

군 저궤도위성통신체계 사용자 링크 설계와 링크버짓 분석

김 동 우*, 송 동 호°

User Link Design and Link Budget Analysis of Military Low Earth Orbit Satellite Communication System

Dongwoo Kim*, Dongho Song°

요 약

본 논문에서는 미래 전장환경에서 우리 군이 필요로 하는 저궤도위성통신체계의 사용자 링크에 대한 링크버짓을 분석한다. 군 저궤도위성통신의 운영개념과 전송통신의 특성을 고려하여 주파수 계획, 채널 구성 등 링크버짓 파라미터를 설정한다. 본 연구에서는 사용자 단말의 종류에 따라 전송속도를 다양하게 설정하고, 전송속도별로 링크버짓 분석결과를 제시한다. 하향링크의 전송속도는 단말 안테나의 수신세기를 나타내는 G/T별로 분석하고, 상향링크의 전송속도는 단말 안테나의 송신 출력인 EIRP별로 분석한다. 이를 통해 군에서 저궤도위성통신체계의 운영개념에 따라 다양한 단말을 구성할 수 있도록 한다.

Key Words : Low Earth Orbit(LEO) Satellite Communication, Link Budget, Military Network

ABSTRACT

In this study, we analyze the link budget for the user link of the low Earth orbit(LEO) satellite communication system required by the South Korean military in the future battlefield environment. Link budget parameters such as frequency planning and channel configuration are set in consideration of the operational concept of military LEO satellite

communication and the characteristics of tactical communication. In this study, the transmission rate is set in various ways according to the terminal type, and the link budget analysis results are presented for each transmission rate. The downlink transmission rate is analyzed for each G/T representing the reception strength of the terminal antenna, and the uplink transmission rate is analyzed for each EIRP, which is the transmit power of the terminal antenna. Through this, the military can configure various terminals according to the operating concept of the LEO satellite communication system.

I. 서 론

군은 미래전에서 유·무인 복합체계를 효과적으로 운용하고 다영역 능력을 통합하기 위해 저궤도위성통신 중심의 초연결네트워크를 구상하고 있다. 군 저궤도위성통신체계의 운영개념에서 지상부 단말은 부대 규모 및 작전환경에 따라 다양하게 구성된다¹⁾. 지상부 단말은 중·대형 차량단말, 이동기지국 차량단말, OTM(On The Move) 단말, OTW(On The Walk) 단말, IoT 단말 등으로 구분된다. 상급부대 지휘소에는 초고속·대용량 전송이 가능한 중·대형 차량단말을 운용한다. 지상 기동무기체계(전차, 장갑차, 자주포), 항공기, 함정, 잠수함 등에는 탑재 가능한 OTM 단말을 운용한다. 이러한 저궤도위성통신 운영개념 구현을 위해서는 통신위성과 지상부 단말 간에 구성되는 사용자 링크에 대한 링크버짓 분석이 필수적이다.

본 논문의 목적은 저궤도위성통신 사용자 링크에 대한 설계와 링크버짓을 분석하는 것이다. 군 운영개념에 부합하는 주파수 계획, 사용자 링크 구성 등을 통해 링크버짓 파라미터를 설정한다. 단말 상·하향 링크의 전송속도를 다양하게 구성하고, 전송속도별로 링크버짓 결과를 제시한다.

II. 사용자 링크 설계 및 링크버짓 조건

링크버짓을 위한 통신위성의 운용조건은 군용 소형 통신위성을 가정하여 표 1과 같이 설정하였다. 빔당

* 본 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(2600-2636-300)

• First Author : (ORCID:0000-0003-3792-6520) Defense Force Research Center, Agency for Defense Development, eastlight3@gmail.com, 연구원, 정회원

° Corresponding Author : (ORCID:0009-0002-9901-8333) Hanwha Systems, dongho37.song@hanwha.com, 연구원, 정회원
논문번호 : 202303-054-C-LU, Received March 22, 2023; Revised March 31, 2023; Accepted March 31, 2023

