

論文97-34S-7-5

저궤도 위성 관제 시스템의 링크 특성 분석

(Link Analysis of TTC System for LEO Satellite)

張大翼*, 李點勳*, 金英完*, 崔在益*

(Dae-Ig Chang, Jeom-Hun Lee, Young Wan Kim, and Jae Ick Choi)

요 약

TTC시스템의 임무는 위성으로부터 원격측정 데이터를 수신하고 처리하며, 목표 위성 시스템을 위해 위성의 임무를 계획하고 제어하도록 한다. 본 논문에서는 위성 관제시스템을 위한 전송방식을 기술하고, CCSDS의 권고에 의해 전송방식을 결정하였으며 또한 변조방식에 따라 채널특성을 분석하였다. 특별히, 채널의 성능을 감소시키는 반송파 대 원격측정 데이터의 전력비 개념을 도입하였고 전력비와 변조지수에 따른 전송성능의 영향정도를 분석하였다. 저궤도 관제시스템의 채널은 일반 위성 통신시스템과 다르다. 그러므로 일반적으로 잘 알려져 있는 지상시스템의 링크설계 방식을 이용하기 위해 TTC시스템의 링크설계를 일반화하였고 채널성능을 높이기 위한 변조지수 결정 방법을 제안하였다.

Abstract

The mission of the TTC system is to acquire and process the telemetry data from the satellite and to provide mission planning and satellite control for the target satellite system. In this paper, the transmission scheme for the Tracking, Telemetry and Command(TTC) system of satellite is described and determined according to the recommendation of CCSDS, and the channel characteristics are analyzed according to modulation method.

Especially, we introduced the concepts of carrier vs. telemetry data power ratio which causes the channel performance to degrade, and analyzed the effects of transmission performance according to the power ratio of carrier vs. telemetry data and the modulation index. The channel of the LEO TTC system is different with usual satellite communication system. So, we have generalized the link budget of TTC system for using the link budget of ground station well-known and proposed the determination method of modulation indices for improving channel performance.

I. 서 론

한반도에 대한 지도제작, 해양관측, 그리고 이온층/고에너지 입자에 대한 관측등 대기환경에 대한 관측등이 주요 임무인 다목적 실용위성(KOMPSAT, KOREA Multi-Purpose SATellite)은 1999년에 발사될 예정이다. 이 다목적 실용위성은 지상의 관제에 의

해 저궤도(LEO)인 685km의 정상고도로 태양동기궤도(sunsynchronous)에 있도록 유지되며 고유의 임무를 수행한다.

위성의 관제 시스템(Tracking, Telemetry and Command (TTC))은 위성을 추적(Tracking)하고, 위성 상태 및 측정 데이터인 원격측정(Telemetry) 데이터를 수신하며, 위성의 임무수행 요구를 위한 제어 명령인 원격명령(Command) 데이터를 송신하여 위성 고유의 임무를 수행하도록 한다. 위성을 추적하기 위한 방법으로 본 TTC에서는 거리측정 신호(Ranging tones)를 송수신하여 위성을 추적한다. 이러한 원격명

* 正會員, 韓國電子通信研究院 衛星通信研究團
(ETRI, Satellite Communications, Division)
接受日子: 1996年11月12日 수정완료일: 1997年6月19日

령, 원격측정 그리고 거리측정 신호를 상향 및 하향링크를 통해 송수신하기 위한 변복조 방법은 참고문헌 [1~4]의 권고를 따른다. 이 권고에 따라 PSK 및 PM변조를 동시에 수행하며 TTC의 위링크를 설계하기 위해 변조에 따른 채널의 특성을 분석한다.

본 논문에서는 PM변조시 변조지수(Modulation Index)에 따른 변조손실을 상향 및 하향링크별로 유도하고 그 결과를 제시한다. 또한 플레이백(playback) 데이터의 특성에 의한 새로운 개념의 반송파 SNR 계산방법을 제시하고, 각 링크에서의 PM복조를 위한 실제적인 반송파 및 데이터 SNR을 유도함으로써 LEO TTC시스템의 링크설계를 일반화 하여 일반 위성통신 시스템의 링크설계 절차를 그대로 이용할 수 있도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 TTC시스템의 전송방식을 설정하고, 3장에서는 정해진 전송방식에 대한 변조손실을 분석하고 변조지수에 따른 변조손실을 제시한다. 4장에서는 원격측정 데이터에 대한 반송파 대 데이터 전력비를 분석하고, 5장에서는 3장과 4장에서 분석한 변조손실 및 반송파 대 데이터 전력비를 링크설계에 적용하여 반송파 신호의 SNR, 원격측정 신호의 E_b/N_0 , 거리측정 신호의 SNR을 제시한 다음 6장에서 결론을 맺는다.

II. TTC 시스템의 전송방식

위성의 위치 및 자세제어, 탑재장치의 임무수행등을 위한 제어요구인 원격명령 신호와 이동하는 위성의 추적을 위한 거리측정 신호는 상향링크를 통해 위성으로 전송되며, 위성의 상태 및 측정 데이터인 원격측정 신호와 위성에서 회귀(turn-around)되는 거리측정 신호는 하향링크를 통해 TTC시스템으로 수신된다. 이와 같은 원격명령과 원격측정 그리고 거리측정 신호는 참고문헌 [1~4]의 권고에 따라 전송방식이 결정된다. 즉 상향링크에서 원격명령 데이터는 NRZ-L로서 BPSK변조되고 이 변조된 원격명령 신호와 거리측정 톤들은 PM변조된다. 또한 하향링크에서 원격측정 데이터는 리얼타임(R/T, real-time)과 플레이백(P/B, playback) 데이터로 구분되는데 R/T원격측정 데이터는 BPSK변조된 후 PM변조되고 P/B원격측정 데이터는 직접 PM변조된다. 그리고 회귀된 거리측정 신호는 상향링크와 마찬가지로 직접 PM변조된다. TTC

시스템의 전송방식 요약은 표 1과 같다.

