

# BOC 신호 동기화를 위한 새로운 주변 침투 제거 기법

준회원 김 상 훈\*, 윤 태 응\*, 이 영 윤\*, 종신회원 한 태 희\*, 윤 석 호\*

## A Novel Side-Peak Cancellation Method for BOC Signal Synchronization

Sanghun Kim\*, Taeung Yoon\*, Youngyoon Lee\* *Associate Members*,  
Tae Hee Han\*, and Seokho Yoon\* *Lifelong Members*

### 요 약

Binary offset carrier (BOC) 신호 동기화 과정은 GPS, Galileo와 같은 위성항법시스템에서 가장 중요한 단계이다. BOC 신호 동기화 과정은 일반적으로, 수신 BOC 신호와 단말기의 BOC 신호 사이의 상관함수를 이용하여 이루어진다. 따라서 BOC 자기상관함수의 다중 침투 문제는 동기화 오차의 주요한 원인이 된다. 최근 Julien에 의해 BOC 상관함수 상의 주변 침투 크기를 줄일 수 있는 기법이 제안되었다<sup>[8]</sup>. 그러나 이 기법은 주변 침투를 완벽히 제거하지 못하며, 적용할 수 있는 신호도 제한적이다. 본 논문에서는 주변 침투가 완벽히 제거된 새로운 상관함수를 제안하였다. 제안한 상관함수는 sine 위상 및 cosine 위상의 BOC 신호 모두에 적용할 수 있으며, 주변 침투를 완벽히 제거할 수 있다. 또한 제안한 상관함수를 효율적으로 구현할 수 있는 상관기 구조도 제안하였다.

Key Words : BOC, side-peak, correlation function, synchronization, GNSS

### ABSTRACT

Binary offset carrier (BOC) signal synchronization is one of the most important steps to recover the transmitted information in global navigation satellite systems (GNSS) including Galileo and global positioning system (GPS). Generally, BOC signal synchronization is based on the correlation between the received and locally generated BOC signals. Thus, the multiple side-peaks in BOC autocorrelation are one of the main error sources in synchronizing BOC signals. Recently, a novel correlation function with reduced side-peaks was proposed for BOC signal synchronization by Julien [8]; however, Julien's correlation function not only still has the side-peaks, but also is only applicable to sine phased BOC( $n, n$ ), where  $n$  is the ratio of the pseudo random noise (PRN) code rate to 1.023 MHz. In this paper, we propose a new correlation function for BOC signal synchronization, which does not have any side-peaks and is applicable to general types of BOC signals, sine/cosine phased BOC( $kn, n$ ), where  $k$  is the ratio of a PRN chip duration to the period of a square wave sub-carrier used in BOC modulation. In addition, an efficient correlator structure is presented for generating the proposed correlation function.

※ 이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00295)

\* 성균관대학교 정보통신공학부 (syoon@skku.edu)

논문번호 : KICS2008-10-462, 접수일자 : 2008년 10월 20일, 최종논문접수일자 : 2008년 11월 10일

## I. 서 론

유럽 항공 우주국에서 (European space agency) 개발중인 Galileo 위성 항법시스템은 새로운 신호 변조 방법인 binary offset carrier (BOC) 변조 기법이 사용될 예정이다. 이러한 BOC 변조는 미국의 global positioning system (GPS) 현대화 에도 적용될 예정이다<sup>[1]-[3]</sup>. BOC 신호는 의사잡음부호와 (pseudo random noise: PRN) 이진 부반송파의 곱으로 생성되며, BOC( $kn, n$ )의 형태로 표시된다. 여기서  $k$ 는 의사잡음부호의 부호율과 이진 부반송파의 주파수 비를 나타내며,  $n$ 은 의사잡음 부호의 부호율을 1.023MHz의 배수로 나타낸 것이다. 이러한 BOC 신호는 부반송파에 따라 sine 위상과 cosine 위상을 가진 BOC 신호로 나눌 수 있다. Sine 위상 BOC 신호의 (SinBOC) 부반송파는  $\text{sgn}\{\sin(2\pi kn t \times 1.023 \times 10^6)\}$ 으로 나타낼 수 있으며, cosine 위상 BOC 신호의 (CosBOC) 부반송파는  $\text{sgn}\{\cos(2\pi kn t \times 1.023 \times 10^6)\}$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\text{sgn}\{\cdot\}$ 은 부호 함수를 나타낸다.