표 1. 링크버짓을 위한 통신위성 운용조건
Table 1. Communication satellite operating conditions for link budget

파라미터	조건
빔당 Peak EIRP	37.5dBW
위성 G/T	4dB/K
운용 고도 및 최소 고각	600km, 40°
강우 감쇄	ITU-R region-M, 가용도 99.5%

EIRP 및 위성 G/T는 3GPP 표준과 유사한 조건으로 설정하였다. 강우감쇄^[2]는 한반도 주변 해양을 포함하는 강화된 조건으로 ITU-R Region-M 및 Ka 대역 가용도 99.5%를 고려하였다.

저궤도 통신위성은 주파수 대역을 효율적으로 활용하기 위하여 다중 빔을 구성한다. 본 논문에서는 8빔

을 갖는 것으로 설정하였다. 주파수 재사용 개념을 적용한 주파수 계획은 그림 1과 같다. Ka 대역에서 상·하향 링크에 각 1GHz 대역폭을 적용하고, 인접 빔과의 간섭 영향을 최소화하기 위해 1개 빔의 대역폭을 250MHz으로 할당하였다. 표 2는 단말 종류와 상·하향링크 캐리어 심볼율(전송률)과의 관계를 나타낸다. 단말의 크기 및 활용 용도에 맞게 송신 EIRP 및 수신 G/T를 다르게 설정하고, 이에 따라 가용한 심볼율(전송률)을 적용한다. 군사 보안상 운용 주파수와 심볼율(전송률)은 숫자 대신 문자로 표기하였다.

그림 2는 1개 빔의 대역폭에서 각 단말 종류에 맞는 트래픽 캐리어 구성을 나타내고 있다. 통신채널 사이에는 위성과 단말의 이동에 따른 도플러 효과를 고려하여 가드밴드를 설정한다.

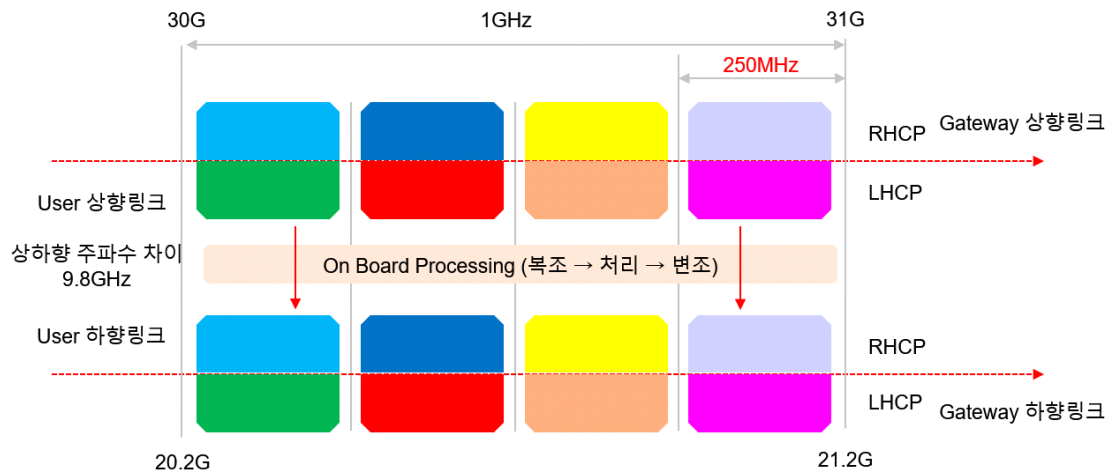


그림 1. 주파수 재사용 개념을 적용한 주파수 계획
Fig. 1. Frequency planning with the concept of frequency reuse

표 2. 단말 종류와 링크 캐리어 심볼율(전송률)과의 관계
Table 2. Relationship between terminal types and link carrier symbol rates

