

통신해양기상위성의 위성 거리 측정 모호성 및 성능 분석

안상일^{1†}, 박동철²

¹한국항공우주연구원 우주응용센터 위성운영실 지상체계개발팀

²충남대학교 전기정보통신공학부 전파공학과

PERFORMANCE & AMBIGUITY OF RANGE MEASUREMENT FOR COMS

Sang-II Ahn^{1†} and Dong-Chul Park²

¹Ground System Development Dept., Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-333, Korea

²Dept. of Radio Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

E-mail: siahn@kari.re.kr

(Received October 09, 2007; Accepted November 07, 2007)

요 약

이 논문에서는 톤 방식을 사용하는 통신해양기상위성의 위성 거리 측정의 거리 측정 모호성 및 성능을 위성이 천이궤도(transfer-station)와 운용궤도(on-station)에서 운용될 경우를 고려하여 해석하였다. 결과적으로 위성 거리 측정의 모호성은 사용하는 톤 신호의 주파수 비율이 낮고, 많은 톤 신호를 사용할수록 작아짐을 알 수 있었다. 또한, 동일한 톤 신호의 신호 대 잡음밀도 비에서는 작은 잡음 대역폭을 사용할수록 모호성 발생이 작아짐을 알 수 있었다. 요구된 통신해양기상위성의 거리 측정 성능을 위해서 천이궤도에서는 2Hz, 그리고 운용궤도에서는 1Hz 이하의 잡음 대역폭으로 운용하여야 함을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The ambiguity and performance of range measurement for COMS using tone standard was analyzed with assuming that satellite is operating at transfer-station and on-station. From the results of analysis, it was shown that the ambiguity was reduced when low frequency ratio between tone signals and large number of minor tones are applied. It was also found that using the narrow noise bandwidth leads to decrease the ambiguity. As a result, required performance of range measurement for COMS can be satisfied when the noise bandwidth is set as 2Hz for transfer-station and 1Hz for on-station, respectively.

Keywords: satellite range, satellite range ambiguity, tone method

1. 서 론

위성은 크게 정지궤도 위성군과 비 정지궤도 위성군으로 분류할 수 있는데, 최근에는 이러한 위성군이 상호 연동되어 지상, 해상 또는 항공기를 대상으로 하는 멀티미디어 이동통신은 물론이고, 초고속정보통신 인프라 구축 면에서 큰 역할을 하고 있다(Yen 2000). 더욱이 이러한 통신 인프라와 더