표 1. KOMPSAT TTC 시스템의 전송방식
Table 1. Transmission specifications for KOMPSAT TTC system.

항 목	특성값
상향링크 변조방식	Command Ranging tones BPSK/PM PM
하향링크 변조방식	R/T Telemetry P/B Telemetry Ranging tones BPSK/PM PM PM
데이터 속도	Command R/T Telemetry P/B Telemetry 2kbps 2.048kbps 1.5Mbps

III. 변조손실(Modulation Loss) 계산

KOMPSAT TTC는 일반 위성통신용 지상 시스템과는 달리 PSK변조와 PM변조를 동시에 하거나 또는 PM변조만 하게된다^[2~4]. 또한 상향링크를 통해 원격명령과 거리측정 신호를 전송하고 하향링크를 통해 원격측정과 거리측정 신호를 수신한다. 일반적으로 PM변조는 변조지수에 따라 식 (1)과 같이 변조한다^[5].

$$S_{PM}(t) = \sqrt{2} \sin[\omega_c t + \sum_{i=1}^M \beta_i s_i(t)] \quad (1)$$

여기서 β_i 는 변조지수, ω_c 는 PM변조의 반송파 주파수이고, 부반송파(subcarrier)의 수나 데이터 채널의 수는 $i = 1, 2, \dots, M$ 으로 표현한다. 그리고 신호 $S_i(t)$ 는 PM변조를 위한 신호로서 normalized data sequence이며 NRZ-L에 대한 신호를 $d_i(t)$ 로 표현하고 NRZ-L데이터를 직접 PM변조하는 경우, 거리측정 신호를 PM변조하는 경우 그리고 NRZ-L데이터를 PSK변조한 후 PM변조하는 각각의 경우에 대한 $S_i(t)$ 는 식 (2)와 같이 표현한다. 여기서 $d_i(t)$ 는 NRZ-L이므로 ± 1 이다.

$$s_i(t) = \begin{cases} d_i(t) & PCM / PM \\ \sin \omega_c t & \text{tone} / PM \\ d_i(t) \sin \omega_c t & PCM / PSK / PM \end{cases} \quad (2)$$

1. 상향링크 변조손실

위성 관제시스템은 상향링크를 통해 위성의 제어요구를 위한 원격명령 신호와 위성 추적을 위한 거리측정 신호를 전송하는데 원격명령 데이터는 BPSK변

조후 PM변조되고 거리측정 신호는 직접 PM변조된다. 또한 위성을 관제할 때 원격명령 신호만 전송하거나 원격명령 신호와 거리측정 신호를 동시에 전송하거나 또는 거리측정 신호만 전송할 경우로 나누어 각각의 경우에 대한 변조손실을 분석한다.

1) 원격명령 신호만 전송할 경우

원격명령 신호는 BPSK변조된 후 PM변조되므로 식 (1)과 식 (2)로 부터 식 (3)과 같다.

$$S_{PMcm}(t) = \sqrt{2} \sin[\omega_0 t + \beta_{cm} d_{cm}(t)] \sin \omega_{cm} t \\ = \sqrt{2} \{ \sin \omega_0 t \cos[\beta_{cm}(\sin \omega_{cm} t)] \\ + d_{cm}(t) \cos \omega_0 t \sin[\beta_{cm}(\sin \omega_{cm} t)] \} \quad (3)$$

여기서, ω_0 는 PM변조의 반송파 주파수, β_{cm} 은 원격명령 신호의 변조지수, ω_{cm} 은 원격명령 신호의 BPSK에 의한 부반송파 주파수, $d_{cm}(t)$ 는 원격명령 신호의 NRZ-L데이터이다.

식 (3)에서 cos항과 sin항을 식 (4)와 같은 Jacobi 방정식으로 표현할 수 있으며 식 (3)을 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\cos[\beta \sin(\omega t)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos(n\omega t) \\ \sin[\beta \sin(\omega t)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \sin(n\omega t) \quad (4) \\ S_{PMcm}(t) = \sqrt{2} \{ \sin \omega_0 t \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_{cm}) \cos(n\omega_{cm} t) \\ + d_{cm}(t) \cos \omega_0 t \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_{cm}) \sin(n\omega_{cm} t) \} \quad (5)$$

식(5)를 삼각함수 및 Bessel함수 성질을 이용하여 다시 정리하면 식 (6)과 같다.

$$= \sqrt{2} \{ \{ J_0(\beta_{cm}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta_{cm}) \cos(2n\omega_{cm} t) \} \sin \omega_0 t \\ + 2 d_{cm}(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\beta_{cm}) \cos((2n-1)\omega_{cm} t) \cos \omega_0 t \} \quad (6)$$

여기서, n 이 홀수이면 데이터 신호의 성분($d_{cm}(t)$)이 변조된 신호에 존재하고 n 이 짝수이면 신호성분 없이 반송파 성분만 존재한다는 사실을 알 수 있다. 또한 첫번째 항은PM변조의 반송파 신호, 두번째 항은 원격명령의 데이터 신호이다.

