

모의위성망을 활용한 위성통신체계의 링크성능 분석

정회원 장재웅*

The link performance analysis of the satellite communications system using satellite network simulator

Jaewoong Jang* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 위성망 자원할당 및 분석 툴(SNRAT : Satellite Network Resource Allocation & Analysis Tool)을 활용하여 위성통신체계에 대한 링크성능 분석결과를 제시하였으며, 모의위성망을 구성하여 성능분석 툴로 예측한 링크 성능을 검증하였다. 통신위성은 지상장비와 달리 정지궤도에 발사하여 궤도 내 운용을 시작하면, 더 이상 성능의 수정이나 수리가 불가능하고, 운용 가능한 수명이 제한되어 있기 때문에 적기에 배치하여 운용하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 위성 발사 전 위성망 자원할당 및 분석 툴을 이용하여 통신품질, 지원용량 및 항재밍 성능 등을 예측하고, 모의위성망을 구축하여 지상단말과 망제어기와 같은 지상장비 및 중계기 규격의 적합성을 증명하였으며, 여러 망 운용 시나리오에 대한 시험을 통해 최적의 운용방안을 도출하였다.

Key Words : Link Budget Analysis, Satellite Network, Satellite Communication, Satellite Network Simulator

ABSTRACT

In this paper, it is proposed the link performance analysis results using SNRAT(Satellite Network Resource Allocation & Analysis Tool) and verified the anticipated results by satellite communication network simulator. A communication satellite cannot be corrected or fixed for the error in orbit operation after launching unlike the ground operation equipment and has a restricted operation life. So, it is important to make possible to use satellite communications in the proper time. It is expected the link BER(Bit Error Rate), throughput and AJ(Anti-Jamming) performance using SNRAT tool before launching. And it is verified the performance of the repeaters and ground equipment specification using the satellite network simulator and is extracted the optimum operational scenarios through the tests of various network operational plans.

I. 서론

2006년 8월 국내 최초로 군용 위성중계기를 탑재한 민군겸용위성 무궁화 5호가 발사되었으며, 통신 서비스를 위한 최종 시험단계에 있다.

위성통신은 한 개의 통신위성으로 한반도 또는 그 이상의 지역에 대한 통신 및 방송 서비스를 제공할 수 있다는 장점을 가지나, 발사 후에는 중계기

성능의 변경 및 고장 발생 시 수리가 불가능하며, 위성에 탑재된 배터리 제한으로 위성 운용 수명이 한정된다.

따라서, 중계기 수량, 중계기별 대역폭, 수신성능 및 최대출력전력 등의 중계기의 전력 및 대역 측면의 규격과 단말 송수신 성능, 모뎀의 BER 요구성능 등을 결정하기 위한 위성링크 성능분석 툴을 개발하고^[1-4] 지상장비에 대한 운용자의 다양한 요구

* 국방과학연구소 위성통신체계부 (jjw0302@hanmail.net)

논문번호 : KICS2007-03-103, 접수일자 : 2007년 3월 6일, 최종논문접수일자 : 2007년 5월 17일

를 검증하기 위해서 위성링크 테스트베드를 개발하여 운용할 필요가 있다.¹⁵⁾

위성망 운용에서 위성링크 성능분석 틀을 개발하는 이유는 다음과 같다. 첫째로, 다양한 형태의 단말을 한정된 중계기에 할당하여 최대의 지원용량(throughput)을 가지도록 모의실험을 통해 망을 구성하여야 한다. 동일하거나 유사한 중계기 입력 전력밀도를 가지고 망을 운용하는 일반 상용위성망과는 달리 군 위성통신체계는 한정된 중계기에 매우 상이한 송수신성능을 가지는 지상단말을 운용하므로 망을 구성하는 방식에 따라 동일한 중계기 전력 및 대역자원에 대한 지원 가능용량이 다르게 나타난다. 따라서, 다양한 망 구성 시나리오에 대한 망 운용성능 분석이 필요하다. 둘째는 항재밍 능력에 대한 분석이 요구된다. 위성통신체계는 동시에 특정한 지역에 대한 통신서비스가 가능하다는 장점을 가지나, 통신영역안의 허가받지 않은 단말의 전자전 위협에 노출되어 있으므로, 적의 전자전 위협에 대한 정확한 분석이 요구된다. 본 논문에서 개발된 링크성능 분석 틀은 통신 운용특성에 따라 항재밍 성능 분석이 가능하도록 제작하였다.