[†]corresponding author

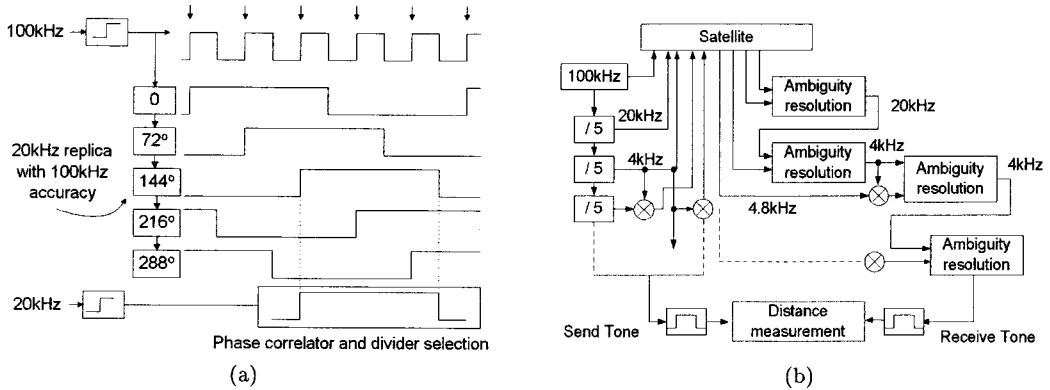


그림 1. 톤 신호의 동기. (a) 20kHz minor 톤 신호의 동기, (b) 톤 신호 동기 개념도

블어 기상 및 해양 관측을 위한 탐사 기능을 탑재한 복합 위성의 개발 및 운용이 현재 진행되고 있다. 21세기 정보화 시대에 보다 다양한 멀티미디어 서비스와 과학 및 기상 관측 데이터의 제공을 위한 복합 위성으로 국내에서 개발되고 있는 통신해양기상위성은 2008년 발사를 목표로 진행 중이다(장대익 외 2004). 통신해양기상위성은 Ka 대역의 위성통신 중계기이외에 기상 관측 그리고 해양 관측을 수행 하는 복합 위성으로 정지궤도에서 운용될 것이다.

위성 관제는 국제적으로 사용되는 전송 방식 범위 내에서 목적 위성의 관제 및 운용 환경에 따라 적합한 방법이 응용되어 적용된다. 통신해양기상위성은 복합위성으로 정확한 궤도 추적 및 운영이 요구된다(이병선 외 1998). 결국 위성 거리 측정 데이터를 기반으로 궤도 측정 및 자세 제어가 필요하기 때문에 위성의 천이궤도 및 운용궤도에서 신뢰성 있는 정확한 거리 측정이 반드시 수행되어야 한다.

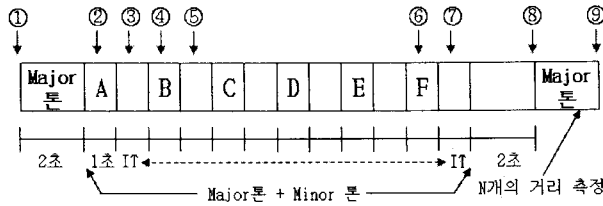
이 논문에서는 통신해양기상위성의 위성 거리 측정의 정확성과 신뢰성 있는 데이터 확보를 위해 위성 거리 측정의 성능과 모호성 발생 가능성을 해석하였다. 또한 이로부터 통신해양기상위성의 천이궤도와 운용궤도에서 발생하는 거리측정 모호성을 최소로 하여 정확한 거리측정을 위한 위성 운용 환경을 분석하였다. 통신해양기상위성의 정확한 궤도 예측 및 운용을 위해 이 연구에서 제시한 요구사항 데이터는 향후 위성 관제 지상 시스템의 설계 및 운영 데이터로 적용이 될 것으로 판단된다.

2. 통신해양기상위성의 위성거리 측정

2.1 위성 거리 측정 및 전송

위성 거리 측정 신호는 위성까지 전송되어 위성으로부터 되돌아오는 전송 신호 형태를 갖는다. 상향 링크에는 거리 측정 신호이외에 원격 명령 신호가 포함될 수 있으며, 위성으로부터 전송되는 하향 링크 신호에도 원격 측정 신호가 포함되어 전송될 수 있다(김영완 2000).

위성 거리 측정 신호는 major 톤과 minor 톤 신호들로 구성되어 있으며 이들 신호들이 순차적으로 동시에 위성으로 전송되어 거리 측정에 따른 거리 모호성을 해결한다. 그림 1은 100kHz Major 톤 신호를 사용하는 GSTDN 방식의 거리 측정 톤 측정 방법을 보여준다. 100kHz major 톤 신호는



- ① 거리측정 시작
 - ② 제 1 minor 톤 신호 전송
 - ③ 위상 동기화 시간
 - ④ 제 2 minor 톤 신호 전송
 - ⑤ 위상 동기화 시간
 - ⑥ 최종 minor 톤 전송
 - ⑦ 위상 동기화 시간
 - ⑧ 거리 데이터 측정 시작
 - ⑨ 거리 측정 종료
- (IT : minor 톤의 correlation을 위한 integration time)

그림 2. 위성 거리 측정 신호의 전송.