단말 종류	하향링크 캐리어 심볼율(전송률)	상향링크 캐리어 심볼율(전송률)
드론봇, OTW 단말	A Msps(a Mbps)	E Msps(드론봇 e Mbps, OTW ee Mbps) \times 1개
기동형 OTM	B Msps(b Mbps)	F Msps(f Mbps) \times 2개
소형차량단말, 이동기지국차량단말	C Msps(c Mbps)	G Msps(g Mbps) \times 2개
		H Msps(h Mbps) \times 2개
중형차량단말, 대형차량단말	D Msps(d Mbps)	I Msps(i Mbps) \times 2개
		J Msps(j Mbps) \times 2개
		K Msps(k Mbps) \times 개

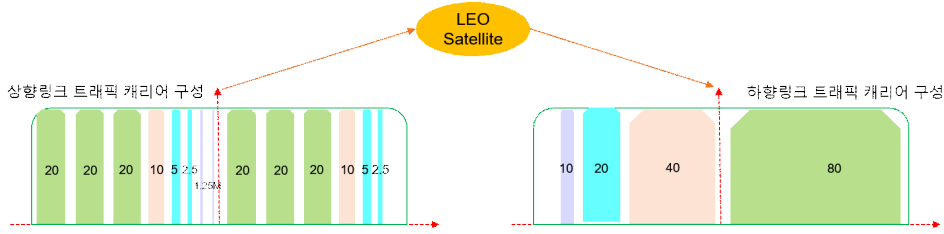


그림 2. 상·하향링크의 트래픽 캐리어 구성
Fig. 2. Traffic carrier composition of uplink and downlink

III. 링크버짓 분석결과

표 3은 사용자 하향링크의 전송속도별 링크버짓^[3,4] 분석결과를 제시한다. 각 전송속도는 단말 안테나의 수신세기를 나타내는 G/T별로 분석하였다. 표 3에서 디지털통신 성능평가에 기준이 되는 잡음전력밀도에 대한 비트에너지 비율(E_b/N_0 [dB], Energy Per Bit to Noise Spectral Density Ratio)은 식 (1)에 의해 계산된다. 본 연구에서 하향링크 E_b/N_0 값은 시스템의 요구 E_b/N_0 및 링크 마진을 충족하도록 입력 파라미터를 조정하면서 계산되었다.

$$E_b/N_{0\ down} = EIRP_{\ carr} + L_{\ path} + L_{\ atmo} + L_{\ scin} + A_{\ rain} + G/T_{\ rece} + k - 10\log_{10}(R_{\ tran}) \quad (1)$$

표 3. 사용자 하향링크 링크버짓 결과
Table 3. Link budget results of user downlink

파라미터	전송속도 [Mbps]			
	a	b	c	d
캐리어 대역폭 [MHz]	10.0	20.0	40.0	80.0
캐리어 EIRP [dBW]	25.4	28.5	31.5	34.5
경로손실 [dB]	-177.7	-177.7	-177.7	-177.7
Atmospheric Loss [dB]	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
Scintillation Loss [dB]	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
강우감쇄 [dB]	-5.3	-5.3	-5.3	-5.3
수신 단말 G/T [dB/K]	7.0	8.5	15.0	24.0
E_b/N_0 [dB]	8.6	7.1	10.6	14.5
요구 E_b/N_0 [dB]	6.0	6.0	9.5	14.0
링크 마진 [dB]	2.6	1.1	1.1	0.5
트래픽 채널 대역 총합	150MHz			
범당 총 전송용량	617Mbps			
트래픽 신호 대역폭 효율	2.47bps/Hz(617Mbps/250MHz)			
8빔 전송용량 [Gbps]	4.94Gbps			

여기에서 $EIRP_{\ carr}$ 는 캐리어 EIRP, $L_{\ path}$ 는 경로손실, $L_{\ atmo}$ 는 대기손실, $L_{\ scin}$ 는 Scintillation 손실, $A_{\ rain}$ 는 강우감쇄, $G/T_{\ rece}$ 는 수신 단말의 G/T, k 는 볼츠만 상수(228.6 dBK), $R_{\ tran}$ 는 전송속도이며, 단위는 표 3에서 제시하는 바와 같다.

