

Tone 방식을 사용한 위성 거리 측정 방법에 대한 잡음의 영향

김 영완, 김 호겸, 장 대익

한국전자통신연구원 무선방송기술연구소

Performance analysis of the satellite range measurement using tone method in the presence of noise

Young-Wan Kim, Ho-Kyom Kim, Dai-Ik Chang

ETRI, Radio & broadcasting Technology Lab.

요 약

Tone 방식을 사용하는 거리 측정시스템의 잡음 및 간섭에 대한 열화 도를 분석한다. 위성 링크상의 잡음 및 다중 변조 방식에 의한 전송 신호간 간섭들로 인하여 위상차 측정에 열화가 발생하며, 열화 도는 ranging 측정 시스템의 잡음 대역폭에 의존한다. Ranging 측정 모드에서는 잡음 대역폭 8Hz, 4Hz 그리고 1Hz 에 대하여 0.3dB 열화가 발생하였으며, ranging 및 원격 측정 데이터 전송 모드에서는 대역폭에 따라 6.4dB, 4.2dB, 4dB 가 발생하였다.

I. 서 론

위성의 위치를 파악하고 위성 궤도를 예측하기 위해서는 위성 위치 데이터가 필요하다. 위성 지구국에서 위성의 위치 데이터를 얻기 위해서는 일반적으로 2 가지 방법이 사용한다. 지구국 안테나의 angle tracking 데이터로부터 위성에 대한 angular coordinates 데이터가 산출되거나 ranging tone 을 사용한 위성까지의 거리 데이터를 산출하여 위성 위치를 파악할 수 있다. 위성에 대한 angle tracking 은 위성에 대한 고도 (elevation)와 앙각(azimuth) 데이터를 측정하는 것으로 정확도의 향상을 위하여 multiple-feed horn 을 사용하는 안테나 시스템을 사용한다. 또한, 위성까지의 거리 데이터를 산출하는 ranging tone 방식은 위성으로 송신된 tone 의 위상과 위성으로부터 되 돌아온 tone 신호의 위상차를 비교함으로써 거리를 알 수 있다. 한 지구국으로부터 얻어진 range 데이터는 위성 궤도를 정확히 예측하기 어려우므로 다른 지구국의 range 데이터를 이용하거나 또는 angle-tracking 데이터를 사용하여 정확한 위성 궤도를 예측할 수 있다.

록 한다. Ranging tone 을 사용하는 방법은 정확도를 위한 major tone 과 위상 ambiguity 해결을 위한 minor tone 들로 구성된다.

위성까지의 정확한 거리 측정을 위해서는 tone 신호간의 위상차를 정확히 측정하여야 하며, 위성 link 상에서 발생하는 잡음 및 간섭 그리고 다중 변조 방식에 따른 전송 신호간의 간섭을 최소화하여, 잡음에 따른 위상 변화 그리고 간섭에 따른 위상차를 최소화하는 ranging 측정 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 ranging tone 방식을 사용하는 GSTDN ranging 측정 시스템에서 link 상에서 발생하는 잡음이 거리 측정 데이터에 미치는 영향을 해석하고 ranging 측정 시스템에서 실현한 결과를 토대로 잡음에 대한 거리 측정 데이터의 영향을 분석한다.

II. 거리 측정 방법

위성까지의 거리 측정은 multi-tone ranging 방법과 hybrid harmonic/pseudo-random 방식이 사용된다.

2-1. Ranging Tone 및 전송 방식

Intelsat/Comsat ranging 시스템은 27.777kHz, 3968.25, 283.447 그리고 35.431Hz 의 4 tone 을 사용하며, GSTDN 방식은 500, 100, 4kHz, 800, 160, 40 그리고 8Hz 의 tone 을 사용한다. GSTDN 방식은 전송 대역폭을 고려하여 800Hz 이하의 minor tone 들은 4kHz 부 반송파를 사용하여 전송하며, ESA 방식은 16kHz 부 반송파를 사용한다. Tone 방식에 의한 거리 측정은 그림 1과 같이 Major tone 에 의해 거리 측정의 정확도를 결정하며 minor tone 들에 거리 측정 데이터의

ambiguity를 제거한다. 위상의 ambiguity를 제거할 수 있기 위해서는 가장 낮은 tone 신호의 위상 측정치는 식 1)과 같은 범위이내의 정확 도를 가져야 한다.

$$\Delta\phi = \pm \frac{180^\circ}{m} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, m 은 tone 신호들의 주파수 비이다.

