

OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호를 위한 비모호 상관 함수 설계

유 승 수*, 김 선 용°

Design of Unambiguous Correlation Function for
OFDM-BOC(8:4:4,2) Signal

Seungsoo Yoo*, Sun Yong Kim°

요 약

본 논문에서는 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호를 위한 비모호 상관 함수를 제안하고, 모의실험을 통해 부호 동기 추적 성능을 확인한다. OFDM-BOC (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Binary Offset Carrier) 신호는 LEO-PNT (Low Earth Orbit - Position, Navigation, and Timing) 구현을 위해 제안된 신호로서 BOC 신호의 장점인 높은 주파수 대역 효율과 부호 동기 추적 성능을 유지하면서도 광대역 변조가 가능하다. 기존 BOC 신호는 대부분 정현(sine) 또는 여현(cosine) BOC 신호만 사용하는 것과 비교해 OFDM-BOC 신호는 정현과 여현 BOC 신호를 모두 사용할 수 있다. 제안한 OFDM-BOC 신호를 위한 비모호 상관 함수는 2개의 기저 신호(basis signal)를 조합하여 구성하며, 설계한 신호의 상관 함수는 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 상관 함수 주첨두(main peak) 폭의 절반 폭의 주첨두만 갖는다. OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 상관 함수가 12개의 오결정점(false-lock point)을 갖는 것과 비교해 설계한 신호의 상관 함수는 오결정점을 전혀 갖지 않으며, 대표적인 다중경로 신호 수신 환경에서 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 부호 동기 추적 오차가 약 4.5m인 반면 제안한 기법은 약 3.0m이고, 부호 동기 추적 오차의 유동 평균의 최고값이 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호보다 절반 정도로 부호 동기 추적 정확도와 안정성이 우수하다.

키워드 : 전파항법위성시스템, 저궤도위성기반 측위시스템, 직교주파수분할다중-이진천이반송파, 비모호 상관 함수, 부호 동기 추적 편이

Key Words : Radio Navigation Satellite System (RNSS), Low Earth Orbit - Position, Navigation, and Timing (LEO-PNT), Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Binary Offset Carrier (OFDM-BOC), Unambiguous Correlation Function, Code Tracking Bias

ABSTRACT

In this paper, we propose an unambiguous correlation function for OFDM-BOC(8:4:4,2) signals and evaluate the spreading code phase tracking performance through simulation. The orthogonal frequency division multiplexing - binary offset carrier (OFDM-BOC) signal is a signal proposed to implement the low Earth orbit-position, navigation, and timing (LEO-PNT) system. Like the binary offset carrier (BOC) signal, the OFDM-BOC signal has high bandwidth efficiency and accurate spreading code phase tracking performance, but is also capable of broadband modulation. Compared with most traditional BOC signals that only use sine or cosine BOC signals, OFDM-BOC signals can use both sine and cosine BOC signals. The designed

※ 이 논문은 2024학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었음

• First Author : Konkuk University, Department of Electrical and Electronics Engineering, kelvin@konkuk.ac.kr, 정회원

° Corresponding Author : Konkuk University, Department of Electrical and Electronics Engineering, kimsy@konkuk.ac.kr, 종신회원
논문번호 : 202404-060-B-RU, Received April 5, 2024; Revised April 28, 2024; Accepted May 10, 2024

unambiguous correlation function for the OFDM-BOC signal is composed of a combination of two basis signals, and the correlation function of the designed signal has only half the width of the main peak of the correlation function of the OFDM-BOC(8:4:4,2) signal. Compared to the correlation function of the OFDM-BOC(8:4:4,2) signal having 12 false-lock points, the correlation function of the designed signal does not have any false-lock point. In a typical multipath signal reception environment, the spreading code tracking bias of the OFDM-BOC(8:4:4,2) signal is about 4.5m, while the proposed scheme is about 3.0m, and the maximum running average of the spreading code tracking bias is about half better than that of the OFDM-BOC(8:4:4,2) signal.

I. 서 론

현재 사용 또는 개발 중인 RNSS (Radio Navigation Satellite System)는 지상 약 20,000km의 MEO (Medium Earth Orbit) 이상의 궤도를 공전하는 측위 위성을 사용하고 있다. MEO 이상의 궤도를 공전하는 측위 위성을 사용하는 경우, 약 24개 이상의 위성을 적절하게 배치하면 지구상 대부분의 위치에서 최소 4개 이상의 측위 위성 신호를 수신할 수 있다. 그러나 약 20,000km 상공에서 송신한 신호는 지표면에 매우 미약한 수준으로 도달하기 때문에 도심, 건물 내 창가 등에서는 RNSS 신호를 수신하기 매우 어렵다¹⁻³. 이에 대한 대안으로 연구 및 개발되고 있는 시스템은 [1]과 [2]와 같은 LEO-PNT (Low Earth Orbit - Position, Navigation, and Timing) 시스템이다. LEO-PNT 시스템은 약 2,000km 상공을 공전하는 저궤도 위성을 활용하는 전파 측위 시스템으로 지표면으로부터 측위 위성까지의 거리가 MEO 위성과 비교해 1/10로 가까워서 같은 세기로 측위 신호를 송신하는 경우, 약 30dB 강한 신호를 지표면에서 수신할 수 있다. 다만, LEO-PNT 위성은 공전 속도가 매우 빠르고, 단일 위성 신호를 수신할 수 있는 영역이 좁아 약 350개 내외의 위성을 적절한 궤도로 배치해야 전지구 영역에서 사용할 수 있다.

