

신호획득 코드를 이용한 장주기 항법신호 획득 기법 설계 및 분석

이기훈^{1†}, 이장용¹, 신장환², 안재민², 황동환³

Design and Analysis of the Long Period Navigation Signal Search Algorithm Using Acquisition Code

Kihoon Lee^{1†}, Jang Yong Lee¹, Jang Hwan Shin², Jae Min Ahn², Dong-Hwan Hwang³

¹Navigation Satellite System Directorate, Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

²Department of Radio Science and Information Communication Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

ABSTRACT

The public regulated restriction signals are encrypted generally with the very long period code in Global Navigation Satellite System (GNSS) including Global positioning system (GPS). Unlike civilian navigation signals, the long period code is used for the security enhancement purpose. The navigation signals with the long period code are very difficult to acquire due to their own non-periodic characteristics. The application of Acquisition Code (AC) is required for the proper working of the long period navigation signals. In this paper, we present the design and analysis results of the navigation signal with acquisition code. Specifically, the acquisition performance and Time To First Acquisition (TTFA) are presented analytically. In the process of the navigation signal design, we include AC length, insertion pattern, code rate, and filter effects. Also, the navigation signal receiving process include the effects of Side Band Filter (SBF), doppler frequency and code phase errors. The indicators that used to evaluate navigation signal acquisition performance are the detectability and TTFA.

Keywords: GNSS, long period, navigation signal, acquisition code

주요어: 위성항법체계, 장주기, 항법신호, 신호획득 코드

1. 서론

전세계 선진국에서 운용중인 Global Navigation Satellite System (GNSS)는 군사용 목적으로 장주기 코드를 갖는 항법 신호를 사용하고 있다 (Spilker et al. 1996, Betz 1999, Kaplan & Hegarty 2006, Broumandan et al. 2016). 일반적인 민간용 항법신호와 달리 보안성 확보를 위해 장주기 코드를 사용한다. 이러한 장주기 코드 항법신호는 장주기 특성으로 인해 신호획득이 매우 어렵다. 이를 극복하기 위해 신호획득 코드 (Acquisition Code, AC)를 장주기 코드 사이에 삽입하여 운용하는 방법이 있다 (Betz 1999).

본 논문에서는 이러한 신호획득 코드를 이용한 장주기 항법신호를 설계하고 그 획득성능을 분석한다. 항법신호 설계 구성요소로서 신호획득 코드의 길이 및 삽입 패턴, 신호획득 코드 삽입 구간에서의 Data/Pilot 전력 비율, 코드 칩 속도, 대역제한필터 영향 등이 존재한다 (Kaplan & Hegarty 2006, Han et al. 2022). 수신 환경 파라미터로는 항법신호 수신 전력, 잡음 전력 밀도, 위성 양각에 따른 수신 안테나 이득, 잡음지수, 양자화 오차 등을 고려한다 (Kaplan & Hegarty 2006). 검색기법으로는 동기식 누적 및 에너지 탐색을 적용하고 Binary Offset Carrier (BOC) 변조 신호의 모호성 해결을 위한 Side band filter 영향, 도플러 주파수 및 코드 위상 오차를 고려한다 (Heiries et al. 2007). 항법신호 획득성능을 평가하는 지표는 신호획득 확률(detectability), 신호획득 소요 시

Received Sep 15, 2024 Revised Oct 06, 2024 Accepted Oct 08, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: hanbee75@hanmail.net



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

간(Time To First Acquisition, TTFA)을 사용한다.