또한, 모의위성망 테스트베드를 개발하는 이유는 다음과 같다. 첫째로, 재밍에 대한 통신지원 능력 및 생존성을 검증하기 위해서는 위성체계가 가지는 항재밍 능력에 대한 분석을 실시하여야 하고 시험을 통해 실제로 분석결과가 유효한지에 대한 검증이 필요하다. 그러나, 위성의 RF장비는 고출력 재밍에 의해 성능이 열화될 가능성이 있으므로 단지 검증을 위한 용도로 실위성을 대상으로 재밍시험을 하기에는 큰 위험부담이 따르기 때문에 테스트베드를 구축하여 시험하는 것이 유용하다. 둘째로, 위성은 운용가능한 수명이 정해져 있기 때문에 통신 운용 비용절감을 위해 가능한 빠른 시기에 운용 가능하도록 해야 한다. 따라서, 위성 발사 이전에 개발된 여러 종류의 지상단말에 대한 인증시험 및 망과 단말 관리를 위한 운용국 장비에 대한 기본적인 시험을 미리 진행할 경우 실제 위성을 발사한 이후 시험하는 경우보다 운용시간을 최소화하여 사용자 필요로 하는 시기에 사용하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 통신품질 분석, 지원가능 용량분석, 항재밍 성능분석 등의 위성통신망을 분석하기 위한 링크버킷 분석 틀을 자체개발하였으며, 그 분석결과를 모의위성망 테스트베드를 통하여 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장의 서론 및 연구배경에 이어 2장에서는 위성망 자원할당 및 분

석 틀에 대해 구체적으로 서술하고, 3장에서는 분석 틀의 검증을 위한 모의 위성망 구축에 대해 기술하고, 4장에서는 위성망 자원할당 및 분석 틀을 이용한 모의실험결과 및 모의위성망을 활용한 검증을 나타내었으며, 5장은 본 논문의 결론이다.

II. 위성망 자원할당 및 분석 틀 개발

위성링크는 다음과 같은 신호흐름을 가진다. 상향링크는 송신단말에서 특정 전력(EIRP_T)을 가지는 캐리어를 송출하면, 상향링크 경로(L_U) 및 강우감쇄(L_{U,RAIN})를 받고 위성 중계기에 도달한다. 이 캐리어는 중계기 수신안테나, 주파수 변환과 증폭모듈 및 송신안테나를 거쳐 증폭된다. 하향링크는 증폭된 캐리어가 하향링크 경로(L_D) 및 강우감쇄(L_{D,RAIN})를 받고 수신단말에 도달한다. 군 위성링크에서 일반 상용 위성링크와 다른 점은 적에 의한 의도적인 전파방해(EIRP_J)를 고려해야 한다는 것이다. 위성망 자원할당 및 분석 틀에서 고려한 위성링크 구성은 그림 1과 같다.

일반적으로 링크 성능분석 틀 구성에서 가장 기본이 되는 것은 각 링크에 대한 통신품질을 계산하는 것이다. 통신품질을 계산하기 위한 수식은 중계기 이득 및 전력 제어모드에 따라 다르게 계산될 수 있으며, 본 논문에서는 일반 중계기 운용모드(수동중계기/고정이득모드)에의 통신품질 계산방법과 재밍에 대응하는 중계기 운용모드(능동중계기/리미트모드)에 대한 통신품질 분석방법을 서술하였다.

2.1 수동중계기/고정이득모드에서의 통신품질 분석

수동중계기는 일반 상용 중계기에 널리 사용되는

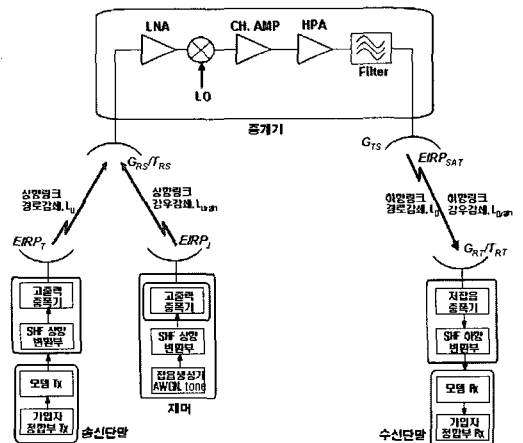


그림 1. 성능분석을 위한 위성링크 구성도

방식으로 신호의 증폭 및 주파수 변환기능 만을 가지고 있는 중계기를 의미하며, 고정이득모드는 중계기로 입력되는 신호의 크기와 관계없이 일정한 이득으로 증폭시켜 하향링크로 보내는 중계기 이득모드를 의미한다. 수동중계기/고정이득모드에서 통신품질 분석방법은 다음과 같다.

