적 실제 거리를 계산할 수 있으므로 각 수신기 간의 측정된 TDOA 정보와 기하학적 실제 거리를 비교하여 도출된 시각 오차만큼 차감한다.



<Fig. 2> Schematic of time synchronization scenario and algorithm

22) BIS : Block Interpolation-based Synchronization, 블록 보간 기반 동기화

23) C/A : Coarse/Acquisition code, 코스 획득 코드

24) VLBI : Very Long Baseline Interferometry, 매우 긴 기준 간섭계

2. 시각 동기화 알고리즘

시각 동기화 알고리즘에서 재밍이 걸리지 않는 신호 대역이 존재하여 위성의 위치와 수신기의 위치를 안다고 가정하고 각 수신기의 위치가 $R_1(x_1, y_1, z_1)$, $R_2(x_2, y_2, z_2)$ 로 가정하였을 경우 GNSS 신호로 위치해를 도출하는 식을 i 번째 수신기에 대한 식 (1)로 정의한다(Kaplan and Hegarty, 2006).

$$\rho_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + B_i + \epsilon_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서,
 x, y, z = 위성의 위치(known)
 x_i, y_i, z_i = 수신기의 위치(known)
 B_i = 수신기의 시각 오차 거리 환산값(unknown)
 ϵ_i = 수신기 오차

식 (1)을 두 수신기에 대하여 차분하여 정리하면 식 (2)를 얻는다.

$$\Delta B = \Delta d - \Delta \rho + \Delta \epsilon \dots\dots\dots (2)$$

여기서,
 $\Delta B = B_1 - B_2$
 $\Delta \rho = \rho_1 - \rho_2$
 $\Delta \epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_2$
 $\Delta d = d_1 - d_2 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2}$

식 (2)서 ρ_1, ρ_2 는 측정치이고 d_1, d_2 는 계산이 가능하므로 수신기 측정잡음차($\Delta \epsilon$)가 작다는 가정하에 수신기 1과 수신기 2의 상대적 시각 오차(ΔB)를 계산할 수 있다. 수신기까지 도달하는 거리가 달라짐에 따라 신호가 수신기까지 도착하는 시간의 차이가 발생한다.

기존의 시각 동기화 기법은 신호를 수신하여 후처리를 통하여 시각 동기화를 수행한다. 예를 들어 시간 정보를 도출한 다음 시간 정보를 코리코프 형식으로 송신하는 기법이다(Berns et al., 2004). 또한, 위성 신호의 후처리로 1초 간격으로 송신되는 시간 신호를 이용하여 1pps로 매 초마다 시간을 동기화하는 기법이 있다(Hall et al., 2003). 즉, 대부분의 GNSS 수신기 시각 동기화 기법은 측정치 영역에서 이루어진다. 본 논문에서는 위의 식을 이용하여 IF 신호로부터 직접 TDOA 정보를 도출하여 상대적인 시각의 오차를 도출한다. 식 (3)은 수신기에 수신된 위성 신호를 의미한다(Kaplan and Hegarty, 2006).

$$r_i(t_i) = A_i \cdot C(t_i - \tau_i) \cdot D(t_i - \tau_i) \cdot \cos(\omega_i(t_i)t_i + \theta_i) + n(t) \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega_i(t_i) = 2\pi(f_{IF} + f_{d,i}(t_i))$$

여기서,
 $r(t)$ = i 번째 수신기에서 수신된 위성 신호
 A = 신호 세기
 C = 위성의 PRN
 θ = 반송파 위상
 $n(t)$ = 잡음
 f_{IF} = 중간 주파수
 $f_d(t)$ = 도플러 편이 주파수

r_1 과 r_2 의 IF 신호에서 동일 위성 신호에 대한 상관관계를 따져 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