2. 신호획득 코드 설계

2.1 설계 개요

군용 위성항법 신호는 보안성 확보를 위해 암호화된 장주기 코드를 사용한다. 예를 들면 Global Positioning System (GPS) P(Y) 신호는 위성별로 서로 다른 1주일 주기의 코드를 할당하여 사용한다. 그리고, 공개된 P-code를 사용하지만, Anti-Spoofing mode에서는 P-code를 암호화된 Y-code로 대체하여 사용한다. 이처럼 GPS P(Y) 신호는 장주기 코드를 사용함으로써 코드의 반복적인 노출 가능성을 미리 차단하고 인가되지 않은 외부 공격자로부터의 코드의 탐지를 어렵게 만든다. 또한, 높은 보안성이 요구되는 상황에서는 장주기 코드를 암호화된 코드로 대체하여 공격자로부터의 코드 탐지를 더욱 어렵게 만든다 (Kaplan & Hegarty 2006, Wang et al. 2007).

그러나, 장주기 코드의 사용은 보안성이 확보되는 반면, 코드의 길이가 매우 길어 인가된 사용자가 신호를 획득하기까지 걸리는 시간이 비약적으로 증가하는 문제가 있다. GPS P(Y)는 이러한 문제를 극복하기 위해 1 ms의 짧은 주기를 갖는 C/A 신호를 획득한 후 P(Y) 신호를 추적하는 Hand-Over 방식을 사용한다. 그러나 이 경우 외부 공격자가 C/A 신호를 공격하여 P(Y)의 획득을 방해할 가능성이 있다. GPS M-code는 획득 시험 통계 (Acquisition test statistics)를 생성하는 기법을 적용하여 C/A 및 P(Y)의 도움 없이 직접 획득이 가능하도록 고안되었다 (Barker et al. 2000, Wang et al. 2007).

이는 장주기의 암호화된 코드를 기본 측위 코드로 사용되 측위 코드의 일부분을 비워두고 빈자리에 직접 신호 획득의 보조를 위한 동기화 코드를 삽입하는 Punctured Code 구조가 있다. 이를 본 논문에서는 신호획득 코드로 정의하며, 이러한 신호획득 코드를 사용하여 신호 획득 소요 시간을 현저히 줄일 수 있다.

2.2 AC 구조 설계

장주기로 암호화된 코드 내 AC는 slot 단위로 한 번씩 삽입된다. N개의 슬롯은 하나의 프레임으로 형성하고 보안성 향상을 위해 프레임마다 AC를 변경한다. slot 내 AC가 삽입되는 위치와 프레임 단위의 AC 변경 패턴은 보안성 유지를 위해, 송/수신기 간의 랜덤한 규칙에 따라 결정한다. Fig. 1은 AC 전송구조의 설계 예를 보여준다.

장주기 항법신호는 신호획득 및 추적 민감도(sensitivity)를 향상하기 위해 data 신호와는 별도로 pilot 신호의 도입을 고려할 수 있으며, data와 pilot을 Time Division Modulation (TDM) 구조로 전송하는 것을 가정한다. 이에 따라 AC가 삽입된 구간 내에는 data 신호의 코드 칩과 pilot 신호의 코드 칩이 data와 pilot의 전력 비율에 따라 번갈아 가며 나타난다. 예를 들어, data와 pilot의 전력 비율이 1:1 관계에서는 data 신호의 코드 칩과 pilot 신호의 코드 칩이 chip-by-chip의 TDM 구조를 가진다. 이를 통해 data

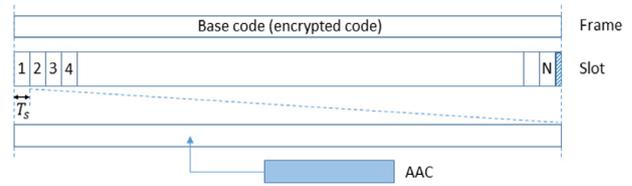


Fig. 1. AC insertion structure.

신호의 코드 칩에 실린 비트의 부호 반전으로 인한 처리 이득의 감소를 배제할 수 있다.

