

# 차세대 GPS 시스템에 알맞은 국소 신호 설계

채근홍\*, 윤석호<sup>o</sup>

## Local Signal Design for Future GPS Systems

Keunhong Chae\*, Seokho Yoon<sup>o</sup>

### 요약

본 논문에서는 차세대 GPS 시스템에 채용된 시간 복합 이진 오프셋 반송파의 (time-multiplexed binary offset carrier: TMBOC) 신호 추적 성능을 향상시키기 위한 국소 신호를 설계한다. 구체적으로 TMBOC 변조는 BOC(6,1) 신호 성분을 포함하고 있다는 점으로부터 착안하여, TMBOC(6,1,4/33) 신호의 부반송파를 BOC(6,1) 부반송파 펄스 주기로 일정하게 나누는 방식으로 국소 신호를 설계한다. 이후, 설계한 국소 신호를 통해 얻은 부분 상관함수들을 재조합하여 TMBOC(6,1,4/33) 신호의 자기상관함수에 존재하는 주변 첨두를 제거함으로써 모호성 문제를 해결한다. 모의실험을 통해 설계한 국소 신호를 이용하여 신호 추적을 수행할 경우, 자기상관함수 및 기존의 기법을 이용하는 경우에 비해 향상된 추적 오류 표준편차 (tracking error standard deviation: TESD) 성능을 가짐을 확인하였다.

**Key Words** : global navigation satellite systems (GNSSs), global positioning system (GPS) modernization, time-multiplexed binary offset carrier (TMBOC), signal tracking, tracking error standard deviation (TESD)

### ABSTRACT

In this paper, we design a local signal to improve a tracking performance of time-multiplexed binary offset carrier (TMBOC) signal, which was adopted in modernized global positioning systems (GPS). Specifically, considering that TMBOC signal includes BOC(6,1) components, we first obtain local signal by evenly dividing sub-carrier of TMBOC(6,1,4/33) by the period of a BOC(6,1) pulse. Finally, we remove side-peaks of TMBOC(6,1,4.33) autocorrelation via combination of partial correlations given from designed local signal and solve the ambiguity problem. From numerical results, when performing signal tracking using the designed local signal, we demonstrate that the improved tracking error standard deviation (TESD) performance is offered as compared its autocorrelation and the conventional correlation functions.

### 1. 서론

현재 가장 널리 사용되고 있는 항법위성시스템은 (global navigation satellite system: GNSS) 1978년

초 군사 목적으로 미국에서 개발된 범지구측위시스템으로 (global positioning system: GPS) 민간에게 공개된 이후, 차량, 선박, 항공 등에서 운용에 가장 중요한 정보 중 하나인 측위 정보를 지속적으로 제공하고

\* 이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2012R1A2A2A01045887, 2014R1A5A1011478)을 받아 수행된 연구임.

• First Author : Sungkyunkwan University, College of Information & Communication Engineering, chae0820@skku.edu, 학생회원  
<sup>o</sup> Corresponding Author : Sungkyunkwan University, College of Information & Communication Engineering, syoon@skku.edu, 종신회원  
 논문번호 : KICS2014-04-134, Received April 17, 2014; Revised June 4, 2014; Accepted June 4, 2014

있다<sup>1,2)</sup>. 최근에는 모바일 기기 등에도 탑재되어 부가적인 서비스를 제공하는 위치 기반 서비스 (location-based service) 크게 각광받고 있다<sup>3)</sup>. 더불어, 최근에는 미국의 GPS에 대해 독립적인 시스템을 구축하기 위해 유럽 연합에서 (European Union: EU) Galileo 시스템을 개발하는 등 활발한 연구 및 개발이 이루어지고 있으며, 미국 내에서도 기존의 노후된 GPS를 개선하기 위한 GPS 현대화 개발을 진행하고 있다<sup>4,5)</sup>. 특히, GPS 현대화 계획에서는 2024년까지 위치 추적 성능 향상, 재밍에 대한 안정성 향상 등을 목표로 총 32개의 GPS III 위성을 발사할 계획이다<sup>6)</sup>.