표 1. COMS 위성 거리 측정 신호 전송방식.

| 항목 | 상향링크 | 하향링크 |
|-------------------|------------------|---------------------|
| 변조방식 | Phase Modulation | Phase Modulation |
| 변조지수(major only) | 1.4rad ± 5% | 0.45 rad +10%, -15% |
| 변조지수(major+minor) | 0.75rad ± 5% | 0.32 rad +10%, -15% |

20kHz minor 톤 신호와 동시에 전송되며, 20kHz minor 톤 신호 전송 후 제 2의 minor 톤 신호인 4kHz 신호가 100kHz major 톤 신호와 같이 전송된다. 또한 4kHz 톤 보다 낮은 minor 톤 신호들은 4kHz 부 반송파에 변조되어 전송된다(김영완 2000).

위성으로 전송된 거리 측정 톤 신호는 지상국으로 회귀(turn-around)되며 전송된 톤 신호의 위상과 회귀된 톤 신호의 위상차를 비교 측정한다. 100kHz 톤 신호의 정확도를 유지하기 위하여 회귀된 minor 톤은 major 톤 신호인 100kHz 신호에 위상동기 된 모사(replica) 거리 측정신호를 발생한다.

그림 2는 위성 거리 측정 톤 신호의 위성 전송 방식을 보여준다. 지상국에서 전송한 거리 측정 톤 신호가 위성으로부터 회귀되어 지상국 거리 측정시스템에 의해 동기 될 수 있는 시간동안 거리 측정 시점에 major 톤 신호가 전송된다. Major 톤 신호 전송이 끝나고 첫 번째 minor 톤 신호와 major 톤 신호가 동시에 전송되며, 거리 측정 장비의 디지털 PLL(Phase Locked-Loop)에서는 전송되어 회귀된 minor 톤 신호에 위상동기 된 모사 톤 신호를 IT(integration time) 동안 발생시킨다. 순차적으로 6개의 minor 톤 신호가 위성으로 전송되고, 지상국으로 회귀된 톤 신호들과 위상동기 된 모사 minor 톤 신호들을 발생시켜 순차적으로 거리 측정의 거리 모호성(n)을 해결한다.

마지막 6번째 minor 톤 신호 전송 및 IT이 지난 후, 디지털 PLL의 안정화 및 major 톤 신호의 위상 동기 유지를 위하여 major 톤 신호를 전송한다. 그림 2에서 7번 과정이 지나면 거리 측정의 거리 모호성 변수(n)와 major 톤 신호의 위상차를 측정하여 식 (1)을 이용하여 측정된 위성 거리(R_{mea})를 구할 수 있다(Cortex 2003).

$$R_{mea} = \left(\frac{\theta_{major\ tone}}{360} + n \right) \times \frac{c}{f_{major}} \quad (m) \quad (1)$$

여기서, C 는 광속 (3×10^8 m/s)이며, f_{major} 는 major 톤 신호의 주파수이다. 또한 $\theta_{majortone}$ 는 major 톤 신호의 기준 위상 값과 측정 위상 값의 차이이다. 통신해양기상위성의 거리 측정 신호는 표 1과 같이 톤 방식을 사용한다(이성팔 외 2004).

전송 거리 신호 간에 일정한 관계를 유지하기 위하여 식 (2)와 같은 일정한 비율을 갖는 주파수 성분들로 구성되는 신호를 사용하여 신호 상호간에 위상 동기를 유지하게 된다.

$$s(t) = \sum_{n=0}^N a_n \cos \omega_n t, \quad \omega_{(n+1)}/\omega_n = M (> 1) \quad (2)$$

여기서, N 은 거리 측정에 사용되는 톤 신호의 개수이며, ω_n 은 N 번째 톤의 각속도를 나타낸 것이다. 또한 M 은 거리 측정 신호 주파수 비율이다. 식 (2)의 관계에 따른 major 톤과 minor 톤을 선정하여 앞서 보인 그림 2와 같이 순차적으로 위성으로 전송된다.

2.2 위성 거리 측정의 모호성

그림 3은 위성으로부터 되돌아온 위성 거리 톤 신호의 major 톤 신호 및 minor 톤 신호들의 관계를 보여준다.