3. 신호획득 성능분석 환경

3.1 신호 품질

항법신호 획득 성능분석에 앞서 설계 구성요소 및 수신 환경 파라미터를 반영한 수신 신호의 품질을 살펴보고 이를 고려한 상관기(correlator) 입력단에서의 칩 Signal to Noise Ratio (SNR)을 계산한다. 이때 고려하는 파라미터로는 수신 전력, 잡음 전력 밀도, 위성 양각에 따른 수신 안테나 이득, 잡음지수, 양자화 오차, 코드 칩 속도가 있다 (Foucras et al. 2014). 다음은 각 파라미터에 대응되는 값을 정리한 것이다.

- 수신 안테나 입력 신호전력: -162.5 dBW
- 수신신호 대역폭: 16 MHz
- 잡음 전력 밀도: -204.3 dBW/Hz
- 위성 양각 5도에서의 안테나 이득: -8 dB
- 구현 손실 (잡음지수+양자화 오차): 2 dB
- 코드 칩 속도: 2.046 Mcps
- 변조: BOC(4,2)
- 주파수: S 대역 2.4 GHz

여기서 안테나 이득은 제시하는 항법신호 구조가 미약 신호 환경에서도 신호획득이 가능한 구조인지를 확인하기 위해 위성 양각 5도를 기준으로 설정하였다. 위 나열한 파라미터를 반영한 상관기 입력단에서의 칩 SNR 계산과정은 Eqs. (1-3)과 같다.

$$C/N_{0,ant} = P_{rx} - N_0 + g_{ant} = -162.5 - (-204.3) + (-8) = 33.8 \text{ dB} - \text{Hz} \quad (1)$$

$$C/N_{0,corr} = C/N_{0,ant} - L_i = 33.8 - 2 = 31.8 \text{ dB} - \text{Hz} \quad (2)$$

$$cSNR_{dB} = C/N_{0,corr} - 10 \times \log_{10}(f_c) = 31.8 - 63.109 = -31.309 \text{ dB} \quad (3)$$

Eq. (1)에서 $C/N_{0,ant}$ 는 안테나 입력에서의 C/N_0 를, P_{rx} 는 안테나 입력 수신전력을, N_0 는 잡음 전력 밀도를, g_{ant} 는 위성 양각 5도에서의 안테나 이득을 의미한다. Eq. (2)에서 $C/N_{0,corr}$ 는 상관기 입력단에서의 C/N_0 를, L_i 는 구현 손실을 의미한다. Eq. (3)에서 $cSNR_{dB}$ 는 상관기 입력단에서의 칩 당 SNR을, f_c 는 코드 칩 속도를 의미한다. Eqs. (1-3)은 S 대역을 기준으로 계산하는 예시이고, Eq. (3)에서 C/N_0 를 SNR로 환산하는 과정에서 유효 대역폭을 코드 칩 속도와 동일한 것으로 가정하였다.

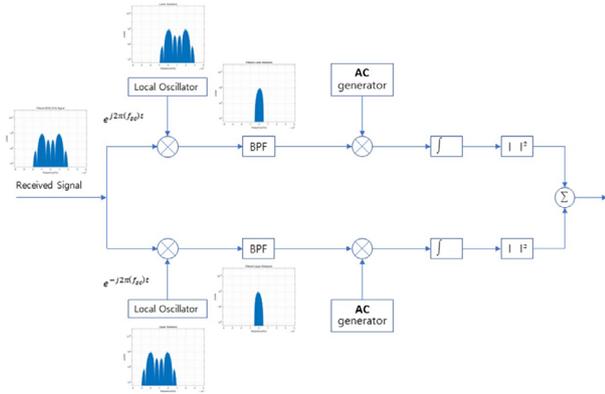


Fig. 2. Signal acquisition process of the side band filtering correlation.

