

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(6), 505-514(2014)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.6.505>

## 의사위성 항법시스템에서의 해수면 반사파가 미치는 영향 분석 및 대처방안에 대한 연구

박준표\*, 석진영\*\*

### A Study on the Effects and the Countermeasure of Sea Surface Reflection Waves in Pseudolite Navigation Systems

Jun-Pyo Park\* and Jinyoung Suk\*\*

Agency for Defense Development\*, Chungnam National University\*\*

#### ABSTRACT

The effects of reflected wave of the sea on pseudolite ranging accuracy are analysed in this paper, when a pseudolite navigation system is used for wide area outdoor applications such as aircraft and vessels positioning. Methods for minimizing the influence of sea surface reflection wave were proposed. The methods include the appropriate correlator in pseudolite navigation system through the correlation performance comparison analysis in receiver design, the use of the technology of multiple antennas, and locating the transmitting station antenna on an appropriate position. From the results of experiments, the method of locating the antenna position shows the most reliable performance against the effect of surface reflection wave. The analysis results of the ranging accuracy improvement are addressed, when the multipath caused by sea surface reflection exists.

#### 초 록

본 논문은 의사위성 항법시스템을 이용하여 항공기, 선박 등에 정밀한 항법해를 제공할 경우 해수면의 반사파에 의한 영향으로 항법신호의 의사거리 추정 성능이 어떻게 변화하는지 분석하였다. 해수면 반사파의 영향을 최소화하기 위한 방안들로써 수신기 설계에 있어 상관기별 성능비교 분석을 통해 의사위성 항법시스템에 적절한 상관기를 제시하고자 하였으며, 다중 안테나 기법 사용을 제안하였다. 또한, 해수면 반사파를 회피하기 위한 가장 확실한 방안으로 송신소 위치 이동 시의 실험값을 제시하여 해수면 반사파의 영향으로부터 항법 신호의 의사거리 추정 성능의 개선 정도를 분석하였다.

**Key Words** : Pseudolite(의사위성), GNSS(위성항법시스템), Navigation(항법), Multipath Error(다중경로 오차)

#### 1. 서 론

전파를 이용한 항법시스템으로 대표되는 GPS (Global Positioning System)와 같은 위성항법시

스템(GNSS : Global Navigation Satellite System)은 위성으로부터 항법신호를 수신 받아 사용자의 위치와 시각을 정밀하게 측정하는 시스템으로, 초기 군사용으로 개발되어 현재는 민간의 차량,

† Received: March 5, 2014 Accepted: May 13, 2014

\*\* Corresponding author, E-mail : jsuk@cnu.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

선박, 항공기 및 휴대용 단말기 등 광범위한 분야에서 언제, 어디서나 간편하고 손쉽게 사용되고 있다. 그러나, 이러한 위성항법시스템은 지상 20,000km 상공에 위치한 항법위성에서 송신된 신호를 받아 항법정보를 계산하기 때문에 신호강도가 매우 약하다. 이와 같이 미약한 위성항법신호로 인하여 실내, 도심지역, 야외 광산 등 수신 환경이 열악한 지역에서의 사용이 제한되며, 전파교란에도 취약하여 최근에는 북한 GPS 재머에 의해 경기 서부지역에서 민간 항공기, 선박 및 이동통신 기지국 등의 GPS 수신불능 상태도 발생하였다. 이러한 미약한 신호와 전파교란에 취약한 단점을 극복하는 방안으로서 위성항법시스템과 관계없이 독립적으로 운용되는 의사위성(Pseudolite) 항법시스템이 연구되고 있다[1~4]. 의사위성 항법시스템은 지상에 설치된 송신기에서 위성항법시스템의 위성과 유사한 형태의 항법신호를 송출하여 사용자에게 항법정보를 제공하는 시스템으로 GPS 개발 초기에 시스템 검증을 위한 지상테스트용으로 고안되었고, GPS가 본격적으로 운용되면서 GPS 신호수신이 취약한 실내, 야외 광산지역이나 공항에서 항공기 정밀 이착륙을 위한 GPS 보강시스템으로서의 의사위성 항법시스템에 관한 연구가 발전되어 왔으며, 특히 고정된 의사위성 항법시스템을 이용할 경우 정확한 위치를 알 수 있기 때문에 보다 정밀한 항법 결과를 얻을 수 있다.

위성항법시스템 및 의사위성과 같이 전파를 이용하는 전파항법시스템의 정확도는 위성의 배치에 의해 결정되는 DOP(Dilution Of Precision) 과 거리측정 정확도인 의사거리오차(UERE : User Equivalent Range Error)에 의해 결정된다. 따라서, 지상에 설치되는 의사위성 항법시스템의 경우 위성항법시스템의 항법위성 궤도설계와 같이 일정 영역의 사용자에게 항법신호를 제공하기 위해서는 설치환경에 맞추어 의사위성 송신기간 가시성(Line of Sight)를 확보하고, DOP을 최소화 할 수 있도록 의사위성 송신기를 배치하는 배치설계와 더불어 일반적인 위성항법 시스템에서 고려되는 오차 요소들 중 특히, 다중경로(Multipath) 오차, 대류권 지연(Tropospheric Delay) 오차 등에 대한 고려가 요구된다.