$M = 2$ 이고 N 개의 톤 신호를 사용한다고 하면, 가장 높은 주파수를 갖는 톤 신호($\omega_N = 2^{(N-1)} \omega_1$)의 수신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_N(t) = \sqrt{2}K_1 \cos[\omega_N(t - \tau_s) - \phi_N] \quad (3)$$

여기서, K_1 은 신호 크기에 대한 상수이고, ϕ_N 은 루프의 위상 에러로써 그림 3과 같이 최대값과의 오차를 나타내며, 측정 시간($0, \tau_s$) 동안 그림에 화살표로 표시한 것과 같이 $2^{(N-1)}$ 개의 양의 최대값(positive peak)이 발생된다.

$$t_N = \frac{\omega_N \tau_s + \phi_N + 2k\pi}{\omega_N} = \frac{2m_N \pi + \Theta_N}{\omega_N}, \quad m_N = 0, 1, 2, \dots, 2^{(N-1)} - 1 \quad (4)$$

여기서, Θ_N 은 위상 측정기의 측정 위상 값이며, minor 톤 신호들에 의해 위상 거리 측정의 모호성이 해결되면 식 (4)에서 정확한 m_N 값이 결정되어 위성 거리를 계산할 수 있다.

그림 3으로부터 $N - 1$ 번째 톤 신호인 minor 톤 신호로부터 major 톤 신호의 거리 측정 모호성 M 을 줄이기 위하여 $N - 1$ 번째 minor 톤의 위상을 측정한다. $N - 1$ 번째 minor 톤 신호의 양의 최대값은 식 (5)의 시각에서 발생한다.

$$t_{N-1} = \frac{\omega_N - 1\tau_s + \phi_{N-1} + 2k\pi}{\omega_{N-1}} = \frac{2m_{N-1} \pi + \Theta_{N-1}}{\omega_{N-1}}, \quad m_{N-1} = 0, 1, 2, \dots, 2^{(N-2)} - 1 \quad (5)$$

$N - 1$ 번째 minor 톤의 양의 최대값은 major 톤과의 관계에서 식 (6)과 같은 boundary decision 값을 갖는다.

$$t_{\pm} = \frac{\omega_N \tau_s + \phi_N + (2k \pm 1)\pi}{\omega_N} \quad (6)$$

따라서 ϕ_{N-1} 과 ϕ_N 의 관계에서 즉, 식 (6)으로부터 다음 관계를 만족하면, $N - 1$ 번째 minor 톤에 의한 M 개의 모호성을 줄일 수 있다.

$$\tau_s + \frac{\phi_N}{\omega_N} - \frac{\pi}{\omega_N} < \tau_s + \frac{\phi}{\omega_{N-1}} < \tau_s + \frac{\phi_N}{\omega_N} + \frac{\pi}{\omega_N} \quad (7)$$