GPS 현대화 (GPS modernization) 및 Galileo에서는 기존의 GPS가 사용하는 위상 편이 변조 (phase shift keying: PSK) 신호에 비해 더욱 정교한 위치 추적이 가능할 뿐 아니라, 기존의 PSK 신호와 동일한 대역을 점유하는 이진 오프셋 반송파 (binary offset carrier: BOC) 신호를 채용하고 있다<sup>7,8)</sup>. BOC 신호는 확산 코드의 일종인 의사잡음부호와 (pseudo random noise: PRN) 사인 또는 코사인 구형 (rectangular) 부분송파의 (sub-carrier) 곱으로 이루어지며, 부분송파의 위상에 따라 사인 위상 BOC 신호와 코사인 위상 BOC 신호로 나뉘어진다. BOC 신호는  $BOC(kn, n)$ 으로 표현되며,  $k$ 는 PRN 코드 칩 주기와 부분송파 (sub-carrier) 주기의 비를 나타내는 양의 정수이며,  $n$ 은 PRN 코드 전송률과 1.023MHz와의 비를 나타낸다<sup>8)</sup>. 이후에는 GPS 현대화와 Galileo 시스템 간의 호환성을 고려한 복합 이진 오프셋 반송파 (multiplexed BOC: MBOC) 신호가 제안되었고, 사인 위상 BOC(1,1) 및 사인 위상 BOC(6,1) 신호가 전력 분리 비율 1/11로 결합된 MBOC 신호를 사용하기로 최종적으로 결정하였다. 특히, GPS 현대화에서는 MBOC 신호 중에서 시간에 따라 사인 위상 BOC(1,1) 신호 및 BOC(6,1) 신호가 일정한 규칙으로 번갈아가며 나타나는 시간 복합 이진 오프셋 반송파를 (time-multiplexed BOC: TMBOC) 채택하였으며, 본 논문에서는 TMBOC 신호에 적용될 수 있는 국소 신호를 설계하며, 특히 동기화를 위한 파일럿 채널에서 전송되는 TMBOC(6,1,4/33) 신호에 초점을 맞춘다.

항법위성 단말기는 수신되는 위성신호와 동일한 국소 신호를 내재하고 있으며, 국소 신호를 이용하여 얻을 수 있는 자기상관함수를 통하여 신호 동기화가 가능하다. TMBOC(6,1,4/33) 신호의 자기상관함수는 기존의 PSK 신호의 자기상관함수와 BOC(1,1) 신호의 자기상관함수에 비해 더욱 뾰족한 주 첨두를 (main-peak) 가지기에 기존의 PSK 및 BOC(1,1) 신호

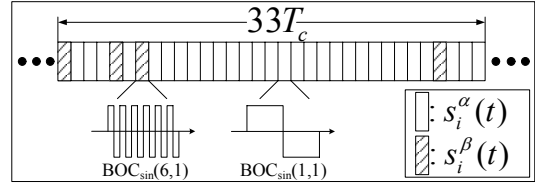


그림 1. TMBOC(6,1,4/33) 신호의 부분송파 구조.  
Fig. 1. The sub-carrier structure of TMBOC(6,1,4/33) signal.

에 비해 더욱 우수한 측위 정확도를 제공한다. 다만, TMBOC(6,1,4/33) 신호의 자기상관함수는 BOC 신호의 자기상관함수처럼 주변 첨두가 (side-peak) 존재하며, 신호 추적 과정에서 주변 첨두에서 동기화가 완료되는 모호성 문제가 (ambiguity problem) 발생할 수 있다. 주변 첨두에서 신호 동기화가 완료되고 유지되면 시간 동기화 오차가 곧 위치 측정에서의 거리오차로 나타나기 때문에, 모호성 문제를 반드시 해결하여야 한다.

최근 BOC 및 MBOC 신호에서 발생하는 모호성 문제를 해결하는 기법들이 제안되어 왔다<sup>9-14)</sup>. 그러나 이러한 연구들은 TMBOC 신호에 직접적으로 적용되기 어렵다.