위성항법시스템의 경우 수신기에서 저양각에 위치한 위성 신호를 수신할 경우, 기하학적 측면에서 가시성이 확보된 직접 신호 뿐만 아니라 지표면 인근의 산이나 호수, 바다, 건물 등에 의해 반사 및 회절된 다중경로 신호도 수신하게 된다. 관측점 근처에 빌딩과 같은 반사체가 존재하는

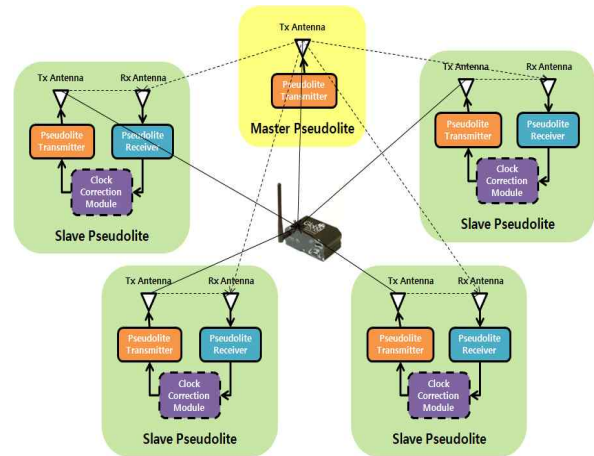


Fig. 1. Synchronous pseudolite navigation system

경우 약 100m 수준의 다중경로 오차도 발생 가능하다. 의사위성 항법시스템의 경우 지상에 설치되는 송신소의 고도 차이가 크지 않을 경우, 많은 수의 다중경로를 겪을 수 있다. 따라서, Indoor 환경, 산악지형, 해안가 혹은 해수면을 끼고 있는 의사위성 항법시스템에서 다중경로 문제는 항법 정확도에 영향을 미치는 중요한 사항이다[2]. 특히, 마스터 의사위성 송신기에서 송신된 항법신호를 중속 의사위성 송신기에서 수신하여 이를 의사거리 추정을 통해 시각동기 알고리즘을 수행하는 동기식 의사위성 시스템(Fig. 1)에서는 다중경로에 의한 오차가 시계오차 형태로 항법 결과에 나타난다. 주변 환경이 고정적인 환경에서는 고정된 바이어스로 나타나고, 해안가 조수 간만 차이에 의해 해수면 높이가 시변하는 환경에서는 항법 결과에서 랜덤한 바이어스 형태로 영향을 미친다. 이러한 다중경로 문제로 인한 오차 완화 방법으로 송, 수신 안테나 설계기법, 새로운 신호 설계, 신호처리 기법 등의 분야에서 많은 연구가 수행되어 왔다[5~7].

본 논문에서는 항공기, 선박 등의 항법 목적으로 의사위성 항법시스템을 이용할 경우 지리적 여건으로 인해 배치되는 송신소간 고도 차이가 크지 않고, 해수면의 영향을 받을 수 밖에 없는 운용환경에서 시변하는 해수면의 높이 변화에 의한 문제점을 분석한 후, 이를 극복할 수 있는 방안을 제시하였다.

## II. 본 론

### 2.1 다중경로 오차

다중경로란 송신기의 신호가 다수의 경로를

통하여 수신기에 도달하는 현상을 의미하는데 일반적으로 다중경로는 수신기의 주변 환경에 의한 전파 반사로 인하여 발생하지만 먼 거리에서 일어나는 반사에 의하여 발생하는 경우도 있다. 간접파 신호는 신호가 반사되거나 회절되어 생기기 때문에 직접파보다 수신기까지의 전파전달 경로 길이가 길다. 만약 간접파 신호에 대한 지연의 크기가 매우 크다면 사용자 수신기에서 이러한 간접파 신호를 걸러낼 수 있기 때문에 이러한 간접파 신호는 사용자 수신기의 성능에 미치는 영향이 매우 적다. 그러나 가까운 물체에 반사된 신호나 먼 물체에서 반사된 신호가 짧은 다중경로를 발생시킬 경우에는 수신기의 상관함수를 왜곡시켜 의사거리 측정 성능에 영향을 미치게 된다. 또한 직접파가 장애물에 의해서 가려지거나 감쇠가 되어 간접파보다 신호의 크기가 작아지게 되면 사용자 수신기는 직접파보다 간접파에 의해서 생성되는 상관함수를 추적하게 된다.

다중경로가 항법을 하는 수신기에 미치는 영향은 신호의 획득에 미치는 영향보다 코드나 위상 추적에 미치는 영향이 더 심각한데, 주변 환경에 따라서 그 영향이 달라지기 때문에 다중경로에 의한 의사거리 오차는 제거하기가 매우 힘들다.

2.1.1 수학적 모델[8]

사용자 수신기의 기하학적인 주변 환경은 항상 동일할 수 없기 때문에, 다중경로에 대한 일반적인 모델은 존재하지 않는다. 하지만 다중경로 현상이 전파 수신에 미치는 특성을 파악하기 위해서 Fig. 2와 같이 직접파와 간접파가 같이 수신되는 상황을 가정해보자. 만약 간접파가 존재하지 않는다면 직접파는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \alpha_0 x(t - \tau_0) e^{-j\phi_0} e^{j2\pi f_c(t - \tau_0)} \quad (1)$$

여기서,  $x(t)$ 는 송신 신호의 항법데이터 및 코드,  $\tau_0$ 는 의사위성 송신기에서 수신기까지 신호

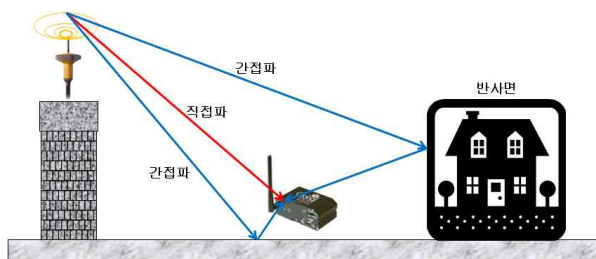


Fig. 2. Generation Principle of Multipath Signal

가 도달하는 시간,  $f_c$ 는 반송파 주파수를 의미한다. 여기에 다중경로 신호가 혼합되면 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \alpha_0 e^{-j\phi_0} x(t - \tau_0) e^{-j2\pi f_c \tau_0} + \sum_{n=1}^N \alpha_n e^{-j\phi_n} x(t - \tau_n) e^{j2\pi f_n t} \quad (2)$$

여기서,  $N$ 은 다중경로 수,  $\alpha_0$ 은 직접파 신호의 진폭,  $\alpha_n$ 은 간접파 신호의 진폭,  $\tau_0$ 와  $\tau_n$ 은 직접파와 간접파의 신호도달 시간,  $\phi_0$ 은 직접파의 위상,  $\phi_n$ 은 간접파의 위상,  $f_n$ 은 간접파 신호의 주파수이다.

송신기나 수신기가 움직이거나 반사면이 이동하게 되면 수식 (2)의 파라미터는 시간에 따라서 변화하는 값을 가지게 된다.