신호의 전력은 참고문헌 [5]에 의해 식 (7)~(9)의 과정으로 계산한다.

$$S(t) = \sqrt{2A} \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos(\omega_0 + n\omega_c) t \quad (7)$$

식 (7)을 식 (8)과 같이 autocorrelation하고 푸리에 변환 값 $R(\omega)$ 을 주파수에 대해 적분하면 식 (9)와 같은 전력 P를 얻을 수 있다.

$$R(\tau) = A^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) \cos(\omega_0 + n\omega_c) \tau \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\omega) d\omega = A^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\beta) \quad (9)$$

신호에 대한 전력인 식 (9)를 이용하면 식 (6)의 PM변조된 원격명령 신호에 대한 전력을 계산할 수 있다. 여기서 $d_{cm}(t) = \pm 1$ 임을 고려하면 식 (10)과 같이 PM변조 신호의 전력이 유도된다.

$$P_{PMcm} = J_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}^2(\beta_{cm}) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}^2(\beta_{cm}) = 1 \quad (10)$$

식 (10)에서 PM변조된 신호의 전력을 반송파 전력과 원격명령 신호 전력으로 구분하여 식 (11)과 같이 쓸 수 있으며 다음과 같은 중요한 사실을 알 수 있다. 즉, 식 (10)에서 변조된 신호의 총전력이 1이고 이 총 전력은 반송파 성분 전력과 원격명령 성분의 전력으로 구분되며 이때 변조지수 β_{cm} 에 의해 1의 총 전력이 반송파 전력과 원격명령 전력으로 분배되어 각각에 대한 전력비율이 정해진다. 그러므로 변조지수 값에 의한 전력 비율인 식 (11)을 로그함수 취하면 전력 1을 기준으로 반송파와 원격명령 신호에 대한 손실없이 되어 식 (12)와 같이 쓸 수 있으며 이 값을 변조손실이라 한다. 변조손실은 신호의 전력값 비율의 로그값으로 이후부터 전력값 또는 변조손실이라 표현한다.

$$(P_{PMcm})_{car} = J_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}^2(\beta_{cm}) \\ (P_{PMcm})_{cm} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}^2(\beta_{cm}) \quad (11)$$

$$(ML_{PMcm})_{car} = 10 \log [J_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}^2(\beta_{cm})] \\ (ML_{PMcm})_{cm} = 10 \log [2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}^2(\beta_{cm})] \quad (12)$$

식 (11)에서 $(P_{PMcm})_{car}$ 은 원격명령 신호에 의한 반송파 전력이고 $(P_{PMcm})_{cm}$ 은 원격명령 신호의 신호 전력이며 식 (12)에서 $(ML_{PMcm})_{car}$ 은 원격명령 신호에 의한 반송파 신호의 변조손실이고 $(ML_{PMcm})_{cm}$ 은 원격명령 신호의 변조손실이다.

본 TTC 시스템의 PM변조에서 $d_{cm}(t) = \pm 1$ 이고 변조지수 β 는 2미만이므로 Bessel함수의 특성에 의해 n 이 2 이상에서는 $J_n(\beta) \approx 0$ 으로 한다. 그러므로 식

(6)의 반송파와 데이터에 대한 전력을 계산하면 식 (13)과 같으며, 식 (6)을 이용하면 0차 Bessel함수로 표현되는 항은 반송파 성분이고 1차 Bessel함수로 표현되는 항은 원격명령 데이터 성분이라는 중요한 결론을 얻는다.

$$\begin{aligned} \text{Carrier Power} &= J_0^2(\beta_{cm}) \\ \text{Command Power} &= 2J_1^2(\beta_{cm}) \end{aligned} \quad (13)$$

2) 원격명령 신호와 거리측정 신호 동시 전송
원격명령 신호는 BPSK변조후 PM변조되고 거리측정 신호는 主톤(major tone)과 副톤(minor tone) 주파수에 의해 PM변조되므로 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} S_{PMcm}(t) &= \sqrt{2} \sin[\omega_o t + \beta_{cm} d_{cm}(t) \sin \omega_{cm} t \\ &\quad + \beta_{rj} \sin \omega_{rj} t + \beta_{rm} \sin \omega_{rm} t] \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, β_{rj} 와 ω_{rj} 는 major ranging신호의 변조지수와 tone주파수, β_{rm} 과 ω_{rm} 은 minor ranging신호의 변조지수와 tone주파수이다.

