

BOC 변조 GNSS 신호를 위한 상관함수 재구성 추적 기법 분석

김도훈, 송재오, 황용택, 박민상, 유호영*

충남대학교 전자공학과

e-mail : dhkim21.cas@gmail.com, josong.cas@gmail.com, ythwang.cas@gmail.com,
mskwak.cas@gmail.com, hyyoo@cnu.ac.kr

Analysis of correlation function reconstruction tracking techniques for BOC Modulation-Based GNSS Signals

Dohun Kim, Jaeo Song, Yongtaek Hwang, Minsang Kwak, and Hoyoung Yoo*

Department of Electronics Engineering

Chungnam National University

Abstract

Next-generation Global Navigation Satellite System (GNSS) adopts Binary Offset Carrier (BOC) modulation to improve precision. However, BOC signals generate side peaks in the autocorrelation function, causing a false lock problem and severe tracking errors. To mitigate this issue, this paper evaluates the positioning accuracy of ASPeCT and USync correlation reconstruction techniques using a Software Defined Radio (SDR) platform. Results verified that ASPeCT and USync eliminates side peaks, demonstrating the low horizontal and vertical errors, although this introduces higher complexity due to correlator branches. This proves that these techniques fundamentally resolve the false lock risk and significantly improve GNSS navigation accuracy.

I. 서론

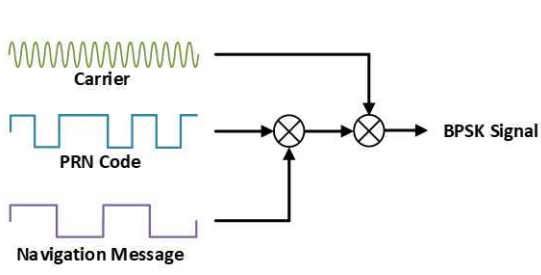
Global Navigation Satellite System (GNSS)은 다양한 산업 분야에서 필수적인 위치, 항법, 시각

정보를 제공하는 핵심 인프라이다[1]. 최근 현대화된 차세대 GNSS는 신호의 간섭 저항성과 정밀도 향상을 위해 기존의 Binary Phase Shift Keying (BPSK) 변조 방식 대신 Binary Offset Carrier (BOC) 변조 방식을 채택한다[2]. BPSK 변조 방식과는 달리 BOC 신호는 신호 생성 과정에서 Pseudo Random Noise (PRN) 코드에 부반송파를 추가로 곱하여 스펙트럼을 분할하는 특징을 갖는다. 그러나 이러한 부반송파는 신호의 자기상관함수에 주 peak 외에도 다수의 부 peak를 발생시킨다. 이로 인해 수신기가 주 peak가 아닌 부 peak에 동기를 맞추는 오동기 문제가 야기될 수 있으며, 이는 잘못된 코드 위상 지연 추적으로 큰 항법 오차를 초래할 위험이 있다. 따라서 본 논문에서는 BOC 신호 추적 시 발생하는 부 peak 문제를 해결하기 위해 고안된 가장 대표적인 상관함수 재구성 추적 기법들을 구현하고 항법 성능 및 복잡도를 비교 분석하고자 한다.

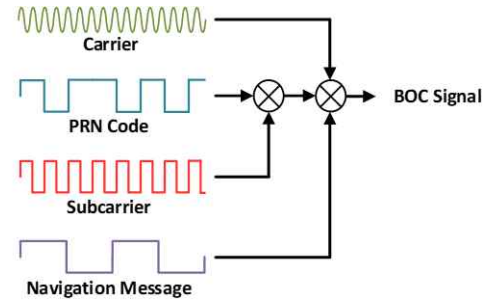
II. Background

2.1 BOC 신호 특성

BOC 변조 신호와 BPSK 변조 신호를 생성하는 과정은 그림 1과 같다. BPSK 신호 생성은 반송파와 PRN 코드, 항법 메시지를 곱하여 신호를 구성하고,