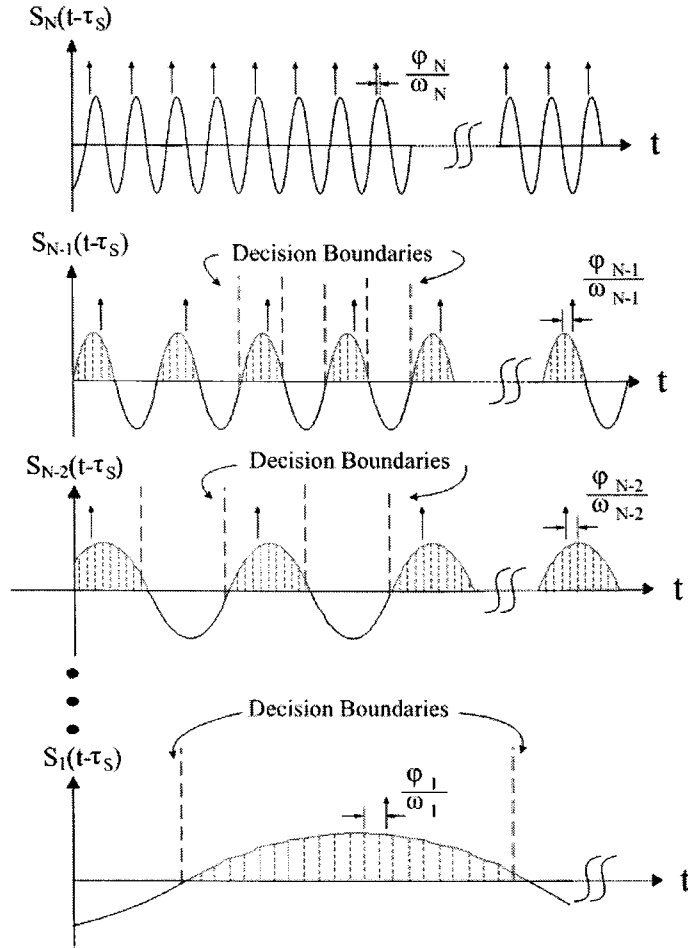


그림 3. 톤 방식의 위성 거리 측정 모호성.

식 (7)을 다시 표현하면,

$$\left| \frac{\phi_{N-1}}{\omega_{N-1}} - \frac{\phi_N}{\omega_N} \right| < \frac{\pi}{\omega_N} \quad (8)$$

$N - 2$ 번째 minor 톤 신호와 major 톤 신호와의 관계 또한 $N - 1$ 번째 minor 톤과의 관계로부터 식 (9)와 같은 관계를 만족할 경우, M 개의 거리의 모호성을 해결할 수 있음을 알 수 있다.

$$\left| \frac{\phi_{N-2}}{\omega_{N-2}} - \frac{\phi_N}{\omega_N} \right| < \frac{2\pi}{\omega_N} \quad (9)$$

따라서 식 (8)과 식 (9)로부터 위성 거리 측정의 모호성을 해결하기 위하여 major 톤과 minor 톤 신호들 사이의 일반적인 관계식을 표현할 수 있다.

$$\left| \frac{\phi_{n-1}}{\omega_{n-1}} - \frac{\phi_N}{\omega_N} \right| < \frac{\pi M^{(N-n)}}{\omega_N}, \quad n = 2, 3, \dots, N \quad (10)$$

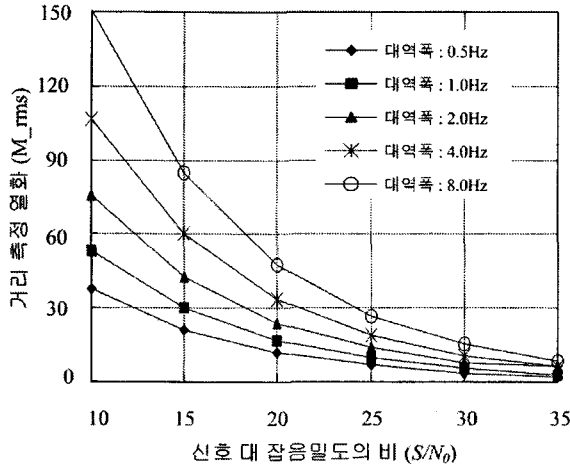


그림 4. 본 신호의 신호 대 잡음밀도 비에 따른 위성거리 측정 열화.

$\tau_n \equiv \frac{\phi_n}{\omega_n}$ 정의에 의해, 식 (10)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 |\tau_{n-1} - \tau_n| &< \frac{\pi M^{(N-n)}}{\omega_N}, \quad n = 2, 3, \dots, N, \\
 \left| M\phi_{n-1} - \frac{\phi_N}{M^{N-n}} \right| &< \pi
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