식 (14)를 3.1.1절과 같은 방법으로 정리하고 n을 0과 1에 대해서만 정리하면 식 (15)와 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} S_{PMcm}(t) &= J_0(\beta_{cm})[J_0(\beta_{rj})J_0(\beta_{rm}) \\ &\quad - 4J_1(\beta_{rj})(\sin \omega_{rj} t)J_1(\beta_{rm})\sin \omega_{rm} t] \sin \omega_o t \\ &\quad - [2d_{cm}(t)J_1(\beta_{cm})\sin \omega_{cm} t][2J_1(\beta_{rj})(\sin \omega_{rj} t)J_0(\beta_{rm}) \\ &\quad + 2J_0(\beta_{rj})J_1(\beta_{rm})\sin \omega_{rm} t] \sin \omega_o t \\ &\quad + [2d_{cm}(t)J_1(\beta_{cm})\sin \omega_{cm} t][J_0(\beta_{rj})J_0(\beta_{rm}) \\ &\quad - 4J_1(\beta_{rj})(\sin \omega_{rj} t)J_1(\beta_{rm})\sin \omega_{rm} t] \cos \omega_o t \\ &\quad + [J_0(\beta_{cm})][2J_1(\beta_{rj})(\sin \omega_{rj} t)J_0(\beta_{rm}) \\ &\quad + 2J_0(\beta_{rj})J_1(\beta_{rm})\sin \omega_{rm} t] \cos \omega_o t \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)로부터 0차 Bessel함수의 곱으로만 표현되는 항은 반송파성분이고 1차 Bessel함수 1개와 0차 Bessel함수 2개의 곱으로 표현되는 항은 1차 Bessel함수에 해당하는 신호성분이다. 그리고 그외 1차 Bessel함수항이 2 이상의 곱으로 존재하는 것은 혼변조(cross-modulation)이다. 즉, 1차 Bessel함수 하나만 존재하는 항이 그 신호성분이다. 그러므로 반송파, 원격명령 그리고 거리측정 신호의 전력은 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Carrier Power} &= J_0^2(\beta_{cm})J_0^2(\beta_{rj})J_0^2(\beta_{rm}) \\ \text{TC Power} &= 2J_1^2(\beta_{cm})J_0^2(\beta_{rj})J_0^2(\beta_{rm}) \\ \text{Ranging Power} &= 2J_1^2(\beta_{cm})J_1^2(\beta_{rj})J_0^2(\beta_{rm}) \end{aligned} \quad (16)$$

식 (6)과 식 (15)에서 다음과 같은 중요한 결론을 얻을 수 있다. 즉, cos항에서는 데이터 성분은 사라지고 반송파 성분만 남게되며 이때 0차 Bessel함수 성분으로 구성되고, sin항에서는 데이터 성분이 남게되어 1차 Bessel함수 성분으로 구성된다.

지금까지는 거리측정 신호가 정현파일 경우에 국한하였으나 구형파인 경우에는 Bessel함수가 0차인 경우 cos항으로, 1차인 경우 sin항으로 변환된다. Ranging tone 신호가 구형파일 경우 반송파, 원격명령 그리고 거리측정 신호의 전력은 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Carrier Power} &= J_0^2(\beta_{cm})\cos^2(\beta_{rj})\cos^2(\beta_{rm}) \\ \text{TC Power} &= 2J_1^2(\beta_{cm})\cos^2(\beta_{rj})\cos^2(\beta_{rm}) \\ \text{Ranging Power} &= J_0^2(\beta_{cm})\sin^2(\beta_{rj})\cos^2(\beta_{rm}) \end{aligned} \quad (17)$$

3) 거리측정 신호만 전송할 경우

거리측정 신호는 major tone과 minor tone주파수를 가지고 PM변조되므로 식 (18)과 같고 3.1.1과 3.1.2절과 같은 방법으로 정리하면 식 (19)와 같은 결과를 얻는다.

$$S_{PMcm}(t) = \sqrt{2} \sin(\omega_o t + \beta_{rj} \sin \omega_{rj} t + \beta_{rm} \sin \omega_{rm} t) \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{Carrier Power} &= J_0^2(\beta_{rj})J_0^2(\beta_{rm}) \\ \text{Ranging Power} &= 2J_1^2(\beta_{rj})J_0^2(\beta_{rm}) \end{aligned} \quad (19)$$

2. 하향링크 변조손실

위성의 관제(TTC) 시스템 하향링크는 상향링크에 비해 훨씬 복잡하다. 하향링크에서 위성의 원격측정 신호가 리얼타임(Real-time, R/T)과 플레이백(Play-back, P/B) 형태로 구분되어 전송되며 이때 2.048 kbps의 R/T 원격측정 신호는 PCM/BPSK/PM되고 1.5Mbps의 P/B 원격측정 신호는 PCM/PM된다. 또한 위성에서 회귀되는 거리측정 신호가 하향링크를 통해 수신된다. P/B 원격측정 신호의 경우 데이터 전송 속도가 높고 거리측정 신호의 전송없이 단독으로 전송되며, R/T 원격측정 신호의 경우 데이터 전송속도는 낮고 원격명령과 거리측정 신호가 동시에 전송되는 경우와 R/T 원격측정 신호 단독으로 전송되는 경우로

구분한다. 또한 거리측정 신호만 전송되는 경우도 있으므로 각각의 경우에 대한 변조손실을 분석한다.

1) P/B 원격측정 신호만 전송할 경우

P/B 원격측정 신호는 NRZ-L의 신호가 PM변조되므로 식 (20)과 같다.

$$S_{PMTP}(t) = \sqrt{2} \sin[\omega_o t + \beta_{ip} d_{ip}(t)]$$

$$= \sqrt{2} [\sin \omega_o t \cos \beta_{ip} + d_{ip}(t) \cos \omega_o t \sin \beta_{ip}] \quad (20)$$

여기서, β_{ip} 와 $d_{ip}(t)$ 는 각각 P/B 원격측정 신호의 변조지수와 NRZ-L 데이터이다.