상향링크에서의 링크성능은 중계기 수신단에서 캐리어 대 잡음비($C/(N_o+N_j)_{up}$)로 나타내어지는데, 이는 다음과 같은 수식으로 계산될 수 있다.

$$\left(\frac{C}{N_o+N_j}\right)_{up} = \frac{\frac{EIRP_T G_{RS}}{L_U L_{U,rain}}}{kT_{RS} W_S + \frac{EIRP_J G_{RS}}{L_U L_{U,rain}}} \quad (1)$$

여기에서, $EIRP_T$, $EIRP_J$ 는 송신단말 및 재머의 출력전력, G_{RS} , T_{RS} 는 중계기 수신안테나 이득 및 수신잡음온도, L_U , $L_{U,rain}$ 는 상향링크 경로감쇄 및 강우감쇄, k 는 볼츠만상수, W_S 는 신호의 대역폭을 각각 의미한다.

마찬가지로 하향링크에서의 링크성능은 수신단말에서 캐리어 대 잡음비($C/(N_o+N_j)_{down}$)로 나타내어지는데, 이는 다음과 같은 수식으로 계산될 수 있다.

$$\left(\frac{C}{N_o+N_j}\right)_{down} = \frac{\frac{EIRP_{SAT} G_{RT}}{L_D L_{D,rain}}}{kT_{RT} W_S} = \frac{EIRP_{SAT} G_{RT}}{L_D L_{D,rain} kT_{RT}} \quad (2)$$

여기에서, $EIRP_{SAT}$ 는 위성의 출력전력을, G_{RT} , T_{RT} 는 수신단말 수신안테나 이득 및 잡음온도를, L_D , $L_{D,rain}$ 는 하향링크 경로감쇄 및 강우감쇄를 각각 의미한다.

전체링크에 대한 캐리어 대 잡음비($C/(N_o+N_j)_{total}$)는 상향링크 캐리어 대 잡음비, 하향링크 캐리어 대 잡음비, 중계기 및 단말의 증폭기 비선형성에 의한 캐리어 대 간섭 비($(C/I_o)_{rep}$, $(C/I_o)_{ter}$)와 인접위성에 의한 간섭($(C/I_o)_{ASI}$) 등을 고려하여 계산한다.^[6]

$$\left(\frac{C}{N_o+N_j}\right)_{total}^{-1} = \left(\frac{C}{N_o+N_j}\right)_{up}^{-1} + \left(\frac{C}{N_o+N_j}\right)_{down}^{-1} + \left(\frac{C}{I_o}\right)_{rep}^{-1} + \left(\frac{C}{I_o}\right)_{ter}^{-1} + \left(\frac{C}{I_o}\right)_{ASI}^{-1} \quad (3)$$

모뎀의 BER 성능을 결정하는 비트 에너지 대 잡음비($E_b/(N_o+N_j)_{total}$)는 총 캐리어 대 잡음비에 전송 속도(R_b)를 나눈 값으로 계산될 수 있다.^[7]

$$\left(\frac{E_b}{N_o+N_j}\right)_{total} = \left(\frac{C}{N_o+N_j}\right)_{total} \times \left(\frac{1}{R_b}\right) \quad (4)$$

2.2 능동중계기/리미트모드에서의 통신품질 분석
 능동중계기는 신호를 기저대역으로 바꾸어 변복조를 수행하는 OBP(On-Board Processing) 방식의 능동중계기와 수신신호를 기저대역까지 하향변환하지 않고, RF 신호상에서 역도약·여과·도약을 수행하는 DRT (Dehop-Rehop Transponder)방식의 능동중계기가 있는데,^[8] 본 논문에서는 무궁화 5호 중계기에 적용되는 DRT 방식에 대해 서술하였다. 리미트모드는 입력되는 수신신호의 크기에 따라 이득을 가변하여 일정한 출력을 송출하는 중계기 이득모드를 의미한다.

DRT 중계기는 도약하는 신호에 대한 역도약과정을 거쳐서, 특정대역에 신호를 고정시킨 후, 신호대역에 대해 그룹필터를 통한 대역통과여과를 거쳐서 신호대역이외의 대역에 존재하는 재밍신호를 걸러낸다. 그림 2에 DRT 방식의 중계기 구성도를 간략하게 나타내었다.

