

고기동 환경의 약신호 추적루프 설계에 관한 연구

*이기훈¹, 백복수²

¹전술항법/GPS 연구실, 국방과학연구소 (Tel: 042-821-2804 E-mail: kihoon@add.re.kr)

²정밀항법 연구실, 국방과학연구소 (Tel: 042-821-4460 E-mail: bspaik@add.re.kr)

Abstract: 위성신호는 저양각에 위치하거나 재밍 및 간섭신호의 영향을 받으면 약해진다. 이러한 약신호를 안정적으로 추적하기 위해서는 신호추적루프의 대역폭이 가능하면 작아야 한다. 그러나 작은 대역폭의 신호추적루프는고기동 환경에서 기준주파수의 주파수오차를 포함한 입력오차가 커져 불안정해진다. 본 논문에서는 최대 저크 15g/s의 동적특성을 가지는 항체의 항법정보를 획득하고 동시에 28dB-Hz의 약신호도 안정적으로 추적할 수 있는 신호추적루프를 연구한다. 이를 위해 위성신호 상태를 예측할 수 있는 SNR, 양각, 항체의 가속도 등을 고려하여 대역폭 및 PIT를 가변적으로 설계한 적응형 신호추적루프를 설계한다. 또한 약신호인 C/No 28dB-Hz 신호를 안정적으로 추적하기 위해 10ms의 PIT(Predetection Integration Time)와 비트동기를 고려한 Coherent 방식을 적용한 반송파 위상추적루프를 설계한다. 이렇게 설계된 신호추적루프의 성능을 검증하기 위해 항체의 동적환경과 위성신호 크기를 묘사해줄 수 있는 시뮬레이터를 이용하여 위성신호 추적성능을 시험하고 결과를 분석한다.

Keywords: 신호추적루프,고기동, 약신호, PIT, Coherent PLL

1. 서론

고기동 항체의 위치, 속도, 시각 등 항법정보를 얻기 위해서는 큰 대역폭의 신호추적루프를 가지는 위성항법수신기가 다양한 무기체계 등에 적용되고 있다. 기존에는 가속도와 각속도를 측정하는 고가의 관성센서를 이용하는 관성항법장치로써 위치 및 자세 등의 항법정보를 측정하였는데, 오늘날에는 비교적 저가이고 시간에 따른 오차의 증가가 없는 위성항법수신기를 적용하고 있는 추세이다. 특히 동적특성이 큰고기동 항체의 항법정보를 측정하기 위해서 위성항법수신기는 신호추적루프의 입력이 큰 변이를 갖고, 출력은 이러한 입력을 추적해야 하기 때문에 대역폭이 커야 한다[1].

위성항법수신기의 신호추적루프는 반송파 주파수를 추적하는 반송파추적루프와 코드 지연을 추적하는 코드추적루프로 구성되어 있다[2][3]. 각각의 추적루프 차수 및 대역폭은 적용분야의 동적특성 및 열적 잡음을 고려하여 최적으로 설계되어야 한다. 특히 반송파추적루프는 응용분야가 광범위한 고정밀 측위기술을 위해서 위상을 추적하는 PLL(Phase Lock Loop) 형태가 많이 있게 연구되고 있다[4][5][6].

본 논문에서는고기동 환경에서 약한 위성신호 추적에 적합한 신호추적루프를 연구한다. 위성신호는 저양각에 위치하거나 재밍 및 간섭신호의 영향을 받으면 약해진다. 이러한 약신호를 안정적으로 추적하기 위해서는 신호추적루프의 대역폭이 가능하면 작아야 한다. 그러나 작은 대역폭의 신호추적루프는고기동 환경에서 기준주파수의 주파수오차를 포함한 입력오차가 커져 불안정해진다. 본 논문에서는 위성신호 상태를 예측할 수 있는 SNR, 양각, 항체의 가속도 등을 고려하여 대역폭을 가변적으로 설계한 적응형 신호추적루프를 설계한다. 또한 약신호를 안정적으로 추적하기 위해 PIT(Predetection Integration Time)를 늘리고 비트동기를 고려한 Coherent 방식의 반송파 위상추적루프를 설계하고 시뮬레이터를 이용하여 그 성능을 시험한다.