표 3에서 트래픽 채널 대역 총합은 전송속도별 캐리어 대역폭의 합(10 + 20 + 40 + 80 = 150MHz)이며, 범당 총 전송용량은 전송속도를 모두 합한 값이다($a + b + c + d = 617Mbps$).

표 4는 사용자 상향링크의 전송속도별 링크버짓 분석 결과를 제시한다. 각 전송속도는 단말 안테나의 송신 출력인 EIRP별로 분석하였다. 표 4의 도출 과정은 사용자 하향링크 분석과정과 동일하며, 상향링크 E_b/N_0 의 계산식은 식 (2)와 같다.

$$E_b/N_{0\ up} = EIRP_{\ carr} + L_{\ path} + L_{\ atmo} + L_{\ scin} + A_{\ rain} + G/T_{\ sate} + k - 10\log_{10}(R_{\ tran}) \quad (2)$$

여기에서 $EIRP_{\ carr}$ 는 캐리어 EIRP, $L_{\ path}$ 는 경로손실, $L_{\ atmo}$ 는 대기손실, $L_{\ scin}$ 는 Scintillation 손실, $A_{\ rain}$ 는 강우감쇄, $G/T_{\ sate}$ 는 위성의 G/T, k 는 볼츠만 상수(228.6 dBK), $R_{\ tran}$ 는 전송속도이며, 단위는 표 3에서 제시하는 바와 같다.

표 4에서 트래픽 채널 대역 총합은 하향링크의 경우와 마찬가지로 전송속도별 캐리어 대역폭의 합($1.25 + 2.5 \times 2 + 5 \times 2 + 10 \times 2 + 20 \times 2 + 20 \times 2 + 20 \times 2 = 156.3MHz$)이며, 범당 총 전송용량은 전송속도를 모두 합한 값이다($e + f \times 2 + g \times 2 + h \times 2 + i \times 2 + j \times 2 + k \times 2 = 564.8Mbps$).

군에서는 운용할 단말의 종류에 따라 상·하향링크의 전송속도를 선택할 수 있다. 하향링크의 경우 안테나 크기 및 전과간섭 특성 등을 고려하여 단말의 전송속도를 다양화할 수 있다. 상향링크의 경우에는 가용 전력, 무게 등에 따라 단말의 전송속도를 다양하게 구성할 수 있다. 단말별로 가용한 송신 EIRP와 수신

표 4. 사용자 상향링크 링크버지트 결과
Table 4. Link budget results of user uplink

파라미터	전송속도 [Mbps]						
	<i>e</i> or <i>ee</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
캐리어 대역폭 [MHz]	1.25	2.5	5.0	10.0	20.0	20.0	20.0
캐리어 EIRP [dBW]	33.3	37.9	41.2	49.6	55.2	60.4	64.2
경로손실 [dB]	-181.2	-181.2	-181.2	-181.2	-181.2	-181.2	-181.2
Atmospheric Loss [dB]	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
Scintillation Loss [dB]	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
강우감쇄 [dB]	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0
위성 G/T [dB/K]	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Eb/No [dB]	8.0	8.0	8.3	10.7	14.5	16.8	18.6
요구 Eb/No [dB]	7.0	7.0	7.0	9.5	11.0	14.0	16.0
링크 마진 [dB]	1.0	1.0	1.3	1.2	3.5	2.8	2.6
트래픽 채널 구성 [개수]	1	2	2	2	2	2	2
트래픽 채널 대역 총합	156.3MHz						
빔당 총 전송용량	564.8Mbps						
트래픽 신호 대역폭 효율	2.26bps/Hz(566Mbps/250MHz)						
8빔 전송용량 [Gbps]	4.53Gbps						

G/T가 제한되기 때문에 1개 빔의 대역폭에서 이러한 단말들을 어떻게 구성하는가에 따라 통신위성의 가능한 전송용량이 달라질 수 있다.

