

# PCM/PSK/PM 방식을 사용하는 정지궤도 위성의 슈퍼 천이 궤도에서 S-Band TC & R 통신 링크 성능 분석

## TC & R Communication Link Performance Analysis of Geostationary Satellite Employing PCM/PSK/PM on Super Synchronous Transfer Orbit

이 선 익 · 염 경 환\*

Sun-Ik Lee · Kyung-Whan Yeom\*

### 요 약

PCM/PSK/PM 변조 방식은 위성과 지상국간 원격명령과 원격측정 및 거리측정(레이징)을 위하여 S-band 주파수 대역에서 널리 사용되어 왔다. 본 논문에서는 정지궤도 위성 발사에 활용되고 있는 슈퍼 천이 궤도에서 PCM/PSK/PM 방식을 적용하는 정지궤도 위성과 지상국간 TC & R(Telemetry, Command and Ranging) 링크 성능이 확보되는지를 연구하였다. 위성의 제원은 Heritage를 고려하여 기존 정지궤도 위성에서 운용되는 제원으로 설정하였다. 이 결과, 상향 링크에서는 EIRP가 65 dBW이면 3 dB 이상의 여유 마진이 확보되는 것을 확인하였다. 하향 링크에서는 원격측정과 레이징 변조 지수를 조정함으로써 요구 마진(3 dB)을 얻을 수 있었고, 이에 상응하는 지상국 최소 G/T 성능을 찾아볼 수 있었다. 원지점 고도가 65,000 km와 70,000 km인 슈퍼 천이 궤도를 이용한 정지 궤도 진입이 추진될 경우에는 천리안 위성을 발사할 때 초기에 이미 운용되었던 지상국의 활용이 가능한 것으로 분석된다.

### Abstract

The classical PCM/PSK/PM scheme has been commonly used for TC & R applications between satellites and ground stations in the S-band. We analyzed TC & R link performance between ground station and the geostationary satellite which employs PCM/PSK/PM, when the satellite are particularly on the Super Synchronous Transfer Orbit(SSTO). The satellite parameters on SSTO are assumed to be those operating on the geostationary orbit, considering heritage aspect. In the uplink, the results shown indicate that sufficient margins over 3 dB are obtained when the EIRP of ground station is greater than 65 dBW. The down link performance is of great interest. By adjusting the telemetry modulation index and ranging modulation index, we could obtain the required margin of 3.0 dB in the down link, and find out the minimum G/T of ground station. In conclusion, the previously operated ground stations during LEOP at COMS launch, can be operational when GEO injection is made using SSTO(65,000 km and 70,000 km).

Key words: PCM/PSK/PM, TC & R, Geostationary Satellite, Modulation Loss, SSTO, Link Budget

## I. 서 론

적도 상공으로부터 약 35,786 km 떨어진 지구 정지궤도

「이 연구는 정지궤도복합위성 개발사업의 일환으로 연구되었음.」

한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

\*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received August 25, 2014 ; Revised October 8, 2014 ; Accepted October 8, 2014. (ID No. 20140825-062)

· Corresponding Author: Kyung-Whan Yeom (e-mail: khyeom@cnu.ac.kr)

(GEO: Geostationary Earth Orbit)에 위성을 진입시키는데 주로 지구 천이 궤도(GTO: Geostationary Transfer Orbit) 또는 슈퍼 천이 궤도(SSTO: Super Synchronous Transfer Orbit)를 이용하고 있다. 특히 SSTO에서 위성은 지구 정지궤도 너머 약 1.8~2.5배 만큼 먼 거리까지 도달했다가 궤도 조정을 통해 목표 궤도로 들어가 자리를 잡는다. SSTO를 이용하면 GTO에 비해 연료를 다소 절약할 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있고, 주로 러시아의 Proton M, 미국의 Falcon 9와 Atlas V, Delta V 발사체에서 SSTO를 이용하고 있다. 현재까지 우리나라가 발사한 정지궤도 위성들은 모두 GTO를 이용하였지만, 앞으로 SSTO를 통하여 발사될 가능성도 있다. 본 논문에서는 S-band 주파수를 사용하는 정지궤도 위성이 SSTO에서 PCM/PSK/PM 방식으로 통신하는 상황을 가정할 때, 지상국과 TC & R(Telemetry, Command and Ranging) 링크 마진이 확보되는지를 알아본다. 참고문헌 [1]에서는 원격측정(Telemetry, TM)과 원격명령(Command, TC)에 대한 링크 분석이 다루어졌으나, 변조 손실(Modulation Index: MI)과 거리 측정(레인지, Ranging: RG)에 관한 내용이 부족하기에 본 논문에서 이를 포함하여 자세히 다루어 보고자 한다. 이 분야에 대한 국내 연구 결과로는 정지궤도 위성의 관제 신호 전송 방식에 관한 최적화 연구<sup>[2]</sup>가 있다.

S-band 주파수는 1980년대 초부터 TC & R 용도로 사용되어 왔다. 이 주파수를 사용하는 지상국은 광범위하게 잘 구축되어 있으므로 이 주파수를 사용하면 발사 초기 운용단계(Launch Early Operation Phase: LEOP) 및 정상 임무 시 위성 관제에 문제가 발생하였을 때 타 지역의 지상국을 활용할 수 있다<sup>[3]</sup>. 향후 SSTO를 이용한 국내 위성의 발사가 추진될 경우, 발사 초기 운용에 필요한 해외 지상국의 검토 및 확보가 필수적이다.

TC & R 용도로 PCM/PSK/PM과 PCM/PM/Bi-phase 방식이 널리 사용되어 왔다. PCM/PSK/PM은 주로 데이터율이 60 Ksps 미만일 때, PCM/PM/Bi-phase은 수백 Ksps의 데이터 전송에 적합하다. PCM/PM/Bi-phase는 PCM 코드로서 맨체스터 코드를 사용하는데 SPL/PM이라고도 불린다<sup>[3]</sup>. 일반적으로 데이터율이 100 Ksps~2 Msps와 같이 높을 때는 BPSK 또는 QPSK 변조 방식이 사용된다. 본 논문에서는 원격측정과 원격명령에 대한 데이터율이 10 kbps보다 작게 요구되는 상황을 설정하였으므로, 이에 적합한 PCM/PSK/PM 방식을 적용한다. PCM/PSK/PM과 SPL/PM

은 잔류 반송파(Residual carrier) 변조 방식인 반면, BPSK 또는 QPSK 방식은 억압 반송파(suppressed carrier) 변조 방식이다<sup>[4]</sup>. 잔류 반송파 방식은 위성 또는 지구국에서 반송파로부터 데이터를 복조해 내는데 안정적인 기준 주파수를 제공하므로 위상 잠금 루프(PLL: Phase Locked Loop)를 적용하는 시스템에 사용된다<sup>[5]</sup>. 본 논문에서도 위성과 지상국 모두 PLL이 적용된 시스템을 다룬다.

PCM/PSK/PM에서는 데이터를 부반송파에 위상 천이 변조시킨 후에 반송파의 위상을 변조하기 때문에 신호 전송에 가용한 총 전력은 반송파와 부반송파 및 레인징 신호에 배분된다<sup>[6]~[10],[12]</sup>. 이 때 전체 송신 출력에 대한 각 채널에 배분되는 전력의 비를 변조 손실이라고 하며, 변조 손실은 링크 성능 분석에 중요한 파라미터이다. 따라서 2장에서 PCM/PSK/PM 방식에 대한 신호 이론에 대해 살펴보고, 변조 손실을 기술한다.