본 논문에서는 TMBOC(6,1,4/33) 신호의 동기화 과정에서 발생하는 모호성 문제를 해결하기 위하여, 새로운 국소신호를 설계한다. 구체적으로는 TMBOC(6,1,4/33) 신호를 12개의 부분 부분송파로 (partial sub-carrier) 균일하게 나눈 국소 신호를 제안한다. 다음으로 설계한 국소 신호를 이용하여 생성한 부분 상관함수를 (partial correlation) 재조합하여 모호성 문제를 해결하는 일련의 과정을 소개한다.

이후 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 TMBOC 신호 모형을 소개하고, III장에서 본 논문에서 설계한 부분 국소 신호를 소개하며 이를 이용하여 모호성 문제를 해결하는 일련의 과정을 소개한다. IV장에서는 제안한 비모호 상관함수를 이용한 경우의 추적 오류 표준편차 (tracking error standard deviation: TESD) 성능이 자기상관함수와 [13]의 기법에 비해 뛰어남을 보인다. 마지막으로, V장에서는 본 논문의 결론을 내린다.

## II. TMBOC(6,1,4/33) 신호 모형

GPS 현대화 L1 대역에서는 전력 분리 비율 1/11로 결합된 TMBOC 신호를 사용할 예정이다. 여기서 파일럿 신호 성분의 전력은 전체 신호 전력의 75%를 차

지하며, 데이터 신호 성분은 25%를 차지한다. 다만, 데이터 신호 성분에는 BOC(1,1) 신호만이 포함되기에, 파일럿 성분은 BOC(6,1) 신호와 BOC(1,1) 신호가 4/33의 전력 분리 비율로 결합되어 전송되며 이를 TMBOC(6,1,4/33)으로 표기한다. 본 논문은 신호 동기화를 위한 국소 신호 설계에 초점을 맞추고 있기에, TMBOC(6,1,4/33) 신호를 기준으로 국소 신호를 설계한다.

TMBOC(6,1,4/33) 신호의 기저대역 신호  $B(t)$ 는 아래의 (1)과 같이 나타낸다.

$$B(t) = \sqrt{P} \sum_{i=-\infty}^{\infty} p_i r_{T_c}(t - iT_c) d(t) s_i(t) \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 신호전력,  $p_i \in \{-1, 1\}$ 는 주기가  $T$ 인 PRN 코드의  $i$ 째 칩,  $r_{\alpha}(t)$ 는  $[0, \alpha]$ 에 존재하는 단위 구형파,  $T_c$ 는 PRN 코드 칩 주기,  $d(t)$ 는 항법 데이터,  $s_i(t)$ 는 TMBOC(6,1,4/33) 신호의  $i$ 째 PRN 코드 칩에 존재하는 부분송파를 나타낸다. TMBOC(6,1,4/33) 신호는 신호 동기화를 위해 사용

되는 파일럿 성분이므로, 신호 동기화 과정에서의 항법 데이터  $d(t)$ 는 1로 설정하여, 데이터가 존재하지 않는다고 가정한다. 또한 PRN 코드의 경우 Legendre 수열로부터 결정한 Weil 수열을 적용한다.

TMBOC(6,1,4/33) 신호의 부분송파  $s_i(t)$ 는 그림 1에서 나타낸 바와 같이 BOC<sub>sin</sub>(1,1) 신호의 부분송파  $s_i^{\alpha}(t)$ 와 BOC<sub>sin</sub>(6,1) 신호의 부분송파  $s_i^{\beta}(t)$ 로 구성되며,  $33T_c$ 의 주기를 갖는다. 각각의 부분송파는 아래의 (2)와 같은 규칙으로 구성되어 TMBOC(6,1,4/33) 신호의 부분송파를 이룬다.

$$s_i(t) = \begin{cases} s_i^{\alpha}(t), & (i \neq 33j, 33j+4, 33j+6, 33j+29) \\ s_i^{\beta}(t), & (i = 33j, 33j+4, 33j+6, 33j+29) \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $j$ 는 임의의 정수이다. BOC<sub>sin</sub>(1,1) 신호의 부분송파  $s_i^{\alpha}(t)$ 와 BOC<sub>sin</sub>(6,1) 신호의 부분송파  $s_i^{\beta}(t)$ 는 수식 (3)과 같이 나타내어진다.