수식 (2)는 간접파와 직접파에 관계된 다음과 같은 수식으로 표현이 가능한데,

$$r(t) = \alpha_0 e^{-j\tilde{\phi}_0} [x(t - \tau_0)] + \sum_{n=1}^N \tilde{\alpha}_n e^{-j\tilde{\phi}_n} x(t - \tau_0 - \tilde{\tau}_n) \quad (3)$$

여기서,  $\tilde{\alpha}_n = \alpha_n / \alpha_0$ 는 간접파와 직접파의 진폭비(Multipath-to-Direct Ratio),  $\tilde{\tau}_n = \tau_n - \tau_0$ 은 직접파에 대한 간접파의 지연량, 그리고  $\tilde{\phi}_n$ 은 간접파와 직접파의 반송파 위상 차이를 의미한다. 참고로 수식 (2)를 보면 간접파의 반송파 주파수가 직접파의 반송파 주파수와 같다는 것을 알 수 있는데 이것은 송수신기와 반사 또는 간섭을 일으키는 물체가 모두 상대적인 움직임이 없다는 것을 의미한다. 만일 한 간접파 신호의 크기가 다른 간접파 신호의 크기보다 매우 크고 그 신호의 지연차이가 직접파와 그리 크지 않다면 수식 (3)은 다음과 같이 정리된다.

$$r(t) \cong \alpha_0 e^{-j\tilde{\phi}_0} [1 - \alpha_1 e^{-j\tilde{\phi}_1}] x(t - \tau_0) \quad (4)$$

여기서,  $\tilde{\phi}_1 = 2\pi f_c \tilde{\tau}_1$ 은 매우 작고, 간접파 신호의 크기가 매우 강해서 진폭비가 1에 가까우면 대괄호 안의 값이 0이 된다. 이 경우 간접파의 지연이 작기 때문에 의사거리 오차에 미치는 영향은 미미하지만, 직접파 자체를 상쇄시키기 때문에 직접파의 감쇠가 자유공간에서 보다 심하게 일어난다. 이러한 현상은 지상의 의사위성 송신기들이 해수면을 사이에 두고 설치 될 때 자주 발생

하기 때문에, 설치 시 전파환경을 잘 고려하여 설치해야 한다.

간접파가 하나만 존재하는 환경에서는 수식 (3)을 다음과 같이 표현할 수 있는데,

$$r(t) = \alpha_o e^{-j\tilde{\phi}_o} [x(t - \tau_o) + \tilde{\alpha}_1 e^{-j\tilde{\phi}_1} x(t - \tau_o - \tilde{\tau}_1)] \quad (5)$$

이 신호가 수신기에서 생성된 기준 신호,  $e^{-j\theta} x(t)$ 와 상관된 후의 상관함수를 통계적으로 평균화 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}(t) &= \alpha_o e^{-j(\tilde{\phi}_o - \theta)} [R_x(\tau - \tau_o) + \tilde{\alpha}_1 e^{-j\tilde{\phi}_1} R_x(\tau - \tau_o - \tilde{\tau}_1)] \\ &= \alpha_o e^{-j(\tilde{\phi}_o - \theta)} \hat{R}_x(\tau - \tau_o) \end{aligned} \quad (6)$$

수식 (6)에서  $\hat{R}_x(\tau - \tau_o) = R_x(\tau - \tau_o) + \tilde{\alpha}_1 e^{-j\tilde{\phi}_1} R_x(\tau - \tau_o - \tilde{\tau}_1)$ 의 값은 직접파와 간접파에 대한 수신기의 상관함수를 합친 복합 상관함수(Composite correlation function)을 의미한다. 따라서 수신기가 복합 상관함수를 기반으로 의사거리 및 반송파의 위상을 측정하면 오차가 유발된다.

다중경로에 의하여 생성된 간접파에 대한 의사거리 오차는 일반적으로 수신기의 변조방식이나 대역폭에 따라 달라진다. 하지만 수신기의 변조방식과 대역폭이 일정할 때 간접파가 의사거리의 오차에 미치는 영향은 간접파와 직접파의 위상 차이(Phase difference), 지연 차이(Delay difference), 그리고 진폭비에 의해 달라진다. 만일 진폭비가 고정적이라면 다중경로 오차는 주어진 지연 차이에 대하여 위상 차이에 따라 달라진다.

### 2.1.2 해수면 반사파의 영향

마스터 의사위성 송신기에서 송신된 항법신호를 종속 의사위성 송신기의 수신부에서 수신하여 이를 의사거리 추정을 통해 시각동기 알고리즘을 수행하는 동기식 의사위성 시스템의 경우 마스터 의사위성 송신기에서 송신된 항법신호가 다중경로를 통해 종속 의사위성의 수신기에 도착하면 수식 (3)처럼 수신 신호  $r(t)$ 를 모델링할 수 있다[8, 9].

바다를 사이에 두면서 의사위성 항법시스템을 가정한 경우, 섬과 육지 사이의 거리는 수백 m에서부터 수십 km 될 수가 있고, 직접파를 수신하기 위해서는 해안선 인근에 의사위성을 둘 수

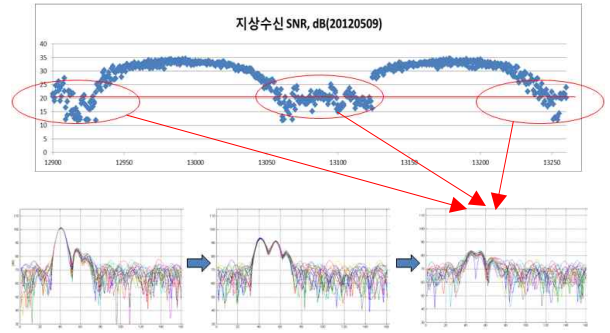


Fig. 3. Changes in the correlation characteristics and the received SNR in accordance with the level of sea level time-varying