이러한 BOC 변조 방식이 주목받는 이유는 신호 에너지를 대역의 가장자리로 손쉽게 이동시킬 수 있기 때문이다. 이러한 특성은 신호들끼리 주파수 대역 공유를 가능하게 하는 장점을 제공한다. 또 다른 BOC 변조의 장점은 다중 경로에 강인한 특성을 지닌다는 점이다. BOC 신호의 자기상관함수는 첨두가 뾰족한 특성을 가지며, 이로 인해 기존 위상 변조 (phase shift keying: PSK) 신호에 비해 다중 경로에 강인한 특성을 지닌다<sup>[4],[5]</sup>. 그러나 이러한 BOC 신호의 장점들은 정확한 동기화를 수행해야 얻어질 수 있는 장점들이다.

BOC 신호 동기화 과정은 일반적으로 두 단계로 이루어진다. 이러한 과정은 신호 획득과 (acquisition) 추적 (tracking) 과정이다. 신호 획득 과정은 수신 신호와 단말기 BOC 신호의 시간 위상을 추적 과정이 처리할 수 있는 범위 안으로 맞춰주는 것이다. 또한 신호 추적 과정은 보다 정밀한 동기화를 수행하여, 동기화를 마무리 하는 것이다. 그림 1은 BOC 신호 획득 및 추적 단계에서의 자기상관함수와 선후 판별기 (early-late discriminator) 출력을 나타낸 것이다. 여기서  $T_c$ 는 의사잡음부호 칩 시간을 나타내며, 오경보는 (false alarm) 추적 과정이 처리할 수 있는 범위 밖의 자기상관함수 값이 주어진 문턱값을 (threshold) 넘었을 때 발생한다. 그림에서

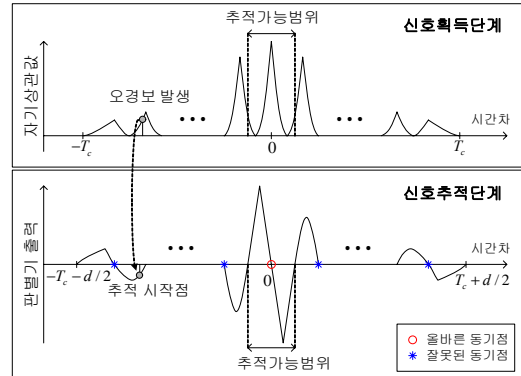


그림 1. BOC 신호 동기화 과정에서 다중 첨두로 인한 문제 발생

볼 수 있듯이, BOC 신호의 자기상관함수는 여러 개의 첨두를 지니므로써, 높은 오경보 확률을 지니며, 이러한 다중 첨두는 올바른 동기화를 방해하는 주요한 요소가 된다.

이러한 다중 첨두 문제를 해결하기 위하여, 몇몇 기법들이 제안되어 왔다<sup>[6]-[8]</sup>. Bump-jumping<sup>[6]</sup> 기법은 연속한 자기상관함수 첨두의 크기를 비교하여 가장 큰 첨두를 찾아내는 기법이다. 이러한 Bump-jumping 기법은 동기화를 수행하기 위한 시간이 오래 걸리며, 주변 첨두의 개수가 증가하면 ( $k$  값이 증가할 때), 이러한 시간이 더욱 증가하는 단점이 있다. BPSK-like 기법<sup>[7]</sup> BOC 자기상관함수의 모양을 BPSK와 유사한 형태로 만들어 주어 주변 첨두를 제거하는 기법이다. 그러나 BPSK-like 기법은, 처리 과정에서 필터링 (filtering), 주파수 이동, 결합 등의 복잡한 연산을 필요로 하기에 구현이 복잡하고, 단말기의 가격이 상승한다는 단점이 있다.