2. 위성신호 추적루프 구조

중계도 위성인 GPS 위성은 고도 약 2만km에서 각각의 위성이 고유한 코드를 전송하는 CDMA 방식으로 운영되고 있다. 이러한 위성신호를 수신하여 위치, 속도, 시각 등의 항법정보를 계산하기 위해서 위성항법수신기는 그림 1과 같이 코드 지연을 추적하는 코드추적루프와 상대속도에 의해 발생하는 도플러주파수를 추적하는 반송파추적루프를 실행한다.

코드추적루프는 크게 코드지연 분별기, 코드루프필터, 코드 발생기로 나눌 수 있는데, 코드지연 분별기는 상관기에서 생성하는 복제신호의 Early 상관값과 Late 상관값의 차이를 이용하여 코드지연 오차를 계산한다. 코드루프필터는 코드지연 분별기에서 계산된 코드지연 오차의 잡음성분을 줄이기 위한 목적으로 설계하는데, 대부분의 위성항법수신기는 위성과 안테나의 상대운동에 의한 동적특성을 제거하기 위해 반송파추적루프에서 추정된 상대운동량을 이용하여 이득만 존재하는 1차 루프로 설계한다.

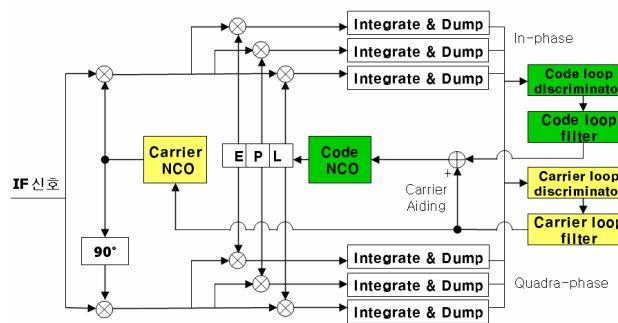


그림 1. 코드 및 반송파 추적루프

반송파추적루프는 코드추적루프와 유사한 구조를 가진다. 즉 위상 분별기, 반송파 루프필터, 반송파 발생기로 구성되어 있다. 그러나 위상 분별기는 상관기에서 생성하는 Prompt 복제신호의 In-phase와 Quadra-phase 상관값으로 위상 오차를 계산하며, 표 1과 같은 종류 및 특징을 갖는다. 반송파 루프필터는 동적환경에 맞추어 설계되는데 가속도 및 저크 등의 운동량이 클수록 차수와 대역폭이 커져야 한다. 반송파 위상추적루프는 RF단에 의해 저주파수로 낮추어진 중간주파수(IF, Intermediate Frequency)를 매우 정밀하게 추적하는데, 도플러주파수는 기준 중간주파수에서 변화된 주파수량으로 정밀하게 측정된다. 도플러주파수는 위성과 위성항법수신기 상대속도에 비례하여 이를 코드추적루프에 적용하면, 동적특성은 제거되므로 대역폭을 작게 하여 잡음의 영향을 줄일 수 있다.

표 1. 위상 분별기 종류

종류	오차	특징
Sign(I _{PS})·Q _{PS}	Sin(φ)	강신호 적합
I _{PS} ·Q _{PS}	sin(2φ)	약신호 적합
Q _{PS} / I _{PS}	Tan(φ)	강 및 약신호 적합
atan(Q _{PS} / I _{PS})	φ	최적, 계산량 많음