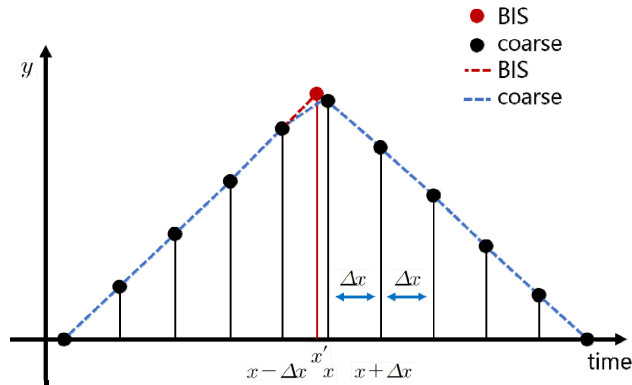
$$corr(r_1(t_1), r_2(t_2)) = R(t_1 - t_2 + \tilde{n}(t)) \dots\dots\dots (4)$$

여기서,
 R = 상관 함수

식 (4)에서 위성 신호 간 상관관계를 이용하여 수신기에서 수신한 위성 신호는 수신기 시계 오차 차이에 의한 $t_1 - t_2 = \Delta t$ 로 정의할 수 있고 이는 식 (2)의 ΔB 와 등가이다.

3. 신호영역 정밀 시각 동기화 알고리즘

<Fig. 3>은 BIS 알고리즘에 기반한 정밀 TDOA 기법을 도식화하였다. 수신 신호의 샘플링 간 간격을 Δx 로 가정하였을 경우, 실제 최대 상관 값을 가지는 시각은 x' 이지만 수신 샘플링 정밀도에 의하여 x 로 도출된다. 즉, 보간 기법을 활용하여 $x - x'$ 만큼의 시각 오차를 보정한다. x 의 시각에서 도출된 최대 상관 값과 최대 상관 값 이전의 데이터와 최대 상관 값 이후의 데이터를 대조하여 최대 상관 값을 도출한다.



<Fig. 3> Schematic of BIS algorithm

이를 이용하여 <Fig. 3>과 같이 BIS 알고리즘에 기반한 정밀 TDOA 기법을 적용하면 샘플 간의 TDOA를 보다 정확하게 추정할 수 있고 샘플링 속도에 비해 고해상도의 TDOA를 추정할 수 있다. 이때 사용하는 수식은 <Fig. 3>에 개략적으로 표현된 선형 보간법이 적용되어 전개되며 다음과 같다(Lee et al., 2018b).

$$\begin{aligned} y_p &= N_s(1 - |x|) \dots\dots\dots (5) \\ y_l &= N_s(1 - x - \Delta x) \\ y_e &= N_s(1 + x - \Delta x) \end{aligned}$$

여기서,
 y_p = 최대 상관 값
 y_l = 최대 상관 값 다음 샘플 데이터
 y_e = 최대 상관 값 이전 샘플 데이터
 N_s = 샘플 데이터 수
 Δx = 샘플링 간격

식 (5)에서 y_l 을 y_e 로 나누면 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$r \equiv \frac{y_l}{y_e} = \frac{1-x-\Delta x}{1+x-\Delta x} \dots\dots\dots (6)$$

여기서,
 $r = y_e$ 와 y_l 의 비율

식 (6)을 x 에 대하여 정리하면 식 (7)이 된다.

$$x = \frac{(1-r)(1-\Delta x)}{1+r} \dots\dots\dots (7)$$

식 (7)에서 y_p 가 이상적으로 최대 상관 값인 경우, $x=0$, $r=1$ 로 y_e 와 y_l 은 동일한 값이 도출된다. 현실에서 교차 모호 함수는 <Fig. 3>과 같이 날카로운 최댓값을 가질 수 없다. 이를 고려하여 BIS 알고리즘은 2차 곡선 적합 모델을 사용하여 식 (8)과 같이 표현된다.

$$y = ax^2 + bx + c \dots\dots\dots (8)$$

여기서,
 $a, b, c = 2$ 차 곡선 적합 모델의 계수

2차 곡선 적합 모델에서 식 (8)의 해법은 식 (9)를 계산하여 얻을 수 있다.