3.2 신호획득 수신 알고리즘

항법신호는 S 대역에서 BOC(4, 2)로 변조되는 것을 가정하였다. BOC 변조된 신호는 Binary Phase Shift Keying (BPSK)와 달리 자기 상관함수(Auto-Correlation Function, ACF)에서 main-peak 대비 side-peak이 크게 나타나기 때문에 신호 획득 단계에서 탐색한 코드 위상에는 모호성(ambiguity)이 발생할 수 있다. 또한, BPSK 대비 동일한 코드 칩 지연에 대하여 ACF의 감소가 크기 때문에 코드 칩 지연 탐색 간격도 작게 설정해야 한다. 탐색 간격이 작아지면 AC 획득에 요구되는 계산 복잡도가 증가하게 된다. 이러한 단점은 Side-Band Filtering (SBF)를 통해 해결할 수 있다. SBF가 적용된 수신기는 BOC 변조된 수신 신호의 lower-side와 upper-side에 위치한 main lobe 신호를 각각 동기식으로 상관하고, 얻어진 두 결과를 다시 비동기식으로 에너지 결합하는 방식이다. 이와 같은 방식으로 AC를 획득하면 ACF의 모호성을 배제할 수 있으며 코드 칩 지연의 탐색 간격도 1/2 칩으로 설정할 수 있다. Fig. 2는 SBF가 적용된 AC의 획득 과정을 보여준다.

Fig. 2에서 수신 신호는 대역폭 16 MHz (S 대역) 내 수신 전력 -162.5 dBW를 갖는 기저대역으로 변환된 신호이다. 수신 신호는 $+f_{sc}$ 와 $-f_{sc}$ (f_{sc} : 부반송파 주파수, 4.092 MHz)로 다시 주파수 천이된 후, 수신 신호의 lower-side와 upper-side의 main lobe만을 추출하기 위해 band pass filter를 통과한다. 이때, 제한 대역폭은 4.092 MHz이다. 추출된 lower-side와 upper-side의 main lobe는 AC 참조 코드와의 동기식 상관이 적용되고, 최종적으로 각각의 상관 결과는 에너지 결합 과정을 거치게 된다. 동기식 상관 시 누적 길이는 AC 참조 코드 전체를 사용하여 30 ms, 40 ms, 50 ms를 고려한다. 참고로, Fig. 2는 시간 영역(time-domain)에서의 상관기를 통한 AC 획득 과정을 보이고 있으며, AC 획득을 위해 시간 영역이 아닌 FFT/IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 통한 주파수 영역(frequency-domain)에서의 획득도 고려할 수 있다.

3.3 오경보 확률 설정

이번 절에서는 획득 임계값을 도출하기 위한 오경보 확률의 설정 기준을 살펴보고자 한다. 오경보 확률은 AC 획득 시도 별 후보 위치(candidate position)의 검색 범위(searching space) 내에서

Table 1. Search space number according to AC length.

AC length		
30 ms	40 ms	50 ms
0.44×10^8	0.78×10^8	1.22×10^8

발생하는 오경보의 판정을 몇 개까지 검증할 것인지를 결정하여 설정할 수 있다. 여기서 AC 획득 시도란 AC 전송구조에서 제시한 slot 내에서 AC 참조 코드 길이 단위로 수행하는 것을 의미하며, 따라서 한 slot 내 AAC 획득 시도는 Eq. (4)와 같이 계산된다.

$$n_{trial} = T_S / T_{AC} \tag{4}$$

여기서 T_S 는 AC가 삽입되는 slot의 길이, T_{AC} 는 AC의 길이이다. AC의 길이는 앞 절에서 언급한 30 ms, 40 ms, 50 ms를 가정한다. n_{trial} 은 한 slot 내 AAC 획득 시도 횟수로 T_S 를 T_{AC} 로 나눈 뒤 버림 연산하여 계산된다.

만약 slot 길이 1 s, AC 길이 30 ms로 가정하면, 한 slot 내에는 33번의 AC 획득을 시도하고, 각 시도에서는 오경보 판정이 내려진 후보 위치들이 발생하게 된다. 여기서는 i번째 시도에서 발생한 오경보의 후보 위치에 대한 검증은 i+1 번째 시도에서 검증하는 것을 가정한다. 각 AC 획득 시도에는 후보 위치의 공간 범위가 존재하며 오경보 확률의 설정은 수신기가 각 AC 획득 시도마다 발생하는 오경보의 판정을 몇 개까지 검증할 수 있는지를 감안하여 설정할 수 있다. 이를 위한 경우의 수 분석은 다음절에서 수행한다.