3. 고기동 항체용 신호추적루프 설계

최대 저크 15g/s 및 가속도 15g의 동적특성을 가지는 고기동 항체의 항법정보를 얻기 위한 신호추적루프는 저크를 추적해야 하기 때문에 3차의 반송파 위상추적루프와 이의 도움을 받는 1차 코드추적루프로 설계해야 한다. 1차 코드추적루프는 위상추적루프의 도움을 받기 때문에 대역폭을 0.5~수Hz로 설계할 수 있으며, 작게 설계할수록 잡음의 영향을 줄일 수 있다. 본 장에서는 동적 추적성능을 결정하는 반송파 위상추적루프를 중점적으로 설계한다. 고유진동수 ω_n 에 따른 3차 반송파 위상추적루프의 최적설계는 다음 수식 (1)과 같은 페루프 전달함수를 가지며 대역폭(B_n)은 수식(2)와 같이 계산된다[4].

$$H(s) = \frac{2\omega_n s^2 + 2\omega_n^2 s + \omega_n^3}{s^3 + 2\omega_n s^2 + 2\omega_n^2 s + \omega_n^3} \quad (1)$$

$$B_n = 0.833\omega_n \quad (2)$$

위상추적루프의 설계 시 고려해야 할 사항은 최대 동적특성, 기준 TCX0의 안정도 및 열적잡음이다. 위상추적루프의 추적오차는 원칙적으로 3σ 규칙에 의해 In-phase와 Quadra-phase 신호의 구분이 가능한 45° 값의 $1/3$ 인 15° 이하를 가져야 하며 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다[1].

$$\sigma_{PLL} = \sqrt{\sigma_{iPLL}^2 + \sigma_v^2 + \theta_A^2} + \frac{\theta_e}{3} \leq 15^\circ \quad (3)$$

여기서, σ_{PLL} = 위상 추적 오차(1σ)

σ_{iPLL} = 열적잡음에 의한 오차(1σ)

σ_v = 진동에 의한 TCX0 오차(1σ)

θ_A = Allan deviation에 의한 TCX0 오차(1σ)

θ_e = 최대 동적특성 추적 오차

열적잡음에 의한 위상추적 오차는 열적잡음 대비 위성신호의 크기(C/N_0), 적분시간(T), 대역폭의 함수이며 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\sigma_{iPLL} = \frac{360}{2\pi} \sqrt{\frac{B_n}{C/N_0} \left(1 + \frac{1}{2T \cdot C/N_0}\right)} \quad (4)$$

열적잡음에 의한 오차는 대역폭과 비례관계가 성립하며 위성신호 크기와 반비례 관계이다. 또한 수식 (4)의 괄호에서 두번째 항은 50bps로 전송되는 항법메시지의 비트변이 영향을 제거하기 위해 사용된 위상 분별기로 인해 발생하는 Squaring loss이다. 다음 장에서 설계하는 Coherent 방식은 두번째 항이 존재하지 않아 약신호 추적을 위해 적합하다. 아래 그림 1은 $B_n = 10\text{Hz}$, $T=0.05$ 로 설정할 때 일반적 PLL과 Coherent PLL의 위상오차인데 위성신호가 30dB-Hz이하이면 오차 차이가 커진다.