LEO-PNT 위성은 필요 위성 수가 RDSS와 비교해 약 10 - 15배 정도 많아서 RDSS처럼 PNT만을 위한 용도뿐만 아니라 상업성 등을 고려하여 광대역 통신용으로도 함께 사용하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구 결과 가운데 하나는 [3]의 OFDM-BOC (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Binary Offset Carrier) 신호이다. OFDM-BOC 신호는 광대역 통신에서 주로 사용하고 있는 OFDM 시스템과 RDSS에서 주파수 대역 효율과 부호 추적 정확도를 높이기 위해 사용하는 BOC 변조 기법을 함께 적용한 신호이다. OFDM-BOC 신호는 10개 이상의 BOC 신호를 합성해 구성하는 경우, 확산

부호 신호의 상관 함수(correlation function)의 모호성(ambiguity)이 상당히 개선된다⁴. 그러나 이보다 낮은 수의 BOC 신호를 합성해 OFDM-BOC 신호를 구성하는 경우, 상관 함수의 모호성이 높다. BOC 신호의 상관 함수는 주첨두(main-peak)와 함께 여러 부첨두(side-peak)가 나타나는데, 확산 부호 획득(spreading code acquisition) 과정에서 부첨두를 잘못 검출(mis-detection)하거나 확산 부호 추적(spreading code tracking) 과정에서 부첨두로 인해 잘못된 부호 동기 시점으로 부호 동기를 오결정(false locking)할 수 있으며, 이를 BOC 신호의 모호성 문제라고 한다⁴.

BOC 신호의 모호성 문제를 해결하기 위해 [5]-[16]처럼 다양한 방법이 연구되었다. 이 방법들은 1) 유사 BPSK 방법 (Binary Phase Shift Keying-like method)^{5,6}, 2) 부첨두 검출 후 모호성 회피 방법(ambiguity avoidance detection method)⁷⁻⁹, 3) 부첨두 제거 방법(side-peak cancellation method)¹⁰⁻¹⁶, 이상 3가지 방법으로 분류할 수 있다⁴. 1) 유사 BPSK 방법은 수신 국소 부호(local code)로 BPSK 변조된 신호만을 사용하기 때문에 상관 함수의 한 칩(chip) 이내에 단일 주첨두만 나타난다. 하지만 BOC 신호의 상관 함수처럼 폭이 좁은 주첨두를 사용할 수 없어 확산 부호 추적 정확도를 향상시킬 수 없다. 2) 부첨두 검출 후 모호성 회피 방법은 5개 이상의 서로 다른 부호 위상을 갖는 많은 상관기를 사용해 BOC 상관 함수를 관찰하고, 부첨두를 검출하여 모호성을 회피하는 방법이다. 이 방법 중 대표적인 방법은 [6]에서 제안한 BJ (Bump-Jump) 방법이다. BJ 방법은 다중 상관기로 BOC 상관 함수를 관찰하고, 현재 추적하는 부호 동기 시점이 오결정될 것으로 판단(bump)되면 다른 상관기가 추적하는 부호 동기기로 도약(jump)해 모호성을 회피한다. [7]의 DET (Double Estimation Technique) 방법과 [8]의 DDPE (Dual sidebands Double Phase Estimator)도 이와 유사하게 오결정 여부 판정 후, 적절한 부호 동기 시점으로 추적 중인 부호 동기 시점을 변경하여 모호성을 회피한다.

이 방법은 오결정을 판정하기 위한 복잡한 구조의 검출기가 필요하고, 도약 후 정상적인 부호 동기 추적을 위한 충분한 회복 시간(recovery time)이 필요하다. 3) 부침두 제거 방법은 부침두를 완화 또는 제거할 수 있는 국소 보조 신호(local auxiliary signal)를 활용해 상관 함수에서 주침두만을 남겨두는 신호처리 기법이다. 이 방법은 부침두 검출 후 모호성 회피 방법과 비교해 긴 회복 시간 없이 빠른 처리가 가능하다. 대표적인 부침두 제거 방법 가운데 하나는 [10]의 ASPeCT (Autocorrelation Side-Peak Cancellation Technique)이다. 하지만 ASPeCT는 매우 한정적인 일부 BOC 신호에만 적용할 수 있으며, 부침두를 완벽히 제거하지 못한다. 이후 다양한 BOC 신호가 제안되면서 [11-16]과 같은 여러 BOC 신호에 적합한 부침두 제거 방법이 제안되었다. 하지만 [3]에서 제안된 OFDM-BOC 신호는 최근에 제안된 신호라서 적합한 부침두 제거 방법이 연구된 바 없다.