위성 TC & R 운용 모드는 위성마다 운용 개념에 따라 몇 가지 조합으로 구성되는데, PCM/PSK/PM은 원격측정과 레인징을 동시에 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 본 연구에서는 상향 링크에서는 원격측정과 레인징을 함께 하고, 하향 링크에서는 원격측정과 레인징을 동시에 하는 조합에 대하여 변조 손실을 기술하고, 이로부터 다양한 모드에 응용이 가능하므로 정지궤도 위성에서 운용하는 모드에 적용한다. PCM/PSK/PM에서는 부반송파로서 싸인파(Sine wave) 또는 스퀘어파(Square wave)가 이용될 수 있다<sup>[4],[8],[9],[11]</sup>. SSTO는 근지구(WARC ORB-88 회의에서 지구로부터 고도  $2 \times 10^6$  km를 경계로 이 보다 먼 거리를 심우주로, 안쪽을 근지구로 정함. CCSDS는 이 경계를 동의하고, 안쪽 영역을 Category A 임무지역으로, 바깥 영역을 Category B 임무지역으로 구분하여 사용함<sup>[8],[11]</sup>) 영역에 해당되므로 본 논문에서는 부반송파에는 싸인파를 적용하고, 레인징 신호 또한 싸인파를 적용한다. 3장에서는 링크 분석에 사용할 방정식을 간략히 기술하고, 4장에서는 시스템 모델과 Heritage를 고려한 통신 제원을 정의하고, 분석 결과를 제시한다. 또한, SSTO에서 기존 정지궤도 제원으로 산출한 링크 마진이 부족할 경우, 변조 지수를 조정하여 얻은 분석 결과를 제시한다.

## II. PCM/PSK/PM 신호 모델

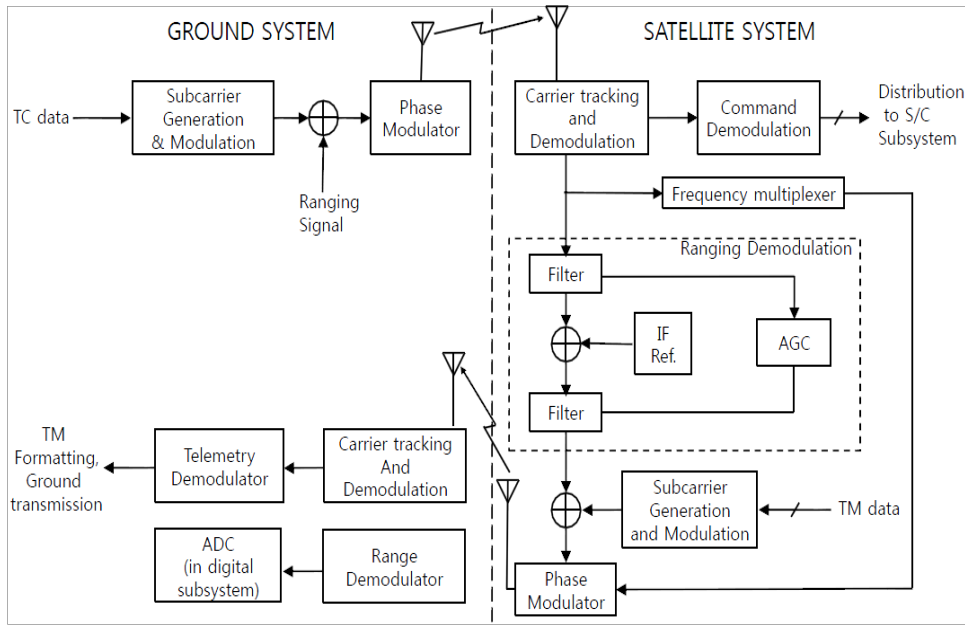


그림 1. 동시 원격명령-레이징과 원격측정-레이징 운용에 대한 블록 다이어그램<sup>[9]</sup>  
 Fig. 1. A block diagram for simultaneous command-ranging and telemetry-ranging operation<sup>[9]</sup>.

PCM/PSK/PM 방식을 사용하는 위성과 지상국 간에 동시에 원격명령과 레이징, 원격측정과 레이징하는 운용 개념에 대한 시스템 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 여기에 적용된 레이징 방식은 Turn-around 방식이다. 이 모델을 기반으로 상하향 링크에서 PCM/PSK/PM 신호의 표현과 변조 손실을 기술한다.

PCM/PSK/PM 방식을 통하여 데이터만 전송하는 경우에 신호를 아래와 같이 표현할 수 있다<sup>[7],[8]</sup>.

$$s(t) = \sqrt{2P_T} \sin(\omega_c t + md(t)P(t)) \quad (1)$$

여기서,  $P_T$ 는 총 전력이고,  $\omega_c$ ( $\omega_c$  이후 같음)는 반송파 각주파수,  $m$ 은 데이터 변조 지수,  $d(t)$ 는 NRZ 데이터 ( $\pm 1$ )이다. 여기서  $P(t)$ 는 각주파수가  $w_{sc}$ ( $w_{sc}$  이후 같음)인 부반송파로서 싸인파 또는 스퀘어파가 사용될 수 있고,  $P(t)$ 가 1이면 PCM/PM 방식이 된다. 식 (1)을 전개 하면

$$s(t) = \sqrt{2P_T} [\sin(\omega_c t)\cos(mP(t)) + d(t)\cos(\omega_c t)\sin(mP(t))] \quad (2)$$

와 같고,  $P(t)$ 가 싸인파형 부반송파일 때 위 신호의 전력

스펙트럼 밀도(PSD: Power Spectral Density)는 식 (3)과 같다.

$$s(f) = P_T [J_0^2(m)\delta(f - f_c) + \sum_{i=\text{짝수}}^{\infty} J_i^2(m)[\delta(f - f_c - if_{sc}) + \delta(f - f_c + if_{sc})] + \sum_{k=\text{홀수}}^{\infty} J_k^2(m)[S_D(f - f_c - kf_{sc}) + S_D(f - f_c + kf_{sc})]] \quad (3)$$

여기서,  $J_0(\cdot)$ 은 제1종 0차 베셀 함수이고,  $S_D(f)$ 는 NRZ 데이터의 PSD를 나타내며, 식 (4)와 같이 정의된다. 식 (3)에서, 첫 번째 항은 잔류 반송파의 스펙트럼 성분이고, 두 번째 항은 상호변조에 의한 손실 성분이며, 나머지 항은 데이터 성분을 나타낸다.

$$S_D(f) = \frac{1}{R_s} \frac{\sin^2(\pi f/R_s)}{(\pi f/R_s)^2} \quad (4)$$

여기서,  $R_s$ 는 데이터율(data rate)이다.

2-1 상향 링크 신호 모델과 변조 손실

식 (1)을 이용하여 상향 링크에서 원격명령 신호와 레인징 신호를 동시 전송한다고 할 때 수학적 표현은 식 (5)와 같이 기술할 수 있다<sup>9)</sup>.

$$S_1(t) = \sqrt{2P_{T1}} \sin[w_c t + m_c d_1(t) \sin(w_{sc} t) + m_{R1} R_1(t)] \quad (5)$$

여기서, 부반송파에는 싸인파를, 레인징 신호인  $R_1(t)$ 에는 싸인파 신호를 적용한다.  $P_{T1}$ 은 총 전력,  $m_c$ 는 원격명령 변조 지수,  $d_1(t)$ 은 원격명령 NRZ 데이터( $\pm 1$ ),  $m_{R1}$ 은 상향 링크 레인징 변조 지수이다.

식 (5)를 전개하면 반송파, 원격명령, 레인징 및 상호변조 성분으로 구분할 수 있다. 따라서 이로부터 반송파, 원격명령 데이터 및 레인징 신호에 대한 변조 손실을 식 (6a)~(6c)와 같이 나타낼 수 있다<sup>11)</sup>.

$$\frac{P_{C1}}{P_{T1}} = J_0^2(m_c) J_0^2(m_{R1}) \quad (6a)$$

$$\frac{P_{CD}}{P_{T1}} = 2J_1^2(m_c) J_0^2(m_{R1}) \quad (6b)$$

$$\frac{P_{R1}}{P_{T1}} = 2J_0^2(m_c) J_1^2(m_{R1}) \quad (6c)$$

여기서,  $J_1(\cdot)$ 은 제1종 1차 베셀 함수이다.

상향 링크에서 원격명령 데이터와 레인징 신호를 함께 송신하는 경우에는 식 (6a)~식 (6c)에  $m_c$ 와  $m_{R1}$ 을 대입하여 변조 손실을 계산한다. 그러나 레인징 신호만 전송하는 경우에는 식 (6a)~식 (6c)에서  $J_0(m_c)$ 값에는 1을 대입하고, 변조 손실을 계산한다. 왜냐하면  $m_c$ 값이 0이면  $J_0(m_c)$ 는 1이 되기 때문이다. 원격명령 데이터만 전송하는 경우에는  $J_0(m_{R1})$ 값을 1로 대입하여 변조 손실을 얻을 수 있다.