최근 비교적 간단한 하드웨어를 통해 주변 첨두의 크기를 감소시킬 수 있는 기법이 Julien에 의해 제안되었다<sup>[8]</sup>. 이 기법은 BOC 자기상관함수에서 BOC와 의사잡음부호의 상호상관함수를 빼 줌으로써 주변 첨두의 크기를 감소시켰다. 그러나 Julien 기법은 주변 첨두의 크기를 감소시킬 뿐 완벽히 제거하지 못하며, SinBOC( $n, n$ )에서만 적용 가능한 기술이다. Galileo와 GPS의 현대화에는 다양한 BOC 신호들이 사용될 예정이며 (Sin/CosBOC( $kn, n$ ))<sup>[9],[10]</sup>, 따라서, 다양한 신호에 적용 가능한 주변 첨두 제거 기술이 필요한 실정이다.

본 논문에서는, BOC 신호 동기화 과정에서 발생하는 다중 첨두 문제를 해결하기 위하여 새로운 상관함수를 제안하였다. 제안한 상관함수는 주변 첨두

가 발생하지 않으며, 일반적인 Sin/CosBOC(kn, n) 신호에 적용이 가능하다. 또한 제안한 상관함수를 효율적으로 발생시킬 수 있는 상관기 구조도 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 주변 침두 문제를 해결할 수 있는 새로운 상관함수와 상관기 구조를 제안하였다. III장에서는 기존 기법과의 성능 비교를 나타내었으며, IV장에서는 본 논문을 마무리 하였다.

## II. 제안한 기법

### 2.1 상관함수

SinBOC(kn, n) 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$s_{\sin}(t) = c(t)d(t)s_{sc}(t). \quad (1)$$

여기서  $c(t) = (\sqrt{T_c})^{-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i p_{T_c}(t - iT_c)$ 이며,  $c_i \in -1, 1$  는 주기  $T$ 인 의사잡음부호의  $i$ 번째 칩,  $p_{T_c}(t)$ 는 의사잡음 부호의 파형으로  $[0, T_c]$ 에서 단위 구형파로 정의되며,  $d(t)$ 는 항법 데이터,  $c_{sc}(t) = \sum_{l=0}^{2k} \sum_{i=-\infty}^{\infty} (-1)^l p_{T_{sc}}(t - iT_c - lT_{sc})$ 는  $[0, T_{sc}]$ 에서 정의된 단위 구형파,  $T_{sc} = T_c/2k$ 이다.

본 논문에서는 [5], [11]과 같이, 빠른 동기화를 위한 파일럿 채널을 가정하였다 ( $d(t) = 1$ ). 따라서,  $s_{\sin}(t)$ 의 자기상관함수  $R_{\sin}(\tau)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R_{\sin}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T s_{\sin}(t) s_{\sin}(t - \tau) dt \\ &= \frac{1}{T} \frac{1}{T_c} \int_0^T \sum_{l=0}^{2k-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} (-1)^l c_i p_{T_{sc}}(t - iT_c - lT_{sc}) \\ &\quad \times \sum_{m=0j=-\infty}^{2k-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} (-1)^m c_j p_{T_{sc}}(t - \tau - jT_c - mT_{sc}) dt \\ &= \frac{1}{T} \frac{1}{T_c} \sum_{l=0}^{2k-1} \sum_{m=0}^{2k-1} (-1)^{l+m} \\ &\quad \times \int_0^T \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i p_{T_{sc}}(t - iT_c - lT_{sc}) \\ &\quad \times \sum_{j=-\infty}^{\infty} c_j p_{T_{sc}}(t - \tau - jT_c - mT_{sc}) dt \\ &= \sum_{m=0}^{2k-1} \sum_{l=0}^{2k-1} (-1)^{l+m} \Lambda(\tau - (l-m)T_{sc}) \\ &= \sum_{m=0}^{2k-1} R_{\sin}^m(\tau) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $R_{\sin}^m(\tau) = \sum_{l=0}^{2k-1} (-1)^{l+m} \Lambda(\tau - (l-m)T_{sc})$ 는  $m$  번째 부반송과 펄스와  $s_{\sin}(t)$ 와의 상관함수이며,  $\Lambda(\tau)$  다음과 같이 정의된다.

$$\Lambda(\tau) = \begin{cases} T_{sc} - |\tau|, & |\tau| \leq T_{sc} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

(2)에서 알 수 있듯이, BOC 자기상관함수는 삼각 형태인  $\{R_{\sin}^m(\tau)\}_{m=0}^{2k-1}$ 의 합으로 구성됨을 알 수 있다. 또한, 이러한 점에서 BOC 자기상관함수가 여러 개의 침두를 가지게 되는 것도 알 수 있다.