식 (20)에서 첫항은 반송파 신호이고 두번째 항은 P/B 데이터 신호이며 3.1.1절과 같은 방법으로 전력을 계산하면 식 (21)과 같다.

$$\text{Carrier Power} = \cos^2 \beta_{ip}$$

$$\text{P/B Telemetry Power} = \sin^2 \beta_{ip} \quad (21)$$

2) R/T 원격측정 신호만 전송할 경우

R/T 원격측정 신호는 BPSK변조 후 PM변조되므로 식 (22)와 같다.

$$S_{PMTR}(t) = \sqrt{2} \sin[\omega_o t + \beta_{ir} d_{ir}(t) \sin \omega_{ir} t]$$

$$= \sqrt{2} \{ \sin \omega_o t \cos[\beta_{ir} (\sin \omega_{ir} t)]$$

$$+ d_{ir}(t) \cos \omega_o t \sin[\beta_{ir} (\sin \omega_{ir} t)] \} \quad (22)$$

여기서, β_{ir} , ω_{ir} , $d_{ir}(t)$ 는 각각 R/T 원격측정 신호의 변조지수, BPSK의 부반송파 주파수, NRZ-L 데이터이다. 식 (22)에서 첫번째항은 반송파 신호이고 둘째항은 R/T 데이터 신호이며 3.1.1절과 같은 방법으로 전력을 계산하면 식 (23)과 같다.

$$\text{Carrier Power} = J_0^2(\beta_{ir})$$

$$\text{R/T Telemetry Power} = 2J_1^2(\beta_{ir}) \quad (23)$$

3) 원격명령, 거리측정, R/T 원격측정 신호를 동시에 전송할 경우

원격명령 신호와 원격측정신호는 BPSK변조후 PM변조되고 거리측정 신호는 주톤과 부톤 주파수를 가지고 PM변조되므로 식 (24)와 같다.

$$S_{PMTR}(t) = \sqrt{2} \sin[\omega_o t + \beta_{cmi} d_{cmi}(t) \sin \omega_{cmi} t$$

$$+ \beta_{ir} d_{ir}(t) \sin \omega_{ir} t + \beta_{rit} \sin \omega_{rit} t + \beta_{rmt} \sin \omega_{rmt} t] \quad (24)$$

여기서, β_{rit} 와 ω_{rit} 는 회귀된 주톤 신호의 변조지수와 톤 주파수, β_{rmt} 와 ω_{rmt} 는 회귀된 부톤 신호의 변

조지수와 톤 주파수이다. 식 (24)를 같은 방법으로 계산하면 식 (25)와 같다.

$$\text{Carrier Power} = J_0^2(\beta_{ir}) J_0^2(\beta_{rit}) J_0^2(\beta_{rmt}) J_0^2(\beta_{cmi})$$

$$\text{R/T TM Power} = 2J_1^2(\beta_{ir}) J_1^2(\beta_{rit}) J_1^2(\beta_{rmt}) J_1^2(\beta_{cmi})$$

$$\text{Ranging Power} = 2J_0^2(\beta_{ir}) J_1^2(\beta_{rit}) J_0^2(\beta_{rmt}) J_0^2(\beta_{cmi}) \quad (25)$$

4) 거리측정 신호만 전송할 경우

거리측정 신호는 주톤과 부톤에 의해 PM변조되어 위성으로 전송되고 거리측정을 위해 위성에서 하향링크를 통하여 회귀된다. 이 회귀된 거리측정 신호는 식 (26)과 같고 3.1.1과 3.1.2절에서와 같은 방법으로 계산하면 식 (27)과 같다.

$$S_{PMRT}(t) = \sqrt{2} \sin(\omega_o t + \beta_{rit} \sin \omega_{rit} t + \beta_{rmt} \sin \omega_{rmt} t) \quad (26)$$

$$\text{Carrier Power} = J_0^2(\beta_{rit}) J_0^2(\beta_{rmt})$$

$$\text{Ranging Power} = 2J_1^2(\beta_{rit}) J_0^2(\beta_{rmt}) \quad (27)$$

3. 변조손실 계산값

TTC 링크설계에서 변조지수에 의한 변조손실은 중요한 파라미터이다. 거리측정의 주톤과 부톤의 변조지수를 0.4로 고정시키고 데이터의 변조지수를 변수로 할 때 반송파, TC와 TM데이터 신호의 변조손실은 각각 그림 1, 2와 같다. 여기서 x축은 변조지수, y축은 변조손실이다.

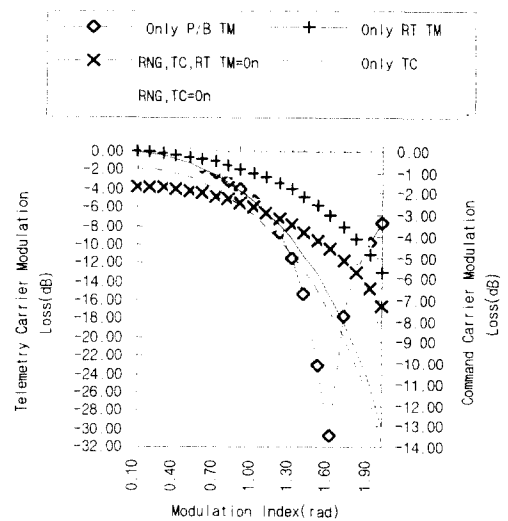


그림 1. 변조지수에 의한 반송파의 변조손실
Fig. 1. Modulation loss of carrier vs. modulation indices.