그림1과 그림 2의 중계기 구성도를 비교해 보면, 수동 및 능동중계기에서 중계기의 DRT 모듈 이전까지는 동일한 링크 구성을 갖는다. 따라서, DRT 중계기의 상향링크 캐리어 대 잡음비는 수동 중계기와 동일한 값(식 (1))을 가진다.

동일한 중계기에 다수의 신호를 송신 경우에 대해 (A) 지점에서 총 수신 신호(S_T)를 $S_T = \sum S$ 이라고 하면, (A) 지점에서 원하는 신호, 재머 및 신호를 포함한 총 수신 전력(P_T)은 식 (5)와 같다.

$$P_T = S_T + J + N = \sum S + J + N \quad (5)$$

여기에서, S , J 및 N 는 각각 그림 2의 (A) 지점에서 신호, 잡음 및 재머 전력을 의미한다.

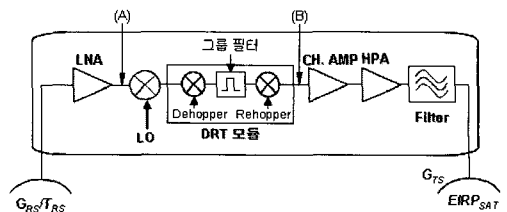


그림 2. DRT 방식의 능동중계기

재머의 대역폭을 W_{jammer} , 그룹필터의 대역폭을 W_G , 그룹필터 대역폭 대비 재밍이 되는 비율을 ρ 라고 하면, 위의 총 수신 전력이 그룹 필터를 지난 후 (B) 지점에서 총 전력(P_T')은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$P_T' = S_T' + J + N' = \Sigma S' + \rho \times W_G \times J / W_{jammer} + N' \quad (6)$$

고정된 출력 전력(P_m)을 가지는 리미트모드 중계기에서 (B) 지점의 원하는 신호의 출력 레벨(P_{SS})은 식 (7)과 같다.^[9-10]

$$P_{SS} = \frac{1}{L_S} \frac{S'}{P_T} P_m \quad (7)$$

여기에서, L_S 는 리미터 동작에 의한 소신호 감쇄를 의미하며, 통상 0dB에서 6dB 사이의 값을 갖는다. $S'/(L_S \cdot P_T)$ 를 f_S 로 치환하면 이는 간단하게 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{SS} = f_S P_m \quad (8)$$

f_S 는 모든 신호, 재밍 및 잡음을 포함한 총 수신 전력에서 1개의 신호가 차지하는 전력의 비를 의미한다. (B) 지점에서 원하는 신호를 제외한 다른 신호, 열 잡음 및 재밍 전력에 의한 출력 전력(P_{OS})은 식 (9)와 같다.

$$P_{OS} = (1 - f_S) P_m \quad (9)$$

(6)의 수식에서 신호의 경우 감쇄가 없으나, 재밍 전력의 경우 필터에 의해 여과되지 않은 전력만이 하향링크로 전송된다. 따라서, DRT 모듈의 이득을 0dB로 가정하면 총 수신전력 P_T 는 DRT 중계기에서 재밍이 여과된 P_T' 로 대체되므로, DRT 중계기에서 중계기에 유입되는 전체 전력 대 신호 전력의 비를 의미하는 f_S 값이 수동중계기에 비해 높아지며, 재밍 전력에 의한 전력 탈취 효과를 감소시킨다.

DRT/리미트모드 중계기에서 하향링크 캐리어 대 잡음비는 다음과 같이 계산될 수 있다.^[9-10]

$$\left(\frac{C}{N_o + N_j} \right)_{down} = \frac{f_S P_m \frac{G_{TS} G_{RT}}{L_D L_{D,rain}}}{(1 - f_S) P_m \frac{G_{TS} G_{RT}}{L_D L_{D,rain}} + k T_{RT}} \quad (10)$$

총 캐리어 대 잡음비와 비트 에너지 대 잡음비는 각각 식 (3)과 식 (4)와 동일하다.

2.3 위성망 자원할당 및 분석 틀의 구성

동일한 수준의 RF성능을 가지는 단말간 개별링크에 대한 성능분석은 중계기 이득제어모드에 따라 1항 및 2항에서 도출된 수식을 이용하여 분석이 가능하다. 그러나, 분석대상의 위성체계는 운용목적에 따라 고정용, 차량용(X), 차량용(Ka) 수상함용, 휴대용, 수중함용 단말 등 송수신 성능이 다양한 단말이 동일한 중계기에 운용되어야 하고, 운용목적에 따라 링크A, 링크B, 링크C 등 waveform 구성과 다중접속방식이 상이한 다양한 링크로 구성된다. 본 논문에서 검토한 링크종류는 표 1과 같다.