$$\frac{dy}{dx} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

방정식을 풀기 위하여 최소 세 번의 측정이 필요하고 식 (8)은 다음과 같이 행렬로 표현한다.

$$y = \begin{bmatrix} y_e \\ y_p \\ y_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e^2 & x_e & 1 \\ x_p^2 & x_p & 1 \\ x_l^2 & x_l & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

식 (10)의 계수 a, b, c 는 식 (11)의 역행렬로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e^2 & x_e & 1 \\ x_p^2 & x_p & 1 \\ x_l^2 & x_l & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_e \\ y_p \\ y_l \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

즉, 2차 BIS 알고리즘의 해법은 식 (12)로 구한다.

$$x' = -\frac{b}{2a} \dots\dots\dots (12)$$

여기서,
 $x' =$ BIS 알고리즘으로 도출된 최대 상관 시간

IV. 시각 동기화 시뮬레이션

1. 각 수신기 간 시각 동기화 오차

본 연구에서 제안한 GNSS 신호를 이용한 독립된 수신기 간 시각 동기화 기법의 유효성을 검증하기 위하여 시나리오에 입각한 2회의 시각 동기화 시뮬레이션을 진행하였다. 첫 번째 시뮬레이션은 L5 대역에 20MHz의 수신 샘플링 수신을 가정하여 진행하였고, 두 번째 시뮬레이션은 L5 대역에 5MHz 수신 샘플링 수신기의 수신 데이터와 BIS 알고리즘을 적용하여 TDOA 정보를 도출하는 방식으로 진행하였다. 첫 번째 시뮬레이션에서 각 수신기의 시각을 다르게 설정하여 각 수신기를 400m의 거리로 배치하였다. 충분한 신호 세기를 유지하기 위하여 기준 위성의 고도각은 45도 이상이라 가정하였고 기준 위성이 아닌 위성 신호와 잡음을 신호 생성 시뮬레이션을 이용하여 IF 신호로 각 수신기에 대하여 생성하였다. <Table 1>는 첫 번째 시각 동기화의 시뮬레이션 결과를 표로 만들어 정리하였다. 시간을 거리로 환산하여 결과를 분석하였을 경우, TDOA 오차에 의하여 약 10m 이내의 오차가 존재할 수 있음을 확인할 수 있다.

<Table 1> Time synchronization results with sampling rate 20MHz

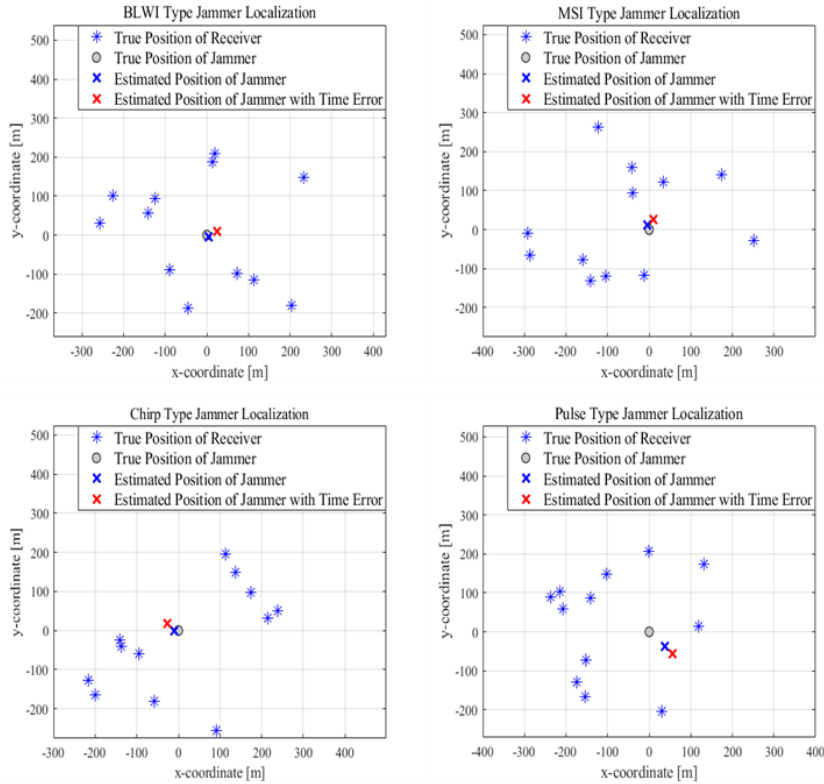
| Receiver | Results | | | |
|----------|---------------|--------------------|----------------|---------------|
| | True TDOA(ns) | Estimated TDOA(ns) | TDOA error(ns) | TDOA error(m) |
| 1 to 2 | -440.79 | -419.98 | 20.81 | 6.25 |
| 2 to 3 | 322.68 | 338.29 | 15.61 | 4.68 |
| 1 to 3 | -118.11 | -149.06 | -30.95 | 9.29 |