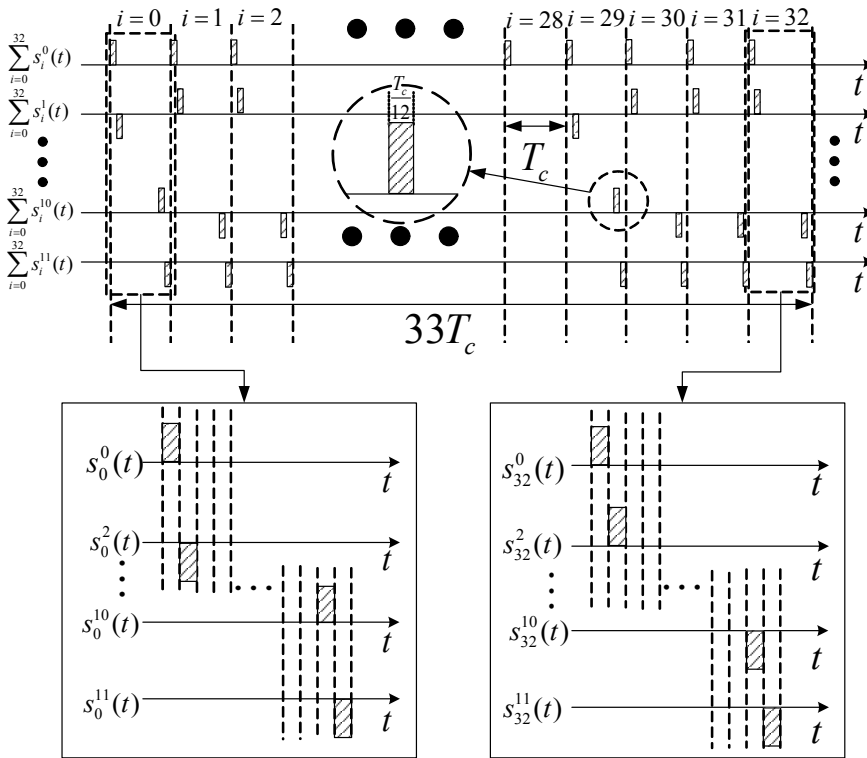


그림 2. TMBOC(6,1,4/33) 신호 추적을 위해 설계한 국소 신호  
 Fig. 2. The designed local signal for TMBOC(6,1,4/33) signal tracking.

$$\begin{cases} s_i^\alpha(t) = \sum_{m=0}^1 (-1)^m r_{T_s^\alpha}(t - iT_c - mT_s^\alpha), \\ s_i^\beta(t) = \sum_{m=0}^{11} (-1)^m r_{T_s^\beta}(t - iT_c - mT_s^\beta) \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $T_s^\alpha = T_c/2$  로 BOC<sub>sin</sub>(1,1) 신호의 부반송파 펄스 주기이며,  $T_s^\beta = T_c/12$  로 BOC<sub>sin</sub>(6,1) 신호의 부반송파 펄스 주기이다.

### III. 설계한 국소 신호를 이용한 모호성 문제 해결

본 논문에서는 TMBOC(6,1,4/33) 신호의 부반송파를 부분 부반송파로 재해석함으로써 새로운 국소 신호를 설계한다. 구체적으로는 TMBOC(6,1,4/33) 신호를 구성하고 있는 BOC(6,1) 신호 성분으로 인해 TMBOC(6,1,4/33) 신호가 기존 BOC(1,1) 신호에 비해 신호 추적 성능이 향상된다는 점에 착안하여 TMBOC(6,1,4/33) 신호의 부반송파를 동일한 폭  $T_c/12$  를 갖는 12개의 부반송파 펄스로 나누어 새로운 국소 신호를 생성한다. 새로운 국소 신호를 아래의 (4)와 같이 표현할 수 있으며, 설계한 국소 신호를 그림 2에 도시하였다.

$$s_i(t) = \sum_{l=0}^{11} s_i^l(t) \quad (4)$$

여기서 설계한 국소신호  $s_i^l(t)$  는 PRN 코드  $i$  제 칩의  $l$  제 부반송파 펄스를 나타낸다.