링크A는 상용위성망에서 주로 사용되는 대용량 전송을 위한 waveform 구성을 가지며, 링크 B는 주파수 도약기능이 추가되어 항재밍 및 저피탐 능력이 강화되었으며, 링크C는 중계기에 도약 및 여과 기능이 추가되어 가장 높은 생존성을 가진다.

위와 같이 한정된 중계기로 송수신성능이 상이한 단말에 다양한 종류의 링크를 지원해야 하므로 개별 위성링크에 대한 성능분석에서 더 나아가 다양한 체계 성능 및 운용요구 만족 여부에 대한 분석이 가능해야 한다. 위성망 자원할당 및 분석 틀(SNRAT)을 이용한 체계 성능 분석 절차를 그림 3에 나타내었다.

표 1. 위성통신체계 제공링크

구분	링크A	링크B	링크C
중계기	수동중계	수동중계	DRT 방식의 능동중계
다중접속방식	FDMA	FH-CDMA	FH-FDMA
waveform	PSK 계열	FSK 계열	FSK 계열
링크할당방식	사전할당방식	요구할당방식	요구할당방식
주파수도약기능	없음	있음	있음

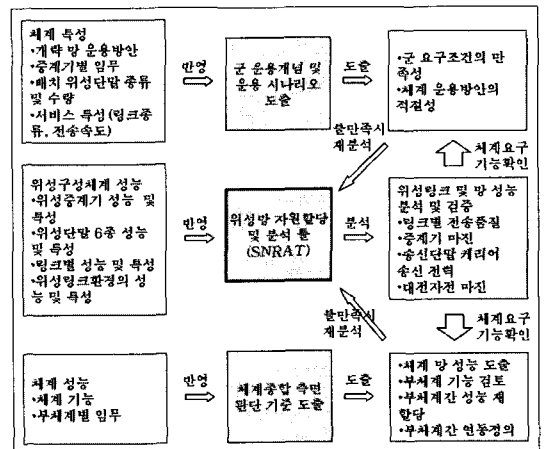


그림 3. SNRAT 틀의 구성 및 분석절차

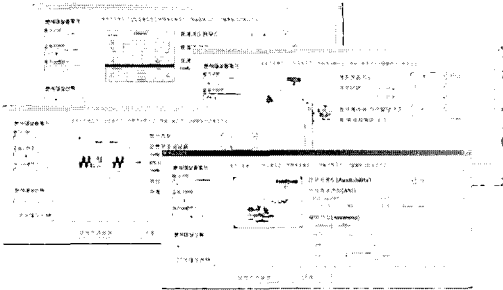


그림 4. 위성망 자원할당 및 분석 틀의 분석창

위성망 자원할당 및 분석 틀에서는 분석결과가 체계특성을 반영한 군 운용개념 및 시나리오를 토대로 운용 요구조건에 대한 기준과 체계성능을 반영한 체계 성능 요구조건에 대한 기준을 만족하는지를 확인하고 불만족 시 망 구성을 재배치 및 망자원을 재할당하여 체계의 망 운용요구 기준을 만족할 때까지 다시 분석하는 알고리즘을 가진다. 그림 4에서는 위성망 자원할당 및 분석 틀의 분석창을 나타내었다.

Ⅲ. 모의 위성망 시뮬레이터 개발을 통한 위성통신링크 테스트베드 구축

위성통신체계는 발사 이후 정지궤도에 안착되면, 위성체의 자세제어 등을 위해 자체 배터리를 지속적으로 소모하기 때문에 가능한 위성단말과 운용국과 같은 개발 지상장비의 기능 및 성능 시험을 빠른 시

기에 수행하는 것이 중계기 운용 효율을 높이는 데 유리하다. 위성 발사 이후, 위성의 버스 및 중계기의 시험 기간 동안 개발 지상장비에 대한 기능 및 성능의 운용 적합성 판정을 위한 시험을 실시하였다.

이 시험을 위해 실위성을 대체할 수 있는 모의위성을 개발 및 구축하였으며, 다음과 같은 기능을 수행할 수 있도록 위성통신링크 시험을 위한 테스트베드를 구축하였다. 개발된 모의 위성망은 다음과 같은 기능을 가진다.