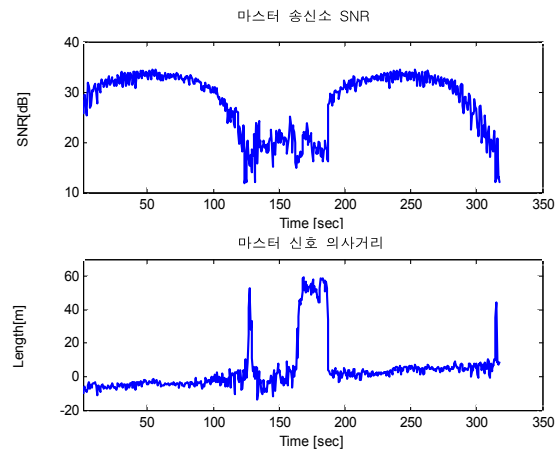


Fig. 4. Changes of SNR and pseudorange by sea surface reflection wave

있다. 이러한 환경에서 의사위성의 고도는 수 미터에서 수십 미터 이내이기 때문에 해수면 반사파는 해수면에 입사각이 0도에 근사하게 되고, 이로 인해 해수면 반사파와 직접파의 신호 지연 값 차이  $\tau_1 - \tau_0$ 는 수 미터에서 수십 미터가 될 수 있고, 신호 반사율은 100%정도로 전반사가 가능하게 된다.

조수간만의 변화로 해수면 높이는 시간에 따라 변화하고, 특히 서해안 지역의 경우는 변화폭이 수 미터 수준이다. 이러한 환경에서 시변하는 해수면의 높이에 따라 Fig. 3처럼 특정 해수면 높이에서 항법신호는 직접파와 해수면 반사파의 역위상으로 인해 신호 크기가 감쇄될 수 있고, 이로 인해 Fig. 4와 같이 다중경로 오차로 인한 의사거리 추정에 오차가 발생하게 된다.

Figure 4에서 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio)가 33dB에서 수분 이내에 급격히 20dB 수준으로 떨어지며, 마스터 의사거리가 40~60m 정도 튀는 현상이 발견된다. 이는 시각동기 이상

을 일으켜 수신기에서 계산하는 항법해에 오류를 발생시키게 한다.

특히, 해수면에 의해 반사된 신호의 경우 기존의 항법에서 다루는 다중경로와는 달리 수십 km 떨어진 두 지점에서 주고받는 신호 환경에서 다중경로 신호의 지연량이 매우 짧기 때문에 다중경로에 의한 오차 뿐 아니라 아예 수신 단절 현상이 발생하였다.

## 2.2 다중경로 오차 저감방안

다중경로의 영향을 작게 하거나, 그 크기를 추정하는 다양한 방법이 개발되고 있다. 일반적으로 이러한 방법은 크게 안테나에 의한 방법, 수신기 기술 개선에 의한 방법 등이 있다[10].

안테나에 대한 방법으로는 특정한 방향으로 편향된 신호만을 수신할 수 있도록 안테나 수신 패턴을 설계하거나 초크링 안테나를 사용하는 방법이 있다. 하지만, 이들 방법은 자세변화가 많은 항체에서나 의사위성의 송신소처럼 수신 신호가 낮은 양각일 경우에는 효용성이 떨어진다.

다중경로를 줄여주는 수신기 설계 기술의 개선 방법은 협역 상관기(Narrow correlator)를 적용하여 상관기의 폭을 좁히거나, 다중경로 추정을 위해 지연 감지회로를 확장하거나, 스트로브 상관기(Strobe correlator)를 적용한 다중경로의 제거 등이 있는데, 특히 MEDLL(Multipath Estimating Delay Lock Loop)은 다중경로를 제거하는 가장 효과적인 기술 중 하나이다. 이 기술은 입력 신호를 상관기의 배열을 이용하여 직접적인 신호와 간접적인 신호로 분리하는 기술인데, 이를 통하여 수신된 신호의 상관함수를 추정하게 된다. 하지만, 이런 방법도 단독으로 사용시 신호 획득에 소요되는 시간이 일반 상관기에 비해 길며 신호 추적 범위도 좁아 사용 분야가 제한된다.

가장 효과적으로 다중경로를 감소시키는 방법은 다중경로가 발생할만한 요인을 가진 장소를 피해서 안테나를 설치하는 것이다. 하지만 이 방법은 현실적으로 어려운 경우가 많이 존재하고, 이동체의 다중경로 제거에는 별로 도움이 되지 않는다.

본 논문에서는 위의 제시 방법들 중에서 수신기 설계 기술 측면에서의 상관기별 성능비교 분석을 통해 의사위성항법 시스템에 적절한 상관기와 다중 안테나를 이용 방안, 그리고 가장 효과적인 방안인 송신소 배치 시 다중경로가 발생하지 않을 장소를 선택했을 때의 실험값을 제시하고자 한다.

### 2.2.1 상관기별 다중경로 오차 비교

의사위성항법 시스템의 다중경로 오차 저감방안으로서의 수신기 설계 기술 개선을 위해 일반적인 GPS C/A(Course Acquisition) 코드 및 P 코드의 최대 다중경로 오차를 칩 간격(Chip Spacing, CS)과 대역폭(Band Width, BW)에 따라 시뮬레이션을 통해 분석해 보았다. 또한, 해당 칩 간격을 구현할 수 있는 최소 샘플링 주파수(Sampling Frequency,  $F_s$ )에 대해서도 분석하였다.

본 시뮬레이션에서 상관기는 일반적으로 대부분의 수신기에서 사용하고 있는 표준 상관기, 협역 상관기, 스트로브 상관기, 고분해능 상관기(High Resolution Correlator, HRC)에 대해서 수행하였다. 또한, 다중경로 신호의 개수는 한 개이며, 신호 크기는 직접파 신호의 0.5배로 가정하였다.

먼저, 칩 간격에 따른 상관기의 특성을 살펴보기 위해 충분히 넓은 대역폭(32MHz)을 선택하여 협역 상관기와 표준 상관기에 대해 C/A 코드와 P 코드의 경우를 살펴보았다.