본 논문에서는 2장에서 OFDM-BOC 신호 상관 함수의 부침두를 효과적으로 제거하기 위해 OFDM-BOC 신호를 분석하고, 기존 부침두 제거 방법을 참고하여 OFDM-BOC 신호에 적합한 비모호 상관 함수를 설계한다. 그리고 3장에서 모의실험을 통해 제안한 기법의 성능을 분석하고, 4장에서 결론을 맺는다.

II. OFDM-BOC 신호와 비모호 상관 함수 설계

이번 장에서는 [3]에서 제안한 OFDM-BOC 신호 모형을 다시 정리하고, OFDM-BOC 신호 상관 함수의 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호에 적합한 비모호 상관 함수를 설계한다.

[3]에서 제안한 OFDM-BOC($a_K:a_d:a_1,\beta$) 신호 모형은 식 (1)과 같다. 여기서 $a_K = f_K/f_0$, $a_d = f_d/f_0$, $a_1 = f_1/f_0$, $\beta = f_c/f_0$, K 는 부반송파(sub-carrier)의 수, f_K 는 최대 주파수, f_d 는 주파수 간격(frequency interval), f_1 는 최소 주파수, f_0 는 1.023 MHz의 참조 주파수(reference frequency), f_c 는 반송파 주파수(carrier frequency)이다.

$$s(t) = \sum_{i=1}^K [s_{c,i}(t) - js_{s,i}(t)] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [a_i(k)sc_{c,i}(t - kT_C) - jb_i(k)sc_{s,i}(t - kT_C)] \quad (1)$$

여기서, $s_{c,i}(t)$ 와 $s_{s,i}(t)$ 는 각각 여현(cosine) 및 정현(sine) BOC 변조된 신호, $a_i(k)$ 와 $b_i(k)$ 는 동위상(in-phase) 및 직교위상(quadrature) 채널을 통해 전송되는 $a_i(k) \in \{\pm 1\}$, $b_i(k) \in \{\pm 1\}$ 인 항법 데이터, $sc_{c,i}(t)$ 와 $sc_{s,i}(t)$ 는 각각 식 (2)와 식 (3)과 같은 여현 및 정현 BOC 부반송파, $T_C = [\beta \times f_0]^{-1}$ 인 확산 부호 칩 지속 시간(spreading code chip duration)이다.

$$sc_{c,i}(t) = \begin{cases} \text{sign}(\cos(2\pi f_{s,i}t)), & 0 \leq t \leq T_C \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

$$sc_{s,i}(t) = \begin{cases} \text{sign}(\sin(2\pi f_{s,i}t)), & 0 \leq t \leq T_C \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (3)$$

여기서, $\text{sign}(\cdot)$ 는 인자의 부호 출력 함수(signum function), $f_{s,i} = [a_1 + (i-1) \times a_d] \times f_0$, $i = 1, 2, \dots, K-1$ 이다.

수신기의 동기(coherent) 상관값은 식 (4)와 같다.

$$R(\tau) = \int_0^{T_s} s(t)s_L(t+\tau)dt. \quad (4)$$

여기서, τ 는 부호 동기 위상차, T_s 는 확산 부호 주기, $s_L(t)$ 는 국소 신호(locally generated signal)이다. 본 논문에서는 모호성 개선을 위한 부침두 제거에 초점을 맞추기 위해 열 잡음은 고려하지 않는다.

여러 BOC 신호의 상관 함수는 그림 1과 같다. 그림 1에서 흑색 점선은 BPSK(1) 신호의 상관 함수, 흑색 실선과 쇄선은 각각 정현 및 여현 BOC(1,1) 신호의 상