- X 및 Ka 대역 수동중계기능
- X 및 Ka 대역간 교차지연 수동중계기능
- DRT(Dehop-Rehop Transponder) 방식의 능동중계기능
- 위성 지연시간 모사를 위한 지연모사기능
- 실 위성 중계기(무궁화 5호 위성 군용중계기)와 동일한 수준의 이득제어 기능

실 위성과 동일한 수준의 기능 및 성능을 가지는 모의중계기의 구성도는 그림 5와 같다.

3.1 모의위성링크와 실위성링크간 비교

모의위성망은 가능한 실위성망과 유사한 링크환경을 가지도록 모사한 것이지만, 여러 측면에서 차이를 가진다. 모의위성링크와 실위성링크간 가장 대표적인 차이는 단말과 위성간 거리차이에 의한 경로감쇄와 전파지연이다.(표 2) 단말-위성간 거리 차이는

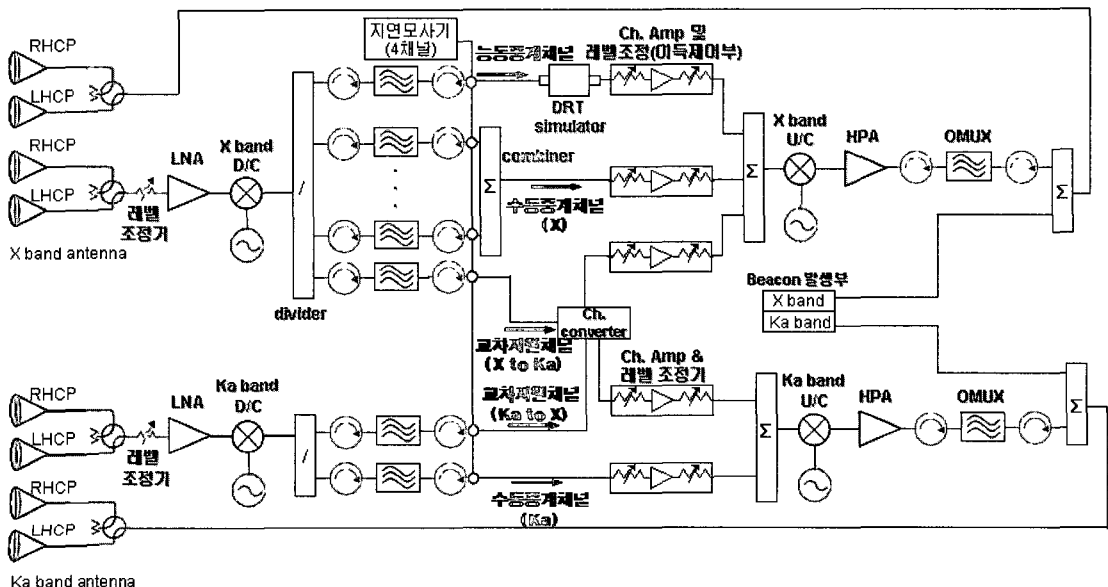


그림 5. 모의 중계기 구성도

표 2. 모의위성망과 실위성망간 환경차이

항목	모의위성	실위성
단말-위성간 거리	약 1.05km	약 37,000km
위성지연	동시 최대 4채널 지원가능	모든 채널발생

표 3. 모의위성망 vs 실위성망(강우운용조건)

항목	모의위성망	실위성망	비고
송신단말 출력(dBW)	43.0	43.0	
상향링크 주파수(GHz)	8.26	8.26	
상향경로감쇄(dB)	111.2	202.3	91.1dB 차이
상향강우감쇄(dB) ^[6]	2.36	2.36	@99.98% 가용도
중계기 G/T(dB/K) ^[11]	-82.0	9.1	상향경로 감쇄 보정
상향링크 C/N ₀ (dBHz)	78.4	78.4	
중계기이득(dB)	24.9	116	하향경로 감쇄 보정
중계기 EIRP(dBW)	-59	32.1	
하향링크 주파수(GHz)	7.61	7.61	
하향경로감쇄(dB)	110.5	201.6	91.1dB 차이
하향강우감쇄(dB) ^[6]	1.92	1.92	@99.98% 가용도
수신단말 G/T	20.0	20.0	
강우에 의한 G/T 감쇄 ^[6]	1.2	1.2	
하향링크 C/N ₀ (dBHz)	73.5	73.5	
전체링크 C/N ₀ (dBHz)	71.6	71.6	

모의위성망은 약 1.05km, 실위성망은 약37,000km로 이로 인해 많은 경로감쇄 측면의 차이가 발생한다. 상향링크 경로감쇄는 모의 중계기 안테나와 저잡음 증폭기 사이에 가변감쇄기를 설치하여, 실위성링크와 동일한 수준의 경로감쇄를 가지도록 모사하였다. 하향링크 경로감쇄는 모의중계기내의 채널증폭기의 여러 단의 가변감쇄기를 설치하여 실위성링크와 동일한 수준의 경로감쇄를 가지도록 모사하였다. 전파 지연은 실위성을 운용할 경우

1-hop 통신을 가정할 때, 모든 채널에서 약 250ms의 지연이 발생한다. 모의위성에서는 2기의 지연모사기를 통해 총 4채널(1기당 2개 채널 지연가능)에 대해 실위성과 동일한 지연이 나타나도록 구성하였다.