주변 침두 제거를 위하여  $\{R_{\sin}^q(\tau)\}_{m=0}^{2k-1}$ 의 특성을 알아보면,  $q=0, 1, 2, \dots, k-1$ 에 대해서,  $R_{\sin}^q(\tau)$ 와  $R_{\sin}^{2k-q-1}(\tau)$ 는  $\tau=0$ 에 대해 대칭이며,  $2q+1$ 개의 중첩된 침두를 지닌다. 이러한 점에 착안하여,  $|R_{\sin}^q(\tau)| + |R_{\sin}^{2k-q-1}(\tau)| - |R_{\sin}^q(\tau) - R_{\sin}^{2k-q-1}(\tau)|$ 를 통하

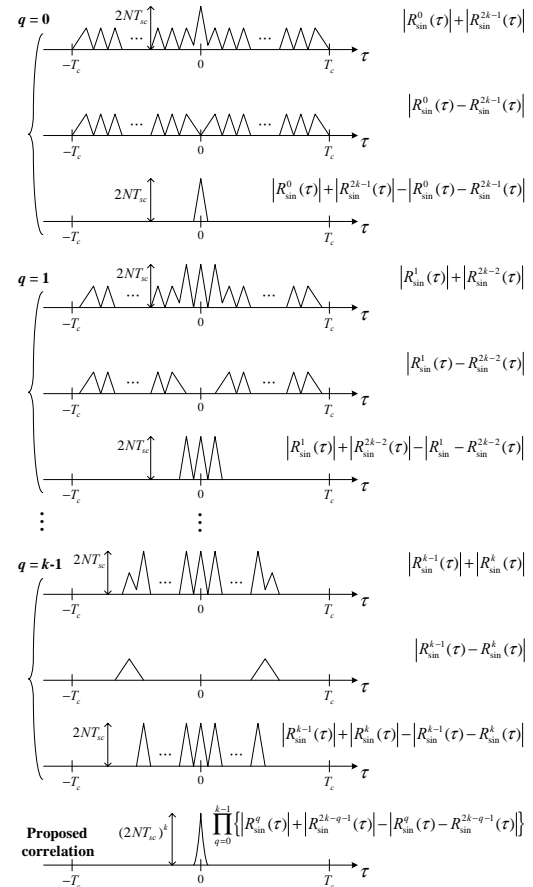


그림 2. 주변 침두가 제거된 상관함수의 생성 과정

여 주변 침두를 제거할 수 있다. 이러한 과정을 그림 2에 나타내었다.  $|R_{\text{sin}}^q(\tau)| + |R_{\text{sin}}^{2k-q-1}(\tau)| - |R_{\text{sin}}^q(\tau) - R_{\text{sin}}^{2k-q-1}(\tau)|$ 는 주침두와  $2q$ 개의 주변 침두를 가지며, 주침두의 위치는 동일하다. 따라서, 주변 침두를 제거하고, 주 침두의 크기를 증가시키기 위하여 다음의 조합을 이용할 수 있다.

$$R_{\text{sin}}^{\text{proposed}}(\tau) = \prod_{q=0}^{k-1} \left\{ |R_{\text{sin}}^q(\tau)| + |R_{\text{sin}}^{2k-q-1}(\tau)| - |R_{\text{sin}}^q(\tau) - R_{\text{sin}}^{2k-q-1}(\tau)| \right\}. \quad (4)$$

여기서  $|\cdot|$ 은 비동기 연산을 의미한다 (시간 동기화 과정은 반송파 위상 추정보다 선행되어야 함).