3.4 AC 획득시 경우의 수 분석

AC 획득 시도 별 후보 위치의 공간 범위는 코드 위상 방향과 도플러 주파수 방향의 후보 위치의 곱으로 주어지며 이는 Eqs. (5, 6)과 같이 계산할 수 있다.

$$s_{cp} = \Delta d \times f_c \times T_{AC} \tag{5}$$

$$s_f = \frac{2 \times \max(f_d)}{\Delta f} \tag{6}$$

여기서 s_{cp} 는 AC 획득 시도별 코드 위상 방향의 검색 범위이다. Δd 는 칩 탐색 간격(chip searching bin), f_c 는 코드 칩 속도(chip rate)이다. s_f 는 AC 획득 시도별 도플러 주파수 검색 범위이다. f_d 는 도플러 주파수 범위이고 차량 정도의 속도를 감안하여 $-1.5 \text{ kHz} \leq f_d \leq +1.5 \text{ kHz}$ 로 설정하였다. Δf 는 주파수 검색 단위로서 $0.5/T_{AC}$ 이다.

칩 탐색 간격 Δd 는 일반적으로 BOC 변조된 신호의 신호 획득에서는 코드 칩 지연에 대한 ACF의 손실이 크기 때문에 1/2 칩보다 작게 설정하지만, 여기서는 SBF를 적용하여 BPSK와 유사한 ACF를 얻을 수 있기 때문에 1/2 칩을 적용할 수 있다. Eqs. (5, 6)에 근거하여 계산한 AC 획득 시도 별 후보 위치의 검색 개수를 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1로부터 AC 길이에 따라 획득 시도 1회 동안 1억 개 내외의 많은 후보 위치가 존재함을 알 수 있다. 수신기는 i번째 시도에서 발생한 1.22×10^8 개의 후보 위치 중 오경보의 판정을 받은 후보 위치를 i+1번째 시도에서 검증하게 되는데, 만약 수신기가 모든 획득 시도에서 평균적으로 1.22개를 검증할 수 있다면 오경보 확

를 10^{-8} 로 임계값을 설정할 수 있다. 수신기가 평균적으로 12.2 개를 검증할 수 있다면 오경보 확률은 10^{-7} 으로 높일 수 있고, 반대로 평균적으로 검증 개수가 1을 초과하지 않도록 하기 위해서는 오경보 확률은 10^{-9} 으로 낮춰 획득 임계값을 도출해야 한다.

3.5 TTFA 계산 방법

이번 절에서는 항법신호 획득 성능을 평가하는 지표 중 하나인 AC 신호획득 소요 시간을 계산하는 방법을 서술한다. TTFA 계산 방법을 서술하기에 앞서 몇 가지 가정을 설명한다. 첫 번째 가정은 AC의 획득 시도는 한 slot 내에서 AC 길이 단위로 수행한다. 두 번째는 수신기는 매 AC 획득 시도마다 이전 획득 시도에서 발생한 오경보 판정들에 대한 검증을 동시에 수행하기 때문에 오경보 판정을 검증하는 과정에서는 추가적인 시간이 소요되지 않음을 가정한다. 마지막으로 수신기는 한 slot 동안 AC 길이 단위로 여러 번(예: slot 길이 1 s, AAC 길이 30 ms 기준 33번)의 획득 시도를 수행하는데, 한 slot이 지남에도 불구하고 모든 후보 위치에서의 최종 출력 z 가 획득 임계값을 넘지 못하여 AC 획득에 실패한 경우, 수신기는 이어지는 다음 slot에서 AC 획득 시도를 계속 수행한다. 이와 같은 가정을 토대로 TTFA를 Eq. (7)과 같이 정의한다.