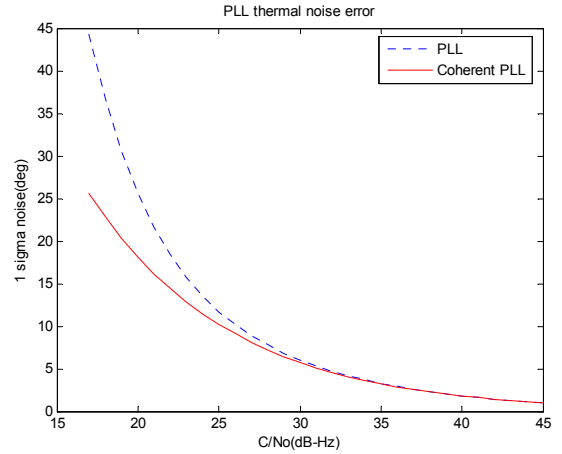


그림 1. 위성신호 크기에 따른 위상오차

기준 TCX0의 안정도에 의한 위상 오차는 경험적으로 분석되며, 진동에 의해 유발된 주파수 오차와 주파수 자체의 정확도로 측정되는 Allan deviation에 의한 위상변화 오차가 존재한다. 진동에 의해 유발되는 위상오차는 일반적으로 $1\sim 2^\circ$ (1σ)를 갖는다고 간주되는데 본 논문에서는 15g/s의 저크를 갖는 고기동 항체를 고려하므로 최대값의 2배인 4° 로 가정한다. Allan deviation($\sigma_A(\tau)$)에 의한 오차(θ_A)는 경험에 의해 3차 위상추적루프에서 다음과 같은 수식 (5)로 표현된다. 대역폭에 따른 위상오차는 그림 2에서 알 수 있듯이 반비례 관계에 있으며 10Hz 이하이면 급격하게 커짐을 알 수 있다.

$$\theta_A = 160 \frac{\sigma_A(\tau) f_L}{B_n} \quad (\text{deg}) \quad (5)$$

여기서, f_L = 위성 반송파 주파수($1.57542 \times 10^9 \text{Hz}$)

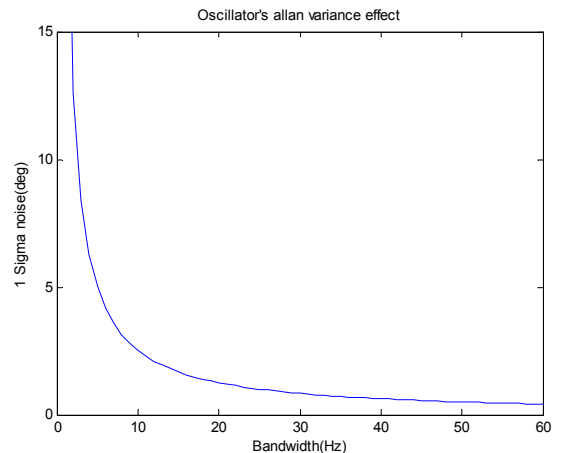


그림 2. 대역폭에 따른 TCX0 위상 오차

최종적으로 고기동 항체용으로 최대 동적특성을 고려하여 3차 위상추적루프의 대역폭을 구하기 위해, 앞에서 고려한 열적잡음 및 기준 TCXO의 안정도에 의한 위상 오차만 ($\sqrt{\sigma_{PLL}^2 + \sigma_v^2 + \theta_A^2}$)을 나타내면 아래 그림 3과 같다. 그림 3은 약신호인 C/No 20~30dB-Hz과 일반적인 위성신호 크기인 C/No 33~55dB-Hz 및 대역폭 1~80Hz에 대한 열적잡음과 기준 TCXO의 안정도에 따른 위상잡음을 표현한 것으로 33dB-Hz 이상의 신호에 대해서는 대역폭을 80Hz 이상으로 설계할 수 있음을 나타낸다. 또한 25dB-Hz 정도의 약신호에 대해서는 대역폭을 2~15Hz로 설계해야 함을 알 수 있다.

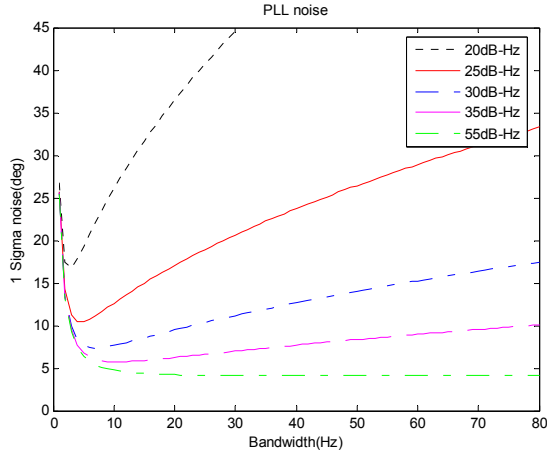


그림 3. 대역폭 및 위성신호에 따른 위상 오차

최대 동적특성에 대한 3차 위상추적루프는 저크 입력에 대해 Steady state error를 가진다. 저크 입력 및 대역폭과 Steady state error의 관계식은 다음 수식 (6)과 같이 유도된다.