## 2-2 하향 링크 신호 모델과 변조 손실

동시에 원격측정과 레인징 기능을 하는 하향 링크 신호  $S_2(t)$ 는 다음과 같이 기술할 수 있다<sup>9),12)</sup>.

$$S_2(t) = \sqrt{2P_{T2}} \sin[w_c t$$

$$+ m_{TM} d_2(t) \sin(w_{sc} t) + m_{R2} R_2(t)] \quad (7)$$

여기서,  $P_{T2}$ 은 위성에서 송신된 총 전력이고,  $m_{TM}$ 는 원격측정 변조 지수(rad),  $d_2(t)$ 은 원격측정 NRZ 데이터( $\pm 1$ ),  $m_{R2}$ 은 하향 링크 레인징 변조 지수(rad),  $R_2(t)$ 는 하향 링크 레인징 신호이다.

Turn-around 레인징 방식에서는 그림 1에서와 같이 상향 링크 반송파를 복조, 필터링하고, 자동 이득 조절(AGC: Automatic Gain Control)을 통하여 기저 대역 신호를 증폭시킨 다음 이 신호를 하향 링크 반송파에 변조시킨다. 이 과정에서 상향 링크의 원격명령 신호는 레인징 필터를 통과한다. 이와 같이 상향 링크 원격명령 신호가 레인징 채널을 통과하여 하향 링크 반송파를 변조시키는 것을 'Command feedthrough'라고 한다<sup>13),14)</sup>. 열적 잡음 또한 레인징 채널을 통과한다. 따라서 AGC 출력에서의 하향 링크 레인징 신호를  $R_2(t)$ 라 할 때  $R_2(t)$ 는 식 (8)과 같이 기술할 수 있다<sup>9)</sup>.

$$R_2(t) = \underbrace{\tau_1' d_1(t) \sin(w_{sc} t)}_{\text{command feedthrough}} + \underbrace{\tau_2' \sin(w_R t)}_{\text{ranging}} + \tau_3' N_1' \quad (8)$$

$N_1'$ 는 평균이 0이고, 분산이  $\sigma^2$ 인 가우시안 백색 잡음으로 상향 링크 잡음이 트랜스폰더의 필터를 통과한 잡음(feed through noise)을 나타낸다.  $\tau_1'$ ,  $\tau_2'$ ,  $\tau_3'$ 은 각각 식 (9a)~(9c)와 같이 정의된다<sup>11)</sup>.

$$\tau_1' = \sqrt{\frac{\alpha_c}{\alpha_c + \alpha_r + 1}} \quad (9a)$$

$$\tau_2' = \sqrt{\frac{\alpha_r}{\alpha_c + \alpha_r + 1}} \quad (9b)$$

$$\tau_3' = \frac{1}{\sqrt{2(\alpha_c + \alpha_r + 1)}} \quad (9c)$$

$$\alpha_r = \frac{P_{R1}}{N_{01} B_R} \quad (9d)$$

$$\alpha_c = \left[ \frac{P_{CD}}{P_{R1}} \right] \alpha_r \quad (9e)$$

여기서,  $\alpha_r$ 은 트랜스폰더 필터 출력에서의 레인징 신호 전력 대 잡음 전력비,  $\alpha_c$ 는 트랜스폰더 레인징 필터 출력에서 Feed through된 원격명령 신호 전력 대 잡음 전력의 비,  $P_{CD}$ 와  $P_{R1}$ 은 각각 상향 링크 시 위성에서 수신된 원격명령 신호의 전력과 레인징 신호의 전력,  $N_{01}$ 은 상향 링크 전력 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density),  $B_R$ 은 트랜스폰더 레인징 채널 대역폭이다.

하향 링크에서 반송파, 원격측정 데이터 및 레인징 신호에 대한 변조 손실은 식 (10a)~(10c)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[9],[11]</sup>.

$$\frac{P_{C2}}{P_{T2}} = J_0^2(m_{TM})J_0^2(\tau_1)J_0^2(\tau_2)e^{-\tau_3^2} \quad (10a)$$

$$\frac{P_{TM}}{P_{T2}} = 2J_1^2(m_{TM})J_0^2(\tau_1)J_0^2(\tau_2)e^{-\tau_3^2} \quad (10b)$$

$$\frac{P_{R2}}{P_{T2}} = 2J_0^2(m_{TM})J_0^2(\tau_1)J_1^2(\tau_2)e^{-\tau_3^2} \quad (10c)$$

위 식에서,  $\tau_1$ 은 Command 신호가 트랜스폰더 레인징 필터를 통과하여 나타나는 변조 지수이고,  $\tau_2$ 는 실제 레인징 변조지수,  $\tau_3$ 는 잡음에 대한 변조지수를 나타내며, 식 (11a)~(11c)와 같은 관계가 있다.

$$\tau_1 = m_{R2}\tau_1' \quad (11a)$$

$$\tau_2 = m_{R2}\tau_2' \quad (11b)$$

$$\tau_3 = m_{R2}\tau_3' \quad (11c)$$

원격측정(텔레메트리) 변조 지수와 레인징 변조 지수의 기준값을 각각  $m_{TMn}$ ,  $m_{R2n}$ 이라고 하고, 이들의 변화량을  $\Delta m_{TM}$ ,  $\Delta m_{R2}$ 라고 하면, 원격측정 변조 지수와 레인징 변조 지수의 최대값과 최소값은 식 (12a)~(12d)와 같이 기술할 수 있다.

$$m_{TM}(\max) = m_{TMn} + \Delta m_{TM} \quad (12a)$$

$$m_{TM}(\min) = m_{TMn} - \Delta m_{TM} \quad (12b)$$

$$m_{R2}(\max) = m_{R2n} + \Delta m_{R2} \quad (12c)$$

$$m_{R2}(\min) = m_{R2n} - \Delta m_{R2} \quad (12d)$$

원격측정과 레인징 변조 지수의 변화에 따라 식 (10a)~(10c)를 최대값과 최소값을 갖는 형태로 표현할 수 있는데, 여기서는 변조 손실이 가장 큰 것이 관심사항이므로, 이를 식 (13a)~(13c)와 같이 기술할 수 있다.

$$\left(\frac{P_{C2}}{P_{T2}}\right)_{\min} = J_0^2(m_{TM}(\max))J_0^2(\tau_1(\max)) \times J_0^2(\tau_2(\max))e^{-\tau_3^2(\max)} \quad (13a)$$

$$\left(\frac{P_{TM}}{P_{T2}}\right)_{\min} = 2J_1^2(m_{TM}(\min))J_0^2(\tau_1(\max)) \times J_0^2(\tau_2(\max))e^{-\tau_3^2(\max)} \quad (13b)$$

$$\left(\frac{P_{R2}}{P_{T2}}\right)_{\min} = 2J_0^2(m_{TM}(\max))J_0^2(\tau_1(\max)) \times J_1^2(\tau_2(\min))e^{-\tau_3^2(\max)} \quad (13c)$$

한편, 본 연구에서는 실제 정지궤도 위성의 운용에 적용할 때는 상향 링크에서 레인징 신호만 전송하고, 하향 링크에서 원격측정 데이터와 레인징 신호를 함께 송신하는 운용모드를 주로 다룬다. 그러므로 이 운용모드에서는  $\tau_1$ 값은 0이 되므로  $J_0(\tau_1)$ 값에는 1을 대입하여 계산한다. 위 식에서 괄호안의 min, max는 해당 변조 지수의 최대, 최소를 의미한다.

### III. 링크 분석식

#### 3-1 전송 방정식

상향 링크와 하향 링크에서 수신기 출력단에서의  $C/N_0$  및 복조 후에  $C/N$  값은 Friis 전송 방정식<sup>[15]</sup>인 식 (14a)~(14b)를 기본으로 부가적인 손실들을 추가하여 얻는다.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (14a)$$

$$\frac{C}{N_0} = P_t G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \frac{G_r}{kT_s} \quad (14b)$$

여기서,  $R$ 은 지상국과 위성간의 거리,  $\lambda$ 는 파장이다. 상향 링크의 경우,  $P_t$ 는 지상국 증폭기 출력,  $G_t$ 는 지상국 송신 안테나 이득,  $G_r$ 은 위성 안테나 이득,  $T_s$ 는 위성

수신 시스템의 총 잡음온도를 나타낸다.