Figure 5와 6에서처럼 표준 상관기(CS=1.0)에 비해 협역 상관기의 칩 간격이 낮을수록 다중경로

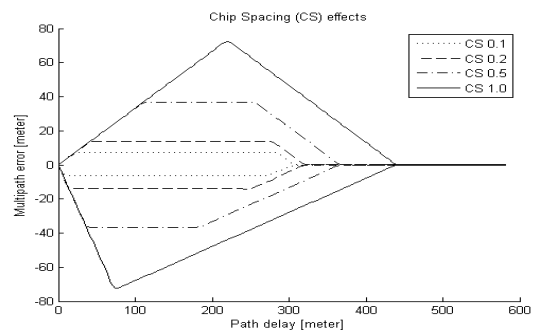


Fig. 5. Narrow correlator multipath error envelope, C/A Code ( $f_c=1.023\text{MHz}$ )

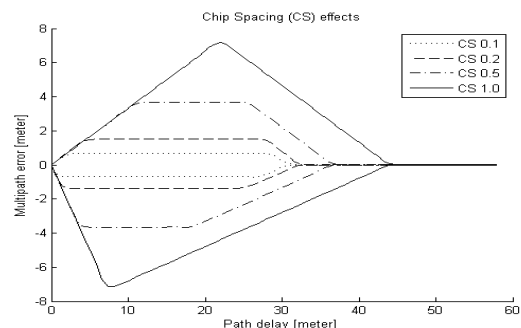


Fig. 6. Narrow correlator multipath error envelope, P-Code ( $f_c=10.23\text{MHz}$ )

로 오차 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

칩 간격(CS=0.1)을 일정하게 유지하고 대역폭에 따른 상관기의 특성을 협역 상관기와 표준 상관기에 대해 C/A 코드와 P 코드 각각에 대해 살펴본 결과, Fig. 7과 8에서처럼 대역폭이 넓을수록 다중경로 오차 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

다음으로 동일한 조건에서 협역 상관기와 스트로브 혹은 고분해능 상관기에 대한 특성을 살펴본 결과, Fig. 9와 같이 고분해능 상관기 특성

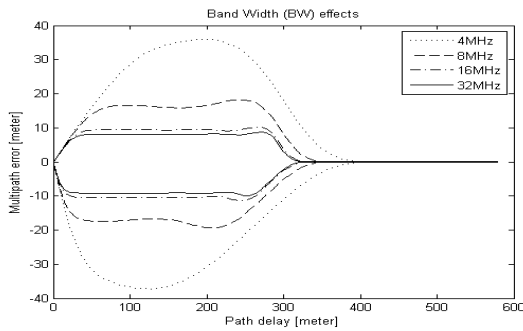


Fig. 7. Narrow correlator multipath error envelope, C/A Code ( $f_c=1.023\text{MHz}$ ), Chip Spacing 0.1

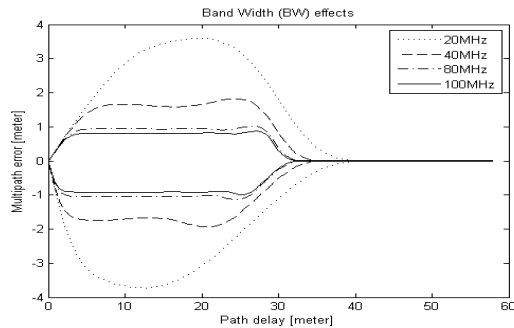


Fig. 8. Narrow correlator multipath error envelope, P-Code ( $f_c=10.23\text{MHz}$ ), Chip Spacing 0.1

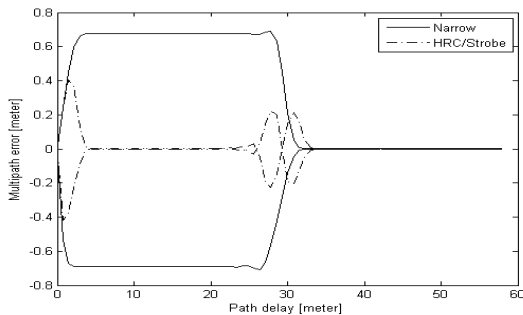


Fig. 9. Multipath error envelope, P-Code ( $f_c=10.23\text{MHz}$ ), HRC/Strobe Chip Spacing 0.1 & 0.2, Narrow Chip Spacing 0.1

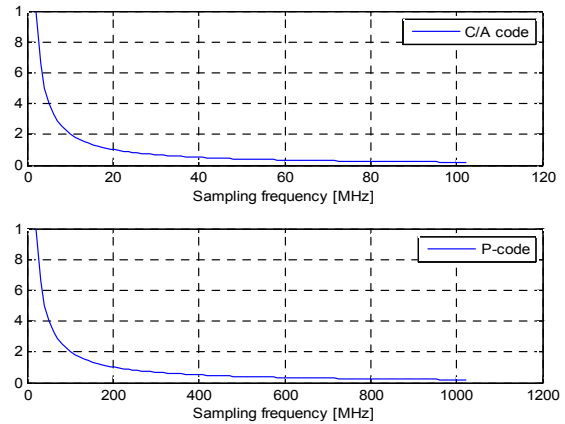


Fig. 10. Minimum Sampling Rate Chip Spacing of implementation

이 보다 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 구현 가능한 협역 상관기의 최소 샘플링 주파수를 살펴보면, Fig. 10과 같다.

위의 분석된 결과를 토대로 의사위성 항법 시스템의 수신기로 고려 가능한 파라미터를 다음과 같이 설정하였을 때의 상관기별 특성을 살펴보았다.

고려할 수신기 파라미터는 다음과 같다.