위에서 설계한 국소 신호를 기반으로 정규화된

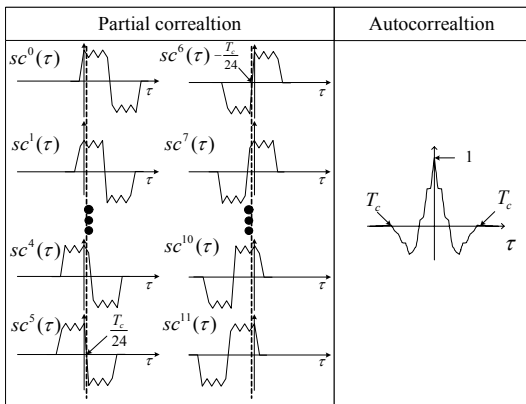


그림 3. TMBOC(6,1,4/33) 신호의 부분 상관함수와 자기상관함수.  
Fig. 3. The partial correlation and autocorrelation of TMBOC(6,1,4/33).

TMBOC(6,1,4/33) 신호의 자기상관함수  $R(\tau)$  를 아래의 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \frac{1}{PT} \int_0^T B(t)B(t+\tau)dt, \\ &= \sum_{l=0}^{11} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_0^T \frac{B(t)}{T\sqrt{P}} p_i r_{T_c}(t+\tau - iT_c) s_i^l(t+\tau)dt, \\ &= \sum_{l=0}^{11} sc^l(\tau) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $sc^l(\tau)$  는  $l$  제 설계한 국소 신호와 TMBOC(6,1,4/33) 수신 신호  $B(t)$  를 상관한 부분 상관함수를 의미한다. 그림 3에서는 설계한 국소 신호들과 수신 신호  $B(t)$  를 PRN 코드 한 칩 주기  $T_c$  동안 상관한 부분 상관함수를 나타낸다. 이를 통해 TMBOC(6,1,4/33) 신호의 자기상관함수는 12개의 부분 상관함수의 합으로 표현할 수 있으며 자기상관함수 역시 그림 3에 함께 도시하였다. 부분 상관함수  $sc^l(\tau)$  는 수식 (6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} sc^l(\tau) &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_0^T \frac{B(t)}{T\sqrt{P}} p_i r_{T_c}(t+\tau - iT_c) s_i^l(t+\tau)dt; \end{aligned} \quad (6)$$

다음으로 위에서 구한 부분 상관함수  $sc^l(\tau)$  를 이용하여 주변 칩두가 제거된 상관함수를 생성한다. 그림 3으로부터 부분 상관함수  $sc^l(\tau)$  와  $sc^{11-l}(\tau)$  는 주 칩두가 생기는 범위를 제외한 부분에서  $sc^l(\tau) \times sc^{11-l}(\tau) \leq 0$  을 만족한다는 것을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 수식  $|x| + |y| - |x - y| = 0, \text{ when } (xy \leq 0)$  을 통해 주변 칩두를 제거할 수 있다. 하지만 본 논문은 모호성 문제를 해결할 뿐만 아니라 신호 추적 성능을 향상시키는 것을 목적으로 하기 때문에 주 칩두의 기울기가 큰 상관함수를 생성하기 위해 자기상관함수의 주 칩두가 생성되는 부분에서 가장 작은 부호 변환점( zero-crossing point ) 가지는 5, 6 제 부분 상관함수를 이용한다. 그림 3을 통해 5, 6 제 부분 상관함수가 주 칩두가 생성되는 부분에서 가장 작은 부호 변환점을 가짐을 알 수 있다. 5, 6 제 부분 상관함수를 이용하여 생성한 주변 칩두가 제거된 1 차 상관함수  $R_0(\tau)$  는 아래와 같이 나타내어진다.