위성 트랜스폰더의 잡음지수( $F_{rcv}$ )가 주어질 때 수신단의 잡음온도( $T_{rcv}$ )는 아래 식으로 구한다<sup>[16]</sup>.  $T_0$ 은 트랜스폰더가 설치된 곳의 절대온도이다.

$$T_{rcv} = (F_{rcv} - 1)T_0 \quad (15)$$

트랜스폰더 수신기의 총 잡음온도는 안테나 잡음온도( $T_a$ ), RF 분배 유닛의 선로 손실( $L_{at}$ , dB)에 의한 잡음온도, 트랜스폰더 수신단의 잡음온도를 모두 합한 식 (16)과 같다<sup>[17]</sup>.

$$T_s = \left(10^{-\frac{L_{at}}{10}}\right)T_a + \left(1 - 10^{-\frac{L_{at}}{10}}\right)T_0 + T_{rcv} \quad (16)$$

편파 손실<sup>[18]</sup>은 식 (17)로부터 구한다.

$$L_p = \frac{1}{2} + \frac{4r_1r_2 + (1 - r_1^2)(1 + r_2^2)\cos(2\theta)}{2(1 + r_1^2)(1 + r_2^2)} \quad (17)$$

여기서,  $r_1$ ,  $r_2$ 는 각각 지상국과 위성 안테나의 축비를 나타내고,  $\theta$ 는 편파의 장축간 각도차를 의미한다.

### 3-2 레인징 오차

열적 잡음에 제한을 받는 레인징 오차(range error, 또는 range noise error)는 측정 오차(measurement error) 또는 레인지 정확도(range accuracy)라고도 하며,  $1\sigma$  조건(m, rms)일 때 아래 식으로 정의된다<sup>[19]</sup>. 식 (18)은 Major tone에 대한 레인지 오차를 계산할 때 적용된다.

$$R_e = \frac{C}{4\pi f_{major}} \sqrt{\frac{N_o B}{2S}} \quad (18)$$

여기서,  $C$ 는 빛의 속도,  $f_{major}$ 는 Major 톤의 주파수,  $S$ 는 레인지 신호 전력,  $N_o$ 는 잡음 전력 스펙트럼 밀도,  $B$ 는 Tracking loop (PLL) bandwidth이다.

## IV. TC & R 시스템 모델 및 링크 분석

### 4-1 TC & R 시스템 구성

TC & R을 위한 위성 통신 시스템은 그림 2와 같이 2대의 S-band 안테나, 2대의 S-band 트랜스폰더, RF 분배

유닛으로 구성된다. RF 분배 유닛은 트랜스폰더와 안테나 간에 3 dB-하이브리드 커플러와 안테나까지의 전송선로(동축케이블)를 말한다.

S-band 안테나는 위성의 자세가 바뀌더라도 지상국과 통신이 가능하도록 빔 커버리지가 넓은(hemispherical coverage) 안테나를 천정과 천저방향에 설치하여 운용한다. 한 쪽의 안테나는 좌선회 편파(LHCP), 다른 쪽의 안테나는 우선회 편파(RHCP) 신호를 송수신할 수 있도록 구성한다. 위성 구조와 탑재물의 영향이 고려된 두 S-band 안테나 패턴의 합성 이득이  $4\pi$  steradians 범위에서 99%를 커버하는 최소 이득을 사용한다. 여기서는 상·하향 링크 모두 합성이득으로 -5.0 dBi를 적용한다.

S-band 트랜스폰더는 이중화 구조를 가진다. 트랜스폰더 내부에는 다이플렉서, PM 수신기, PM 송신기로 구성된다. 반송파의 추적 및 복원을 위하여 PLL 회로가 이용되고, Coherent 방식(추적된 반송파 주파수를 송신기에서 사용하도록 하는 coherent carrier transfer)이 되도록 수신기와 송신기의 주파수 비율은 기존 정지궤도에서 사용하는 비율(240/221)이 적용된다. 송·수신기는 톤 레인징 기능을 포함한다. 수신기는 LNA, 필터, 믹서, AGC, PLL 회로, ADC, DAC 및 복조기 등으로 구성되어 원격명령 신호 또는 레인징 신호를 복조한다. PM 송신기는 원격측정 데이터와 레인징 신호를 변조하고 증폭한 후 송신한다. SSTO에서 발사 초기 운용 시 S-band 트랜스폰더의 증폭기 출력은 5.6 W로 한다. 이 값은 정지궤도에서 정상임무 수행 시와 큰 차이가 없다. 트랜스폰더 수신기의 성능을 나타내는 잡음지수(noise figure)는 최신 기술의 발전 추세를 고려하여 4.5 dB로 정한다.

지상국의 경우, SSTO에서 위성과 교신하기 위해서는 국내 또는 세계 여러 곳에 구축되어 있는 S-band TC & R 지상국을 대상으로 한다. 2010년 6월 국내 정지궤도 위성을 발사할 때 GTO LEOP 운용에는 이탈리아의 Fucino( $\phi$  11 m antenna), 칠레의 Santiago( $\phi$  9 m), 호주 Dongara( $\phi$  13 m) 지상국이 활용되었다. 이 지상국들의 수신 G/T 성능은 23.5~24.5 dBi/K급이며, 송신 출력 EIRP는 65 dBW 이상이다. SSTO LEOP 운용을 위해서는 이들 지상국 및 그 이상의 성능을 가진 지상국, 예를 들어 유럽우주국(ESA) 또는 미국 NASA에서 운용 중인 지상국 네트워크 중에서

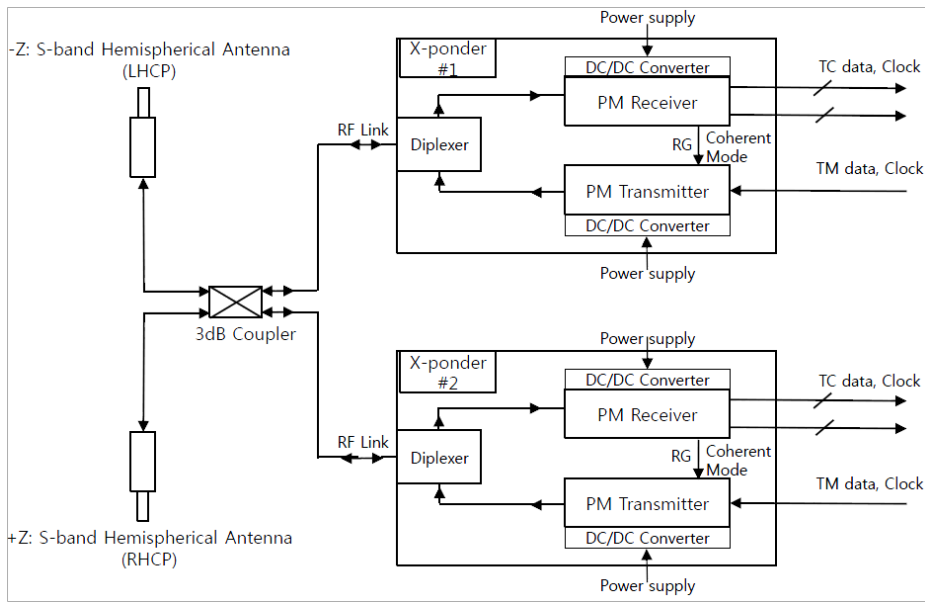


그림 2. 위성 TC & R RF 시스템 개념도  
 Fig. 2. Satellite TC & R RF system conceptual block diagram.

성능과 인터페이스가 호환되는 지상국을 고려한다.

4-2 지상국과 SSTO간 거리

러시아의 프로톤 발사체는 원지점이 65,000 km인 SS-TO를 이용하고, 미국의 팔콘 발사체는 80,000 km~90,000 km인 SSTO를 이용하고 있다. 팔콘 발사체에서 사용하는 천이 궤도는 궤도면이 적도면과 평행하지만, 프로톤 발사체에서의 천이 궤도면은 특정한 궤도 경사각을 갖는 특징이 있다. SSTO의 근지점 고도를 키우고, 원지점 고도를 낮추는 궤도조정을 통하여 위성은 GEO에 진입한다. 따라서, 지상국에서 SSTO 상에 있는 위성까지의 거리 범위는 매우 넓다. 이러한 점을 고려하여 위성과 지상국간 거리의 구분은 SSTO 원지점 고도를 기준으로 40,000 km~90,000 km로 설정한다.