여기서, 랜덤 변수(random variable) ϕ_n 이 Gaussian 분포를 가지고 통계적으로 독립적이라면, $n-1$ 번째 톤 신호로부터 M 의 거리 모호성을 해결할 수 없는 가능성은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 P_E(n-1) &= P_{rob} \left\{ \left| M\phi_{n-1} - \frac{\phi_N}{M^{N-n}} \right| \geq \pi \right\} = 1 - erf \left[\frac{\pi}{\sqrt{2}\sigma_{n-1}} \right] \\
 \sigma_{n-1} &= \sqrt{\frac{M^2}{\rho_{n-1}} + \frac{1}{M^{2(N-n)}\rho_N}}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

여기서, $erf(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2)dt$ 이며, ρ_n 은 루프에서의 n 번째 톤 신호의 신호 대 잡음비이다. 또한, M 은 거리 측정 신호 주파수 비율이며, N 은 거리 측정 신호의 개수이다.

수신되는 위성 거리 측정 톤 신호는 각 PLL 회로에 의해 위상 동기 되어 위상값을 검출한다. 따라서 위성 거리 측정은 PLL의 선형 성분에서 동작하며 PLL의 위상 에러(ϕ_n)성분에 의해 측정의 오차가 발생할 수 있다. n 번째 톤 신호에 대한 위상 에러의 분산(variance)은 다음과 같다(Best 1993).

$$\sigma_{\phi_n}^2 = \frac{1}{\rho_n}, \quad \rho_n = \frac{2S_{tn}}{N_0W_{Ln}}
 \tag{13}$$

여기서, S_{tn}/N_0 은 $n = 1, 2, \dots, N$ 에서의 루프 잡음 대역폭 W_{Ln} 에서의 신호 대 잡음비이다. 따라서 거리 측정 에러의 분산은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_d^2 = \left(\frac{c}{2} \right)^2 \frac{1}{\omega_N^2 \rho_N} = \frac{cd_{max}}{16\pi^2(S_{tN}/N_0)} \left[\frac{M^2}{M^2N} \right] \frac{2\pi W_{LN}}{\omega_1}
 \tag{14}$$

표 2. COMS 위성의 거리 측정 요구 성능.

| 궤도 상태 | | Transfer | On station |
|------------------|-------|----------|------------|
| 거리 모호성 해결 (S/No) | Major | 25 | 25 |
| | Minor | 20 | 20 |
| 거리 측정의 정확도 | | 13.3m | 10m |

표 3. COMS 위성의 위성 거리 측정 모호성 발생 가능성(Major 톤의 S/No=25dB, Minor 톤의 S/No=20dB일 때).

| 대역폭(Hz) | 모호성 발생 확률 |
|---------|------------------------|
| 0.5 | 0 |
| 1.0 | 0 |
| 2.0 | 3.35×10^{-10} |
| 4.0 | 8.92×10^{-6} |
| 8.0 | 1.685×10^{-3} |

3. 위성 거리 성능 분석

위성 거리 측정의 모호성의 결과에 따라 위성 거리 측정의 정확성 및 모호성 해결을 위한 톤 신호의 요구되는 신호 대 잡음밀도 비를 분석한다. 그림 4는 major 톤 신호의 신호 대 잡음밀도 비와 톤 신호를 위한 잡음 대역폭에 대한 거리 측정 열화를 보여준다. 위성 거리 측정의 분산은 톤 신호의 신호 대 잡음밀도 비에 반비례하고, major 톤 신호의 주파수에 반비례한다. 따라서 그림 4와 같이 톤 신호의 신호 대 잡음밀도 비에 의해 거리 측정의 정확도를 구할 수 있다.

그림 4로부터 거리 측정의 정확도를 위해서는 톤 신호의 잡음 대역폭이 작아야하므로 정지 궤도 인 통신해양기상위성에서는 낮은 잡음 대역폭을 갖는 거리 측정 회로를 구성하여야 한다.