두 번째 시뮬레이션에서 첫 번째 시뮬레이션의 조건과 동일한 조건에서 5MHz 수신 샘플링 수신기에서 수신한 것으로 가정하였다. 그리고 BIS 알고리즘을 적용하여 신호 상관 결과의 정확도를 향상하였다. <Table 2>는 시뮬레이션 결과를 수치화하여 정리한 표이다. 첫 번째 시뮬레이션의 결과보다 실제 TDOA 값에 근접한 결과를 확인할 수 있다. TDOA 오차를 거리로 계산하였을 경우, 4배 빠른 샘플링 데이터를 이용한 첫 번째 경우와 비교하여 BIS 알고리즘을 적용하면 계산 부하의 큰 저감과 함께 TDOA 정확도가 10cm내외로 비약적으로 향상됨을 확인할 수 있다.

<Table 2> Time synchronization results with sampling rate 5MHz and BIS algorithm

| Receiver | Results | | | |
|----------|---------------|--------------------|----------------|---------------|
| | True TDOA(ns) | Estimated TDOA(ns) | TDOA error(ns) | TDOA error(m) |
| 1 to 2 | -440.79 | -440.36 | 0.43 | 0.13 |
| 2 to 3 | 322.68 | 322.31 | -0.37 | 0.11 |
| 1 to 3 | -118.11 | -117.60 | 0.51 | 0.15 |

위의 결과를 재머 위치추정 시뮬레이션에 대입하여 첫 번째 시뮬레이션의 시각 오차를 포함한 재머 위치추정을 수행하였다. <Fig. 4>는 시각 오차가 포함된 재머 위치추정 시뮬레이션 결과이다. 재머 위치 추정 시뮬레이션에서 재밍 신호의 종류마다 다른 위치 정확도를 가지므로 BLWI, MSI, chirp, pulse 신호로 총 4개의 신호를 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 청색 별표는 임의로 배치된 수신기의 위치, 회색 원은 재머의 실제 위치, 청색 X표는 시각 오차를 포함하지 않은 재머 추정 위치, 적색 X표는 시뮬레이션에서 도출된 결과를 대입하여 추정된 재머의 위치이다.



<Fig. 4> Jammer position estimation results with time synchronization error

<Table 3>는 첫 번째 시뮬레이션과 두 번째 시뮬레이션의 결과를 위치추정 시뮬레이션에 대입하여 도출한 결과이다. 각 재밍 신호의 시뮬레이션마다 독립적인 시각 동기화 시뮬레이션을 진행하여 결과를 대입하였으며, 시각 동기화 결과는 이전의 결과와 비슷한 결과가 도출되었다. 재머 위치추정 시뮬레이션 결과에서 시각 오차의 결과로 인한 2배 이상의 위치추정 오차 결과 도출이 가능하다.