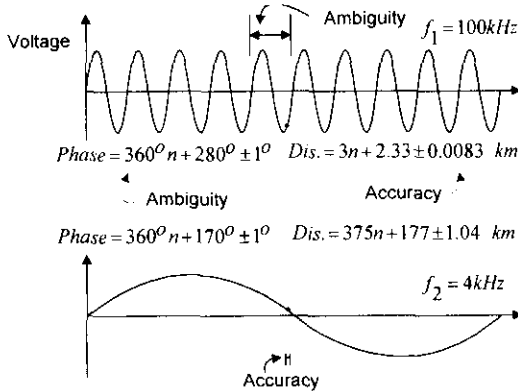


그림 1. Tone 방식에 의한 거리 측정

위성 거리 측정 신호는 위성까지 전송되어 다시 위성으로부터 되 돌아오는 신호 전송 형태를 갖는다. 위성으로부터 전송되는 신호는 원격 측정 신호가 포함될 수 있으며, 거리 측정 신호와 원격 측정 신호가 전송되는 위성 관제 신호의 전송 대역폭은 그림 2와 같다. 1.024MHz 부 반송파를 사용하는 원격 측정 신호는 2048bps 정보가 PSK 변조되어 거리 측정 신호와 같이 전송된다. 거리 측정 신호는 4kHz 부 반송파를 사용하여 상측파 대 single-sided 신호를 사용한다. 또한, major tone 신호로는 100kHz 신호를 사용한다. 원격 측정 신호와 거리 측정 신호는 위상 변조기에서 PM되며, 원격 측정 신호는 1.0 radian 그리고 거리 측정 신호는 0.4 radian의 변조 지수를 갖는다.

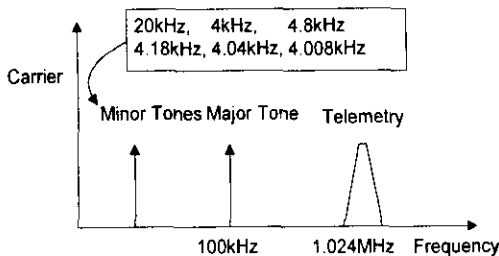


그림 2. Ranging Tone 및 Telemetry 신호 전송

2-2. 잡음에 의한 거리 측정 특성

거리 측정 시스템은 그림 3과 같이 구성된다. Tone 발생기에서 발생한 신호가 위상으로 전송되며, 위상으로부터 되돌아온 신호를 digital PLL(Phase Locked-Loop) 회로에서 major tone 신호와 위상 동기 된 minor tone의 replica 신호를 발생시켜 위상 비교를 한다. 거리 측정 시스템의 잡음에 대한 영향은 PLL 회로에 의해 결정되며 잡음에 대한 PLL 회로의 해석이 중요하다.

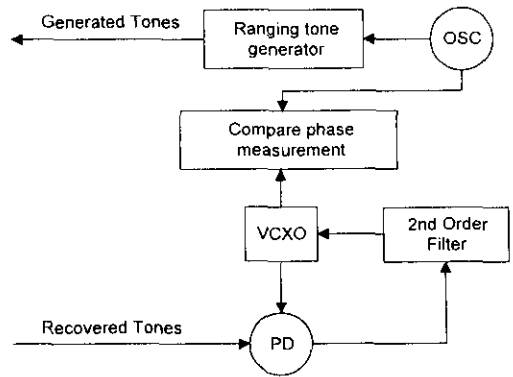


그림 3. Ranging 측정 시스템 Block diagram.

PLL 회로의 잡음 대역폭내의 반송파 신호 대 잡음 신호의 비가 크다면 그림 4와 같이 PLL의 선형 모델을 사용하여 해석한다.

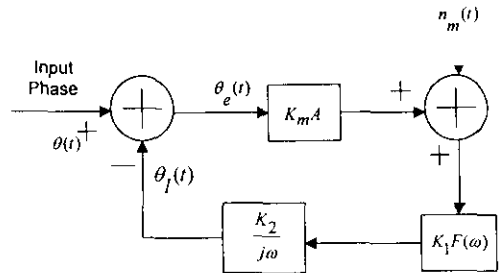


그림 4. Phase lock loop의 등가 선형 모델

그림 4에서 PLL의 loop gain 함수로써 식 2)와 같이 정의한다.

$$H(\omega) \equiv \frac{AK\{F(\omega)/j\omega\}}{1 + \{AKF(\omega)/j\omega\}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $F(\omega)$ 는 loop filter이며, $K = K_1K_2K_m$ 는

loop의 전체 회로 이득이다.