CosBOC( $kn, n$ ) 신호에 대해서도 유사한 과정을 통해서 주변 침두 제거를 수행할 수 있다. CosBOC( $kn, n$ ) 신호는  $\frac{1}{\sqrt{T_c}} \sum_{l=0}^{4k-1} \sum_{i=-\infty}^{\infty} (-1)^{[l/2]} c_{pT_c}(t - iT_c - T_{\text{cd}}l)$ 으로 표현할 수 있으며, 여기서  $T_{\text{cc}}$ 는 ( $=T_c/4k$ ) 부반송파 펄스 시간이며,  $[\cdot]$ 은 올림 (ceiling) 연산자이다. 따라서, 주변 침두가 제거된 CosBOC( $kn, n$ ) 신호의 상관함수는 다음 식에서 얻을 수 있다.

$$R_{\text{cos}}^{\text{proposed}}(\tau) = \prod_{q=0}^{2k-1} \left\{ |R_{\text{cos}}^q(\tau)| + |R_{\text{cos}}^{4k-q-1}(\tau)| - |R_{\text{cos}}^q(\tau) - R_{\text{cos}}^{4k-q-1}(\tau)| \right\}. \quad (5)$$

### 2.2 상관기 구조

제안한 상관함수는 단순 구현에 의해서는  $4k$ 개의 상관기를 필요로 하게 되지만, 그림 3과 같은 샘플링 스위치 구조를 사용하게 되면, 필요로 하는 상관기 개수를 줄일 수 있다. 그림에서  $f_c$ 와  $\phi$ 는 각각 반송파의 주파수와 위상을 나타내며,  $P$ 는 동기화를 위한 관측 길이이다. 그림의 구조는 SinBOC( $kn, n$ )을 고려한 구조이지만, CosBOC( $kn, n$ )에 대해서도 손쉽게 적용할 수 있다 (그림에서  $2k$ 를  $4k$ 로 바꿈으로써 CosBOC 신호에서도 동일한 역할을 수행할 수 있음). 수신된 BOC 신호는 먼저 단말기의 의사잡음부호 및 부반송파와 곱해진 후, 기저대역 동일위상 (in-phase: I) 및 직교위상 (quadrature: Q) 신호로 변환된다. 전체 적분 시간  $T$ 동안 I-Q 가지의 샘플링 스위치가 매  $T_{\text{sc}}$ 시간마다 이동하며 더해진 후  $(R_{\text{sin}}^m)^{I/Q}$ 가 얻어진다. 여기서  $m=0,1,\dots,2k-1$ 이며,  $(\cdot)^{I/Q}$ 는  $(\cdot)$ 의 I/Q 성분을 의미한다. 최종적으로, (4)의  $\{(R_{\text{sin}}^m)^{I/Q}\}_{m=0}^{2k-1}$ 들이 결합하여  $R_{\text{sin}}^{\text{proposed}}(\tau)$ 이 얻어진다.

$$R_{\text{sin}}^{\text{proposed}}(\tau) = \prod_{q=0}^{k-1} \left\{ \sqrt{\{(R_{\text{sin}}^q)^I\}^2 + \{(R_{\text{sin}}^q)^Q\}^2} + \sqrt{\{(R_{\text{sin}}^{2k-q-1})^I\}^2 + \{(R_{\text{sin}}^{2k-q-1})^Q\}^2} \right\} \quad (6)$$