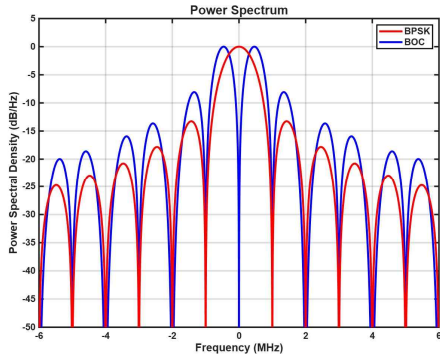


(a) BPSK 신호

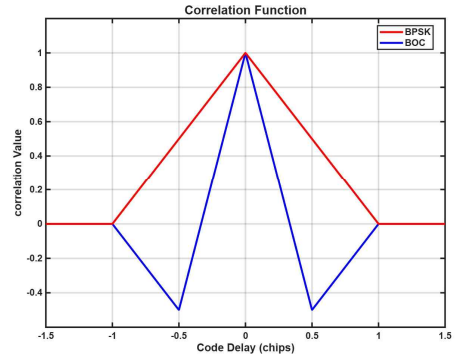


(b) BOC 신호

그림 1. BPSK와 BOC 신호 구성



(a) BPSK와 BOC 신호의 스펙트럼



(b) BPSK와 BOC 신호의 상관 함수

그림 2. BPSK와 BOC 신호의 스펙트럼 및 상관 함수

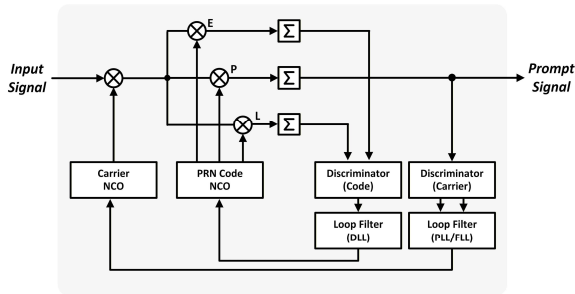


그림 3. 일반적인 신호 추적부 구조

BOC 변조 신호는 부반송파를 추가로 곱하여 신호를 구성한다. 도플러 주파수와 위상 지연을 무시하여 BPSK 신호 S_{BPSK} 를 시간 t 에 대하여 나타내면 식 (1)과 같다.

$$S_{BPSK}(t) = [C(t) \times D(t)]\omega_s (2\pi f_c t), \quad (1)$$

식에서 C 는 PRN 코드를 나타내고 D 는 항법 메시지를 의미하며 BPSK 신호는 반송파 주파수 f_c 를 갖는 캐리어가 곱해지는 단순한 형태로 신호가 구성됨을 알 수 있다. 마찬가지로 BOC 신호 S_{BOC} 를 시간에 대해 나타내면 식 (2)와 같다.

$$S_{BOC}(t) = [C(t) \times D(t) \times S_x(t)]\omega_s (2\pi f_c t) \quad (2)$$

BOC 신호는 기본적으로 식(1)의 BPSK 신호 구조와

동일하나, 부반송파 S_x 가 추가적으로 곱해진 형태로 구성됨을 알 수 있다. BOC 신호의 스펙트럼 및 상관함수의 특성을 BPSK와 비교한 그림은 그림 2과 같다[3]. 스펙트럼 측면에서 BPSK는 중심 주파수에 전력이 집중되는 단일 로브 형태를 갖는 반면, BOC 신호는 부반송파의 영향으로 에너지가 대칭적으로 분할되어 중심 전력이 최소화된다. 또한 상관함수에서 BPSK는 단일 삼각형 피크를 형성하지만, BOC 신호는 부반송파로 인해 폭이 좁은 주 peak와 다수의 부 peak를 발생시킨다. 이러한 부 peak 특성은 BOC 신호에 사용되는 부반송파의 주파수에 따라 달라지게 되며 부반송파의 주파수가 커질수록 상관함수 내에 생성되는 부 peak의 개수는 증가하게 된다[4].