<Table 3> Estimated jammer position simulation results with time error

| Item | BLWI | MSI | Chirp | Pulse |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Estimated position simulation results without time error(m) | 6.51 | 11.90 | 10.12 | 53.18 |
| Estimated position simulation results with 20MHz sampling time error(m) | 25.78 | 28.79 | 32.02 | 72.20 |
| Estimated position simulation results with BIS algorithm time error(m) | 7.69 | 12.99 | 11.41 | 55.94 |

V. 결 론

본 연구는 GNSS 신호를 이용하여 독립된 수신기 간 시각 동기화에 대한 시나리오 및 알고리즘을 제안하고 이에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션에서 도출된 시각 오차를 재머 위치추정 시뮬레이션에 대입하여 수신기 간 시각 오차가 포함된 재머 추정 위치를 도출하였다.

먼저 시각 동기화 시뮬레이션은 조건이 다른 두 번의 시뮬레이션을 수행하였는데, 첫 번째는 20MHz 수신 샘플링 데이터를 이용하여 두 수신기 간 기하학적 실제 거리와 계산된 거리의 TDOA 오차는 수신기 1과 수신기 2는 20.81ns, 수신기 2와 3은 15.61ns, 수신기 1과 3은 30.95ns였다. 이를 거리로 변환하였을 경우 각각 6.25m, 4.68m, 9.29m이다. 두 번째 시뮬레이션은 5MHz 수신 샘플링 데이터에 BIS 알고리즘을 적용하여 시각 오차를 도출하였다. TDOA 오차 결과는 수신기 1과 2는 0.43ns, 수신기 2와 3은 0.37ns, 수신기 1과 3은 0.51ns로 거리로 변환 시 각각 0.13m, 0.11m, 0.15m이며, 이는 이전의 20MHz 수신 샘플링 데이터로 시뮬레이션에서 도출된 결과보다 향상된 결과이다. 수행된 시각 동기화 시뮬레이션의 두 결과를 재머 위치추정 시뮬레이션에 각 재밍 신호마다 대입하여 수행하였다. 시각 동기화 오차를 포함하지 않은 재머 위치추정 오차는 BLWI 신호는 6.51m, MSI 신호는 11.90m, Chirp 신호는 10.12m, Pulse 신호는 53.18m이다. 20MHz 수신 샘플링 데이터는 BLWI 신호는 25.78m, MSI 신호는 28.79m, Chirp 신호는 32.02m, Pulse 신호는 72.20m이며 5MHz 수신 샘플링 데이터에 BIS 알고리즘을 적용한 결과가 BLWI 신호는 7.69m, MSI 신호는 12.99m, Chirp 신호는 11.41m, Pulse 신호는 55.94m이다.

최근 일상생활에서 GNSS 기술 활용의 증가로 재밍에 대한 대응이 요구된다. 현재까지 GNSS 수신기 단독 운영방식을 고려한 다양한 항재밍 기술이 제안되고 있으나 대부분 고가 군용 시스템에 적합한 형태이다. 이와 비교하여 민간 영역에서는 가격 제약의 이유로 개별적인 GNSS 수신기 자체적으로 고가 항재밍 장치를 부가적으로 연동하는 방식의 채용이 제한되며, 국가인프라망에 해당하는 재밍 모니터링 네트워크를 구축하여 재밍에 대응하는 방식이 각광 받는 추세이다. 이때 재밍 발생 여부, 재머의 종류 판별 및 위치 추정이 핵심 기술이며, 일반적으로 재밍 모니터링 네트워크는 고가의 모니터링부를 활용한 AOA 방식으로 구성된다. 단, AOA 방식은 자율주행에서 이슈가 되고 있는 미약 재밍신호 전력을 갖는 PPD에 효율적 대응이 어렵다. 이를 해결하고자 이상적으로 시각동기를 가정한 저가 GNSS 수신기들로 구성된 GNSS 재밍 신호 모니터링 네트워크 시스템 기술이 제안된 바 있다(Lee et al., 2018a). 일반적으로 GNSS 재밍은 L1/L2/L5 모든 대역에 걸리지 않으며 특정한 1 또는 2 가지 대역에 집중된 현상을 지니는 것에 착안하여, 본 연구는 일정 지역에 다수의 저가 GNSS 수신기의 배치로 구성된 GNSS 재밍 신호 모니터링 네트워크에서 재밍이 걸리지 않은 대역의 수신 신호영역에서 직접적으로 정밀한 시각 동기가 가능하고 최종적으로 정밀한 재머 위치추정이 가능함을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 본 연구의 결과를 활용하면 PPD 같은 미약 재밍 신호원의 위치추정이 가능하고 이를 제거하는 행정명령으로 자율주행 및 드론과 같이 GNSS가 수요에 있는 차세대 이동시스템 안전에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO. 2020R1A2C2013091).