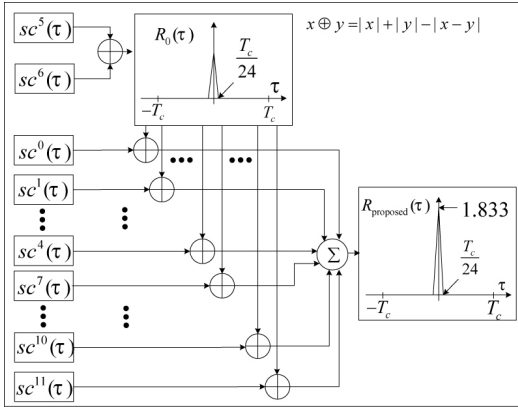


그림 4. TMBOC(6,1,4/33) 신호 추적을 위한 최종 상관함수 생성 과정  
 Fig. 4. The process of generating final correlation function for TMBOC(6,1,4/33) signal tracking

$$R_0(\tau) = |s^5(\tau)| + |s^6(\tau)| - |s^5(\tau) - s^6(\tau)| \quad (7)$$

생성된 1차 상관함수  $R_0(\tau)$ 는 주변 첨두가 완전히 제거되었으나, 자기상관함수에 비해 높이가 현저히 낮기 때문에, 좋은 성능을 기대할 수 없다. 다만, 1차 상관함수를 스케일링하여 높이를 높이는 것은 잡음 성분까지 함께 증가하기 때문에 다른 부분 상관함수와의 추가적인 연산을 통하여 상관함수의 높이를 높이는 연산을 아래의 (8)과 같이 수행하며 이로부터 최종 상관함수  $R_{proposed}(\tau)$ 를 얻는다.

$$R_{proposed}(\tau) = \sum_{l=0, l \neq 5, 6}^{l=11} |s^l(\tau)| + |R_0(\tau)| - |s^l(\tau) - R_0(\tau)| \quad (8)$$

그림 4에서는 (7) 및 (8)의 과정을 거쳐 최종 상관함수를 생성하는 과정을 나타내며, 그림 5에서는 TMBOC(6,1,4/33) 신호의 자기상관함수와 [13]을 이용하여 주변 첨두를 제거한 상관함수, 그리고 본 논문에서 제안한 상관함수를 나타낸다. 그림 5를 통하여 본 논문에서 설계한 국소신호를 이용하여 얻은 상관함수가 자기상관함수 및 [13]의 기법의 상관함수에 비해 더욱 첨예하며 높이가 높을 뿐 아니라, 주변 첨두를 완전히 제거하였기에 이로부터 신호 추적 성능의 향상을 기대할 수 있다. 최종 상관함수  $R_{proposed}(\tau)$ 의 높이는 1.833이고 폭은  $T_c/12$ 인 주 첨두를 갖는다.

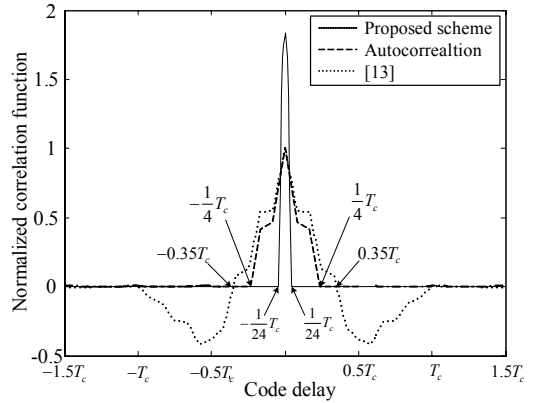


그림 5. 정규화된 기존 상관함수들 및 제안한 상관함수.  
 Fig. 5. The normalized conventional and proposed correlation functions.

TMBOC(6,1,4/33) 신호 추적을 위한 판별기 출력  $D(\tau)$ 은 (discriminator output) 아래의 (9)와 같이 나타내어진다.

$$D(\tau) = R_{proposed}^2(\tau + \frac{\Delta}{2}) - R_{proposed}^2(\tau - \frac{\Delta}{2}) \quad (9)$$

판별기 출력  $D(\tau)$ 은 지연 고정 루프의 (delay lock loop) 수치 제어된 오실레이터에 의해 (numerically controlled oscillator)  $\tau$ 가 0이 될 때까지 동작한다.