표 2는 통신해양기상위성의 거리 측정에 대한 요구 성능이다(이성팔 외 2004). 표 2와 같은 통신해양기상위성의 위성 거리 측정의 요구 성능을 만족하기 위해서는 그림 4로부터 25dB S/No에서 1Hz 이하의 대역폭에서 운용하여야 함을 알 수 있다. 또한, 천이 단계에서는 도플러 영향을 고려하여야 하므로 약 2Hz 이하의 대역폭에서 운용되어 요구하는 위성 거리 측정의 성능을 만족하도록 한다. 또한, 위성 거리 측정의 모호성을 해결하기 위한 major 톤 신호 및 minor 톤 신호의 요구 S/No값에서 거리 측정 모호성이 발생할 확률은 표 3과 같다.

표 3에 의하면, 운용궤도에서 1Hz 이하로 운용할 경우, 거리 측정의 모호성이 발생할 확률은 거의 zero(0) 상태이며, 천이상태에서 약 2Hz 이하로 운영할 경우에는 약 3.35×10^{-10} 의 확률이므로 거리 측정의 모호성 발생은 무시할 수 있다. 그러나 major 톤 신호 및 minor 톤 신호의 요구되는 신호 대 잡음밀도 비를 만족하더라도 톤 신호를 위한 대역폭이 8Hz 이상일 경우에는 표와 같이 거리 측정의 모호성이 발생할 가능성이 높아짐을 알 수 있다.

그림 5는 톤 신호들의 대역폭에 따른 거리 측정의 모호성 발생 가능성의 의존성을 보여주고 있다. 그림에 나타난 것처럼 대역폭이 증가함에 따라 톤 신호의 신호 대 잡음비(S/N)가 증가하기 때문에 동일한 S/No값에 대해 톤 신호의 대역폭에 따라 거리 측정의 모호성 발생 가능성이 크게 변하는 것을 알 수 있다.

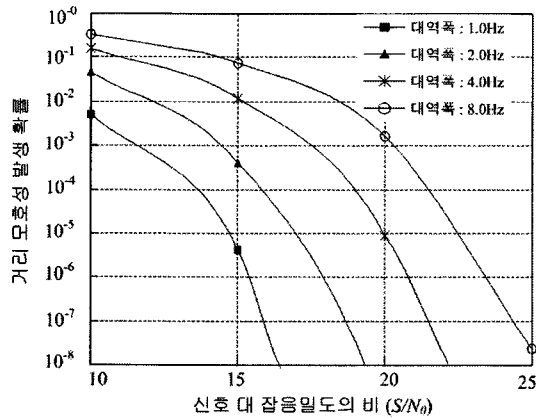


그림 5. 톤 신호의 대역폭에 따른 위성 거리 측정 모호성 발생 가능성.

4. 결 론

통신해양기상위성의 위성 거리 측정에서 발생하는 거리 측정의 모호성 해석과 위성 운영 환경에 대한 거리 측정 성능을 분석하였다. 위성 거리 측정의 모호성은 톤 신호의 주파수 비율이 낮을수록 즉, 사용하는 톤 신호 개수가 증가할수록 작게 발생하며, 톤 신호의 신호 대 잡음밀도 비가 증가할수록 작아진다. 통신해양기상위성의 거리 측정을 위해 요구되는 성능을 만족하기 위해서는 천이궤도에서는 2Hz의 톤 신호의 잡음 대역폭으로 그리고 운용궤도에서는 1Hz 이하의 잡음 대역폭으로 운용하여야 함을 알 수 있었다.

참고문헌

김영완 2000, 한국항공우주학회지, 28, 97
 이병선, 이정숙, 김윤기, 은중원 1998, 한국항공우주학회지, 26, 99
 이성팔, 최경수, 신천식 2004, 한국통신학회 추계학술발표회 논문집 (대전: 한국통신학회), p.276
 장대익, 김영완, 오덕길, 이호진 2004, 한국통신학회 추계학술발표회 논문집 (대전: 한국통신학회), p.284
 Best, R. E. 1993, Phase-Locked Loop: Theory, Design, and Applications (NY: McGraw-Hill), pp.182-195
 Cortex 2003, IN-SNEC CRT-XL user's manual, DTU-100042
 Yen, L. 2000, in 2000 Antennas and Propagation Society International Symposium (Utah: IEEE), p.530