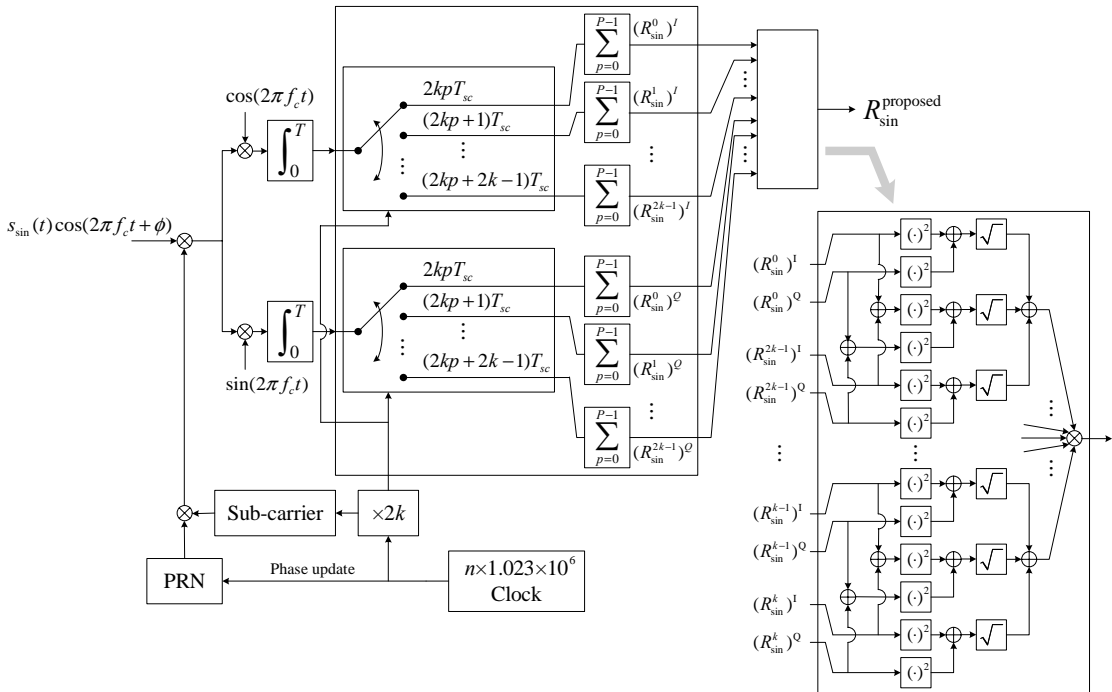


그림 3. 제안한 상관함수를 생성하기 위한 상관기 구조도.

### III. 성능 비교

본 장에서는 제안한 상관함수를 기존 Julien 상관함수 및 BOC 자기상관함수와 비교하였다. 성능 비교의 기준은 주 침투와 전체 침투 사이의 전력비를 이용하였다.

그림 4는 Sin/CosBOC( $n, n$ ) 신호에 대해서 제안한 상관함수, Julien 상관함수, BOC 자기상관함수를 나타낸 것이다. BOC 자기 상관함수는 주변 침투 제거 기술이 적용되지 않은 원래의 상관함수를 알아보기 위해 참고로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, Julien 기법은 SinBOC( $n, n$ ) 신호에 대해서는 주변 침투를 감소시키는 효과가 있지만, CosBOC( $n, n$ )에 대해서는 거의 효과가 없음을 알 수 있다. 반면에, 제안한 상관함수는 Sin/CosBOC( $n, n$ )에 대해서 주변 침투를 완벽히 제거할 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 Sin/CosBOC( $kn, n$ ) 신호에 대해서  $k$ 값이 증가함에 따라 제안한 상관함수, Julien 상관함수, BOC 자기상관함수의 전력비를 나타낸 것이다. 제안한 기법은  $k$ 값에 상관없이 전력비 1을 가짐에 반해, Julien 상관함수와 BOC 자기상관함수는  $k$ 값이 증가함에 따라 전력비가 감소함을 알 수 있다 (전력비 1은 상관함수에서 주변 침투가 전혀 없음을 나타낸다).

또 다른 주목할 점은 CosBOC 신호에서는 Julien 상관함수와 BOC 자기상관함수가 더욱 낮은 전력비를 가짐에 비해 제안한 기법은 여전히 1의 전력비를 가진다는 것이다.