#### IV. 모의실험 결과

본 장에서는 TMBOC(6,1,4/33) 신호에 대한 자기상관함수, [13]의 기법을 적용한 상관함수, 설계한 국소 신호를 이용하여 얻은 제안한 상관함수를 이용한 경우의 TESD 성능을 비교한다. TESD는

$\frac{\sigma}{G} \sqrt{2B_L T_I}$ 로 정의되며<sup>[15]</sup>, 여기서  $\sigma$ 는  $D(0)$ 의 표준편차,  $B_L$ 은 루프필터의 대역폭,  $T_I$ 는 적분 시간,  $G$ 는  $\tau=0$ 에서의 판별기 출력의 순간 기울기를 의미한다. 더불어, 모의실험은 다음과 같은 파라미터를 가정하여 진행되었다.  $B_L = 1\text{Hz}$ ,  $T_I = 10\text{ms}$ ,  $T = T_I$ ,  $\Delta = T_c/24$ ,  $T_c/48$ ,  $T_c^{-1} = 1.023\text{MHz}$ .

그림 6에 TMBOC(6,1,4/33) 신호에 대해서 자기상관함수와 [13]의 기법, 제안한 기법의 TESD 성능을 함께 도시하였다. 특히, 그림 6에서의 (a)는  $\Delta = (1/24) T_c$ 인 경우에서, (b)는  $\Delta = (1/48) T_c$ 인 경우에서 모의실험을 수행한 결과이다. 여기서 반

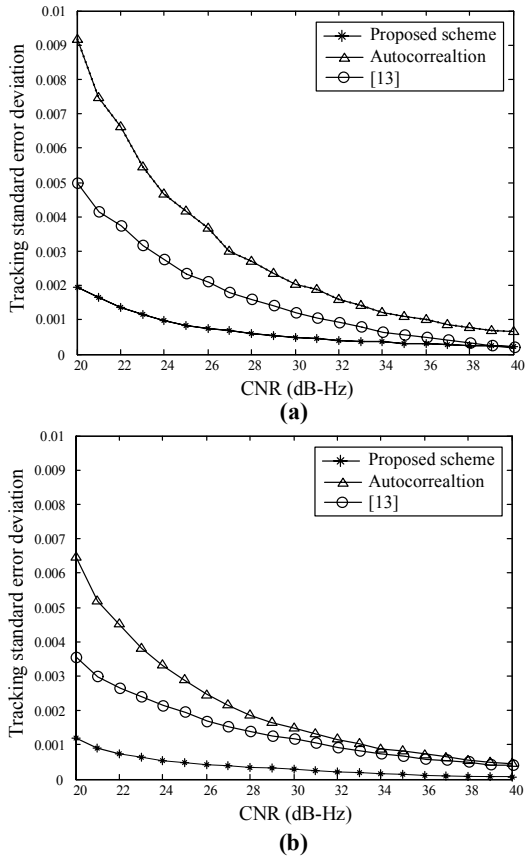


그림 6. 제안한 기법, 기존 기법 및 자기상관함수의 TESD 성능. (a)는  $\Delta$ 가 1/24일 때이고 (b)는  $\Delta$ 가 1/48일 때).  
 Fig. 6. The TESD of proposed scheme, conventional scheme and autocorrelation ( $\Delta$  is 1/24 in case of (a), and  $\Delta$  is 1/48 in case of (b)).

송파 대 잡음비는 (carrier to noise ratio: CNR)  $P/N_0$  dB-Hz 으로 정의되며,  $N_0$ 는 잡음 전력 밀도를 의미한다. 그림 6에 따르면 (a), (b) 모두에서 제안한 기법이 [13] 및 자기상관함수에 비해 모든 관측 구간에서 우수한 성능을 가지며, 그 이유로는 제안한 상관함수는 [13] 및 자기상관함수에 비하여 더욱 첨예하고 높은 첨두를 가질 뿐 아니라, 주변 첨두를 완전히 제거함으로써 모호성 문제를 해결하였기 때문으로 해석할 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 차세대 GPS 시스템에서 이용할 TMBOC(6,1,4/33) 신호를 위한 국소 신호를 설계하였다. 구체적으로는 설계한 국소 신호는 BOC(6,1) 신호가 TMBOC(6,1,4/33) 신호에 포함되었음을 고려하

여, BOC(6,1) 부반송파 펄스 폭으로 일정하게 TMBOC(6,1,4/33) 신호를 나눈 형태로 설계되었다. 설계된 국소 신호를 재조합하여 주변 첨두를 제거한 1차 상관함수를 얻은 후, 나머지 부분 상관함수를 1차 상관함수와 재조합하여 모호성 문제를 해결하였다. 설계한 국소 신호를 통해 얻은 제한한 상관함수는 자기상관함수 및 기존 기법에 비해 더욱 향상된 추적 성능을 보였다.