4-3 전송 특성

정지궤도 위성의 S-band TC & R용으로 사용되는 상·하향 링크 주파수 대역, PCM/PSK/PM 변조 파라미터, 채널 코딩 및 디코딩, 목표 BER을 표 1에 정의하였다<sup>[2],[11],[22]</sup>. 상향 링크 원격명령 데이터율은 2 kbps를 적용하고, 8 kHz

표 1. 정지궤도 위성의 전송 특성

Table 1. Transmission characteristics for a GEO satellite.

Items	Uplink	Downlink	
Freq.	2,025 ~ 2,110 MHz	2,200 ~ 2,290 MHz	
Modulation	PCM/PSK/PM	PCM/PSK/PM	
MI(nominal)	1.4 rad for TC	1.0~1.4 rad for TM	
MI variation	±5 %	±10 %	
Subcarrier type	sine wave	sine wave	
Subcarrier freq.	8 kHz	65.536 kHz	
Data rate	2 kbps(TC)	4.1 kbps(TM)	
RG	Modulation	PM	PM
	Tone freq.	major: 100 kHz, minor: 16~20 kHz	
	MI(nominal)	1.4(0.7, 0.7) rad	0.45(0.32, 0.32) ~ 0.7(0.5, 0.5) rad
	MI variation	±5 %	+10 %, -15 %
Channel coding	BCH	Convolution coding( $r=1/2, k=7$ )	
Channel encoding	Error detection	Viterbi(soft)	
BER	$10^{-6}$		

의 부반송파를 사용한다. 원격측정 데이터율은 4.1 kbps

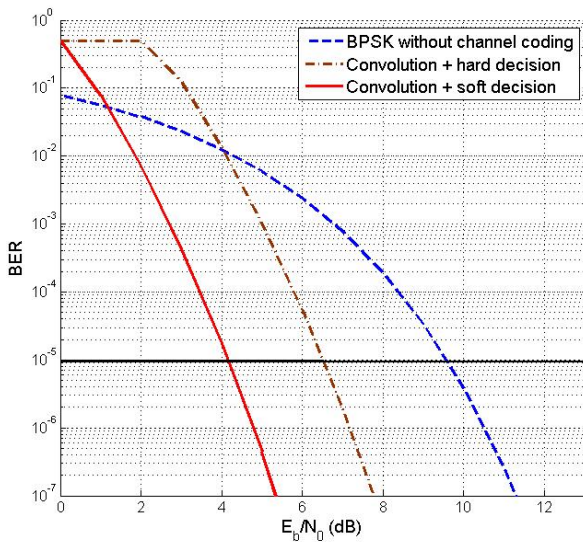


그림 3. 컨벌루션 코딩의 이론적인 BER 특성  
Fig. 3. Theoretical BER curve of convolution coding.

로 하고, 채널 코딩은 Convolution 코딩을 사용하며, 지상국에서는 Viterbi 알고리즘으로 복호한다. Convolution 코딩을 사용하면 코딩을 사용하지 않을 때에 비해 예를 들어 BPSK에 비해 BER을  $10^{-5}$ 로 기준할 때 4~6 dB의 코딩 이득(coding gain)을 기대할 수 있다. 복호기에서 비트 판정과 함께 판정에 대한 신뢰도 정보도 같이 채널 복호기에 제공하는 연판정(soft decision) 기법을 적용한다. 연판정 복호를 수행하면 경판정(hard decision)에 비해 약 2.7 dB의 이득이 확보되는 것으로 알려졌다. 그림 3에서와 같이 시뮬레이션(Matlab)으로 코딩 이득이 확인된다.

위성에서 지구로의 하향 링크에서 레인징을 위한 변조 지수는  $0.2 \sim 0.7$  rad(peak) 범위<sup>[20]</sup>를 참고한다.  $0.5 \sim 0.7$  rad 범위의 값이 하향 링크에서 레인지용으로 많이 사용되며,  $0.45$  rad 값도 운용할 수 있다<sup>[21]</sup>. 따라서, 하향 링크용 레인징 변조 지수는  $0.45 \sim 0.70$  rad 범위의 값을 적용한다. Major tone만 사용할 때의 변조 지수를  $\theta_M$ , Major tone과 Minor tone을 함께 전송할 때의 변조 지수를  $(\theta_m, \theta_n)$ 이라 할 때 이러한 RG 변조 지수의 조합을  $\theta_M(\theta_m, \theta_n)$ 로 나타내었다.  $\theta_M$ 이 주어졌을 때  $\theta_M^2 = \theta_m^2 + \theta_n^2$ 의 관계를 이용하여  $(\theta_m, \theta_n)$ 를 정할 수 있다<sup>[21]</sup>.

링크 분석에 사용할 제원을 표 2에 나타내었다. 여기서

표 2. 상·하향 링크 파라미터

Table 2. Uplink & downlink parameters.

Parameters	Units	Values
G/S Tx. EIRP	dBW	65.0
Pointing loss	dB	-0.2
Atmospheric loss	dB	-0.6
Polarization loss	dB	-2.1
S/C antenna composite gain	dBi	-5.0
S/C circuit loss(Rx. & Tx.)	dB	-5.4
Transponder Rx. Noise figure	dB	4.5
S/C Carrier recovery PLL loop BW	Hz	800
C/N)req for carrier tracking(uplink)	dB	10.0
TC $E_b/N_o$ required at BER $10^{-6}$	dB	10.5
Implementation loss(up & down)	dB	-1.0 ~ -2.5
S/C EIRP	dBW	-2.1
G/S G/T	dBi/K	24 ~ 26
G/S Carrier recovery PLL loop BW	Hz	300
G/S Ranging noise BW for SSTO	Hz	4.0
S/No required on major & minor	dBHz	20.0
TM $E_b/N_o$ required at BER $10^{-6}$	dB	4.9

포인팅 손실은 지상국에서 직경 11 m 이상의 파라볼릭 안테나 사용을 가정하고, S-band에서 좁은 빔폭과 높은 포인팅 정확도를 고려하여 -0.2 dB를 사용하였다. 편파 손실(polarization loss)은 고각 10°를 기준으로 측비를 위성과 지상국 각각 15 dB, 1 dB로 설정하였다. 대기 손실(atmospheric loss)은 경험적 또는 계산에 근거한 값을 적용하고 구형 손실은 -1.0 ~ -2.5 dB 범위에서 적용하였다.

참고로 본 연구에서는 한국항공우주연구원에서 자체 액셀러한 분석 툴(simulation tool)을 참고하고, 변조 손실 등 일부 내용을 업데이트하여 위성까지의 거리를 변화시키는 방법으로 링크 특성을 분석하였다. 또한, 변조 지수와 지상국 성능에 변화를 주는 방법으로 시뮬레이션하였다.

#### 4.4 링크 분석 결과

##### 4.4-1 상향 링크

원격 명령(TC only)만 하는 경우와 레인징(RG only)만



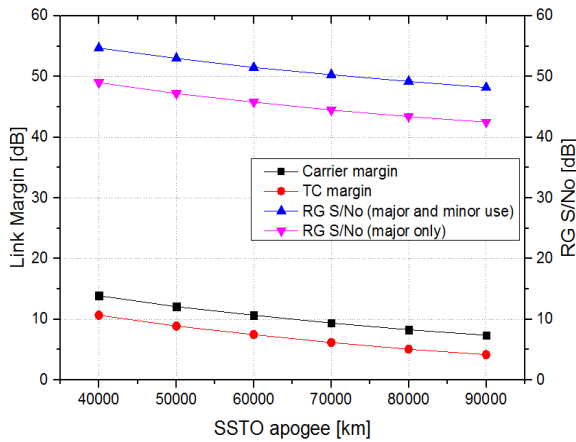
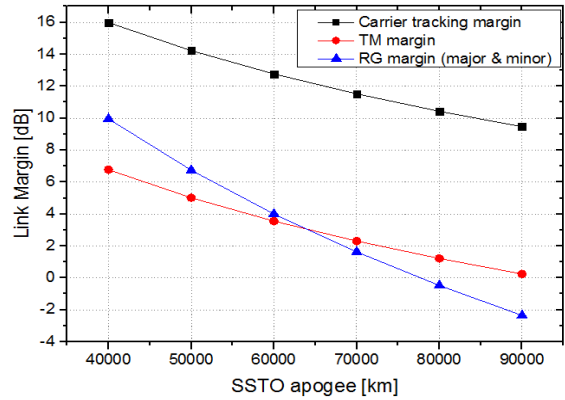


그림 4. TC와 carrier의 상향 링크 마진과 RG S/No  
Fig. 4. Uplink TC, carrier margins and range S/No.