- $f_c = 10.23\text{MHz}$  (P 코드와 동일)
- 대역폭 =  $24\text{MHz}$  (통과대역에 Main lobe만 포함, 약 95%의 Energy 통과)

Figure 10에서 알 수 있듯이 P 코드와 동일한  $f_c$ 를 가질 경우,  $40.92\text{MHz}$ 에서는  $0.5$  칩 간격이 최소 분해능이므로 협역 상관기(CS=0.5) 및  $0.5$ 칩/ $1.0$ 칩 간격의 조합을 갖는 스트로브/고분해능 상관기가 구성 가능하다.(Fig. 11 참조) 하지만, 아래 Fig. 12, 13에서 볼 수 있듯이 두 상관기에 의한 성능차이가 크지는 않고, 스트로브가

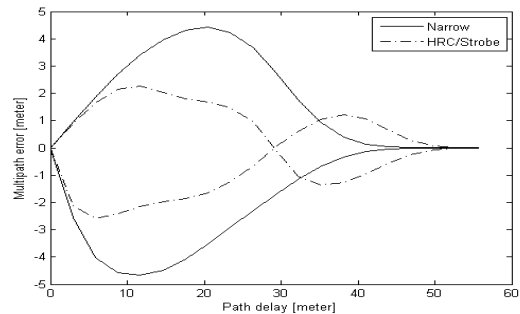


Fig. 11. Maximum multi-path error to be expected when implementing the  $f_s 40\text{MHz}$ , BW  $24\text{MHz}$ , Narrow CS  $0.5$ , HRC CS  $0.5/1.0$

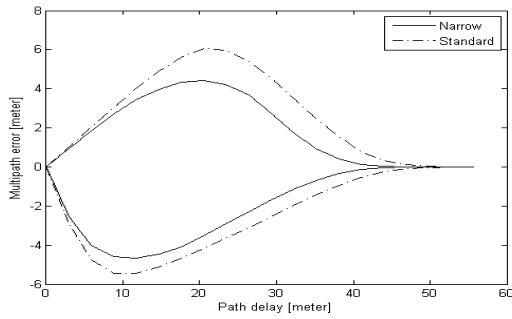


Fig. 12. Maximum multi-path error to be expected when implementing the fs 40MHz, BW 24MHz

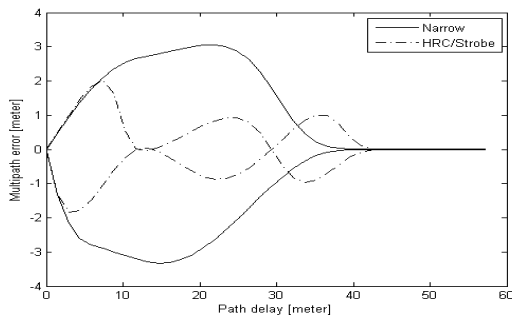


Fig. 13. Maximum multi-path error to be expected when implementing the fs 200MHz, BW 24MHz, Narrow CS 0.1, HRC CS 0.1/0.2

약간 우세하다.

하지만, 이러한 상관기도 실제적으로 해수면에 의해 반사된 신호의 경우처럼 다중경로 신호의 지연량이 매우 짧은 상황에서는 칩 간격의 제한으로 완전한 해결이 되지 못한다.

### 2.2.2 다중 안테나를 이용한 방안

다중 안테나 기법을 이용하여 해수면 반사파의 영향을 줄일 수 있다. 해수면 반사파가 영향을 주는 안테나 위치에서 직접파와 해수면 반사파의 위상이 역위상이기 때문에, 180도 위상이 이동한 위치 즉 직접파와 해수면 반사파의 위상이 동위상이 되는 높이에도 안테나를 설치하여 동시에 운용하며 스위칭해서 신호를 받아들이는 다중 안테나 기법을 활용 가능하다. Fig. 14는 두 개의 안테나를 사용하는 경우에 해당한다.

$h_A$ 는 마스터 송신소의 해발고도이고,  $h_B$ 는 종속 송신소의 임의의 안테나 높이이다. 검은색은 직접파 파란색은 해수면 반사파를 의미한다. 180도 역위상인 해수면 반사파의 영향을 최소화하기 위해 종속 송신소 수신안테나  $h_B$  이외에 또 다른 위치  $h_C$ 에 수신안테나를 설치하는 방식으로

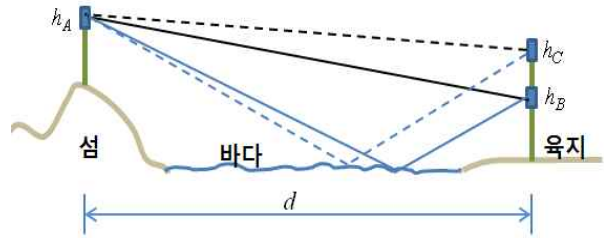


Fig. 14. Direct wave and sea reflected wave corresponding to the reception antenna height

그 높이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|A - B| = \lambda/2 \tag{7}$$

$$A = \sqrt{(h_A + h_C)^2 + d^2} - \sqrt{(h_A - h_C)^2 + d^2}$$

$$B = \sqrt{(h_A + h_B)^2 + d^2} - \sqrt{(h_A - h_B)^2 + d^2}$$

제시한 극복 방안의 유무에 따른 성능 평가를 위해 1.023MHz의 칩 전송률로 C/A 코드를 전송하는 시스템을 가정한다. 이론적일 경우, C/A 코드 Auto-Correlation Function(ACF)는 삼각형 형태이지만, 송신기/수신기에서의 주파수 대역 제한으로 인해 ACF의 피크가 둥글게 된다[8, 11]. 본 논문에서는 분석 편의상 다음과 같은 ACF를 모델링하였다.

$$Normalized\ ACF = \begin{cases} \tau + 1, & -1 \leq \tau \leq -0.1 \\ 0.8 + \sqrt{0.02 - \tau^2}, & |h| \leq 0.1 \\ -\tau + 1 & 0.1 \leq \tau \leq 1 \\ 0 & o.w. \end{cases} \tag{8}$$

또한, 다중 안테나 사용에 의한 영향을 분석하기 위해, 직접파와 해수면 반사파, 송신소 인근의 고정된 물체에 의한 반사파 이렇게 3개의 신호경로가 존재한다고 가정한다.

해수면 반사파의 경우 입사파의 각도에 따라 5%~100%의 반사가 가능한데 본 논문에서 고려하는 환경은 두 송신소 사이의 거리가 수십 km로 멀고 송신소는 해안 인접 내륙이라 가정하기 때문에 상당한 저양각 상태의 전파 환경을 고려한 다중경로 오차 분석을 위해서 90%의 반사를 가정하였다.

수신기에서 표준 상관기를 사용하여 의사거리를 추정한다고 가정하면, 해수면 반사파 영향으로 인한 다중경로 오차는 Fig. 15와 같다.