2.2 일반적인 신호 추적부

신호 추적은 입력 신호와 수신기 내부에서 생성한 로컬 복제 신호의 상관 결과로부터 코드 위상 오차와 반송파 주파수 및 위상을 추정한다. 그림 3은 일반적인 신호 추적의 구조를 나타내며, 이는 크게 carrier 추적 루프와 code 추적 루프로 구분할 수 있다[5]. 입력 신호는 carrier 추적 루프를 통해 반송파 제거 과정을 거친 후, 코드 Numerically

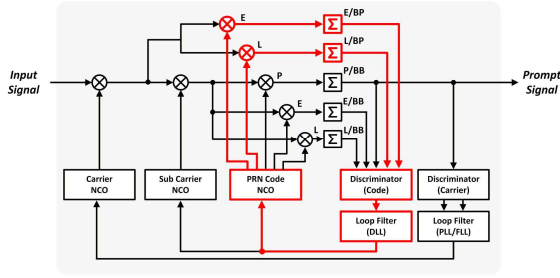


그림 4. ASPeCT 신호 추적부 구조

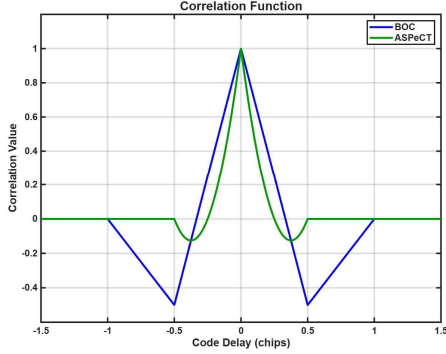


그림 5. ASPeCT 기법의 상관 함수

Controlled Oscillator(NCO)에서 생성된 부반송파가 곱해진 Early(E), Prompt(P), Late(L) 세 가지 위상의 복제 코드와 각각 상관 적분 된다. 이렇게 산출된 E, L 상관 값은 코드 판별기로 인가되어 코드 위상 지연을 산출하며, 이 값은 루프 필터를 통해 다시 NCO를 제어하여 P 복제 신호가 상관함수의 peak에 위치하도록 유도한다. BOC 신호와 같이 상관함수에 다수의 부 peak가 존재하는 경우, P 신호가 주 peak가 아닌 부 peak에 동기화되더라도 판별기는 이를 오차가 없는 정상 상태로 인지할 수 있다.

III. BOC 상관함수 재구성 추적 기법

3.1 ASPeCT

Autocorrelation Side Peak Cancellation Technique(ASPeCT) 추적 기법은 수신된 BOC 신호를 두 가지 서로 다른 BOC 및 PRN 로컬 코드로 상관 처리한 뒤 이를 결합하여 부 peak가 제거된 새로운 상관함수를 재구성하는 기법이다[6]. 그림 4는 ASPeCT 기반의 신호 추적부를 나타내며, 일반적인 BOC 신호 추적 구조와 같이 부반송파와 PRN 코드를 함께 곱해 E, P, L을 생성하는 구조에, 색으로 강조한 부분의 부반송파 없이 PRN code만을 별도로 이용하는 E_{PRN} , L_{PRN} 상관 분기를 추가로 생성한다.