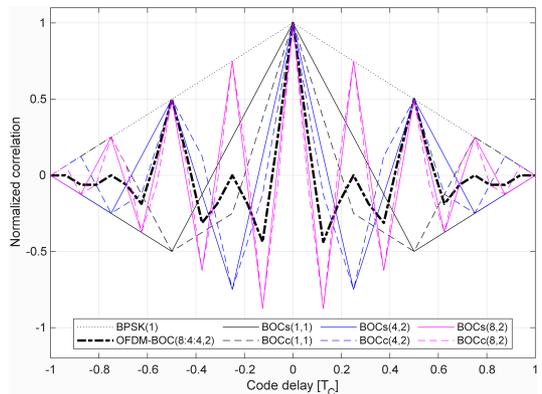


그림 1. 여러 BOC 신호의 상관 함수
Fig. 1. Correlation functions of several BOC signals

관 함수, 청색 실선과 쇄선은 각각 정현 및 여현 BOC(4,2) 신호의 상관 함수, 분홍색 실선과 쇄선은 각각 정현 및 여현 BOC(8,2) 신호의 상관 함수이다. OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호는 정현 및 여현 BOC(4,2) 신호와 BOC(8,2) 신호, 이상 4개의 신호를 결합한 신호이며, 그 상관 함수는 그림 1에서 굵은 흑색 일점 쇄선으로 표시하였다. BOC 신호는 $BOC(\alpha, \beta)$ 로 표현되며, 여기서 $\alpha = f_{sc}/f_0$, f_{sc} 는 부반송파 주파수이다. 본 논문에서 여현 및 정현 BOC 신호는 각각 $BOC_c(\alpha, \beta)$ 및 $BOC_s(\alpha, \beta)$ 로 표시한다. [15]처럼 BOC 신호는 부반송파 변조 차수(sub-carrier modulation order) $M = 2\alpha/\beta$ 이며, BOC 신호의 상관 함수는 1개의 주첨두와 $2(M-1)$ 개의 부첨두를 갖는다. BOC 신호를 EML-DLL (Early-Minus-Late Delay Locked Loop)을 사용해 부호 동기를 추적하는 경우, 상관 함수에 $2(M-1)$ 개의 오결정점(false-lock point)이 나타난다. $BOC_s(1,1)$ 과 $BOC_c(1,1)$ 신호는 $M=2$ 이며, 그림 1의 흑색 실선 및 쇄선과 같이 $\pm T_C/2$ 에서 총 2개의 부첨두를 갖는다. $BOC_s(4,2)$ 와 $BOC_c(4,2)$ 신호는 $M=4$ 이며, 그림 1의 청색 실선 및 쇄선과 같이 $\pm T_C/4$, $\pm 2T_C/4$, $\pm 3T_C/4$ 에서 총 6개의 부첨두를 갖는다. $BOC_s(8,2)$ 와 $BOC_c(8,2)$ 신호는 $M=8$ 이며, 그림 1의 청색 실선 및 쇄선과 같이 $\pm kT_C/M$, $k=1,2,\dots,(M-1)$ 에서 총 14개의 부첨두를 갖는다. OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 상관함수는 그림 1의 굵은 흑색 일점쇄선과 같으며, $\pm kT_C/M$, $k=1,2,\dots,(M-1)$ 에서 총 14개의 부첨두를 갖는다.

BOC 신호처럼 BPSK 신호도 반송파 주파수와 참조 주파수의 비를 인자로 하여 BPSK(1)처럼 표현한다. 본 논문에서 고려하는 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 상관 함수를 분석하기 위해 그림 2처럼 +1과 -1에 대한 연속 시간 펄스 신호에 대한 다양한 신호 파형을 정리하였다. 그림 2(a)는 BPSK(1) 변조된 신호, 그림 2(b)-(d)는 각각 정현 및 여현 BOC(1,1), BOC(4,2), BOC(8,2) 변조된 신호이다. 이 가운데 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호에 사용되는 신호는 그림 2(c)와 그림 2(d)와 같다. 그림 2(c)와 그림 2(d)에서 가장 폭이 좁은 신호는 그림 2(d)의 여현 BOC 신호인 $BOC_c(8,2)$ 신호이다. 따라서 본 논문에서는 이를 고려해 그림 2(e)와 같은 $BOC_c(8,2)$ 신호의 첫째 펄스와 같은 첫째 기저 신호(basis signal)와 마지막 펄스와 같은 α_K 째 기저 신호를 사용한다. 본 논문에서는 첫째 기저 신호를 식 (1)의 $s_{ci}(t)$ 와 $s_{si}(t)$ 대신 사용한 국소 신호 $s_L(t)$ 를 적용한 상관 함수

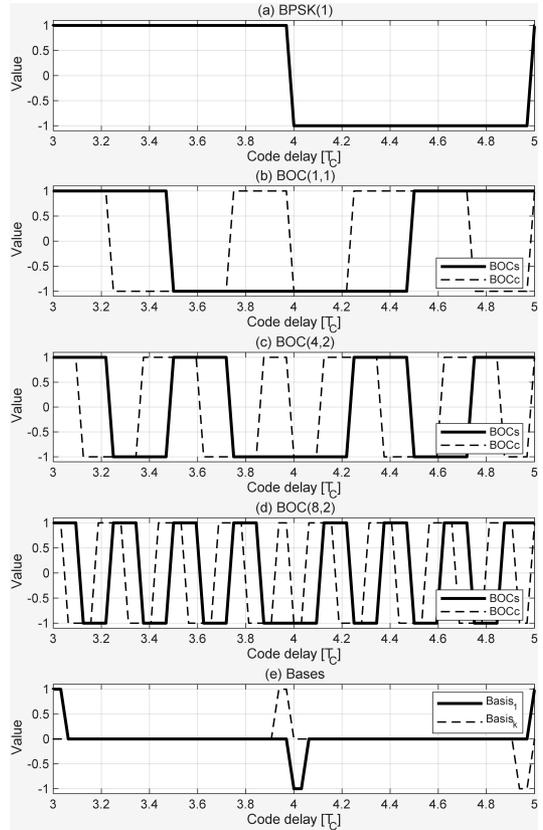


그림 2. +1과 -1에 대한 연속 시간 펄스 신호: (a) BPSK(1) 신호, (b) BOC(1,1) 신호, (c) BOC(4,2) 신호, (d) BOC(8,2) 신호, (e) 제안한 기저 신호
 Fig. 2. Continuous-time pulse signals for +1 and -1: (a) BPSK(1), (b) BOC(1,1), (c) BOC(4,2), (d) BOC(8,2), and (e) proposed basis signals