모의위성링크와 실위성링크간 망운용 환경을 고려한 링크버짓(X대역)은 표 3과 같다.

3.2 모의중계망 시험 구성

모의위성망은 다양한 형태의 지상운용단말, 단말 관리와 망계획 등의 기능을 수행하는 망제어 및 관

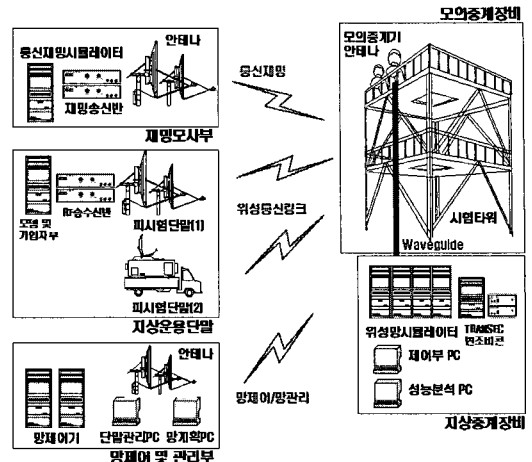


그림 6. 모의위성망 시험 구성도

리부, 여러 waveform 형태를 가지는 재밍을 생성하여 송출하는 재밍모사부, 실 위성 중계기를 모사한 모의중계장비와 모의중계장비의 제어와 성능분석을 담당하는 지상중계장비로 구분된다. 모의위성망 시험구성도는 그림 6과 같다.

IV. 모의실험 및 시험결과 분석

본 논문에서는 일반 상용 위성통신에서 고려하는 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널 뿐만 아니라, 다양한 재밍 채널에서의 위성링크 단말간 링크에서의 통신품질, 중계기별 최대지원가능 용량의 예측, 재밍 시 링크 항재밍 성능 분석을 가능하게 하는 독자적인 위성통신링크 성능분석 틀을 개발하여 위성통신체계의 통신링크 지원가능 용량, 가입자 수 및 생존성을 분석하였다.

또한, 중계기 운용효율을 높이기 위해 모의 위성 중계기를 개발하여 위성단말과 운용국과 같은 지상 장비에 대한 시험평가를 실시하였다.

위성링크시험은 단말간 개별 링크에 대한 링크 통신품질 예측 및 분석, 중계기 최대 지원가능용량 예측 및 분석과 다양한 재밍 운용환경에서의 항재밍 성능분석으로 구분하여 실시하였다. 각각의 시험 과정 및 결과는 다음과 같다.

4.1 개별 링크에 대한 성능시험

전체 위성망은 여러 주파수 대역별 중계기의 조합으로 구성되며, 각 중계기는 개별 위성링크의 조합으로 구성된다. 따라서, 전체 위성망의 지원용량 (throughput) 및 성능을 분석하기 위해서는 개별 링

크에 대한 정확한 성능 예측 및 분석이 필요하다.

개별 링크에 대한 성능시험은 수신단말에서의 통신품질을 나타내는 송신단말 출력에 대한 케리어 대 잡음비(EIRP vs C/N₀) 측면의 분석뿐만 아니라, 단말별 최소 수신레벨을 예측하고 링크 상의 각 신호 및 잡음 이득을 정확하게 정의할 수 있는 레벨 정확도, 각 단말별 송신출력의 정확성에 대한 시험을 수행하였다.

중계기 채널별로 몇 가지 대표적인 케리어를 송출하여(45dBW/55dBW/65dBW), 수신단말에서의 총 케리어 대 잡음비와 수신케리어 전력을 측정하고, 위성망 지원할당 및 분석 틀에서 예측한 결과와 비교하였다. 중계기 채널별 총 케리어 대 잡음비 예측 및 측정결과 비교는 그림 7에 수신케리어 전력의 예측 및 측정결과 비교는 그림 8에 각각 나타내었다.