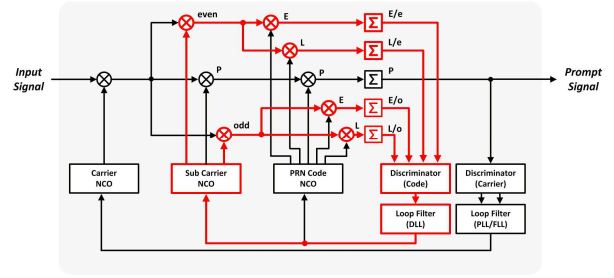


그림 6. USync 신호 추적부 구조

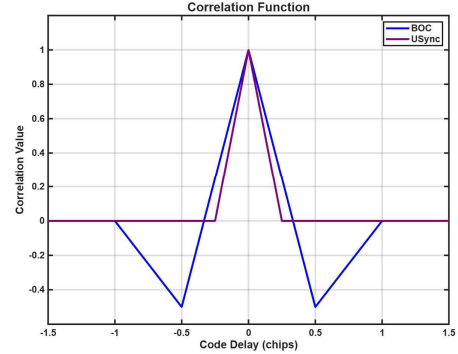


그림 7. USync 기법의 상관 함수

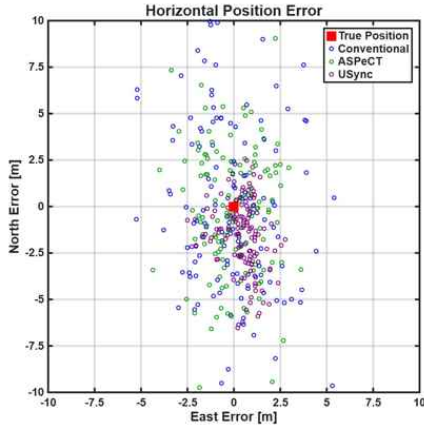
수신 신호와 로컬 PRN 코드만을 곱한 상관 결과는 BOC 자기 상관 함수의 peak 위치와 유사한 형태를 띠는 특성이 있다. 이에 ASPeCT 추적 기법은 식 (3)과 같이 ASPeCT 상관 함수 R_{ASPeCT} 를 재구성한다.

$$R_{ASPeCT} = R_{B/B}^2 - R_{B/P}^2 \quad (3)$$

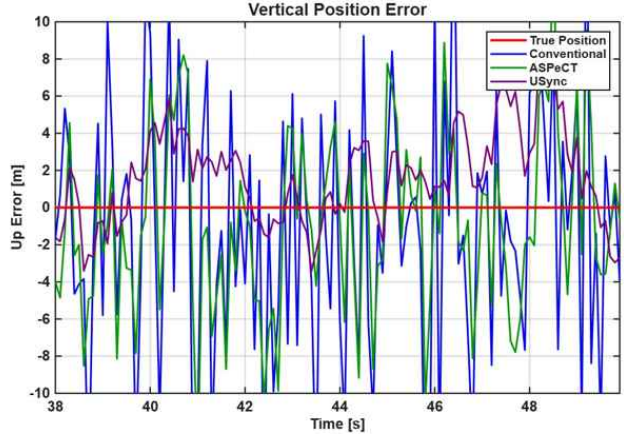
$R_{B/B}$ 는 BOC-BOC 상관 결과, $R_{B/P}$ 는 BOC-PRN 상관 결과를 나타내고 $R_{B/B}$ 의 제곱에서 $R_{B/P}$ 의 제곱을 감산하는 방식으로 R_{ASPeCT} 를 재구성한다. 이 과정을 통해 그림 5와 같은 상관함수를 갖게 되고, 부 peak의 성분은 일부 제거되며, 주 peak의 뾰족한 특성은 유지된다[7].

3.2 Unambiguous Synchronization

Unambiguous Synchronization(USync) 추적 기법은 기존의 단일 E, L 상관기를 사용하는 구조와 달리, 상관기를 홀(Odd), 짝(Even) 단위로 분할해 side peak가 제거된 새로운 상관함수를 재구성하는 기법이다[8]. 그림 6은 USync 기반의 신호 추적부를 나타내며, 수신 신호는 내부에서 생성된 두 가지 형태의 보조 신호인 Odd 성분과 Even 성분으로 나뉘어 색으로 강조한 부분과 같이 각각의 상관 함수를 구성한다. 이때, 내부에서 생성되는 Odd 및 Even 지역 코드는 재구성한 부반송파의 형태에 따라 결정된다. odd 상관 함수를 R_o 라고 하고 Even 상관



(a) 수평 오차 비교



(b) 수직 오차 비교

그림 8. BOC 신호 추적 기법의 수평 및 수직 오차 비교

표 1. 실험 신호 구성

구성	신호 생성
코드 위상	0~10,229(Random)
도플러 주파수	-5,000 ~ 5,000Hz(Random)
ADC	16bit
가시위성	8
C/N0	50dB-Hz

함수를 R_e 라고 할 때, 두 상관 함수 성분의 절댓값의 합과 차를 이용해 $R_{U_{sync}}$ 를 식 (4)와 같이 재구성한다.

$$R_{U_{sync}} = |R_e + R_o| - |R_e - R_o| \quad (4)$$

이 과정을 통해 그림 7과 같은 상관함수를 갖게 되고, side peak의 성분이 완전히 제거되며, 주 peak의 뾰족한 특성은 유지된다.

