

## 회전 항체용 GNSS 수신기의 회전 추적 루프 설계

강희원\*, 류메린\*, 김정원\*\*, 황동환\*\*\*  
 충남대학교 전자공학과\*,  
 한국항공우주연구원\*\*,  
 충남대학교 전기정보통신공학부\*\*\*

### Rotation Tracking Loop Design of the GNSS Receiver for Spinning Vehicles

Hee Won Kang\*, Liu Meilin\*, Jeong Won Kim\*\*, Dong-Hwan Hwang\*\*\*

\*Department of Electronics Engineering, Chungnam National University,

\*\*Korea Aerospace Research Institute,

\*\*\*School of Electrical and Computer Engineering, Chungnam National University

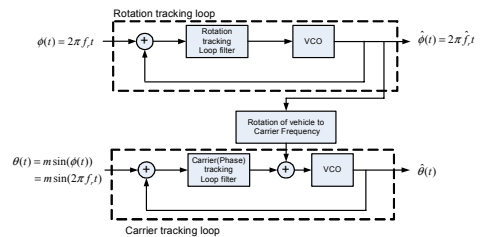
**Abstract** - 회전 항체용 GNSS(Global Navigation Satellite System) 수신기의 회전 추적 루프를 제안하였다. 제안하는 회전 추적 루프는 항체의 회전속도와 회전각을 추적하는 회전 추적 루프가 반송파 추적 루프에 추가되는 형태이다. 회전 추적 루프에서 수신기의 상관기 출력값을 이용하여 항체의 회전 속도를 추정하고 이를 이용하여 회전 변조된 반송파의 위상과 주파수를 추적할 수 있도록 하였다. 제안하는 GNSS 수신기의 회전 추적 루프는 모의실험을 통하여 검증하였으며, 이 루프를 사용함으로써 회전 변조된 신호를 GNSS 수신기에서 추적할 수 있음을 확인하였다.

회전 추적 루프를 성능 검증한 결과를 보였으며, 마지막으로 4절에서 결론과 추후 연구 과제를 제시하였다.

## 2. 회전 추적 루프

### 2.1 회전 추적 루프 설계

회전 항체용 GNSS 수신기의 신호 추적 루프는 그림 1과 같이 회전 추적 루프와 반송파 추적 루프로 구성된다.



〈그림 1〉 회전 항체용 GNSS 수신기의 신호 추적 루프 구조

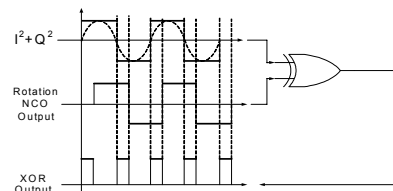
반송파 추적 루프는 일반적인 GNSS 수신기에서 사용하는 PLL(Phase locked loop) 또는 FLL(Frequency locked loop)로 구성되며 여기에 회전 추적 루프가 추가되는 형태이다. 회전 추적 루프는 항체의 회전속도 또는 회전각을 추적하며 회전 추적 루프의 출력을 이용하여 회전 변조된 반송파의 위상 또는 주파수를 추적할 수 있다. 회전 추적 루프는 판별기, 루프 필터, NCO로 구성된다.

#### 2.1.1 회전 판별기

회전 판별기(Rotation discriminator)는 상관기의 출력값을 이용하여 항체의 회전각과 추정된 회전각의 차이를 계산한다. 회전 항체를 GNSS 수신기의 상관기에서 출력되는  $I_k^2 + Q_k^2$ 을 근사화하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_k^2 + Q_k^2 \approx A \sin(2\pi f_s t_k) + \bar{n}_k \quad (1)$$

여기서,  $A$ 는 상관값의 크기,  $f_s$ 는 회전 주파수,  $\bar{n}$ 는 잡음을 나타낸다. 식(1)에서 보듯이 상관값의 주파수는 항체의 회전 주파수와 같고, 상관값의 위상은 회전각과 동일하다. 즉, 상관값의 주파수와 위상을 추정하면 항체의 회전속도와 회전각을 알 수 있다. 주파수와 위상을 추정하기 위해서는 입력되는 상관값의 주파수 및 위상과 추정된 주파수와 위상과의 차이를 계산하여야 하고, 이것은 Exclusive - OR 로직 판별기를 이용하여 계산할 수 있다. 그림 2는 Exclusive - OR 로직을 이용한 회전 판별기를 나타내고 있다[5].