$$t_{TTFA} = \min\{n \mid P_D(n) > 0.95, n = 1, 2, 3, \dots\} \times T_{slot} \quad (7)$$

여기서 n 은 AC 획득까지 사용한 슬롯의 개수이고, $P_D(n)$ 은 n 번째 slot을 사용하는 동안의 누적 획득 확률이다. t_{TTFA} 는 TTFA 시간을 의미하고 누적 획득 확률 $P_D(n)$ 이 95% 이상이 되도록 하는 최소 슬롯의 길이($n \times T_{slot}$)로 정의된다. 누적 획득 확률은 Eq. (8)과 같이 정의한다.

$$P_D(n) = p_D + p_M p_D + p_M^2 p_D + \dots + p_M^{n-1} p_D \quad (8)$$

Eq. (8)은 수신기가 AC 획득에 성공할 때까지 n 개의 슬롯이 사용되었고, n 번째 slot까지 사용하였을 때의 누적 획득 확률을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 Eqs. (7, 8)을 이용하여 도출한 TTFA 결과를 제시한다.

4. 신호획득 성능분석 결과

지금까지 항법신호 획득 성능을 평가하기 위한 AC 획득 성능(detectability)과 TTFA에 대한 도출 방안에 대하여 서술하였다. 이번 장에서는 위에서 서술한 방안을 토대로 도출된 AC 획득 성능과 TTFA 결과를 제시한다. AC 획득 성능은 오경보 확률이 주어졌을 때 해석적인 접근 방식으로 도출한 미검출 확률 및 detectability로 제시하고, TTFA는 해석적 방식으로 도출한 미검출 및 detectability가 반영된 누적 획득 확률이 95% 이상 되도록 하는 최소 슬롯의 길이로 제시한다.

먼저 이러한 결과를 제시하기 위해서는 신호 검색 과정에서 신호 불일치(코드 및 도플러)에 의한 손실, SBF 적용으로 인한 손실, 칩 탐색 간격, 도플러 탐색 간격 등이 설정되어야 한다. 이러한 설정값은 다음과 같다.

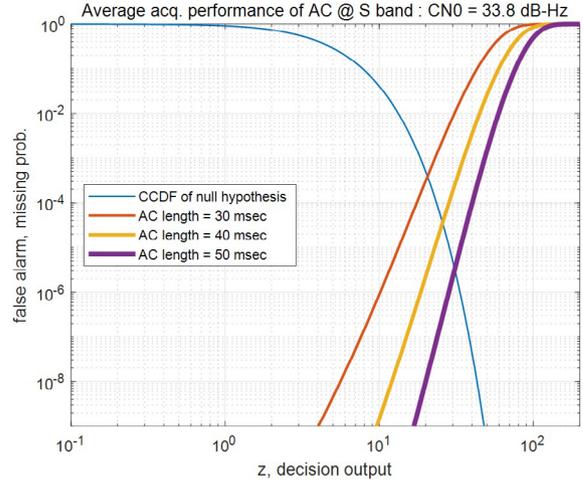


Fig. 3. Signal detectability (CCDF, CDF) w.r.t various conditions of AC.

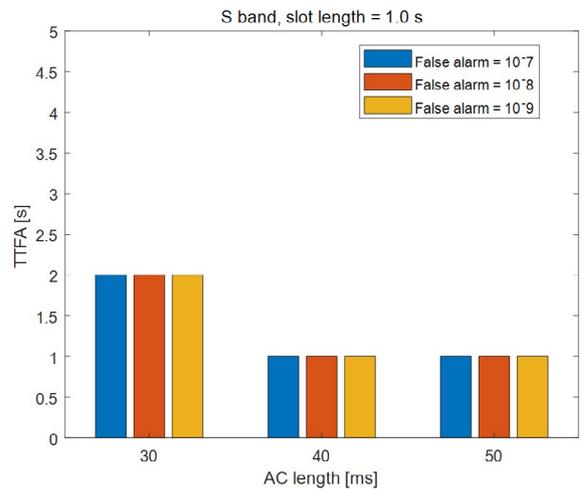


Fig. 4. TTFA w.r.t various conditions of AC and False alarm thresholds.

