

회전체의 GPS 신호 영향 분석

Analysis of Effect of the Spinning Vehicle on the GPS Signal

*조중철, **김정원, ***황동환, ***이상정

Jong Chul Cho, Jeong Won Kim, Dong-Hwan Hwang, Sang Jeong Lee

Abstract - This paper analyzes effect of the spinning vehicle on the GPS signal. In rapid spinning vehicles such as missiles and space rockets, carrier phase and frequency depend on the roll rate of the vehicle. It induces phase and frequency modulation caused by the roll rate. The modulated phase and frequency increase dynamic stress error of the tracking loop. Even though higher order tracking loop can remove dynamic stress error, the dynamic stress error can not be remove in this case. In order to analyze the effect of the spinning vehicle on the GPS signal, the experiments are carried out. The experiment results show the modulation of the carrier frequency and phase caused by the roll rate of the spinning vehicle.

Key Words : GPS, Spinning Vehicle, Rotation Effect

1. 서론

최근에 GPS 수신기를 사용하는 항체가 더욱 다양해지고, 발사체, 자유 낙하 폭탄과 같은 특수한 항체에도 GPS 수신기를 사용하고 있다. 이들은 롤(roll)축을 기준으로 회전하며, 롤 회전은 GPS 반송파 신호에 영향을 미치게 된다. 이로 인해 신호 추적 오차가 발생하여 항법 오차가 증가하는 것으로 알려져 있다[1][2]. 가속도, 저크(Jerk) 운동과 같은 기동운 하는 항체의 경우에는 신호 추적 오차를 줄이기 위하여 신호 추적 루프의 차수를 증가시키거나 대역폭을 증가시키는 방법을 사용한다[3]. 롤 회전을 하는 항체의 경우에는 GPS 신호가 롤 회전의 영향을 받게 되어 일반적인 신호 추적 루프를 사용하여 차수를 증가시키거나 대역폭을 증가시켜도 신호 추적 오차를 줄일 수가 없다. 따라서 롤 회전으로 인한 오차를 줄이기 위해서는 GPS 신호의 변화나 보조 센서 정보를 이용하여 롤 회전을 측정하고 롤 회전에 의한 신호 추적 오차를 보상하여야만 GPS로부터 정확한 항법 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 롤 회전으로 인한 신호 추적 오차를 보상하기 위한 첫 번째 단계로 롤 회전이 GPS 신호에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 회전에 의한 도플러 현상으로부터 발생한 GPS 반송파의 위상과 주파수의 변화를 관찰하고, 이것이 GPS 수신기 신호 추적 루프에 미치는 영향을 살펴보았다. 분석결과는 회전 실험 장치를 이용해 실시간 GPS 신호와 비교하여 검증하였다.

2. 회전체에서의 GPS 신호 영향

2.1 회전체에서의 GPS 신호 변화

그림 1과 같이 한 개의 안테나를 장착한 항체가 회전하는 경우에는 두 가지 현상을 관찰할 수 있다. 하나는 수신기에 입력된 GPS 신호의 위상 및 주파수가 변하는 것이고 다른 하나는 안테나가 위성의 반대쪽으로 이동하여 발생하는 신호의 단절이다. 회전에 의한 위상 및 주파수 변화는 신호 추적 루프에 영향을 미치고 신호 단절로 인해 신호 추적 및 재획득 과정을 반복하게 한다. 앞으로의 서술에서 신호 단절 후 재획득 과정이 충분히 짧은 시간 안에 이루어진다고 하자.

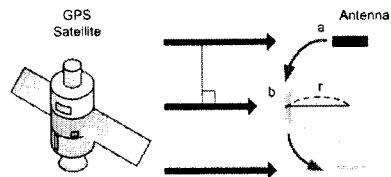


그림 1 회전체 GPS 신호 영향 블록도

그림 1과 같이 하나의 위성 신호에 대해 위성과 항체의 위치가 고정되어 있다고 하고, 항체가 일정 속도로 회전할 때 안테나는 시간이 지남에 따라 a에서 b 그리고 c의 위치로 이동하게 된다. 이 때 a, b, c의 위치에서 입력되는 GPS 신호는 평행하게 입사된다고 보면 안테나는 입사하는 신호에 대하여 반지름 r 만큼 왕복 운동하게 된다.