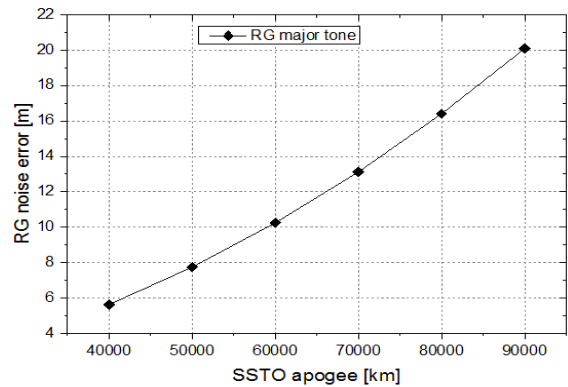
하는 경우에 대한 상향 링크의 링크 분석 결과를 그림 4에 나타내었다. TC 변조 지수는 1.4 rad, Major 톤만을 송신할 때 RG 변조 지수는 1.4 rad, major 톤과 minor 톤을 함께 송신할 때 변조 지수는 각각 0.7 rad, 0.7 rad, 위성의 수신 안테나 합성이득은  $-5$  dBi, 위성의 트랜스폰더의 잡음지수는 4.5 dB, 지상국 송신 EIRP는 65 dBW로 설정하였을 때의 결과이다. 원격 명령만 수행할 때 TC 마진은 4.2~10.7 dB로 3 dB 이상의 마진이 확보되고, 레인징만 수행할 때는 S/No값이 42.5 dB 이상된다. 따라서 위성의 제원을 정지궤도에서 운용하는 제원으로 가정한 상태에서 지상국 송신 EIRP를 65 dBW 이상으로 송신하면 상향 링크는 큰 문제가 없는 것으로 분석된다.

#### 4-4-2 하향 링크

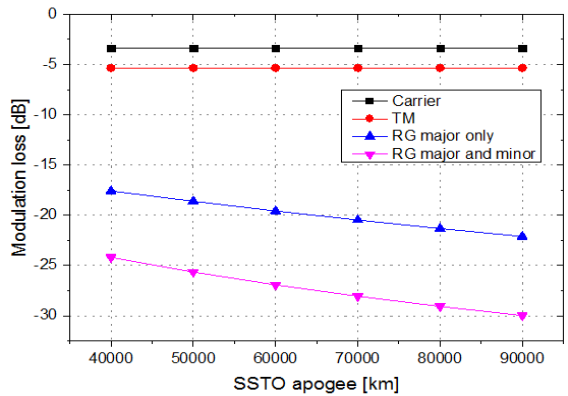
하향 링크에서는 원격측정 데이터와 레인징 신호를 송신하는 모드(simultaneous TM and RG)를 기준하였다. TM 변조 지수를 1.0 rad, RG 변조지수를 0.45(0.32, 0.32) rad를 기준으로 적용한다. 표 2와 같이 위성(EIRP:  $-2.92$  dBW)과 지구국 제원(G/T: 24.0 dBi/K)을 기준으로 위성에 대한 고각  $10^\circ$ 에서 SSTO 원지점 거리에 따른 링크 특성들을 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)에서 SSTO 원지점이 70,000 km에서는 TM과 RG ambiguity 마진은 각각 2.3 dB, 1.6 dB로 산출되며 요구 마진 3 dB보다는 작다. 이에 반해 Carrier, 마진은 9 dB 이상으로 충분하다. 정지궤도 위성이



(a)



(b)



(c)

그림 5. (a) 링크 마진, (b) 거리 오차, (c) 변조 손실. 단, TM 변조 지수는 1.0 rad, RG 변조 지수는 0.45 (0.32, 0.32) rad, G/S G/T는 24 dBi/K인 조건  
Fig. 5. (a) Link margins, (b) Range errors, (c) Modulation losses, where TM MI of 1.0 rad, RG MI of 0.45 (0.32, 0.32) rad, G/S G/T of 24 dBi/K.

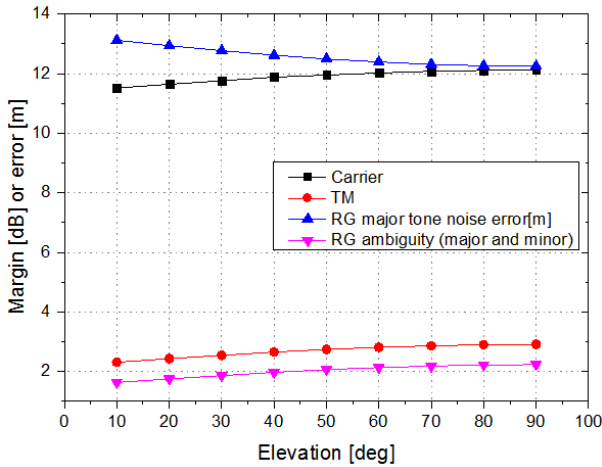


그림 6. SSTO 70,000 km에서 고각별 링크 마진과 거리 오차. 단, TM 변조 지수는 1.0 rad, RG 변조 지수는 0.45(0.32, 0.32) rad, G/S G/T는 24 dBi/K인 조건

Fig. 6. Link margins and range errors versus elevation angle (in degrees) on SSTO of 70,000 km, where TM MI of 1.0 rad, RG MI of 0.45(0.32, 0.32) rad, G/S G/T of 24 dBi/K.

SSTO 40,000 km에서의 분석된 거리 정확도(5.6 m, rms)는 GEO에 있는 국내 S-band 정지궤도 위성의 레인징 정확도 (6.0 m, rms)<sup>[22]</sup>와 거의 같은 성능을 가짐을 알 수 있다.

즉, 비슷한 위치에서 100 kHz 톤 신호를 사용하였을 때의 거리 정확도가 유사하다. 그림 5(b)에서 RG Major 톤 신호만을 사용할 때 거리 오차(range noise error)는 70,000 km에서는 약 13 m 이하, 90,000 km 이하에서는 20 m 이하의 값을 얻었다. 그림 5(c)에서 Carrier와 TM 변조 손실은 거리가 관계없이 일정하지만, RG 변조 손실은 SSTO 원지점이 멀어질수록 더 커짐을 볼 수 있다. 이것은 앞서 이론에서 살펴본 바와 같이 상향 링크에서의 레인징 신호세기와 레인징 채널을 통과하는 열적 잡음이 RG 변조 손실을 계산하는데 연관되어, 거리가 멀어질수록 레인징 신호의 S/No가 낮아지기 때문이다.

그림 6은 70,000 km에서 고각을 10°부터 90°까지 변화시켰을 때 링크 마진과 RG Major 톤 거리 오차를 보여준다. TM과 RG ambiguity 마진이 10°부터 90°까지 약 0.6 dB 정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 고각이 10°일 때의 편파손실을 모든 고각에 적용하였으므로 실제로는 고도가 높아짐에 따라 마진이 약 0.1~1.3 dB 정도 상승하는 것을 감안할 수 있다.