$$\theta_e = 0.5786 \frac{Jerk}{B_n^3} \quad (6)$$

위 수식에서 알 수 있듯이 최대 저크는 위상추적루프의 대역폭과 관련이 있으며 Steady state error가 수식 (3)의 안정도 조건을 만족시켜야 한다. 본 논문에서는 1초 동안 15g/s의 저크를 입력하여 15g의 가속도를 가지는 항체의 동적특성을 추적해야 한다. 15g/s의 저크에 대한 위상추적루프의 추적오차는 그림 4와 같다. 그림 3에서 약신호가 아닌 33dB-Hz 이상의 위성신호에 대해서만 고려하면 허용 오차가 거의 없으므로, 최대 저크에 의한 위상추적루프 추적오차는 1° 이하의 Steady state error를 가지도록 설계한다. 이를 위한 대역폭은 60Hz 정도임을 알 수 있다.

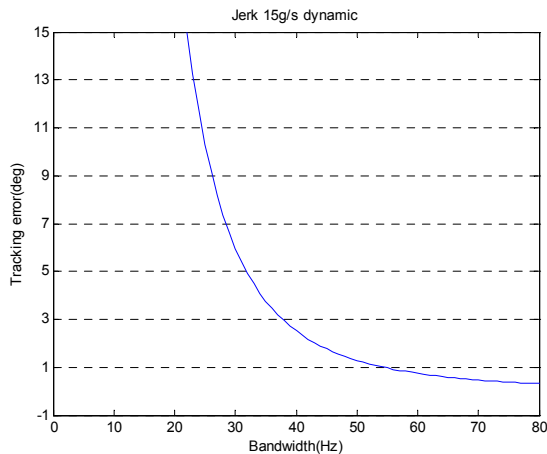


그림 4. 대역폭과 추적오차

앞에서 설계한 대역폭 60Hz를 수식 (1)의 페루프 전달함수에 대입하고 저크 15g/s의 위상변화를 입력하였을 경우 위상추적오차는 그림 5와 같이 1° 이하의 추적오차를 가짐을 알 수 있다.

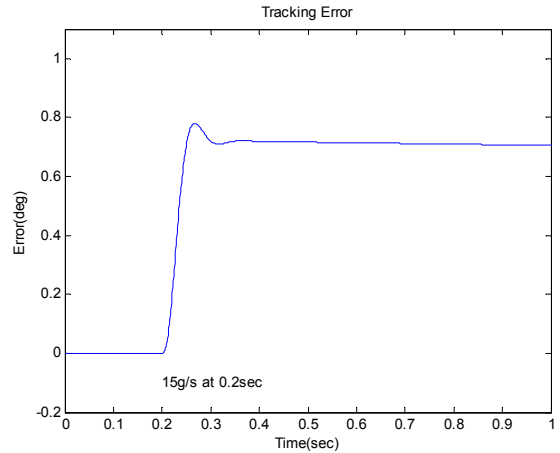


그림 5. 3차 PLL 저크추적 오차

4. 적응형 약신호 추적루프 설계

위성신호가 30dB-Hz 이하로 작으면 그림 3에서 알 수 있듯이 대역폭이 작아야 안정적으로 추적할 수 있다. 하지만 대역폭이 작으면 그림 4에서 알 수 있듯이 동적특성에 따라 위상오차가 발생하여 반송파를 추적할 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위해 동적특성을 INS로써 제거하여 대역폭을 낮추는 기법이 연구되고 있다[7]. 하지만 본 논문에서는 INS 도움 방식을 제외하고, 3장에서 분석한 결과를 이용하여 위상항법수신기 단독으로 고기동 및 약신호 추적성능을 향상시키는 방안을 연구한다.

4.1 신호 상태에 따른 가변형 추적루프 구현

위성신호 크기는 송출전력, 위성각각, 안테나 이득패턴, 재밍 영향 등에 의해서 변화하며 위상항법수신기에서 1Hz 이상으로 측정된다. 또한 항체의 동적특성은 관성센서 또는 적응필터에 의해서 직간접적으로 측정될 수 있다. 본 논문에서는 각 채널별로 위성신호의 크기에 따라서 가변적으로 추적하는 그림 6과 같은 적응형 신호추적루프를 제안한다.