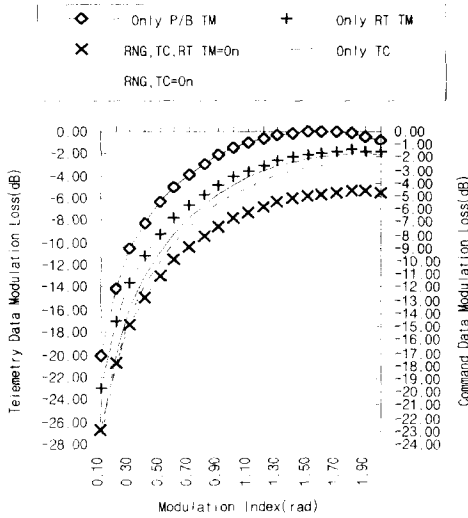


그림 2. 변조지수에 의한 데이터의 변조손실
Fig. 2. Modulation loss of data vs. modulation indices.

TTC시스템 전송에서 각 경우에 대한 변조지수는 참고문헌 [2,6]에 의해 최적의 값인 원격명령 변조지수 1.0, 거리측정의 주톤과 부톤 변조지수 각각 0.4, 원격측정 변조지수 1.0으로 결정된다. 이 결정된 변조지수에 대한 상향 및 하향링크의 변조손실 결과는 그림 1, 2로부터 표 2 및 표 3과 같다.

표 2. 상향링크 신호의 변조손실
Table 2. Modulation loss of uplink signals.

Mod Loss	TC : on Rng : off	TC : on Rng : on	TC : off Rng : on
Carrier	3.03dB	2.32dB	0.7dB
TC	4.82dB	4.12dB	
Ranging	13.82dB		11.49dB

표 3. 하향링크 신호의 변조손실
Table 3. Modulation loss of downlink signals.

Mod Loss	P/B: on Rng: off	R/T: on Rng: off	R/T: on Rng: on	TM,TC: off Rng: on
Carr	5.347dB	2.325dB	6.04dB	0.702dB
TM	1.499dB	4.120dB	7.84dB	
Rag			16.83dB	11.494dB

IV. 반송파 대 TM 데이터 전력 비

BPSK변조된 R/T원격측정 신호와 거리측정 톤들이 PM변조의 반송파를 중심으로 부반송파 주파수 만큼

양쪽에 위치하고, P/B 원격측정 신호는 데이터 속도가 높고(1.5Mbps) NRZ-L의 기저대역(baseband) 신호가 직접 PM 변조되기 때문에 PM반송파를 중심으로 그림 3과 같이 양쪽으로 확산된다[7]. 그러므로 P/B 원격측정(TM) 신호는 PM반송파(f_0)에 대해 간섭(Interference)으로 작용하며, 링크설계시 반송파의 SNR에 영향을 미침으로써 반송파 마진을 저하시키는 중요한 원인이 된다.

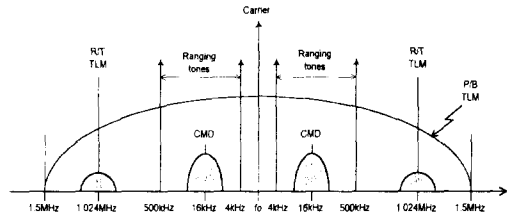


그림 3. 각 신호에 대한 Power Spectral 분포
Fig. 3. Power spectral distribution of TM, TC and ranging.

1. Normalized Signal Power

NRZ-L(TM) 신호를 $g(t)$ 라 하면 식 (28)과 같다.

$$g(t) = \text{rect}(t/T_B) = \begin{cases} 1, & |t| < T_B/2 \\ 0, & |t| > T_B/2 \end{cases} \quad (28)$$

여기서 T_B 는 데이터의 time duration이며 $g(t)$ 를 푸리에 변환하면 식 (29)와 같다.

$$g(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(t/T_B) e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-T_B/2}^{T_B/2} e^{-j2\pi ft} dt = \frac{(e^{j\pi f T_B} - e^{-j\pi f T_B})}{(-j2\pi f)} = T_B \frac{\sin(\pi f T_B)}{\pi f T_B} = T_B \text{Sa}(\pi f T_B) \quad (29)$$

반송파 f_0 의 대역폭을 $\pm f_1$ 이라 하면 이 반송파의 대역폭 범위내에 존재하는 즉 반송파에 영향을 미치는 TM신호의 전력은 식 (30)과 같다.

$$P_o = \frac{1}{T_B} \int_{-\infty}^{\infty} |g(f)|^2 df = \frac{1}{T_B} \int_{-f_1}^{f_1} \left[\frac{\sin(\pi f T_B)}{\pi f T_B} \right]^2 df \quad (30)$$

2. Carrier/TM Data Power Ratio 계산

P/B TM신호만 전송할 경우 식 (21)에 의해 반송파 전력은 $\cos^2 \beta_{tp}$, 데이터 전력은 $\sin^2 \beta_{tp}$ 만큼 비율로 변조손실이 발생하므로 변조손실을 고려한 P/B TM의 전력은 식 (31)과 같다.

$$P_{P/BTM} = \sin^2(\beta_{lp}) T_B \int_n \left[\frac{\sin(\pi f T_B)}{\pi f T_B} \right]^2 df \quad (31)$$

$$P_{car/TM} = \frac{\cos^2 \beta_{lp}}{\sin^2(\beta_{lp}) T_B} \int_n \left[\frac{\sin(\pi f T_B)}{\pi f T_B} \right]^2 df \quad (32)$$

그러므로 반송파 대 P/B TM 데이터 전력비 ($P_{car/TM}$)는 식 (32)와 같으며 원격측정의 변조지수에 대한 전력비는 그림 4와 같다. 여기서 전력비는 dB값이고 데이터 속도는 1.5Mbps, 반송파 대역폭은 100Hz에 대한 값이다.