- 코드 불일치로 인한 손실: 2.5 dB
- 도플러 불일치로 인한 손실: 1.5 dB
- SBF 적용으로 인한 손실: 0.05 dB
- 코드 탐색 간격: 0.5 chip
- 도플러 탐색 간격: AC 길이에 따라 조정
- 오경보 확률: 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9}

위와 같은 설정을 바탕으로 신호획득 탐지율(detectability)을 측정하는 시뮬레이션을 수행하였다. 이론적 분석을 바탕으로 계산하였으며, 신호가 없는 경우는 Null hypothesis에서 사용되는 Complementary Cumulative Distribution Function (CCDF)로 false alarm이며, 신호가 있는 경우는 Cumulative Distribution Function (CDF)로 missing probability이다 (Johnson et al 1995).

Fig. 3은 수신기 상관값 z 에 따라서 각각의 확률이고, 임계값 상관값 z 에 대한 특정값이다. 이 임계값 설정에 따라 false alarm, missing probability가 결정된다. 가능한 좋은 TTFA 달성을 위해서는 1개 slot이 지났을 때 AC 획득 성능(Detectability)을 95% 이상 확보하는 것이 좋다. 오경보 확률 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9} 로 설정하였을

경우 30 ms AC에서 항법신호 획득 확률은 각각 95%, 90%, 81% 획득 확률이다. 40 ms AC에서 항법신호 획득 확률은 98%, 99%, 99% 획득 확률이다. 50 ms AC에서 항법신호 획득 확률은 99%, 99%, 99%이다. 결과에서 파악할 수 있듯이 현실적인 오경보 확률을 고려한다면 30 ms AC는 획득 확률이 낮은 편이다.

TTFA 성능 결과는 Fig. 4와 같이 계산되었다. TTFA는 누적 획득 확률이 95% 이상이 되도록 하는 최소 slot의 길이로 제시하였다. 이때 slot 하나의 길이는 편의상 1 초로 고정하였다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 TTFA 성능은 AC의 길이에 따라서 차이가 있다. 그런데 신호획득 시간인 1~2초는 수신기가 전원 인가 후 위치해가 출력되는 시간인 time to first fix 시간 100초 내외에 비해 매우 작으므로 양호한 결과를 보인다고 판단할 수 있다. 오경보 확률 변화에 따라서 TTFA의 큰 차이는 없었다. 종합적으로 살펴볼 때, AC 길이가 길수록 항법신호 획득성능이 좋아지나 수신기 구현 복잡도에 관련이 있으므로 오경보 확률은 적절히 선택되어야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 신호획득 코드의 적용이 필요한 장주기 항법신호의 설계안을 도출하기 위해 AC 획득 성능과 TTFA 성능을 해석적 방법으로 분석하였다. 해석적 분석 방법에서는 BOC 변조된 항법신호의 자기상관함수 모호성 및 복잡도 증가의 문제를 극복하기 위해 SBF를 통한 BPSK-like의 AC 획득기법을 적용하였고, AC 획득기법의 최종 출력을 수신된 코드와 참조 코드 간의 타이밍 동기를 고려하여 모델링하였다. AC 획득성능 분석 결과에서는 준수한 AC 획득 성능을 확보하기 위해서는 30 ms 이상의 AC 설계가 필요함을 확인하였다. TTFA 성능은 AC 획득 시도 시 누적 획득 확률이 95% 이상이 되도록 하는 최소 slot의 길이로 정의하였다. TTFA 성능분석 결과에서는 1~2초 내에 신호획득이 가능한 것으로 분석되었다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Agency For Defense Development Grant funded by the Korean Government (274345901).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J. Lee, K. Lee and J. Shin; methodology, J. Lee, J. Shin and K. Lee; validation, J. Lee, K. Lee, J. Ahn and D.-H. Hwang; writing-original draft preparation, J. Lee and K. Lee; writing-review and editing, K. Lee, J. Ahn and D.-H. Hwang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Barker, B. C., Betz, J. W., Clark, J. E., Correia, J. T., Gillis, J. T., et al. 2000, Overview of the GPS M Code Signal, Proceedings of the 2000 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, Anaheim, CA, January 26-28 2000, pp.542-549. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=66>
- Betz, J. W. 1999, The Offset Carrier Modulation for GPS Modernization, Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, January 25-27 1999, pp.639-648. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=716>
- Broumandan, A., Jafarnia-Jahromi, A., Daneshmand, S., & Lachapelle, G. 2016, Overview of Spatial Processing Approaches for GNSS Structural Interference Detection and Mitigation, Proceedings of the IEEE, 104, 1246-1257. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2529600>
- Foucras, M., Julien, O., Macabiau, C., & Ekambi, B. 2014, Detailed Analysis of the Impact of the Code Doppler on the Acquisition Performance of New GNSS Signals, In Proceedings of the 2014 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, California, 27-29 Jan 2014, pp.513-524. <https://enac.hal.science/hal-00937060>
- Han, K., Lee, S., Lee, K., & Won, J. 2022, Performance Analysis for Secured Service Signals of RNSS Systems, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 11, 341-349. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.4.341>
- Heiries, V., Calmettes, V., Ries, L., & Roviras, D. 2007, Solving the correlation peak ambiguity of BOC signals, 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Fort Worth, United States, September 2007, pp.1-10. <https://hal.science/hal-04106646>
- Johnson, N. L., Kotz, S., & Balakrishnan, N. 1995, Continuous Univariate Distributions, vol.1, 2nd ed. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc.)
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2006, Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd ed. (Boston: Artech House Inc.)
- Spilker Jr., J. J., Axelrad, P., Parkinson, B. W., & Enge, P. 1996, Global Positioning System: Theory and Applications, Volume1 (Washington: AIAA). <https://doi.org/10.2514/4.866388>