수를 $R_1(\tau)$, α_K 째 기저 신호를 적용한 상관 함수를 $R_K(\tau)$ 로 적는다. 기저 신호를 국소 신호로 사용한 제안한 비모호 상관 함수는 다음 식 (5)와 같다.

$$R_p(\tau) = |R_1(\tau)| + |R_K(\tau)| - |R_1(\tau) - R_K(\tau)|. \quad (5)$$

식 (5)의 제안한 비모호 상관 함수의 세부 생성 과정은 그림 3과 같다. 그림 3(b)에서 흑색 실선은 식 (5)의 첫째 항과 둘째 항을 더한 값인 $|R_1(\tau)| + |R_K(\tau)|$ 값이며, 적색 쇄선은 식 (5)의 셋째 항인 $-|R_1(\tau) - R_K(\tau)|$ 값이다. 그림 3(a)는 $\pm 0.1T_C$ 를 확대한 결과이다. 그림 3(a)와 그림 3(b)처럼 부호 동기 시점인 부호 지연(code delay) 0 부근을 제외하고, 나머지 영역에서는 그 값이 반전되어 있어 이를 더하면 부첨두를 형성하는 값들이 서로 상쇄된다. 식 (5)를 적용한

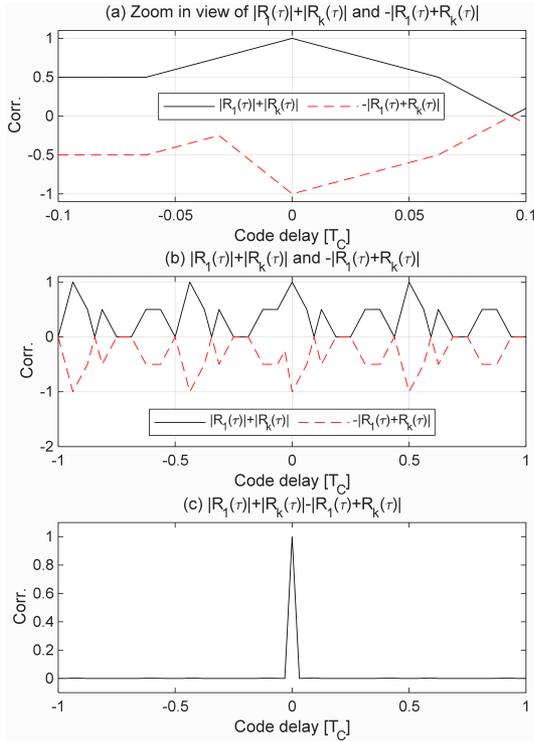


그림 3. OFDM-BOC(8:4:2,2) 신호를 위한 제안한 비모호 상관 함수의 생성 과정: (a) $\pm 0.1T_C$ 이내 영역에서 확대한 $|R_1(\tau)| + |R_k(\tau)|$ 와 $-|R_1(\tau) + R_k(\tau)|$ 신호 개형, (b) $|R_1(\tau)| + |R_k(\tau)|$ 와 $-|R_1(\tau) + R_k(\tau)|$ 신호 개형, (c) 제안한 비모호 상관 함수
 Fig. 3. Generation process of the proposed unambiguous correlation function for OFDM-BOC(8:4:2,2) signal: (a) $|R_1(\tau)| + |R_k(\tau)|$ and $-|R_1(\tau) + R_k(\tau)|$ signal shapes zoomed in the $\pm 0.1T_C$, (b) $|R_1(\tau)| + |R_k(\tau)|$ and $-|R_1(\tau) + R_k(\tau)|$ signal shapes, and (c) the proposed unambiguous correlation function

최종적인 비모호 상관 함수는 그림 3(c)와 같이 $\pm T_C/16$ 이내에서만 하나의 주침두를 갖는다. BPSK(1) 신호와 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 상관 함수, 그리고 제안한 비모호 상관 함수는 그림 4와 같다. 그림 4처럼 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 상관 함수는 모호성이 상당히 높다. 하지만 제안한 비모호 상관 함수는 단일 주침두만 가지며, 그 폭 또한 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호 상관 함수 주침두의 절반이다. 이는 제안한 비모호 상관 함수는 국소 신호에서 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호에 포함된 여러 신호 가운데 가장 신호 펄스폭이 좁은 BOC_C(8,2) 신호를 기반으로 기저 신호를 구성했기 때문이다.