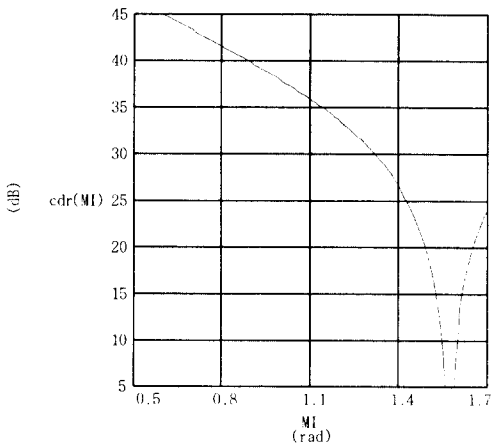


그림 4. 반송파 대 TM데이터 전력비
Fig. 4. Carrier vs. TM data power ratio.

V. 링크설계에 적용

3장과 4장에서 분석한 변조손실 및 반송파 대 TM 데이터 전력비는 PM변조방식을 이용하고 있는 TTC 시스템의 링크설계에 중요한 파라미터로서 BPSK나 QPSK만을 이용하는 VSAT이나 DAMA-SCPC시스템 등 일반적인 통신용 시스템의 링크설계에서는 없는 특이한 요소이다. 이 두 요소를 링크설계에 적용하여 시스템 성능인 링크마진을 계산하는 것은 3장에서와 같이 복잡하다. 즉, 원격명령, P/B이나 R/T원격측정, 거리측정 신호의 有無에 따라 반송파, P/B과 R/T데이터, 거리측정의 링크마진을 계산한다. 각각에 대한 링크설계는 다음과 같다.

상향링크와 하향링크에 대한 수신신호의 신호 대 잡음비인 S/No는 참고문헌 [8]에 의해 식 (33)과 같다.

$$S/N_c = EIRP - FSL - L_{pol} - L_{atm} + K + G/T \quad (33)$$

여기서 EIRP는 지구국이나 위성의 EIRP, FSL은 자유공간손실, L_{pol} 은 편극손실, L_{atm} 은 대기손실, K는 볼츠만 상수, G/T는 수신안테나의 G/T.

식 (33)에서 계산된 S/No는 수신신호에 대한 반송파와 데이터를 통합한 신호에 대한 잡음비이다. 그러므로 복조단계별로 성능을 검증하기 위해 원격명령, 원격측정 그리고 거리측정 신호의 有無에 따라 반송파, P/B과 R/T데이터, 거리측정에 대한 성능을 계산한다.

1. 반송파 성능

상향 및 하향링크의 반송파 성능인 신호 대 잡음비 SNR은 식 (33)의 S/No로부터 식 (34)와 같이 계산한다. 여기서 반송파의 SNR은 원격명령, 원격측정 그리고 거리측정 신호의 유무에 따라 계산되며 ML_{car} 은 그림 1의 결과인 반송파 변조손실, BW_{car} 은 수신기 반송파의 잡음 대역폭이다.

$$SNR_{car} = S/N_o - ML_{car} + 10 \log BW_{car} \quad (34)$$

그러나 P/B원격측정 신호에 대한 SNR은 식 (34)와 다른 방법으로 계산해야 하며 복잡하다. 4장에서 설명한 바와 같이 P/B 원격측정 신호는 PM반송파에 대해 간섭으로 작용하기 때문에 반송파의 SNR을 저하시킨다. 그러므로 P/B TM신호의 반송파 SNR은 식 (34)에서 계산한 SNR_{car} 과 식 (32)의 반송파 대 TM데이터 전력비($P_{car/TM}$)에 의해 식 (35)와 같이 계산한다^[8].

$$-10 \log [10^{(-SNR_{car}/10)} + 1/(P_{car/TM})] \quad (35)$$

P/B 원격측정의 반송파의 마진은 식 (35)에서 계산된 수신 반송파의 SNR과 요구 반송파 SNR($SNR_{req,car}$)의 차에 의해 계산한다. 링크설계 결과 하향링크 수신 신호의 S/No가 83dB-Hz, 반송파 잡음대역폭이 100Hz, 요구 $SNR_{req,car}$ 이 15dB라 할때 P/B원격측정 신호에 대한 반송파의 마진은 그림 5와 같다. 그림 5에서 $mca(MI)$ 는 반송파 대 P/B 데이터의 전력비를 고려하지 않은 식 (34)에 의한 반송파 링크마진, $mcap(MI)$ 는 반송파 대 P/B 데이터의 전력비로 식 (32)에 의한 반송파의 링크마진, $mcae(MI)$ 는 반송파 SNR과 반송파 대 데이터 전력비를 고려한 반송파의 실효적인 링크마진으로 식 (35)에 의해 계산한 값이다.