안테나에 수신된 반송파 신호는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[2].

저자 소개

- * 忠南大學校 電子工學科 碩士課程
- ** 忠南大學校 電子工學科 博士課程
- *** 忠南大學校 電氣·情報通信工學部 教授

$$A_c \cos(2\pi f_c t + \Delta\phi(t)) \quad (1)$$

여기서 A_c 는 반송파의 크기, f_c 는 L1 반송파 주파수이고, $\Delta\phi(t)$ 는 반송파 위상을 나타낸다. 항체가 일정 속도로 회전하면 안테나의 위치 변화에 의하여 수신된 반송파의 위상이 다음 식(2)와 같이 변하게 된다.

$$\Delta\phi(t) = -\frac{l(t)}{\lambda} \times 2\pi \quad (2)$$

여기서 λ 는 19cm인 L1 반송파의 파장이며, $l(t)$ 는 시간에 따른 시선각 방향상에서의 안테나 위치를 나타내고 일정 속도로 회전하는 항체의 경우 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$l(t) = r \sin(2\pi f_s t) \quad (3)$$

여기서 r 은 안테나와 회전체 중심 사이의 거리이고 $2\pi f_s$ 은 항체의 회전 주파수이다. 식(2)와 (3)으로부터 회전에 의한 반송파의 위상 변화는 $1/f_s$ 초의 간격으로 반복하여 최대 $+2\pi r/\lambda$ 에서 $-2\pi r/\lambda$ 까지 변하게 되므로 수신되는 GPS 신호는 회전 주파수에 따라 변조되는 형태를 가지게 됨을 알 수 있다.

주파수의 변화는 위상 변화율이므로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta f(t) = \frac{d}{dt}(\Delta\phi(t)) = -\frac{4\pi^2 f_s r}{\lambda} \cos(2\pi f_s t) \quad (4)$$

따라서 식 (4)로부터 수신되는 GPS 반송파의 주파수도 항체의 회전으로 인하여 주기적으로 변하는 것을 알 수 있다.

2.2 회전 도플러에 의한 신호 추적 성능

GPS 신호 추적 루프의 성능은 루프의 차수, 대역폭, 선적분 시간에 따라 달라진다. 주파수 추적 루프의 경우 오차의 표준 편차는 식(5)와 같이 나타낸다[3].

$$\sigma_{FLL} = \frac{1}{2\pi T} \sqrt{\frac{4FB_n}{c/n_0} \left[1 + \frac{1}{Tc/n_0} \right]} + \frac{f_e}{3} \quad [Hz] \quad (5)$$

여기서 T 는 선적분 시간이고, F 는 c/n_0 에 의하여 결정되는 계수로 1 또는 2의 값을 가지며, c/n_0 는 반송파대 잡음의 전력 밀도이고, f_e 는 추적 루프의 정상 상태 오차이다. 일반적으로 $3\sigma_{FLL}$ 가 $0.25/T$ 보다 작게 되도록 대역폭과 선적분 시간 등을 조절하여 설계한다. 주파수 추적의 경우 항체의 기동에 의한 주파수 추적 루프의 정상 상태 오차, 즉 동적 스트레스(Dynamic Stress) 오차 f_e 는 식(6)과 같이 나타낸다[3].

$$f_e = \frac{1}{360\omega_0^n} \frac{d^{n+1}\Delta\phi(t)}{dt^{n+1}} \quad (6)$$

여기서 n 은 주파수 추적 루프의 차수를 나타내고 ω_0 는 루프의 비감쇄 자연 주파수(Undamped natural frequency)이다. 가속도 운동을 하는 항체에서는 경우에는 2차 이상의 추적 루프를 사용하면 동적 스트레스 오차가 제거된다. 회전하는 항체의 주파수는 회전에 따라 일정 주기로 주파수가 변화하므로 동적 스트레스 오차가 다음 표1과 같이 나타난다.