다중경로 신호가 직접파와 동위상인 경우에 의사거리 오차 그래프의 피크점까지의 Error Envelope 기울기가  $(\alpha_1/\alpha_0)/(1 + \alpha_1/\alpha_0)$ 에 비례하고, 다중경로 신호가 역위상인 경우에는 의사거리 오차의 피크점까지의 Error Envelope 기울기

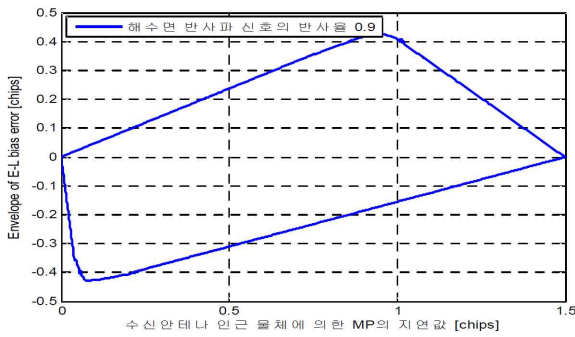


Fig. 15. The effects of multi-path and sea surface reflected wave

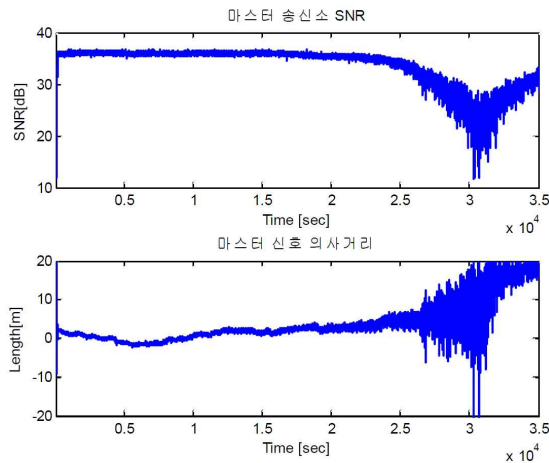


Fig. 16. The antenna was  $\lambda/2$  separation, changes of SNR and pseudorange at the time of switching

가  $-(\alpha_1/\alpha_0)/(1-\alpha_1/\alpha_0)$  에 비례하게 된다. 본 분석에서 가정한  $\alpha_0=1, \alpha_1=0.9$ 인 경우 19배의 기울기 차이를 보이게 되는데, 이는 Fig. 15의 분석 그래프 결과와 일치함을 확인할 수 있다.

Figure 15의 결과를 살펴보면, 해수면 반사파의 영향으로 수신기에서 의사거리 추정치에 최대 -0.45 ~ 0.45 칩만큼의 다중경로 오차가 발생이 가능함을 알 수 있다. 또한 역위상인 해수면 반사파의 경우 0.05칩 이내의 매우 짧은 지연을 갖는 경우에도 그 오차가 0.1~0.2칩 레벨로 오차가 매우 크게 발생될 수 있음을 알 수 있다.

Figure 16은 실제 해수면 반사파로 인해 신호 대잡음비가 15dB가 될 때,  $\lambda/2$ 의 위상값 차이가 발생하는 지점의 안테나로 수신하는 경우의 신호 대잡음비 실험 결과 값(서해안 지역, 조수간만 차이 8미터 수준)을 보인 것이다. 그림을 보면 3시간 반 정도 신호대잡음비가 30dB이상으로 안정적이면서 마스터 의사거리도 보다 안정적인 성능을 보임을 알 수 있다.

따라서, 다중 안테나를 이용하여 해수면 반사파의 영향을 받는 시간이 되면  $\lambda/2$ 의 위상값 차이가 발생하는 지점의 안테나로 수신하는 방식을 이용하여 해수면 반사파의 영향을 줄일 수 있다.

2.2.3 송신소 최적 배치를 통한 방안

다중경로 오차를 감소시키는 가장 효과적인 방법은 다중경로가 발생할만한 요인을 가진 장소를 피해서 안테나를 설치하는 것이다.

본 절에서는 실제 의사위성 송신소가 해수면 반사파의 영향을 받는 해안 근처에 위치한 장소와 내륙 방향으로 이동하여 해수면의 반사파에 의한 역위상 영향을 줄일 수 있는지를 살펴보았다.

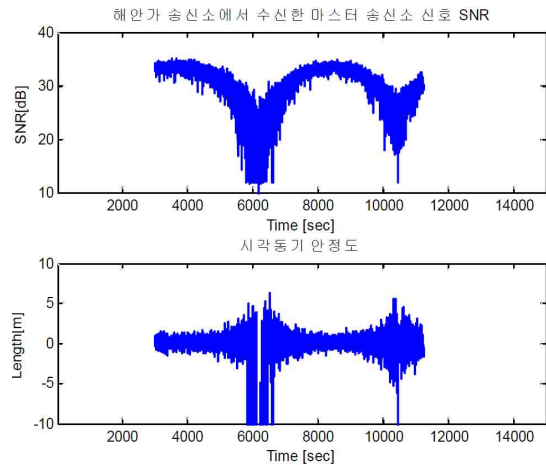


Fig. 17. Changes of SNR and pseudorange by sea surface reflected wave near the coast

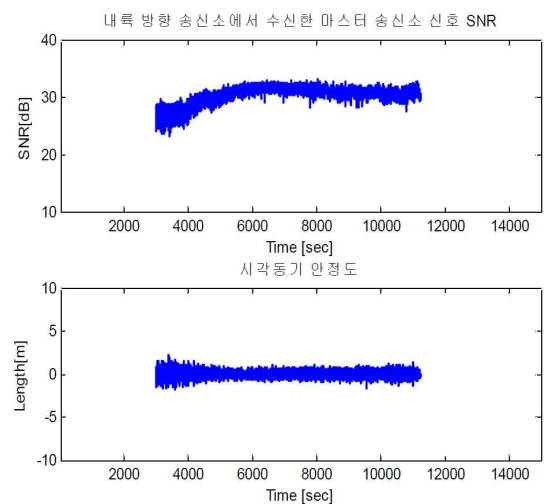


Fig. 18. Changes of SNR and pseudorange by sea surface reflection wave, when the transmitting station was moved to the inland direction