선형 레귤 루프 해석에 의해 Tracking 에러, $\theta_e(t) = \theta(t) - \theta_l(t)$, 는 식 3)과 같다.

$$\Phi_e(\omega) = \Phi(\omega) - \Phi_l(\omega) = \left[\frac{1}{1 + AK\{F(\omega)/j\omega\}} \right] \Phi(\omega) - \left[\frac{AK\{F(\omega)/j\omega\}}{1 + AK\{F(\omega)/j\omega\}} \right] \frac{N_m(\omega)}{K_m A} \quad (3)$$

식 2)의 $H(\omega)$ 에 의해

$$\Phi_e(\omega) = \{1 - H(\omega)\} \Phi(\omega) - H(\omega) \left\{ \frac{N_m(\omega)}{K_m A} \right\} \quad (4)$$

반송파 위상 변조 잡음 신호 $\theta(t)$ 에 의한 영향을 무시하면, Mixer 잡음에 의한 시간 영역에서의 위상 오차 $\theta_{en}(t)$ 는 Gaussian 잡음이며, 시간 영역에서의 $\theta_{en}(t)$ 의 mean squared 값은 식 4)의 두 번째 항의 spectral density 적분하여 구할 수 있다.

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 \frac{S_n(\omega)}{A^2} d\omega = \frac{N_0}{A^2} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H_{IF}(\omega)|^2 |H(\omega)|^2 d\omega \right\} \quad (5)$$

단측파 대(one-sided) loop 잡음 대역폭을 다음과 같이 정의하면,

$$B_L \equiv \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |H_{IF}(\omega)|^2 |H(j\omega)|^2 d\omega \quad (6)$$

식 5)는 다음과 같다.

$$\sigma_n^2 = \frac{N_0 2 B_L}{A^2} \quad (7)$$

Tracking loop에서의 잡음 대역폭과 반송파 신호 대 잡음 신호 비의 관계에 의하여 식 7)은 간단히 식 8)과 같이 표현된다.

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{CNR_L} \quad (8)$$

일반적으로 IF 잡음 대역폭은 변조 신호 대역폭보다

더 넓은 주파수 대역폭을 사용하므로 식 6)의 대역폭은 $B_L \equiv \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega$ 와 같이 정의할 수 있다. 따라서, 거리 측정 시스템에서의 잡음에 대한 성능은 다음과 같다.

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{2B_n}{S}} \sqrt{\frac{S}{2N_0}} \quad (9)$$

여기서, Ranging tone 신호의 S/N_0 값은 IF 신호의 반송파 신호 대 잡음 신호의 비와 변조 지수에 의해 다음과 같이 구한다.

$$\frac{S}{N_0} = \frac{C}{N_0} + 10 \log \{ J_1^2(mr) \} \quad \text{for ranging} \quad (10)$$

$$\frac{S}{N_0} = \frac{C}{N_0} + 10 \log \{ J_1^2(mr) \} + 10 \log \{ J_0^2(mt) \} \quad \text{for ranging + TM}$$

여기서, mr 은 ranging tone 신호의 변조 지수이며, mt 는 원격 측정 신호의 변조 지수이다.

III. 성능 분석 및 결과

거리 측정 시스템의 PLL 대역폭은 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 1, 2, 4 그리고 8Hz 대역폭을 사용하며, 측정 시스템은 INSNEC ranging 시스템을 사용한다. 위성의 doppler 현상에 따른 주파수 편차 현상의 측정은 고려하지 않으나, 실제 동작에서는 doppler 주파수에 따라 최적의 PLL 대역폭이 선정된다. 그림 5는 PLL 대역폭내의 잡음에 따른 이론적인 성능 값을 보여 준다.

그림 6은 ranging 신호 전송에 따른 거리 측정 데이터의 열화 도를 보여 준다. S/N 비가 낮은 영역에서는 0.3dB 정도의 열화가 발생하며, 신호 대 잡음 신호비가 47dB 이상 증가할 때에는 잡음에 의한 영향이 나타나지 않는다.

위성으로부터 거리 측정 신호와 원격 측정 신호가 동시에 전송될 때 잡음에 대한 거리 측정 데이터의 열화 도는 그림 7에 나타나 있다. 잡음 대역폭이 작아수록 잡음에 의한 영향은 상당히 작아지며, 37dB의 낮은 S/N 값에서는 잡음 대역폭에 따라 4 ~ 6.4dB의 열화 값이 나타나며, S/N 값이 70dB 이상일 때는 잡음의 영향을 무시할 수 있다.