표 1 회전시 주파수 추적 루프 차수에 따른 동적 스트레스 오차

	1차	2차
1Hz 회전	$\frac{1}{360\omega_0} \frac{2\pi^2 r^2}{\lambda} \sin(2\pi t)$	$-\frac{1}{360\omega_0} \frac{2\pi^2 r^2}{\lambda} \cos(2\pi t)$
2Hz 회전	$\frac{1}{360\omega_0} \frac{2\pi^2 4r^2}{\lambda} \sin(4\pi t)$	$-\frac{1}{360\omega_0} \frac{2\pi^2 4r^2}{\lambda} \cos(4\pi t)$
3Hz 회전	$\frac{1}{360\omega_0} \frac{2\pi^2 9r^2}{\lambda} \sin(6\pi t)$	$-\frac{1}{360\omega_0} \frac{2\pi^2 9r^2}{\lambda} \cos(6\pi t)$

표 1에서 보는바와 같이 회전 속도가 빠를수록 동적 스트레스 오차를 증가하게 되고 차수가 증가할수록 오차가 증가하는 것을 알 수 있다. 일반적인 주파수 추적 루프를 사용하는 경우에는 오차를 줄이기 위하여 대역폭을 증가시켜야 한다. 그렇지만 대역폭을 증가 시킬수록 열잡음에 의한 오차가 증가되므로 대역폭을 증가시키는 것도 한계를 가지게 된다.

3. 성능 분석 실험

회전체에서의 영향 회전 속도를 추정하기 위하여 그림 (2)와 같은 회전 실험 장치를 제작하였다. 회전체 실험 장치는 최대 6Hz의 속도로 회전할 수 있고 제어 판넬에서 속도 명령을 조절할 수 있다. 회전 실험 장치의 외부에는 안테나를 부착하였으며 내부에는 소프트웨어 GPS 수신기의 RF부를 장착하였다. RF부는 1575.42MHz의 주파수를 IF 대역의 주파수로 낮추고 디지털 데이터로 변환하여 외부 컴퓨터로 전송한다. 컴퓨터로의 전송은 USB를 통하여, 컴퓨터에서는 저장된 데이터로 항법 확인 및 신호의 분석을 하게 된다. 그림 2는 회전 실험 장치의 구성도 이고, 그림 3은 실제 회전 실험 장치의 외관이다.

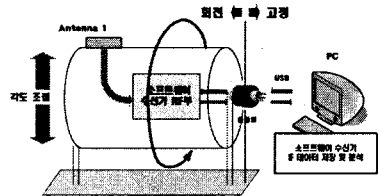


그림 2 회전 실험 장치의 구성도

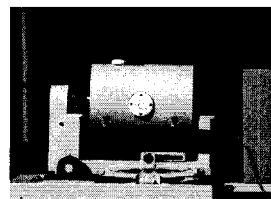


그림 3 회전 실험 장치

3.1 회전체에서의 GPS의 영향

회전에 의한 입력된 GPS 신호의 주파수 변화를 확인하기 위하여 측정된 도플러 주파수에서 위성과 항체간의 직선 운동으로 인한 도플러를 식(7)과 같이 제거하였다.

$$\widehat{f}_{rot}(t) = \widehat{f}_D(t) - \widehat{f}_{vel}(t) \quad (7)$$

여기서 $\widehat{f}_{rot}(t)$ 는 회전에 의한 도플러 주파수이고 $\widehat{f}_D(t)$ 는 주파수 추적 루프의 출력으로부터 측정된 도플러 주파수이다. \widehat{f}_{vel} 는 위성과 항체의 속도 정보를 이용하여 구한 도플러 주파수로서 식 (8)과 같다.

$$\widehat{f}_{vel}(t) = f_{L1} \frac{v_{sv}(t) - v_{usr}(t)}{c} \cdot \hat{l} \quad (8)$$

회전체에 1개의 안테나와 수신기를 설치하고 1Hz, 2Hz, 3Hz의 속도로 회전체를 회전시켜 회전에 의한 영향을 확인하였다. 그림 4는 1Hz로 회전하는 경우에 1분 동안의 도플러 변화를 측정된 결과이다.