그림 6과 7은 각각 Sin/CosBOC( $n, n$ ), Sin/CosBOC( $2n, n$ ) 신호에 대해 다중경로 성분이 존재할 경우

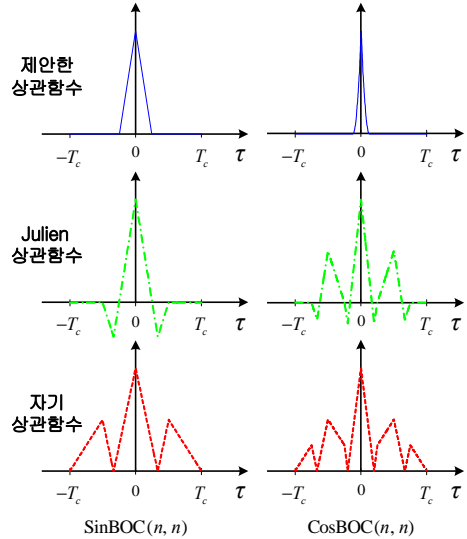
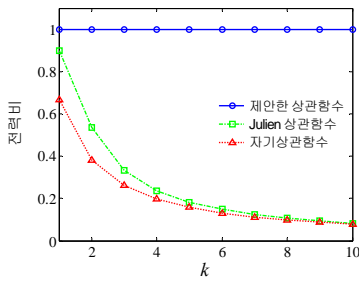
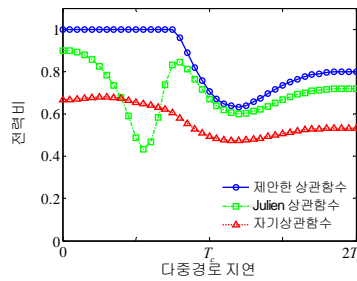


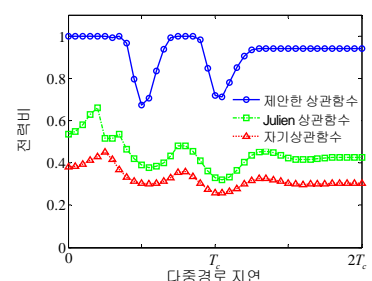
그림 4. Sin/CosBOC( $n, n$ ) 신호에 대한 각 상관함수들의 비교



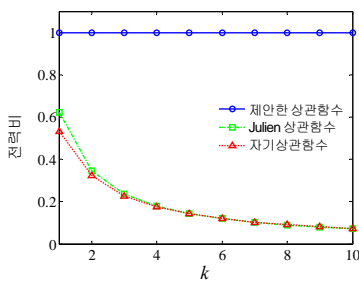
(a) SinBOC( $kn, n$ )



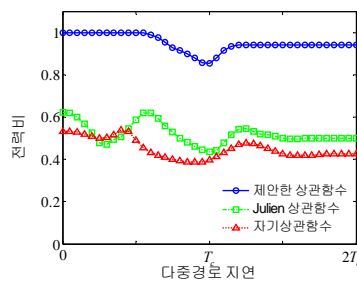
(a) SinBOC( $n, n$ )



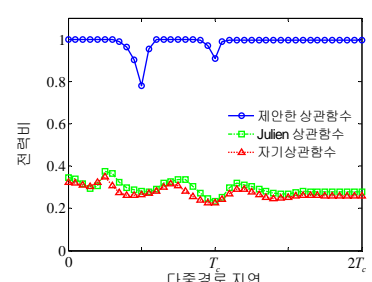
(a) SinBOC( $2n, n$ )



(b) CosBOC( $kn, n$ )



(b) CosBOC( $n, n$ )



(b) CosBOC( $2n, n$ )

그림 5. SinBOC( $kn, n$ ) 및 CosBOC( $kn, n$ ) 신호에 대해 각 상관함수들의  $k$ 값에 따른 전력비 비교

그림 6. Sin/CosBOC( $n, n$ ) 신호에 대해 각 상관함수들의 다중경로 환경에서의 전력비 비교

그림 7. Sin/CosBOC( $2n, n$ ) 신호에 대해 각 상관함수들의 다중경로 환경에서의 전력비 비교

의 전력비를 나타낸 것이다. 다중경로 환경은 다음과 같은 2경로 모델을 사용하였다<sup>[12]</sup>.

$$h(t) = \delta(t) + \alpha\delta(t - \beta). \quad (7)$$

여기서  $\alpha$ 는 두 번째 경로의 감쇄 비율,  $\beta$ 는 첫 번째 경로와 두 번째 경로의 시간차,  $\delta(t)$ 는 Dirac-delta 함수이다. 본 논문에서는  $\alpha$ 를 0.5로 설정하였다.