〈그림 2〉 회전 판별기 구조

## 1. 서 론

최근 자유낙하 폭탄, 포발사 포탄 등의 재래식 무기에 GNSS 수신기와 같은 항법 시스템을 추가하여 정확도를 향상 시키는 연구가 진행되고 있다. 포탄과 같은 항체는 비행 중 회전 하며, 이로 인한 변조된 반송파의 주파수와 위상이 GNSS 수신기 신호 추적 루프의 동적 스트레스 오차(Dynamic stress error)를 증가시켜 신호 추적에 실패하거나 항법 오차가 증가할 수 있다. 일반적인 GNSS 수신기에서는 반송파 추적 오차를 줄이기 위해서 넓은 대역폭의 신호 추적 루프를 사용하지만, 대역폭을 넓히면 열잡음에 의한 신호 추적 오차가 증가하여 신호 추적에 실패할 수 있다[1].

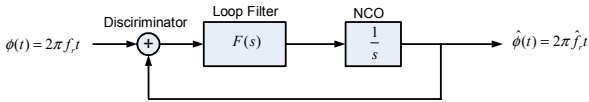
회전 운동에 의하여 변조된 GNSS 신호를 추적하기 위하여 J. H. Doty 등은 롤 추적 루프(Roll tracking loop)를 제안하였다[2][3]. 이 루프는 항체의 롤 회전에 의하여 크기 변조(Amplitude modulation)와 위상 변조(Phase Modulation)된 입력 신호를 복조하기 위한 것으로 롤 판별기(Roll discriminator), 루프 필터(Loop filter), 롤 NCO(Numerical controlled oscillator)로 구성된다. GNSS 수신기에 롤 추적 루프를 사용함으로써 회전에 의하여 변조된 신호를 추적할 수 있지만, 항체의 롤 회전각과 추정된 회전각의 차이를 계산하기 위한 판별기를 구현하기 위해서는 수신기에 상관기를 추가하여야 한다. 즉, 수신기 H/W(Hard ware)를 수정하여야 한다. Cantwell 등은 회전 운동하는 인공위성에서 GPS 신호를 연속적으로 추적하기 위한 방법을 제안하였다[4]. 이 방법에서는 여러 개의 안테나를 사용하고 각 안테나마다 별도의 RF 초단부(Radio frequency front-end)를 두어 회전 시 하나의 안테나만 위성 신호를 수신하도록 하였다. 안테나에 입력되는 신호를 스위칭(Switching)하여 사용하면, 수신기의 디지털 신호 처리부에서는 회전하는 것이 아닌, 고정된 안테나에서 수신한 신호를 처리하는 것과 같이 처리할 수 있으므로 별도의 신호 추적 루프나 처리 방법이 필요하지 않다. 이 방법을 사용하기 위해서는 안테나의 수만큼 RF 초단부가 필요할 뿐만 아니라 RF 초단부 간의 스위칭 기술이 필요하다.

본 논문에서는 회전 항체용 GNSS 수신기의 회전 추적 루프를 제안하였다. 제안하는 회전 추적 루프는 일반적인 GNSS 수신기에 추가되어 회전에 의하여 변조된 반송파 신호의 위상과 주파수를 복조하는 역할을 한다. 회전 추적 루프는 판별기, 루프 필터, NCO로 구성되는데 판별기는 일반적인 GNSS 수신기의 I(In-phase), Q(Quadrature-phase)상관값을 이용하므로 H/W 수정이 필요 없는 장점을 가진다. 항체의 회전을 추적하기 위하여 항체의 회전 속도와 대역폭을 결정하여 루프 필터를 설계하였다. NCO는 일반적인 반송파 추적 루프, 코드 추적 루프의 NCO와 유사한 구조를 가진다. 제안하는 회전 복조 루프는 모의실험을 검증하였다.

2절에서는 롤 회전 루프를 구성하는 판별기, 루프 필터, NCO에 대한 설계 방법에 대하여 기술하였고 3절에서는 모의실험을 통하여 설계한

### 2.1.2 루프 필터

회전 복조 루프는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.