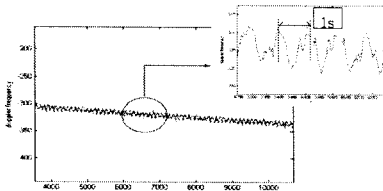


그림 4 위성과 항체간의 도플러 변화와 회전에 의한 도플러 변화

항체와 위성간의 위치 변화에 따라 주파수가 -300Hz에서 -340Hz로 변하고, 항체의 회전으로 매 1초마다 주파수가 반복적으로 변하는 것을 알 수 있었다. 그림 5는 각각의 회전 시 직선 운동에 의한 도플러를 제거하여 회전에 의한 도플러 변화를 나타낸 결과이다. 이때 주파수 추적 루프의 대역폭은 50Hz이다. 결과에서 보듯이 대역폭을 증가시킨 경우에는 잡음이 증가하여 주파수 측정치에 오차가 많이 발생하지만 회전 속도에 따라 일정주기로 변화는 주파수를 확인할 수 있다.

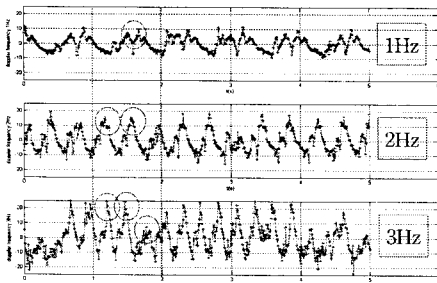


그림 5 1Hz 2Hz 3Hz 각각의 회전에 대한 도플러 주파수 변화

그림 5의 도플러 주파수 변화 측정치에 FFT를 이용하여 회전 주파수를 확인하여 보았다. 그림 6은 각 회전에 의한 도플러 주파수의 FFT이다.

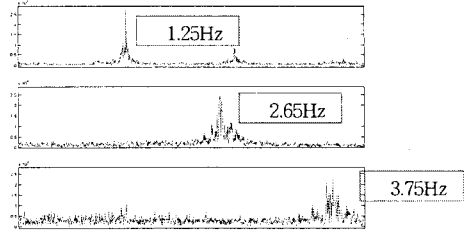


그림 6 회전에 의한 도플러 주파수의 FFT

그림 6의 결과에서 1Hz회전의 경우에는 1.25Hz의 회전 주파수가 측정되고 2Hz와 3Hz의 경우에는 각각 2.65Hz와 3.75Hz의 회전 주파수가 측정된다. 회전체 실험 장치의 회전 속도가 제어 패널에서 설정한 값과 정확하게 일치하지 않고 주파수 측정치에 오차가 포함되어 있는 것으로 판단하지만 회전주파수와 유사한 주파수 결과를 확인할 수 있었고 회전 주파수가 증가함에 따라 오차가 증가하는 하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 회전체의 GPS 신호 영향을 분석하고 이를 실험을 통하여 확인하였다. 물 회전을 하는 항체에서 수신되는 GPS 신호의 위상과 주파수는 회전 주파수에 따라 일정한 형태로 변하게 된다. 이러한 영향은 반송파 추적 루프의 동적 스트레스 오차를 증가시켜 항법 오차를 증가시키는 요인으로 작용한다. 분석 결과와 실험 결과에서 회전체 장치의 회전 속도에 따라 달라지는 주파수를 확인하였다.

추후 GPS 신호의 변화 또는 보조 센서를 이용하여 항체의 물 회전 속도를 추정하고 신호 추적 오차를 보상하여 회전체의 정확한 항법결과를 제공하기 위한 연구를 진행할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] J. H. Doty, T. D. Bybee, "A Demonstration of Advanced Spinning-Vehicle Navigation", ION NTM 2004, pp.573-584, January, 2004.
- [2] Avram K. Tetesky, Frak E. Mullen, "Effects of Platform Rotation on GPS with Implications for Simulators", GPS-96, pp.1917-1925, September, 1996.
- [3] Elliott D. Kaplan, "Understanding GPS - Principles and Applications", Artech House, 1996.
- [4] Bradford W. Parkinson, James J. Spilker Jr., "Global Positioning System: Theory and Application vol 1", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.