본 연구에서는 심볼 간의 간섭을 줄이기 위한 Roll-off 값으로 0.2를 적용하였고, 도플러 효과를 고려하여 가드밴드를 설정하였다. 도플러 효과는 통신위성과 단말기의 상대운동에 의해 발생하며, 도플러 효과에 의한 주파수 천이 Δf 는 식 (3)에 의해 계산된다⁵⁾.

$$\Delta f = \frac{f_t}{c} \times V \cos A \quad (3)$$

여기에서 f_t 는 운용 주파수(Hz), c 는 광속(m/s), V 는 위성의 속도벡터(m/s), A 는 위성의 속도벡터와 단말기가 이루는 고각이다.

본 연구에서는 고도 600km에서의 위성속도, 위성 과 단말기 사이의 최대고각 40° 등을 고려하여 최대 1MHz 이내로 설정하였다. 이러한 고려요소와 함께 RF에서의 빔 채널 필터링을 위한 차단대역폭 등의 추가적인 대역폭 점유를 고려하면 실제 가능한 트래픽 채널 대역폭은 감소하게 된다.

하향링크에서는 빔의 트래픽 채널 대역폭 총합이 150MHz, 빔당 전송용량은 617Mbps, 대역폭 효율은 2.47bps/Hz로 분석되었다. 상향링크에서는 빔의 트래픽 채널 대역폭 총합이 156.3MHz, 빔당 전송용량은

564.8Mbps, 대역폭 효율은 2.26bps/Hz로 분석되었다. 이러한 전송용량은 실제 가입자에 제공되는 전송용량과는 다를 수 있다. 동기 정보, 각종 Header 정보, 군사 목적의 강화된 암호화 정보비트 등을 고려하면, 링크버지트 전송용량 대비 실제 가입자 전송속도는 감소될 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 저궤도위성통신체계의 사용자 링크에 대한 설계안과 링크버지트 분석결과를 제시하였다. 군 저궤도위성통신의 운영개념과 전송통신의 특성을 고려하여 다양한 단말의 상·하향링크 전송속도를 설정하고, 이에 대한 링크버지트 결과를 제시하였다. 하향링크의 전송속도는 단말 안테나의 G/T별로 분석하고, 상향링크의 전송속도는 단말 안테나의 EIRP별로 분석하였다. 이를 통해 군에서 저궤도위성통신체계의 운영개념에 따라 다양한 단말을 구성할 수 있도록 하였다.

통신위성의 전송용량은 빔 내에서 단말들을 구성하는 방법에 따라 달라질 수 있다. 또한, 위성의 EIRP 및 G/T에 따라서 사용자 상·하향 링크의 전송용량이 변경될 것이다. 본 연구에서는 저궤도위성통신체계의 사용자 링크 개념설계를 제시하였다. 실제 체계개발을 위해서는 위성의 성능과 함께 앞서 논의된 단말의 구성 등에 관한 심층 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] D. Kim, "Operational concept of military low Earth orbit satellite networks and operational effectiveness analysis," *J. KICS*, vol. 48, no. 4, pp. 478-481, Apr. 2023.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.4.478>)
- [2] Recommendation ITU-R PN.837-1, *Characteristics of precipitation for propagation modelling*, ITU, 1994.
- [3] D. Roddy, *Satellite Communications*, McGraw-Hill, pp. 279-317, 1996.
- [4] G. Maral and M. Bousquet, *Satellite Communications Systems*, John Wiley & Sons, pp. 15-69, 1994.
- [5] J. Lee, B. Lee, B. Moon, and Y. Chang, "Animal tracking system using the doppler effect for single LEO satellite," *J. KICS*, vol. 34, no. 11, pp. 61-69, Nov. 2006.
(UCI: G704-000344.2006.34.11.008)