〈그림 3〉 회전 복조 루프

회전 복조 루프의 차수는 항체의 회전 속도에 따라 달라진다. 회전속도가 일정하면 회전 복조 루프에 입력되는 회전각은 램프(Rmap)입력으로 볼 수 있으므로 1차의 루프 필터를 사용하고, 회전 속도가 시간에 따라 증가하면 회전각은 가속도로 볼 수 있으므로 2차의 루프 필터를 사용한다. 루프의 대역폭은 항체의 회전속도의 범위와 상관값에 포함된 잡음 특성에 따라 결정할 수 있으며, 특히, 잡음 특성을 사용하는 수신기의 RF부의 노이즈 특성(Noise figure)과 상관기의 적분 시간 등을 고려하여 결정하여야 한다. 대역폭이 정해지면, 식(2)의 루프 필터의 계수를 결정할 수 있다.

$$F(z) = \frac{a\omega_n(1-z^{-1}) + \omega_n^2(T/2)(1+z^{-1})}{1-z^{-1}} \quad (2)$$

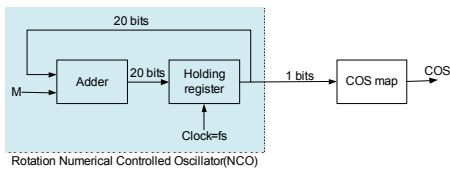
여기서,  $a$ 는 Overshoot 사양으로부터 결정하는 값이며,  $\omega_n$ 는 식(3)과 같이 대역폭 사양으로부터 결정할 수 있다.

$$\omega_n = \left[ \frac{4a}{1+a^2} \right] B_n \quad (3)$$

여기서,  $B_n$ 은 대역폭을 나타낸다.

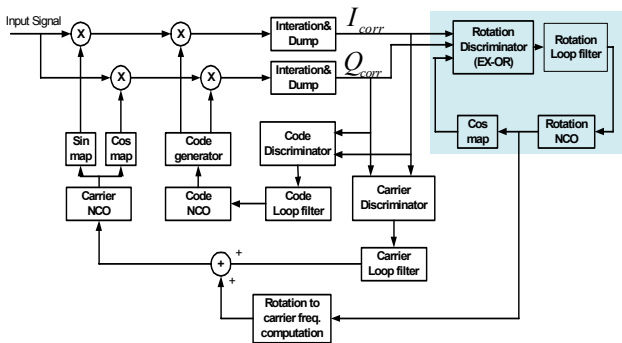
### 2.1.3 NCO와 복제 회전 신호 생성기

NCO는 GNSS 수신기의 반송파 추적 루프 또는 코드 추적 루프의 NCO와 동일한 구조를 가지며, 복제 신호는 1 비트 분해능을 가지는 Cosine 함수 Table을 이용하여 생성한다. 이것은 Exclusive - OR 로직으로 구성된 판별기에서 1 비트의 분해능을 가지는 값으로 차이를 계산할 수 있기 때문이다. 그림 4는 NCO와 복제 회전 신호 생성기의 구조를 나타낸 것이다.



〈그림 4〉 NCO와 복제 회전 신호 생성기의 구조

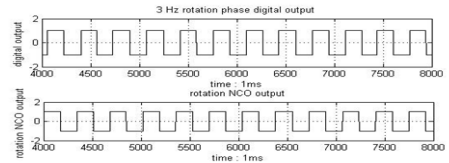
회전 복조 루프를 일반적인 GNSS 수신기의 반송파, 코드 추적 루프에 그림 5와 같이 추가하여 회전 항체용 GNSS 수신기의 신호 추적 루프를 구현할 수 있다.