IV. 실험 환경 및 결과

본 논문에서는 각 상관함수 재구성 추적 기법의 성능을 비교 분석하기 위해 SDR 기반의 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 일반적인 SDR 수신기는 크게 신호 획득, 추적, 그리고 항법 모듈로 구성된다. 본 실험에서는 오직 추적 루프만의 성능을 독립적으로 평가하기 위해, 신호 획득 단계는 병렬 코드 위상 탐색 기반의 획득부로 고정하여 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 모의한 신호의 세부 구성은 표 1과 같다. 원활한 신호 획득을 위해 8개 가시위성의 C/N0는 50dB-Hz로 설정하였으며, 각 기법 간의 성능 차이를 확인하기 위해 코드 및 반송파 판별기를 비롯한 추적 루프의 설정은 모든 알고리즘에 동일하게 적용하였다. 각 신호 추적 알고리즘의 연산 복잡도는 알고리즘 구동에 요구되는 시스템 연산 자원의 양을 의미한다. 일반적으로 하드웨어 및 신호 처리

표 2. BOC 신호 추적 기법의 연산 복잡도

알고리즘	연산 횟수
일반적인 추적 구조	1,964,242
ASPeCT	3,273,670
USync	3,273,678

과정에서 곱셈 연산은 덧셈 연산에 비해 상대적으로 높은 부하를 유발하므로, 본 연구에서는 복잡도 평가로 곱셈 연산의 발생 횟수만을 고려하였다. 알고리즘의 전체 연산량은 단일 추적 루프 주기 내에서 지속적으로 수행되는 누적 연산에 의해 지배된다. 반면, 판별기와 루프 필터 등에 소요되는 연산은 루프 주기당 단 1회만 수행되므로 본 논문에서는 1회의 루프 갱신 주기를 기준으로 총 누적 곱셈 연산량을 산정하여 알고리즘의 복잡도를 비교 분석하였다. 표 2는 기본 추적 구조와, ASPeCT, USync 기법의 연산 복잡도를 나타낸 것이다. 일반적인 추적 구조의 연산량을 100%라고 정규화했을 때, ASPeCT와 USync 알고리즘은 약 1.67배의 연산량을 나타낸다. 이는 각 알고리즘을 구현하기 위해 추가된 누적 상관 분기로 인한 것으로, 일반적인 신호 추적부의 분기는 3개, 개선된 기법들은 5개의 분기를 가지는 것을 통해 유추할 수 있다.

설계한 각 알고리즘의 항법 오차는 전체적인 항법 해의 오차를 평면상의 수평 오차와 고도상의 수직 오차로 구분하여 Root Mean Square(RMS) 기반으로 산출하였다[9-12]. 수평 오차는 경도와 위도 방향의 오차를 합산하여 계산한 2차원 평면 오차이며, 수직 오차는 수평 위치를 제외한 수직 고도 방향의 오차를 의미한다. 그림 8은 기본 BOC 신호 추적 구조와 ASPeCT, USync 기법의 항법 해 분포를 산점도 및 시계열 형태로 나타낸 것이다. True Position을 중심으로, 계산된 위치 좌표들이 얼마나 오차를