그림 7(a)에는 SSTO 원지점이 70,000 km일 때 지상국 G/T를 24 dBi/K로 고정한 상태에서 TM 변조 지수를 1.0 rad에서 1.4 rad까지 변화시켰을 때 Carrier 마진과 TM 마진, 레인징 마진에 미치는 영향을 나타내었다. 그림 7(a)

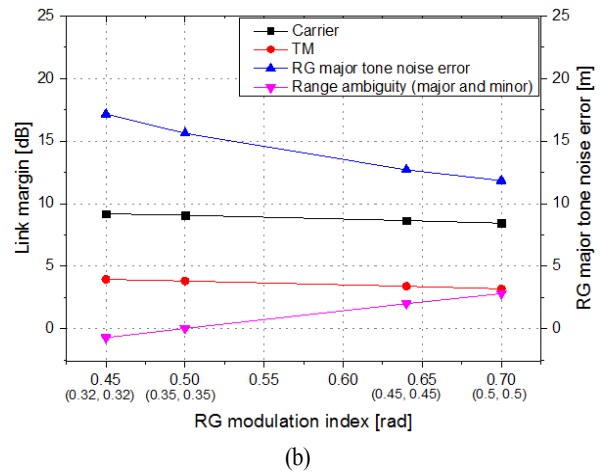
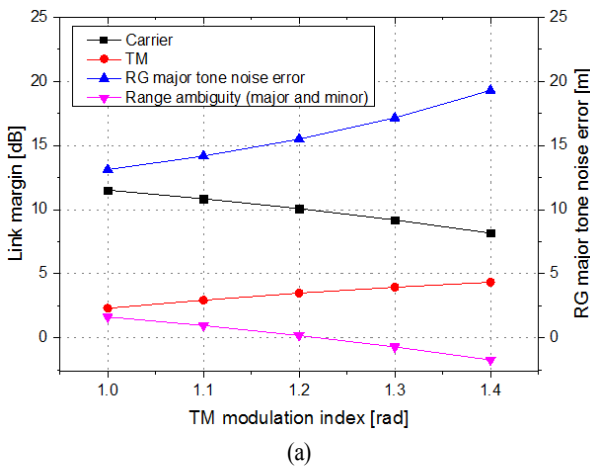


그림 7. (a) TM 변조 지수 변경(1.0~1.4 rad)에 따른 링크 마진과 변조 손실, (b) TM 변조 지수를 1.3 rad로 고정하고 RG 변조 지수를 증가시켰을 때 링크 마진과 변조 손실. 단, SSTO는 70,000 km, G/S G/T는 24 dBi/K를 기준함

Fig. 7. (a) Link margins and range error with TM MI variation from 1.0 to 1.4 rad, (b) Link margins and range error with RG MI variation (when TM MI of 1.3 rad fixed), where SSTO apogee is assumed 70,000 km, and G/S G/T of 24.0 dBi/K.

표 3. SSTO 80,000 km에서 가용한 링크 성능 예시  
Table 3. Link performance example to convince link performance for SSTO apogee of 80,000 km.

Parameters & results	Units	Values
Slant range(@ Elevation 10°)	km	85,041
S/C EIRP	dBW	-2.9
G/S G/T	dBi/K	25.5
TM mod. index	rad	1.2
RG major only mod. index	rad	0.7
RG major & minor mod. index	rad	0.5
Carrier mod. loss	dB	-5.6
TM mod. loss	dB	-4.9
RG mod. loss(major only)	dB	-19.6
RG mod. loss(major & minor)	dB	-27.0
Carrier tracking margin	dB	9.7
TM margin	dB	3.1
RG major tone noise error	m	11.3
RG ambiguity margin	dB	3.1

와 같이 TM 변조 지수를 증가시키기에 따라 TM 마진은 증가하고 Carrier 마진과 RG 마진은 감소하는 것을 볼 수 있다.

TM 변조 지수가 1.0 rad와 1.3 rad일 때 링크 마진의 변화량을 살펴보면 TM 마진은 2.3 dB에서 4.3 dB까지 증가하고, Carrier 마진은 11.5 dB에서 8.2 dB까지 감소하며, RG ambiguity 마진은 1.6 dB에서 -1.7 dB까지 감소한다. 이 때 TM 마진과 Carrier 마진은 요구 마진(3 dB)를 만족하지만 RG ambiguity 마진은 요구 마진을 만족하지 못한다.

이 상태에서 TM 변조지수를 1.3 rad으로 고정하고, RG 변조지수를 0.45(0.32, 0.32), 0.5(0.35, 0.35), 0.64(0.45, 0.45), 0.7(0.5, 0.5) rad로 증가시켰을 때의 링크 마진과 거리 오차를 그림 7(b)에 나타내었다. RG Major 톤의 거리 오차는 17.2 m에서 11.8 m로 감소한다. RG 변조 지수를 증가시키면 Carrier 마진은 9.2 dB에서 8.4 dB까지 감소하고, TM 마진은 3.9 dB에서 3.2 dB까지 감소하는 반면에, RG 마진은 -0.7 dB에서 2.8 dB까지 증가한다. 따라서 RG 변조 지수가 0.64(0.45, 0.45)일 때와 0.7(0.5, 0.5)일 때 TM 마진은 3.4 dB와 3.2 dB, RG 마진은 2.0 dB와 2.8 dB가

표 4. SSTO 90,000 km에서 가용한 링크 성능 예시  
Table 4. Link performance example to convince link performance for SSTO apogee of 90,000 km.

Parameters & results	Units	Values
Slant range(@ Elevation 10°)	km	95,066
S/C EIRP	dBW	-2.9
G/S G/T	dBi/K	27.0
TM mod. index	rad	1.15
RG major only mod. index	rad	0.7
RG major & minor mod. index	rad	0.5
Carrier mod. loss	dB	-5.2
TM mod. loss	dB	-5.2
RG mod. loss(major only)	dB	-20.0
RG mod. loss(major & minor)	dB	-27.5
Carrier tracking margin	dB	10.7
TM margin	dB	3.4
RG major tone noise error	m	11.1
RG ambiguity margin	dB	3.1

된다. 이를 고려하여 지상국 G/T를 24.5 dBi/K로 할 경우 TM 변조 지수가 1.3 rad이고, RG 변조 지수가 0.7(0.5, 0.5) rad일 때는 TM 마진과 RG 마진 모두 3 dB 이상(TM 마진: 3.7 dB, RG 마진: 3.3 dB)으로 요구 마진을 만족하는 운용 조건이 된다.

SSTO 원지점 80,000 km와 90,000 km를 대상으로 지상국 G/T를 최소로 증가시키고, TM과 RG 변조지수를 조정하였을 때 Carrier, TM, RG 마진이 확보되는 예를 표 3과 표 4에 제시하였다.

표 3에서 80,000 km에서는 지상국 G/T 값이 25.5 dBi/K, TM 변조 지수가 1.2 rad, RG 변조 지수가 0.7(0.5, 0.5) rad 일 때 TM과 RG 마진이 모두 3.1 dB 이상 확보된다. SSTO 원지점이 90,000 km일 때 표 4와 같이 TM 변조 지수가 1.15 rad, RG 변조지수가 0.7(0.5, 0.5) rad일 때 지상국 G/T가 27 dBi/K이면 3 dB 이상의 마진이 산출된다.

앞에서와 같이 전반적으로 TM과 RG 마진이 3 dB 이상일 때는 SSTO에서 레인징 거리 오차는 약 12 m 이하로 산출된다. 100 kHz의 Major 톤을 사용하는 국내 기존 정지궤도 위성의 레인징 거리 오차 규격이 10 m 이하<sup>[22]</sup>인 점을 고려할 때, SSTO에서 분석된 거리 오차가 12 m이므

로 SSTO에서도 톤 레인징에 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. SSTO 근지점에서는 궤도를 키우고 원지점에 있을 때는 궤도를 낮추는 조정을 통하여 위성은 정지궤도에 진입하므로, 위성이 정지궤도 안쪽의 근지점에 있으면 레인지 오차가 10 m 이하로 만족스럽지만, 원지점에 있을 때 레인지 오차가 크다. 따라서, SSTO 원지점 근처에 있을 때는 2대 이상의 지상국으로 레인징을 수행하여 레인징 오차를 줄일 수 있고<sup>[23]</sup>, 정지궤도에 근접하게 되면 레인징 오차는 감소하여 정지궤도 진입이 가능하다. 또한, 식 (9)와 식 (10)에서와 같이 상향 링크 출력을 올리면 레인징 신호의 S/N 비가 높아져 하향 링크용 실효 레인징 변조 지수(effective range modulation index,  $\tau_2$ )가 증가하고, 이에 따라 레인징 마진이 증가한다. 이와 같이 상향 링크 출력을 높임으로서 레인징 성능을 개선시킬 수 있다. 한편, 채널코딩의 경우, 본 논문에서는 하향 링크에서 Convolution 코드만 사용하는 것으로 분석하였다. Reed solomon 코드를 추가하여 Convolution 코드와 함께 사용하게 될 경우, 약 2 dB 정도의 마진을 더 기대할 수 있다.