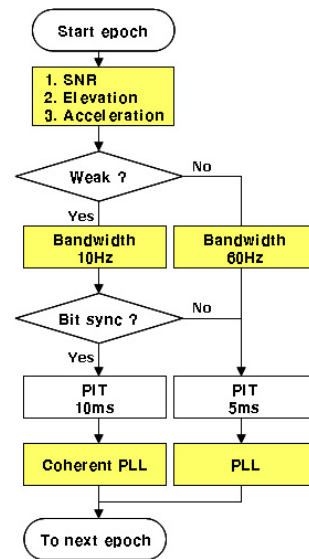


그림 6. 적응형 위상추적루프 흐름도

즉 약신호가 아닌 42dB-Hz 이상의 신호이면 15g/s의 저크 입력을 추적하기 위해 60Hz 대역폭, 5ms PIT를 갖는 PLL을 수행하고, 약신호인 41dB-Hz 이하의 신호이면 안정적으로 추적하기 위해 10Hz 대역폭, 10ms PIT를 갖는 Coherent PLL을 수행하는 구조이다. 이러한 구조에서 15g/s의 저크가 입력되면 약신호 추적모드로 실행되고 있는 채널은 신호를 잃어버리지만, 41dB-Hz 이하의 신호는 총 위성개수의 10% 내외로써 대부분의 경우 항법을 수행하는데 지장이 없다.

4.2 Coherent PLL 설계

약신호 추적에 적합한 Coherent PLL은 위성메시지 비트를 판별하여 위상분별기에 이용해야 한다. 이를 위해 PIT를 10ms로 설계하여 비트를 안정적으로 판별하도록 하였으며, 위상분별기는 표 1의 $Sign(I_{PS}) \cdot Q_{PS}$ 를 사용하였다. Coherent PLL은 이와 같은 위상분별기를 사용함으로써 그림 1에서 나타낸 바와 같이 약신호에서 추적오차가 줄어들고, 비트동기가 선행조건이기 때문에 앞의 그림 6처럼 비트동기 판별 후 실행된다. 이러한 Coherent PLL은 비트동기가 완료되었기 때문에 10ms 동안 I,Q 상관값을 적분하여 위성신호 크기를 구할 수 있어 30dB-Hz 이하의 약신호에서도 신호추적이 가능하다.

5. 시뮬레이터 및 야외 실험

5.1 약신호 추적성능 실험

C/No 30dB-Hz 이하의 약신호 추적성능을 확인하기 위해 SPIRENT사의 시뮬레이터를 이용하였다. 시뮬레이터는 10dB 입력을 가하면 -120dBm의 신호가 출력되며 이는 C/No 44dB-Hz의 일반적인 크기를 갖는다. 따라서 -4dB 입력 시 C/No는 30dB-Hz가 되고 -6dB 입력 시 28dB-Hz가 된다. 그림 7은 -6dB 입력 시 정상적으로 위성을 추적하여 항법을 계산하고 있음을 보여준다.

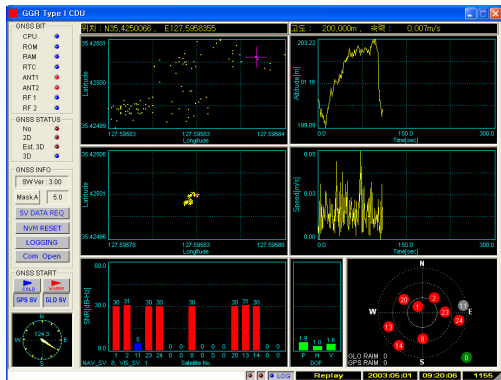


그림 7. C/No 28dB-Hz 신호추적

5.2 고기동 저크 추적성능 실험

시뮬레이터를 이용하여 15g/s의 저크 기동을 갖는 항체를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 기동 조건은 정남쪽 수평방향으로 정지→ +15g/s(1초)→ +15g(10초)→ 1500m/s(100초)→ -15g/s(1초)→ -15g(10초)→ 정지 순서였으며, 위성신호 크기는 15dB(-115dBm, 49dB-Hz)이다. 시험결과 위성신호가 48~50dB-Hz로 기준인 42dB-Hz 이상이었던 때문에 대역폭 60Hz의 PLL으로 추적되었으며, 3차원 위치오차 및 속력을 나타내는 그림 8과 같이 정상이다.