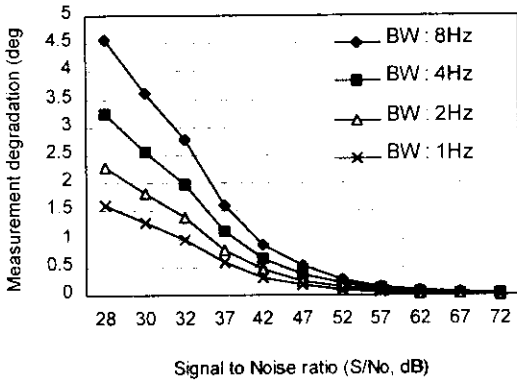


그림 5. 잡음에 따른 이론적인 거리 측정 성능

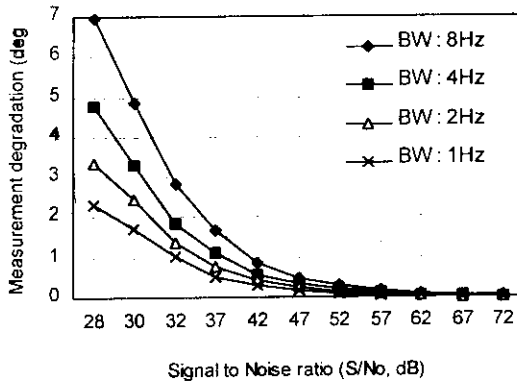


그림 6. RAI Mode 에서의 잡음에 따른 거리 측정 성능

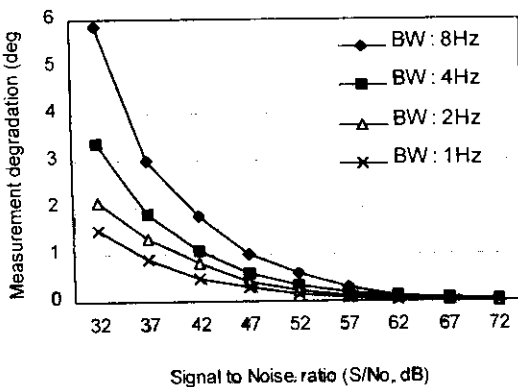


그림 7. RAI 와 원격 측정 Mode 에서의 잡음에 따른 거리 측정 성능

전송 링크상에서 발생하는 잡음에 따른 거리 측정 성능 열화 도를 그림 8 에 나타내었다.

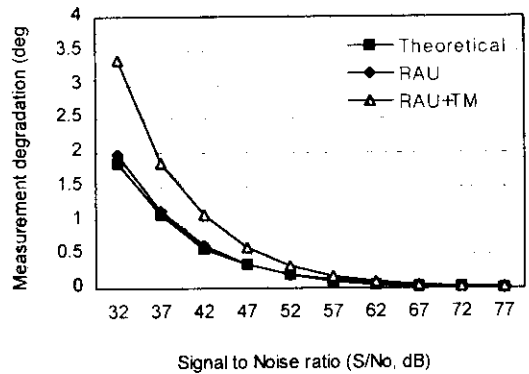


그림 8. 잡음에 따른 거리 측정 성능 비교도

IV. 결론

위성의 위치를 파악하고 위성 궤도를 예측하기 위한 Tone 방식에 대한 위성 거리 측정 데이터에 잡음이 미치는 영향을 알아보았다. 위성 링크상에서 발생하는 잡음의 영향을 최소화 하기 위해 ranging tone 신호만을 초과하는 최소 대역폭을 갖는 digital PLL 회로를 사용하였으며, 거리 측정 신호 전송 모드와 원격 측정 신호 및 거리 측정 신호 전송 모드에 대하여 잡음의 영향을 분석 및 거리 측정 시스템을 이용하여 측정하였다. 거리 측정 전송 모드에서는 낮은 S/K 비에서는 0.3dB 의 열화도가 발생하였으며, S/N 비가 47dB 이상 일 때에는 잡음의 영향이 나타나지 않았다. 또한, 원격 측정 신호와 같이 전송되는 모드에서는 잡음의 영향이 많이 나타났으며, 37dB 의 S/K 비에서 대역폭에 따라 4-6.4dB 의 열화 특성을 보여 주었다. 원격 측정 신호와 거리 측정 신호간의 다중 변조 방식에 따른 상호 변조 신호가 거리 측정 신호에 잡음으로 작용함으로 거리 측정 신호의 성능이 더 열화 되고 있으며, 원격 명령 모드에서도 동일한 성능 특성이 발생하였다.

References

- 1] Robert M. Gagliardi, Satellite Communications, Van Nostrand, reinhold Co., NY, 1984.
- 2] Frank Carden, Telemetry Systems design, Artech House, Boston, 1995.
- 3] Joseph H. Yuen, Deep Space Telecommunications Systems Engineering, Plenum, NY, 1983.
- 4] Insneq, COTEX User' Manual, Paris, 1998.