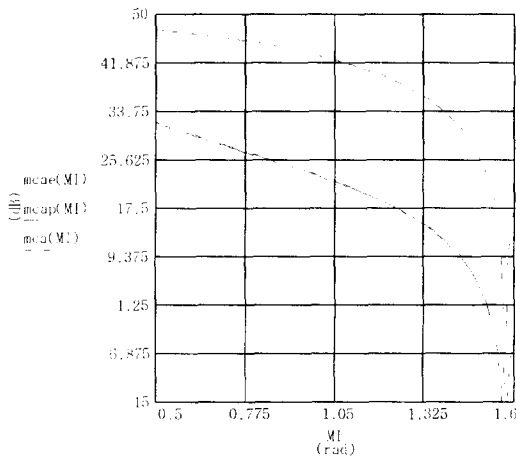


그림 5. P/B 데이터의 링크마진
Fig. 5. Link margin of P/B telemetry data.

그림 5에서 실효적인 링크마진은 반송파 대 P/B데이터의 전력비에 의한 링크마진에 절대적으로 의존(0.1 ~ 0.2dB 차이)한다는 사실을 알 수 있으며 링크마진이 3dB이상 되려면 변조지수를 1.51radian 이하로 설계하여야 한다.

2. 데이터 성능

원격명령이나 원격측정 데이터의 성능인 E_b/N_0 는 식 (33)의 결과와 데이터의 속도(R_b), 그림2의 결과인 변조손실(ML_T), 복조기의 복조손실(DL_T)에 의해 식 (36)과 같다.

$$E_b/N_0 = S/N_0 - 10\log R_b - ML_T - DL_T \quad (36)$$

3. 거리측정 성능

거리측정 톤 신호의 성능인 SNR_{RG} 은 식 (33)의 결과와 거리측정 톤의 변조손실(ML_{RG}), 거리측정신호 채널의 대역폭(BW_{RG})에 의해 식 (37)과 같다.

$$SNR_{RG} = S/N_0 - ML_{RG} - 10\log BW_{RG} \quad (37)$$

VI. 결 론

본 논문에서는 위성의 관제시스템을 위하여 설정된 통신링크의 전송방식에 따라 시스템 분석 결과와 성능 분석방법을 제시하였다. Bessel함수로 표현되는 반송파, 데이터 및 거리측정 신호의 변조손실은 PM변조지

수에 따라 변화되고, 동시전송한 경우 상호작용되어 시스템의 성능을 좌우한다.

또한 시스템의 채널성능에 영향을 미치는 반송파 대 P/B 원격측정 데이터의 전력비의 개념을 도입하였고 이 전력비가 반송파의 성능을 좌우함을 알았다. 그리고 본 논문에서 분석한 변조손실과 전력비를 LEO 위성인 다목적 실용위성 TTC시스템의 링크설계에 적용하는 방법을 제시하였고 P/B의 경우 변조지수가 1.51radian이하로 설계되어야 함을 알았다.

본 시스템의 통신링크 설계 방식에서 일반 통신용 링크설계와의 차이점을 제시함으로써 VSAT이나 DAMA-SCPC등 일반화된 통신용 링크설계에 접목할 수 있도록 하였으며, 일반적으로 알려진 위성통신 시스템의 링크설계 방법을 이용하여 쉽게 링크를 설계할 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] TRW, *Controlled Technical Data for Use on KOMPSAT*, TRW, February 1996.
- [2] CCSDS, *Radio Frequency and Modulation Systems*, PART 1 Earth Stations and Spacecraft, CCSDS 401 (4.1.5) B-1, June 1993.
- [3] ESA(European Space Agency), *Radio Frequency and Modulation Standard*, ESA PSS-04-105 Issue 1, December 1989.
- [4] G.Maral and M.Bousquet, *Satellite Communications Systems*, 2nd ED. Wiley, 1994.
- [5] Wiley J. Larson and James R. Wertz, *Space Mission Analysis and Design*, 2nd ED. Microcosm Inc., 1992.
- [6] Jeom-Hun Lee, Dae-Ig Chang, Young Wan Kim, Jae-Ick Choi, "The Optimal Link Performance Analysis for Tracking, Telemetry and Command of the KOMPSAT Satellite", *ITC-CSCC'96*. vol.I, pp.22~25, July 1996.
- [7] 장대익, 이점훈, 김영완, 최재익, "다목적 실용위성 관제시스템의 PFD 및 전력밀도 분포", *대한전자공학회 추계학술대회*, November 1996
- [8] 장대익, 최재익, 김덕년, "저속데이터 전송용 VSAT 통신시스템의 링크설계", *한국통신학회논문지 제19권 제7호*, pp1213~1223, July 1994

저 자 소 개

張 大 翼(正會員) 第 33卷 A編 第 4號 參照



李 點 勳(正會員)

1988년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1989년 2월 ~ 현재 한국전자통신연구원 위성통신연구단 선임연구원. 주관심분야는 위성통신 및 위성 추적 시스템 설계



金 英 完(正會員)

1983년 2월 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사). 1985년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1984년 12월 동양정밀공업(주) 중앙연구소 근무.

1992년 11월 ~ 현재 한국전자통신연구원 위성통신연구단 선임연구원. 주관심분야는 위성통신 및 디지털 통신분야, 마이크로웨이브 디바이스 분야 등



崔 在 益(正會員)

1981년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1983년 8월 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1995년 2월 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사).

1983년 3월 ~ 현재 한국전자통신연구원 위성통신연구단 책임연구원, 지상 H/W 연구실장. 주관심분야는 위성통신 시스템분야, 디지털 변복조 M/W 설계분야등임