Wang, N., Zhang, B., & Zhang, G. 2007, Direct Acquisition Technique for GPS P(Y)-Code, International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, China, 21-25 September 2007, pp.2985-2987. <https://doi.org/10.1109/WICOM.2007.741>



Kihoon Lee is a principal researcher at Agency for Defense Development. He received his B.S. from the Mechanical Engineering Department of POSTECH in 1999. He received his M.S. from the Mechanical Engineering Department of KAIST in 2001. He received his Ph.D. from the Aerospace Engineering Department of KAIST in 2018. He has served as a researcher at Agency for Defense Development since 2001. His research focuses on the development of GNSS system, anti-jamming and anti-spoofing technologies.



Jang Yong Lee is a principal researcher at Agency for Defense Development, Daejeon, Korea since 1997. He received his B.S, M.S degrees from Electronic Engineering at Chonnam National University in Korea. in 1995 and 1997. His research interests include digital communications and channel coding, satellite navigation system, anti-jamming system.



Jang Hwan Shin is a Ph.D. candidate with the Department of Radio Science and Information Communication Engineering at Chungnam National University in Korea. He received B.S. and M.S. degrees in Radio Science and Information Communication Engineering from Chungnam National University in 2019 and 2021, respectively. His research interests include GNSS signal design, multiplexing and anti-jamming technologies.



Jae Min Ahn received Ph.D. degree in Electrical and Electronic from KAIST in 1994. He is currently a Professor in the Department of Radio Science and Information Communication Engineering at Chungnam National University, Daejeon, Korea. His research interests include Physical session of Next-Generation mobile communication and Radio Resource management.



Dong-Hwan Hwang is a professor in the Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Korea. He received his B.S. degree from Seoul National University, Korea in 1985, and his M.S. and Ph.D. degrees from Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea in 1987 and 1991, respectively. His research interests include GNSS/INS integrated navigation system design and GNSS applications.