이러한 그림에서 알 수 있듯이, 제안한 기법은 다른 상관함수들에 비해 높은 전력비를 가지며, 이러한 차이는  $k$ 값이 증가함에 따라 더욱 커짐을 알 수 있다. 특정  $\beta$ 값에 대해서는 제안한 기법의 전력비가 낮아지는 현상을 관찰 할 수 있다. 이러한 것은  $\beta$ 값이 부반송과 주기의 정수배 부근에서는 제안한 기법이 주변 침두를 완벽히 제거하지 못함을 나타낸다. 그러나 기존 Julien 기법이나 BOC 자기상관함수보다 우수한 전력비를 가지기 때문에, 주변침두 억제 효과는 우수하다 할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 BOC 신호 동기화를 위한 새로운 상관함수를 제안하였다. 기존의 Julien 상관함수 및 BOC 자기상관함수와는 다르게, 제안한 상관함수는 주변 침두를 가지지 않으며, 일반적인 형태의 BOC 신호에 (Sin/CosBOC( $kn, n$ )) 적용이 가능하다. 제안한 상관함수는 다중경로가 없을 때 뿐 아니라 존재할 경우에도, 기존의 Julien 상관함수 및 BOC 자기상관함수 보다 우수한 전력비를 보임을 알아보았다. 또한 본 논문에서는 제안한 상관함수를 효율적으로 구현할 수 있는 상관기 구조도 함께 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

[1] W. Bornemann, "Navigation satellite system Galileo," *Acta Astronautica*, vol. 54, pp. 821-823, June 2004.

[2] H. L. Trautenberg, T. Weber, and C. Schafer, "GALILEO system overview," *Acta Astronautica*, vol. 55, pp. 643-647, Aug. 2004.

[3] S. Wallner, G. Hein, T. Pany, J. A. Rodriguez, and A. Posfay, "Interference computation between GPS and Galileo," in *Proc. ION GNSS*, pp. 861-876, Long Beach, CA, Sep. 2005.

[4] J. W. Betz, "Binary offset carrier modulations for radionavigations," *Journal of The Institute of Navigation*, vol. 48, pp. 227-246, Winter 2001-2002.

[5] G. W. Hein, J. Godet, J. L. Issler, J. C. Martin, P. Erhard, R. Lucas-Rodriguez, and T. Pratt, "Status of Galileo frequency and signal design," in *Proc. ION GPS*, pp. 266-277, Portland, OR, Sep. 2002.

[6] P. Fine and W. Wilson, "Tracking algorithm for GPS offset carrier signals," in *Proc. ION NTM*, pp. 671-676, San Diego, CA, Jan. 1999.

[7] N. Martin, V. Leblond, G. Guillotel, and V. Heiries, "BOC(x, y) signal acquisition techniques and performances," in *Proc. ION GPS*, pp.188-198, Portland, OR, Sep. 2003.

[8] O. Julien, C. Macabiau, M. E. Cannon, and G. Lachapelle, "ASPECT: Unambiguous sine-BOC (n, n) acquisition/tracking technique for navigation applications," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, pp. 150-162, Jan. 2007.

[9] G. W. Hein, M. Irsigler, J. A. Rodriguez, and T. Pany, "Performance of Galileo L1 signal candidates," in *CD-ROM Proc. ENC GNSS*, Rotterdam, Netherland, May 2004.

[10] S. Fischer, A. Guerin, and S. Berberich, "Acquisition concepts for Galileo BOC(2,2) signals in consideration of hardware limitations," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 2852-2856, Milan, Italy, May 2004.

[11] E. S. Lohan, A. Lakhzouri, and M. Renfors, "Complex double-binary-offset-carrier modulation for a unitary characterisation of Galileo and GPS signals," *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol. 153, pp. 403-408, Oct. 2006.

[12] J. Soubielle, I. Fijalkow, P. Duvaut, and A. Bibaut, "GPS positioning in a multipath environment," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, pp. 141-150, Jan. 2002.