### References

- [1] J. A. Avila-Rodriguez, "On generalized signal waveforms for satellite navigation," Ph.D. Dissertation, Dept. Aer. Engineer., University of Munich, Munich, Germany, 2008.
- [2] Y. Lee, S. R. Lee, and S. Yoon, "A novel BOC(n,n) correlation function for maritime satellite communications," *J. KICS*, vol. 38C, no. 3, pp. 296-302, Mar. 2013.
- [3] T. Burger, "IOV Status and results," in *Proc. ION GNSS 2012*, pp. 2503-2549, Nashville, TN, Sept. 2012.
- [4] J. W. Betz, "The offset carrier modulation for GPS modernization," in *Proc. 1999 ION NTM*, pp. 639-648, San Diego, CA, Jan. 1999.
- [5] J. W. Betz, "Binary offset carrier modulations for radionavigation," *J. Inst. Navig.*, vol. 48, no. 4, pp. 27-246, Dec. 2001.
- [6] Michael Shaw, "GPS Modernization: On the road to the future," *IGNSS (Int. Global Navigation Satellite Syst. Soc.)*, Nov. 2009.
- [7] G. W. Hein, J. W. Betz, and J.-A. Avila-Rodriguez, C. J. Hegarty, S. Wallner, L. S. Lenahan, A. R. Pratt, J. J. Rushaman, J. Owen, A. L. Kray, J.-L. Issler, and T. A. Stansell, "MBOC: The new optimized spreading modulation recommended for Galileo L1 OS and GPS L1C," in *Proc. IEEE/ION Plans*, pp. 883-892, San Diego, CA, Apr. 2006.
- [8] J.-A. Avila-Rodriguez, "On generalized signal waveforms for satellite navigation," Ph.D. Dissertation, Dept. Aerosp. Eng., Univ. Munich, Munich, Germany, June 2008.
- [9] O. Julien, C. Macabiau, M. E. Cannon, and G.

- Lachapelle, "ASPeCT: unambiguous sine-BOC(n,n) acquisition/tracking technique for navigation applications," *IEEE Trans. Aerosp., Electron. Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 150-162, Jan. 2007.
- [10] A. Burian, E. S. Lohan, and M. K. Renfors, "Efficient delay tracking methods with sidelobes cancellation for BOC-modulated signals," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2007, article ID. 72626, 2007.
- [11] Z. Yao, M. Lu, and Z. Feng, "Unambiguous technique for multiplexed binary offset carrier modulated signals tracking," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 16, no. 7, pp. 608-611, Jul. 2009.
- [12] Z. Yao, X. Cui, M. Lu, Z. Feng, and J. Yang, "Pseudo-correlation-function-based unambiguous tracking technique for sine-BOC signals," *IEEE Trans. Aerosp., Electron. Syst.*, vol. 46, no. 4, pp. 1782-1796, Oct. 2010.
- [13] J. I. Park, Y.-P. Lee, S. Yoon, S. Y. Kim, and Y. H. Lee, "Synchronization technique based on adaptive combining of sub-correlations of multiband sine phased BOC signals," *J. KICS*, vol. 36, no. 11, pp. 694-701, Nov. 2011.
- [14] Y. Lee and S. Yoon, "A novel unambiguous correlation function for composite binary offset carrier signal tracking," *J. KICS*, vol. 38A, no. 6, pp. 512-519, Jun. 2013.
- [15] A. J. Van Dierendonk, P. Fenton, and T. Ford, "Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver," *J. ION*, vol. 39, no. 3, pp. 265-283, 1992.
- 채 근 흥 (Keunhong Chae)  
한국통신학회 논문지 제 38A권 제 10호 참조
- 윤 석 호 (Seokho Yoon)  
한국통신학회 논문지 제 38A권 제 10호 참조