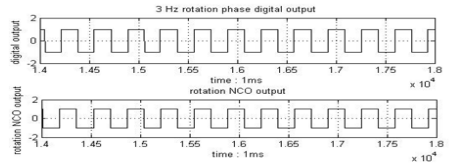
〈그림 5〉 회전 항체용 GNSS 수신기의 신호 추적 루프

### 3. 성능 검증

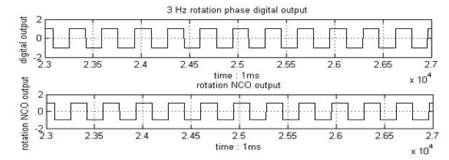
본 논문에서 제안한 추적 루프의 효율성을 보이기 위하여 소프트웨어 기반 수신기에 제안한 회전 복조 루프를 구현하여 성능을 검증하였다. 3Hz의 회전에 의하여 위상과 주파수가 변조된 GPS 신호를 생성하여 소프트웨어 기반의 수신기에 입력한 후 추적 성능을 확인하였다. 그림 6은 시간에 따른 입력 신호와 복제 신호의 위상 차이를 나타내고 있다.



(a) 구동 후 4~8ms에서 판별기의 입력 신호

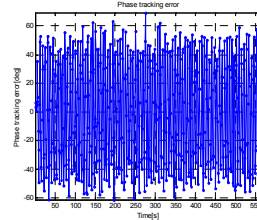


(b) 구동 후 14~18ms에서 판별기의 입력 신호

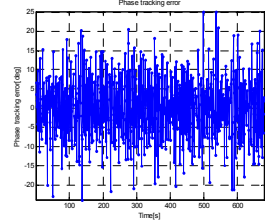


(c) 구동 후 23~27ms 일 때 판별기의 입력 신호  
〈그림 6〉 판별기 입력 신호

회전 복조 루프가 구동된 후 4~8ms에서는 입력 신호의 위상과 복제 신호의 위상이 약 0.3 cycle 정도 차이가 나는 것을 확인할 수 있는데, 시간이 지남에 따라 이 차이가 감소하여 약 25ms 정도가 경과하였을 때는 두 신호의 위상이 일치하는 것을 볼 수 있다. 회전 추적 루프를 GNSS 수신기에 적용하였을 때 반송파 추적 루프인 PLL의 위상 추적 오차를 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 (a)는 수신기의 PLL만 사용한 경우의 위상 추적 오차, (b)는 회전 추적 루프를 추가했을 때 반송파 위상 추적 오차를 나타낸 것이다. PLL만 사용한 경우에는 위상 추적 오차가 신호 추적 오차 임계치인 40deg를 초과하는 반면 회전 추적 루프를 추가하면 40deg 이내로 오차가 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) PLL사용



(b) 회전 추적 루프 사용

〈그림 7〉 위상 추적 오차

### 4. 결론 및 후속 연구 과제

본 논문에서는 회전 항체용 GNSS 수신기의 신호 추적 루프를 설계하였다. 일반적인 GNSS 수신기에 제안하는 회전 추적 루프를 추가함으로써 회전에 의하여 변조된 반송파 신호를 추적할 수 있음을 확인하였다. 항체가 3Hz로 회전 할 때 회전각을 추정하는 것은 확인하였으며, PLL 만을 사용했을 때에 비해 본 논문에 제시한 회전 추적 루프를 추가하면 추적 오차가 현저히 감소하는 것을 확인하였다.

후속으로는 실 신호를 이용한 실험을 수행하여 성능을 검증할 것이며, 회전 항체의 자세를 추정하는데 회전 추적 루프의 출력을 이용하는 방법에 대하여 연구를 진행할 것이다.

#### [참고 문헌]

- [1] Avram K. Tetesky, and Frak E. Mullen, "Effects of Platform Rotation on GPS with Implications for Simulators," Proceedings of the ION GPS-96, pp.1917-1925, Sept. 1996.
- [2] J. H. Doty, "Advanced Spinning-Vehicle Navigation-A New Technique in Navigation on Munitions," Proceedings of the ION 57th Annual Meeting, pp.745-754, June 2001.
- [3] J. H. Doty and T. D. Bybee, "A Demonstration of Advanced Spinning-Vehicle Navigation," Proceedings of the ION NTM 2004, pp.573-584, Jan. 2004.
- [4] R. H. Cantwell and R. Ventresca, "GPS Continuous Track on a Spinning Vehicle with Multiple Patch Antennas," Proceedings of the ION GPS-99, pp.901-906, Sept. 1999.
- [5] Roland E. Best, "phase-Locked Loops - Design, Simulation, and Applications, McGraw-Hill. 1999.