REFERENCES

- Berns H. G., Burnett T. H., Gran R. and Wilkes R. J.(2004), "GPS time synchronization in school-network cosmic ray detectors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 51, no. 3, pp.848-853.
- Clynch J. R., Parker A. A., Adler R. W., Vincent W. R., McGill P. and Badger G.(2003), <https://www.gpsworld.com/the-hunt-rfi/>, 2003.01.01.
- Defraigne P.(2017), *GNSS Time and Frequency Transfer*, In *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Teunissen, P. J. G. and Montenbruck, O. (eds), Springer, pp.1187-1206.
- Gao G. X., Heng L., Hornbostel A. et al.(2013), "DME/TACAN interference mitigation for GNSS: algorithms and flight test results," *GPS Solution*, vol. 17, no. 4, pp.561-573.
- Hall I., Beaumont P. G., Baber G. P., Shuto I., Saga M., Okuno K. and Uo H.(2003), "New line current differential relay using GPS synchronization," In *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, IEEE, vol. 3, p.8.
- Henri Y. and Matas A.(2018), <https://insidegnss.com/rnss-and-the-itu-radio-regulations/>, 2018.01.01.
- Kaplan E. D. and Hegarty C. J.(2006), *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd ed., Artech House, Boston, MA.
- Kar G., Mustafa H., Wang Y., Chen Y., Xu W., Gruteser M. and Vu T.(2014), "Detection of on-road vehicles emanating GPS interference," In *Proceedings of the 2014 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, pp.621-632.
- Kim H. P., Jin G. G. and Won J. H.(2020), "GNSS cloud data processing technique for jamming detection, identification, and localisation," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 14, no. 8, pp.1143-1149.
- Lee J. H., Jeong I. and Won J. H.(2018b), "BASS Algorithm for Enhanced Position Estimation of MEOSAR COSPAS-SARSAT Receivers," In *Proceedings of the 2018 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, pp.292-300.
- Lee J. H., Kim H. P. and Won J. H.(2018a), "GNSS cloud-data processing technique for jamming detection and localization," *ITSNT 2018, International Technical Symposium on Navigation and Timing*, Toulouse, France, 10.31701/itsnt2018.23, hal-01942259.
- Merwe J. R., Rügamer A., Garzia F., Felber W. and Wendel J.(2018), "Evaluation of mitigation methods against COTS PPDs. In 2018 IEEE/ION Position," *Location and Navigation Symposium (PLANS)*, IEEE, pp.920-930.
- Musumeci L., Samson J. and Dovic F.(2014), "Performance assessment of pulse blanking mitigation in presence of multiple Distance Measuring Equipment/Tactical Air Navigation interference on Global Navigation Satellite Systems signals," *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 8, no. 6, pp.647-657.
- Tedeschi C.(2011), "The newark liberty international airport (ewr) gbas experience," *12th Int'l GBAS Working Group Meeting (I-GWG-12)*, Atlantic City, NJ.
- Yoon J. Y., Kim J. W., Lee W. Y. and Eom D. S.(2012), "A TDoA-based localization using precise time-synchronization," In *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology(ICACT)*, IEEE, pp.1266-1271.