5.3 야외 실험

16시간 동안 실외에 설치한 안테나로부터 실제 위성신호를 수신하여 수행한 야외실험 결과, 추적/항법에 사용되고 있는 모든 위성의 C/No는 그림 9와 같다. C/No 28dB-Hz 내외의 위성신호를 추적하여 항법에 사용하고 있음을 알 수 있다.

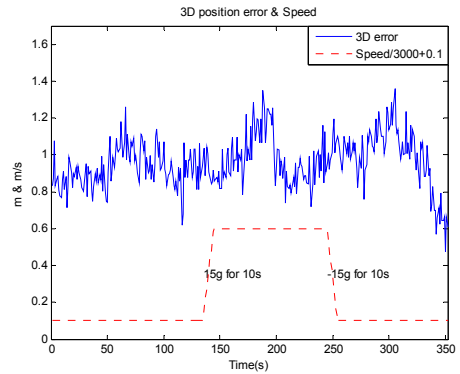


그림 8. 저크 15g/s 신호추적

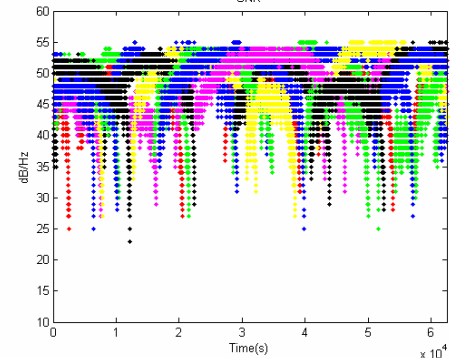


그림 9. 야외실험의 C/No 변화

6. 결론

본 논문에서는 위성항법수신기 단독으로 고기동 및 약신호 추적성능을 향상시키는 신호추적루프를 연구하였다. 위성신호 상태를 예측할 수 있는 SNR, 양각, 항체의 가속도 등을 고려하여 대역폭을 가변적으로 설계한 적응형 신호추적루프를 설계하였다. 약신호를 안정적으로 추적하기 위해 PIT(Predetection Integration Time)를 늘리고 비트동기를 고려한 Coherent 방식의 반송파 위상추적루프를 설계하고 시뮬레이터 및 야외시험을 통하여 그 성능을 확인하였다.

참고 문헌

1. Kaplan, E.D, *Understanding GPS: principles and application*, Artech House, London, 1996.
2. Braasch, M.S., and Van Dierendonck, A.J., "GPS receiver architectures and measurements", *Proceedings of IEEE*, Vol. 87, 1999, pp. 48-64.
3. Pratap Misra, Per Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga-Jamuna Press, 2001.
4. Jwo, D.J, "Optimisation and sensitivity analysis of GPS receiver tracking loops in dynamic environments", *IEE Proceedings of Radar Sonar Navigation*, 2001, pp.241-250.
5. Mao, W.L, Tsao, H.W and Chang, F.R, "Intelligent GPS receiver for robust carrier phase tracking in kinematic environments", *IEE Proceedings of Radar Sonar Navigation*, Vol. 151, 2004, pp. 171-180.
6. Ping Lian, Gerard Lachapelle, ChangLin Ma, "Improving Tracking Performance of PLL in High Dynamics Applications", *ION NTM 2005*, 2005, pp. 1042-1052.
7. Ravindra Badu and Jinling Wang, "Performance of code tracking loop in ultra-tight GPS/INS integration", *ENC-GNSS 2005*, Munich, Germany, 19-22 July, 2005.