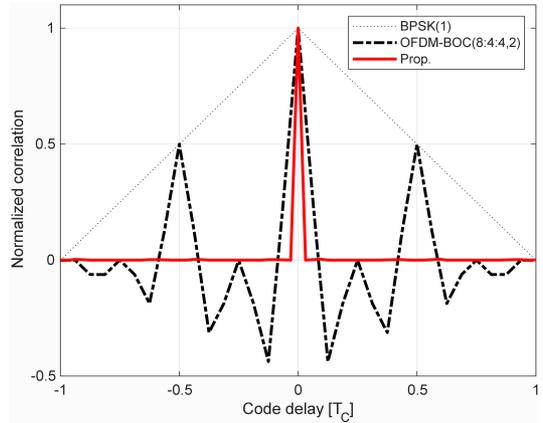


그림 4. BPSK(1)과 OFDM-BOC(8:4:4,2)의 상관 함수, 그리고 제안한 비모호 상관 함수
 Fig. 4. Correlation function of BPSK(1) and OFDM-BOC(8:4:4,2), and the proposed unambiguous correlation function

III. 모의실험 및 분석

본 논문에서는 제안한 비모호 상관 함수의 성능을 확인하기 위해 2선(2-ray) 다중경로 환경에서 모의실험을 통해 여러 신호와 제안한 신호의 부호 동기 추적 편이(spreading code tracking bias)와 그 유동 평균(running average)을 보인다. 고려한 2선 다중경로 환경은 하나의 가시 신호(line-of-sight signal)와 하나의 다중경로 신호만 수신되는 채널 환경으로 주요 매개 변수는 가시 신호와 다중경로 신호의 전력비와 위상차이다. 본 논문에서는 가시 신호 대비 다중경로 신호의 전력비는 -3dB로 설정하고, 서로의 위상차는 동위상(in-phase) 및 역위상(out-of-phase)인 경우만 고려한다. 구체적인 성능 분석을 위해 확산 부호는 GPS (Global Positioning System)의 L1 C/A (Coarse/Acquisition) 부호를 사용했다. GPS L1 C/A 부호의 길이는 1,023 칩이며, 칩 율(chip rate)은 1.023 MHz이다. 다중경로 오차와 그 유동 평균을 실제 거리로 비교하기 위해 광속(light speed)은 299,792,458m/s으로 적용하고, 이른 늦은 상관 간격이 $T_C/16$ 칩인 동기(coherent) EML-DLL을 고려하였다. 이상의 설정을 고려한 동위상 및 역위상인 2선 다중경로 환경에서 여러 신호와 제안한 신호의 부호 동기 추적 편이와 그 유동 평균은 각각 그림 5와 그림 6, 그리고 그림 7과 같다.

그림 5와 그림 6에서 BPSK(1), BOC_S(1,1), BOC_C(1,1) 신호의 최대(또는 최소) 부호 동기 추적 편이는 약 4.5789m이다. OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호는 이보다 다소 낮은 약 4.4814m이다. 끝으로 제안한 비모

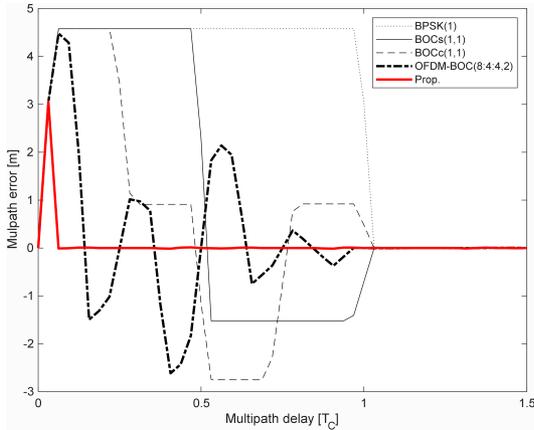


그림 5. 동위상(in-phase)인 2선 다중경로 환경에서 여러 신호와 제안한 신호의 부호 동기 추적 편이
Fig. 5. Code tracking biases of multiple signals and the proposed signal in an in-phase 2-ray multipath environment

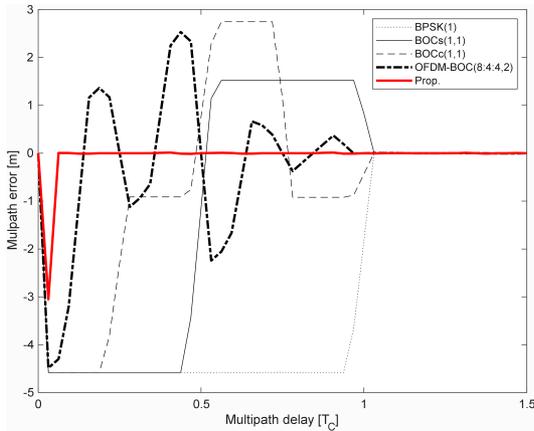


그림 6. 역위상(out-of-phase)인 2선 다중경로 환경에서 여러 신호와 제안한 신호의 부호 동기 추적 편이
Fig. 6. Code tracking biases of multiple signals and the proposed signal in an out-of-phase 2-ray multipath environment

호 상관 함수를 사용했을 때는 약 3.0546m이며, OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호보다 약 68.16% 낮다. 또한 제안한 비모호 상관 함수는 $T_c/16$ 이하의 최근접 다중 경로 지연 환경에서만 부호 동기 추적 편이가 나타나지만, 다른 신호들은 한 칩 이내의 다중경로 지연 환경 대부분에서 부호 동기 추적 편이가 나타난다. 수신기의 부호 동기 추적을 위한 EML-DLL은 부호 동기를 결정(locking)한 이후에도 부호 동기를 세부 추적하는 것을 고려한 성능 지표는 그림 7과 같은 부호 동기 추적 편이의 유동 평균이다. OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 부호 동기 추적 편이의 최대 유동 평균은 약 2.9551m이며, 제안한 기법은 약 1.5273m로 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호