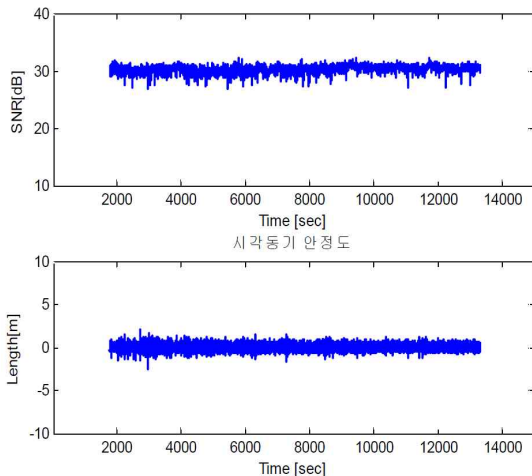


Fig. 19. Changes of SNR and pseudorange in the inland

시험결과, 해안 근처에 위치한 장소에서의 의사위성 마스터 송신소와 종속 송신소간 지상링크의 상태와 의사거리 안정도는 Fig. 17과 같이 시변하는 해수면의 높이에 의해 일정시간 간격(실험 데이터의 epoch)으로 신호의 지상링크 신호대 잡음비가 불안정해져 신호를 놓치는 경우가 발생할 수 있다.

Figure 18은 동일 시간대에 해안가에서 약 1km 정도 내륙 쪽으로 떨어진 장소에서의 종속 송신소의 지상링크 상태와 의사거리 안정도를 나타내는 것으로 지상링크 신호대잡음비가 안정적으로 유지되며 신호를 놓치는 구간이 발생하지 않고, 시간에 따른 신호의 변화도 적음을 볼 수 있다.

또한, 이후 최종적으로 중부 내륙 지역에서 실시한 시험에서 Fig. 19와 같이 안정적 의사위성 송신소간 지상링크를 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

따라서, 서해안 지역과 같은 해수면 반사파 영향에 의해 주기적 지상링크 불안정 요소를 해수면 영향이 적은 곳으로의 송신소 재배치를 통해 최소화할 수 있음을 검증하였다.

### III. 결 론

본 논문에서는 의사위성 항법시스템을 운영함에 있어 해안선 인근에 의사위성 송신기를 배치하였을 경우, 시변하는 해수면 높이 변화에 의해 해수면 반사파가 의사위성 항법시스템의 의사거리 추정에 미치는 영향을 살펴보고 그 대처 방안에 대해 논의하였다. 일반적인 다중경로 오차 저감 방안들 중에서 먼저, 수신기 설계 기술의 개

선 방법으로서 GPS C/A 코드와 P 코드의 최대 다중경로 오차를 칩 간격, 대역폭 및 최소 샘플링 주파수에 대해 시뮬레이션을 통해 협대역 상관기, 스트로브 상관기 및 고분해능 상관기별 특성을 분석하고 의사위성 항법시스템에 적합한 상관기를 제시하였다. 또한, 단일 안테나에서 주기적으로 해수면 반사파 영향을 받는 단점을 보완하기 위해 다중 안테나 기법을 이용하여 시스템을 구축할 경우 다중경로에 의한 의사거리 추정 오차를 0.04~0.07칩 이내로 상당히 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

하지만, 위의 방안들도 다중경로에 의한 영향을 일부 감소시키는 효과를 보일 뿐이므로 가장 효과적인 방안으로 의사위성 송신소를 해수면 반사파의 영향을 받는 해안 근처에서 내륙 방향으로 이동시킨다면 해수면 반사파에 의한 다중경로 신호의 지연량이 매우 짧은 경우에도 그 영향은 거의 없앨 수 있음을 시험을 통해 확인하였다.

추후 위에서 제시한 모든 방안들을 종합적으로 적용하여 어떠한 외부환경에 의한 다중경로 영향에 대해서도 강인성을 갖는 의사위성 항법시스템 개발을 통하여 확인하고자 한다.

### References

- 1) Craig, D. & Locata Corp., "USAF's New Reference System, Truth on the Range", Article of Inside GNSS Magazine, May/June 2012
- 2) J. Wang, "Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems," Journal of Global Positioning Systems, Vol. 1, No. 1, pp.48-56, 2002
- 3) Kee, C., D. Yun, and H. Jun, "Indoor Navigation System using Asynchronous Pseudolites", Journal of Navigation, Vol 56, No. 2, pp.443-455, 2003
- 4) So, H., T. Lee, S. Jeon, C. Kim, C. Kee, T. Kim, and S. Lee, "Implementation of a Vector-based Tracking Loop Receiver in a Pseudolite Navigation System", Sensors, Vol. 10, No. 7, pp.6324-6346, 2010
- 5) H. Bang, J. Lee, G. Jee, J. Kim, H. Jung, and M. Hyun, "A Comparison of the Multipath Error Property In Wireless Location of CDMA and OFDM", Journal of Control, Automation, Systems Engineering, Vol. 12, No. 10, pp.989-995, 2006

- 6) Garin, L., "Strobe & Edge Correlator Multipath Mitigation for Code", Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp.657-664, 1996
- 7) Raue, J. F., "Multiple GPS receiver multipath mitigation technique", IEEE Proceedings-Radar Sonar Navigation, Vol. 149, No. 4, 2002
- 8) Kaplan, E. D., Hegarty, C. J., "Understanding GPS : Principles and Applications", Artech House, 2006
- 9) J. Proakis, "Digital Communications (3<sup>rd</sup> ed.). McGraw-Hill Inc, 1995.
- 10) Ray J. K., Cannon M. E., Fenton P. C., "Mitigation of Static Carrier-Phase Multipath Effects Using Multiple Closely Spaced Antennas", Navigation, Vol. 46, No. 3, pp.193-201, 1999
- 11) C. Lee, B. Park, J. Lee, W. Ahn, "Feasibility study of Pulse Shaping Filter for RNSS", 19<sup>th</sup> GNSS workshop, 2012.