## V. 결 론

S-band 주파수 대역에서 원격명령과 원격측정 데이터율이 10 kbps 미만의 통신에 적합한 PCM/PSK/PM 방식을 사용하는 정지궤도 위성이 발사 초기 목표 궤도에 진입하기 위하여 슈퍼 천이 궤도(SSTO)에 있을 때 TC & R 링크 성능이 확보되는지를 분석하였다. 방법적으로 정지궤도 위성의 제원은 정지궤도에서 운용하는 제원을 가정하고 변조 지수와 지상국 성능(G/T) 파라미터를 조정해 보았다. 이 결과, 상향 링크에서는 EIRP가 65 dBW 출력으로 송신하면 충분한 마진이 확보되는 것으로 분석된다. 하향 링크에서는 원격측정과 레인징 변조 지수를 조정하였을 때 링크 마진 3 dB 이상을 확보할 수 있는 운용 조건이 도출됨을 알 수 있었다. 하향 링크에서 원격측정 변조지수를 높이고, 레인징 변조지수를 낮추면 원격측정 링크 성능을 올릴 수 있다. 그러나 레인징 변조지수를 낮추면 원격측정 마진은 증가하지만, 레인징 오차는 증가하므로 본 논문에서는 원격측정 마진과 레인징 오차를 동시에 만족하는 조건을 분석해 보았다. 이 결과, 70,000 km까

지는 지상국 G/T가 24.5 dBi/K인 조건에서 링크 성능이 확보되는 것에 비해 80,000 km와 90,000 km에서는 지상국 G/T 성능이 각각 25.5 dBi/K, 27 dBi/K에서 3 dB의 요구마진을 만족하면서 운용될 수 있는 것으로 분석된다. 따라서 SSTO 원지점 고도가 65,000 km와 70,000 km인 궤도는 80,000 km와 90,000 km에 비해 GTO LEOP에서 기존에 사용되었던 지상국들(예: 이탈리아의 푸치노, 호주의 동가라)의 활용을 고려할 수 있다는 점에서 유리하다고 판단된다.

링크 분석에 사용한 여러 가지 파라미터의 경우, 경험적 또는 계산을 통하여 얻은 값을 기준으로 매우 불리한 조건으로 분석하였으므로, 실제 운용 시에는 더 좋은 성능이 예상된다. 더 정확한 분석을 위해서는 잘 알려진 파라미터에 대한 검증과 이에 대한 연구가 필요하다.

## References

- [1] 이선익, 김상구, 임원규, 김중표, 유상범, 이상곤, 염경환, "슈퍼 천이 궤도에서의 정지궤도위성 S-대역 원격 측정명령계 링크버짓 분석", 한국항공우주학회 춘계 학술대회 2014, pp. 819-822, 2014년 4월.
- [2] 김영완, 양우진, "통신해양기상위성의 위성 관제 신호 전송 방식의 최적화 연구", 한국항공우주학회지, 34 (11), pp. 47-53, 2006년 11월.
- [3] R. Garcia, S. Marti, F. Schwartz, C. Bainier, and L. Martineau, "Compact TT&C equipment for small satellites", *European Space Agency, TTC 2001, 2nd ESA Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications*, Oct. 2001.
- [4] W. L. Martin, T. M. Nguyen, "The joint CCSDS-SFCG modulation study-A comparison of modulation schemes", *Jet Propulsion Laboratory*, 1994.
- [5] M. K. Simon, S. Million, "Residual versus suppressed-carrier coherent communications", *Jet Propulsion Laboratory, TDA Progress Report 42-127*, pp. 1-9, Nov. 1996.
- [6] T. K. Foley, B. J. Gaumond, "Optimum power division for phase-modulated deep-space communication links",

- IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-3, no. 3, pp. 400-409, May 1967.
- [7] M. M. Shihabi, T. M. Nguyen, and S. M. Hinedi, "On the use of subcarriers in future space missions", *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology*, Apr. 1983.
- [8] M. M. Shihabi, "A comparison of telemetry signals in the presence and absence of a subcarrier", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, pp. 60-73, Feb. 1994.
- [9] T. M. Nguyen, "A computational technique for the means and variances of modulation losses", *Jet Propulsion Laboratory, TDA Progress Report 42-103*, pp. 189-202, Nov. 1990.
- [10] C. C. Wang, T. M. Nguyen, and J. Yoh, "On the power spectral density of SGLS and USB waveforms", *1999 IEEE Aerospace Conference*, vol. 2, pp. 137-143, 1999.
- [11] "Radio frequency and modulation systems-Part 1 earth station and spacecraft", *Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS 401.0-B*, pp. 1.0-3~1.0-4, pp. 2.2.2-1~2.2.2-2, pp. 2.2.7-1~2.2.7-2, pp. 4.1.5-1~4.1.5-9, Jun. 1993.
- [12] T. M. Nguyen, S. M. Hinedi, "Selection technique for subcarrier frequencies and modulation indices", *IEEE Trans. Communications*, vol. 43, no. 2/3/4/, pp. 1055-1066, Apr. 1995.
- [13] P. W. Kinman, J. B. Berner, "Two-way ranging during early mission phase", *2003 IEEE Aerospace Conference*, vol. 3, pp. 3\_1445-3\_1455, Mar. 2003.
- [14] P. W. Kinman, "Sequential ranging", in *DSN Telecommunications Link Design Handbook, Doc. 810-005*, California Institute of Technology, Module 203B, pp. 18-21, Oct. 2009.
- [15] D. M. Pozar, *Microwave and RF Design of Wireless Systems*, John Willey & Sons, New York, pp. 120-121, pp. 129-131, 2001.
- [16] B. Sklar, *Digital Communications Fundamentals and Application*, Prentice-Hall International, pp. 215-223, 1988.
- [17] G. D. Gordon, W. L. Morgan, *Principles of Communications Satellites*, Wiley & Sons, New York, pp. 38-50, pp. 214-231.
- [18] H. Estep, "Polarization loss of a satellite: Data collection sensor link", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-13, pp. 433-435, Jul. 1977.
- [19] "Satellite Earth Stations and Systems(SES): Technical analysis of spread spectrum solutions for Telemetry, Command and Ranging(TCR) of geostationary communications satellite", *European Telecommunications Standards Institute, ETSI TR 101 956 V1.1.1*, p. 18, Sep. 2001.
- [20] "Ranging standard, volume 1: Direct ground to spacecraft ranging", *European Space Agency, ESA PSS-04-104*, vol. 1, pp. 25-31, Mar. 1991.
- [21] W. G. Lim, C. G. Noblejas, "Question for ISBT", *Private e-mail, KARI*, Nov. 2013.
- [22] "TM/TC MODCS link budgets SYS-18", KARI, pp. 3-10, Jan. 2007.
- [23] Y. Hwang, B. S. Lee, H. Y. Kim, H. Kim, and J. Kim, "Orbit determination accuracy improvement for geostationary satellite with single station antenna tracking data", *ETRI Journal*, vol. 30, pp. 774-782, Dec. 2008.

이 선 익



1995년 2월: 연세대학교 천문우주과학과 (이학사)

1995년 12월~1996년 12월: 한국전자통신 연구원 관제기술연구소 위촉연구원

1997년 2월: 연세대학교 천문우주과학과 (이학석사)

2001년 2월: 연세대학교 전자과 (공학석사)

1997년 3월~2003년 7월: (주)하이게인안테나 (부설)전파통신연구소 선임연구원

2003년 9월~2003년 12월: 연세대학교 연구원

2003년 12월~현재: 한국항공우주연구원

2012년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 박사과정  
[주 관심분야] RF 통신시스템, TTC & R

염 경 환



1976년~1980년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1980년~1982년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)

1982년~1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)

1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품 연구소 선임연구원 MIC팀 팀장

1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원

1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원

1991년 8월: (주)LTI

1995년 10월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 시스템, MMIC 설계