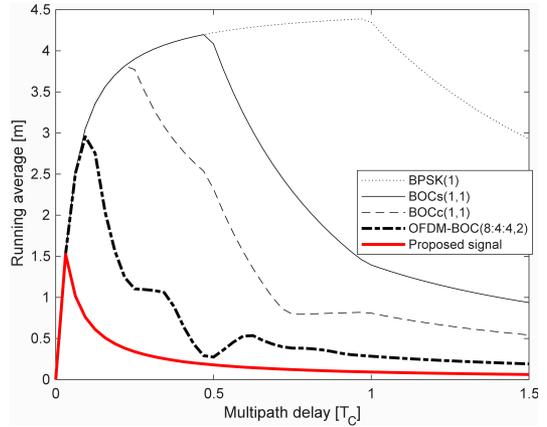


그림 7. 2선 다중경로 환경에서 여러 신호와 제안한 신호의 부호 동기 추적 편이의 유동 평균
Fig. 7. Running average of code tracking biases of multiple signals and the proposed signal in a 2-ray multipath environment

호의 부호 동기 추적 편이의 최대 유동 평균 대비 약 51.68% 수준이다. 다중경로 지연이 약 $1.5 T_c$ 이하일 때, OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 부호 동기 추적 편이의 유동 평균 면적 대비 제안한 신호의 유동 평균 면적 비는 약 33.86%로 제안한 비모호 상관 함수를 사용하면 더욱 정확하고, 안정적인 부호 동기를 추적할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호에 대한 분석을 바탕으로 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호를 위한 비모호 상관 함수를 제안하고, 부호 동기 추적 성능을 모의실험을 통해 확인하였다. 제안한 OFDM-BOC 신호를 위한 비모호 상관 함수는 $BOC_c(8,2)$ 신호의 최소 펄스폭과 같은 폭을 갖는 2개의 기저 신호를 조합하여 구성하였으며, 설계한 신호의 상관 함수는 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 상관 함수 주침두 폭의 절반의 폭을 갖는 주침두만 갖는다. OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 상관 함수가 12개의 오결정점을 갖는 것과 비교해 설계한 신호의 상관 함수는 전혀 오결정점을 갖지 않으며, 대표적인 2선 다중경로 신호 수신 환경에서 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 부호 동기 추적 오차가 약 4.4814m인 반면 제안한 기법은 약 3.0546m로 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호보다 약 68.16% 낮고, 부호 동기 추적 오차의 유동 평균의 최고값은 약 51.68%, 평균 면적비는 약 33.86% 낮다. 따라서 제안한 비모호 상관 함수를 사용하면 OFDM-BOC(8:4:4,2) 신호의 부호 동기를 더욱 정확하