가지고 밀집되어 있는지 확인할 수 있다. 수평 오차로는 일반적인 BOC 추적 기법은 5.36, AS-PeCT는 3.65, USync는 2.63m의 항법 오차를 보였으며 수직으로는 7.57, 5.07, 2.98m의 항법 오차를 보였다. 항법 오차를 통해 USync, ASPeCT, 일반적인 추적 구조 순으로 낮은 오차를 출력하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 BOC 신호를 위한 추적 기법으로 ASPeCT와 USync 추적 기법을 구현하고 상관 특성 및 복잡도와 항법 오차를 비교 분석하였다. ASPeCT 추적 기법은 주 peak를 더 날카롭게 구성하면서 부 peak의 크기를 일부 제거하였으나, 완벽하게 제거하지는 못하였다. USync 기법은 부 peak를 완전히 제거하여 모호성이 없는 단일 peak의 형태를 띠는 것을 확인하였다. 또한 실험을 통해 각 기법의 복잡도를 분석했을 때, 일반적인 구조에 비해 고안된 알고리즘들이 누적 상관 분기로 인하여 약 1.67배의 복잡도를 나타내었다. 마지막으로 항법 성능을 분석하였고, USync, ASPeCT, 일반적인 추적 구조 순으로 낮은 오차를 보임을 확인하였다 결과적으로 BOC 신호 추적을 위해 고안된 기법들이 복잡도를 향상시키지만 오동기 위험을 근본적으로 제거함과 동시에 항법 정확도를 향상시키는 이점을 제공한다는 것을 확인하였다. 본 연구는 향후 독자적인 GNSS를 구축하거나, BOC 신호 기반의 차세대 수신기를 설계함에 있어, 하드웨어 구현 가능성을 판단하고 안정성과 정밀도를 모두 확보하기 위한 유용한 설계 지표로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgments

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) (No. 2022R1A5A8026986) and the Ministry of Science and ICT (MSIT) under the ITRC program (IITP-2025-RS-2024-00436406 (50%)) supervised by the IITP(Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation).

참고문헌

[1] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, Understanding GPS/GNSS Principles and Applications, 3rd Ed., Artech House, Norwood, MA, 2017.
[2] 이상욱, 유준규, 변우진. (2021). 위성항법 시스템

및 기술 동향. 한국전자통신연구원. <https://et-trends.etri.re.kr/ettrends/191/0905191006/>

[3] Martin, N., Leblond, V., Guillotel, G., Heiries, V., "BOC(x,y) Signal Acquisition Techniques and Performances," *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003)*, Portland, OR, September 2003, pp. 188–198.

[4] S. Cho, T. Kim, S.-H. Chung, S. Lee, and S.-H. Kong, "Variable BOC Modulation Technique and Performance Analysis for Next-Generation GNSS," in *Proceedings of the 2020 IPNT Conference*, Nov. 2020.

[5] A. S. S. Phyo, H. M. Tun, A. Mon, S. H. Pha, "Implementation and analysis of signal tracking loops for software defined GPS receiver." *Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 9–16, 2020.

[6] J Olivier Julien, Christophe Macabiau, Me Cannon, Gerard Lachapelle. ASPeCT: Unambiguous Sine-BOC(n,n) acquisition tracking technique for navigation applications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43 (1), pp 150–162.

[7] Liu, Chunyang, Hongwei Zhao, and Li Li. "Research on Unambiguous Acquisition of BOC Modulated Navigation Signal." *IoT as a Service: 5th EAI International Conference, IoTaaS 2019*, Xi'an, China, November 16–17, 2019, Proceedings. Springer International Publishing, 2020

[8] Sun, Xiyan, et al. "An Unambiguous Synchronization Scheme for GNSS BOC Signals Based on Reconstructed Correlation Function." *Sensors* 21.6 (2021): 1982.

[9] Chen, Ya-Tzu, Jan, Shau-Shiun, "Performance Analysis of the FPGA-based Software Defined GPS Receiver," *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, September 2012, pp. 2326–2332

[10] Quilis Alfonso, C., Taylor, F., & Akos, D. M. (2023). Galileo High Accuracy Service SDR implementation. *Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS+ 2023*, 2476–2493.

[11] Sauriol, B., Landry, R., "FPGA-Based Architecture for High Throughput, Flexible and Compact RealTime GNSS Software Defined Receiver," *Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, January 2007, pp. 708–717.

[12] Chittimalla Srinu and Laxminarayana Parayitam, "Performance of GNSS-SDR for IRNSS L5 Signals Using a Low-Cost RF Front-End", *Institute of Navigation Jun 2023*, 70 (2) navi.573