고 안정적으로 추적할 수 있다. 다만, 사용한 기저 함수의 폭은 각각 상관 함수의 $T_c/16$ 로서 2개의 기저 함수를 사용하여 비모호 상관 함수를 구현하므로 상관 전력의 1/8만 사용한다. 따라서 제안한 기법은 열 잡음에 대한 강인성이 낮을 것으로 예상된다. 또한, 본 논문에서는 부호 동기 추적을 위한 모호성 개선 및 다중경로 완화 성능에만 초점을 맞춰 이에 적합한 2선 다중경로 환경에서만 성능을 분석하였다. 추후에는 이를 보완할 수 있는 기법 및 Rician 채널 모형 및 LMSS (Land Mobile Satellite System) 채널 모형 등 다양한 환경을 고려한 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] H. Ge, B. Li, S. Jia, T. Wu, Z. Yang, J. Shang, Y. Zheng, and M. Ge, "LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS): progress, opportunities, and challenges," *Geo-Spatial Inf. Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 1-13, Oct. 2021.
(<https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1978277>)
- [2] F. S. Prol, R. M. Ferre, Z. Saleem, P. Välisuo, C. Pinell, E. S. Lohan, M. Elsanhoury, M. Elmusrati, S. Islam, K. Celikbilek, K. Selvan, J. Yilaho, K. Ruteledge, A. Ojala, L. Ferranti, J. Praks, M. Z. H. Bhuiyan, S. Kaasalainen, and H. Kuusniemi, "Position, navigation, and timing (PNT) through low earth orbit (LEO) satellite: A survey on current status, challenges, and opportunities," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 83971-84002, Jul. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3194050>)
- [3] L. Deng, Y. Yang, J. Ma, Y. Feng, L. Ye, and H. Li, "OFDM-BOC: A broadband multi-carrier navigation modulation-based BOC for future GNSS," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 3, pp. 3964-3979, Mar. 2024.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3328252>)
- [4] E. S. Lohan, D. A. de Diego, J. A. López-Salcedo, G. Seco-Granados, P. Boto, and P. Fernandes, "Unambiguous techniques in modernized GNSS signal," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 34, no. 5, pp. 38-52, Sep. 2017.
(<https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2711778>)
- [5] A. Burian, El. S. Lohan, and M. Renfors, "BPSK-like methods for hybrid-search acquisition of Galileo signals," in *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 5211-5216, Istanbul, Turkey, Jun. 2016.
(<https://doi.org/10.1109/ICC.2006.255493>)
- [6] E. S. Lohan, A. Burian, and M. Renford, "Low-complexity unambiguous acquisition method for BOC-modulated CDMA signals," *Int. J. Satellite Commun. and Netw.*, vol. 26, no. 6, pp. 503-522, Nov./Dec. 2008.
(<https://doi.org/10.1002/sat.922>)
- [7] F. M. Schubert, J. Wendel, M. Söllner, M. Kaindl, R. Kohl, "The astrium correlator: Unambiguous tracking of high-rate BOC signals," in *Proc. 2014 IEEE/ION PLANS 2014*, pp. 589-601, Monterey, CA, May 2014.
(<https://doi.org/10.1109/PLANS.2014.6851420>)
- [8] M. S. Hodgart and E. Simons, "Improvements and additions to the double estimation technique," in *Proc. 2012 6th ESA NAVITEC 2012 & Eur. Wkshp. GNSS Signal and Signal Proc.*, pp. 1-7, Noordwijk, Netherlands, Jan. 2013.
(<https://doi.org/10.1109/NAVITEC.2012.6423053>)
- [9] T. Feng, Z. Kai, and C. Liang, "Unambiguous tracking of BOC signals using coherent combination of dual sideband," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 8, pp. 1555-1558, Aug. 2016.
(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2569520>)
- [10] O. Julien, C. Macabiau, M. E. Cannon, and G. Lachapelle, "ASPeCT: Unambiguous sine-BOC(n,n) acquisition/tracking technique for navigation," *IEEE Trans. Aerospace and Electr. Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 150-162, Jan. 2007.
(<https://doi.org/10.1109/TAES.2007.357123>)
- [11] T.-L. Kao and J.-C. Juang, "Weighted discriminators for GNSS BOC signal tracking," *GPS Solutions*, vol. 16, pp. 339-351, Jul. 2012.

- (<https://doi.org/10.1007/s10291-011-0235-7>)
- [12] Y. Ji, S. Song, X. Sun, N. Guo, and Y. Li, "A novel unambiguous acquisition algorithm based on segmentation reconstruction for BOC(n,n) signal," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E106-B, pp. 287-295, Mar. 2023.
(<https://doi.org/10.1587/transcom.2022EBP3042>)
- [13] S. Kim, S. Yoo, S. Yoon, and S. Y. Kim, "A novel unambiguous multipath mitigation scheme for BOC(kn,n) tracking in GNSS," in *Proc. 2007 Int. Symp. Appl. and the Internet Wkshps.*, pp. 1-4, Hiroshima, Japan, Jan. 2007.
(<https://doi.org/10.1109/SAINT-W.2007.10>)
- [14] Y. Lee, D. Chong, I. Song, S. Y. Kim, G.-I. Jee, and S. Yoon, "Cancellation of correlation side-peaks for unambiguous BOC signal tracking," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 569-572, May 2012.
(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2012.020212.111917>)
- [15] S. Attia, K. Rouabah, D. Chikouche, and M. Flissi, "Side peak cancellation method for sine-BOC(m,n)-modulated GNSS signals," *EURASIP J. Wireless Commun. and Netw.*, vol. 2014, no. 34, pp. 1-14, Mar. 2014.
(<https://doi.org/10.1186/1687-1499-2014-34>)
- [16] Y. Ji, X. Chen, Q. Fu, X. Sun, and W. Zhen, "Reconstruction of sub cross-correlation cancellation technique for unambiguous acquisition of BOC(kn, n) signals," *J. Syst. Eng. and Electr.*, vol. 30, no. 5, pp. 852-860, Oct. 2019.
(<https://doi.org/10.21629/JSEE.2019.05.04>)

유 승 수 (Seungsoo Yoo)



2003년 2월 : 건국대학교 전자정보통신공학부 졸업
 2005년 2월 : 동 대학원 공학석사
 2010년 8월 : 동 대학원 공학박사
 2010년 9월 2011년 2월 : 건국대학교 2단계 BK21 위성항법시스템 수신기 기술 연구팀 박사후연구원
 2011년 3월~현재 : 건국대학교 전기전자공학부 조교수
 <관심분야> GNSS 신호처리, 기계학습 기반 GNSS 제밍 신호 검출 및 추정 등
 [ORCID:0000-0002-8648-1540]

김 선 용 (Sun Yong Kim)



1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(최우등)
 1993년 2월 : 동 대학원 공학석사
 1995년 8월 : 동 대학원 공학박사
 1996년~2001년 한림대학교 정보통신공학부 조교수
 2001년~현재 건국대학교 전기전자공학부 교수
 <관심분야> 통계학적 신호처리, 이동통신시스템, 통신이론, GPS 항제밍 신호처리 등
 [ORCID:0000-0002-4192-2146]