측정결과 채널 및 송신출력전력에 따라 차이는 있으나, 분석 틀의 예측과 실측간 차이가 최대 2dB

를 초과하지 않았다. 이는, 채널별 지상단말의 송신 출력 및 중계기 이득의 오차에 인한 것으로 판단되며 시스템에서 예상하는 오차범위 안에 있으므로 링크 운용상 큰 문제가 되지 않을 것으로 예상된다.

4.2 중계기별 최대 지원용량 시험

현 시점에서 단말 종류별로 소수의 시제단말만 제작하였으므로, 운용 가능한 지상단말은 제한적이다. 따라서, 중계기에 소수의 케리어가 존재하는 경우만 시험할 경우 단말의 양산이 완료된 시점에서 원하는 수준만큼 용량의 지원이 가능한지에 대해 판단하기 어렵다. 중계기에 소수 케리어만 존재하는 경우에 비해 중계기 전대역을 운용하는 경우(full loading 조건)에 중계기 출력이 상승함에 따라 TWTA의 비선형 동작 및 인접채널에 의한 간섭 등이 발생할 수 있다. 따라서, 중계기 대역에 모든 케리어가 점유되었을 때 각각의 케리어가 소수 케리어 운용의 경우와 동일한 결과가 나오는지에 대한 시험이 필요하다.

중계기별 최대 지원용량 시험은 다음과 같은 순서로 실시하였다.

- 절차 1) 중계기 대역별(X/Ka)로 전대역을 점유하도록 넓은 대역을 가지는 여러 케리어를 구성한다.
- 절차 2) 시험대상 케리어에 대해 BER 성능이 10⁻⁷ 수준이 나올 때까지, 송신단말전력을 낮춘다.
- 절차 3) 소수 케리어에서 운용의 경우에도 절차1, 2의 시험을 수행한다.
- 절차 4) 전대역 점유 시와 소수 케리어 운용 시의 송신단말의 케리어 EIRP 대 BER(전체링크 C/N₀) 시험결과가 동일하게 나오는지 확인한다.

그림 9에 Ka대역의 중계기 최대지원용량 시험 스펙트럼을, 표4에 최대지원용량 운용조건과 소수케리어 시험조건에서의 통신품질이 10⁻⁷이 나오는 송신단말 전력과 전체링크 C/N₀에 대한 시험결과에 대한 비교를 각각 나타내었다.

표 4의 결과를 보면 최대 지원용량 운용조건과 2개의 케리어만 존재하는 경우에 있어 동일한 단말 EIRP에 대한 수신 케리어 대 잡음비는 거의 같은 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 중계기에서 어느 정도 충분한 백오프를 가지고 운용하고 있어서, 최대지원기능용량 조건에서도 소수 케리어 운용과 거의 유사한 선형성을 유지하고 있기 때문인 것으로 예상되며, 인접채널에 의한 간섭도 무시할 만한 수준인 것으로 판단된다. 따라서, 양산 이후에

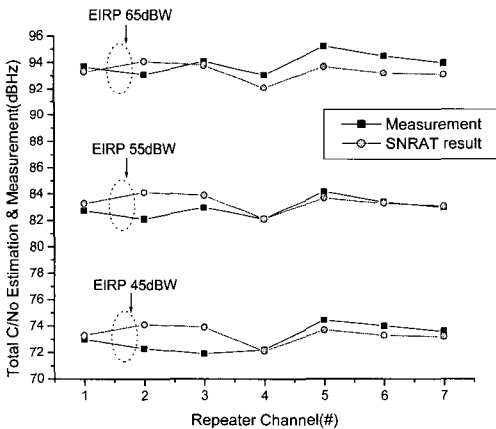


그림 7. 중계기 채널별 총 C/N₀ 예측 vs 측정결과

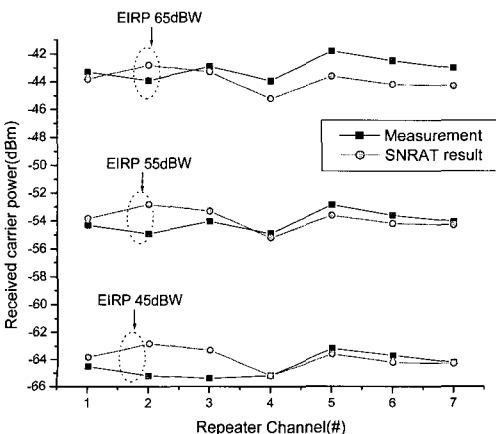


그림 8. 중계기 채널별 수신 케리어 전력 vs 측정결과

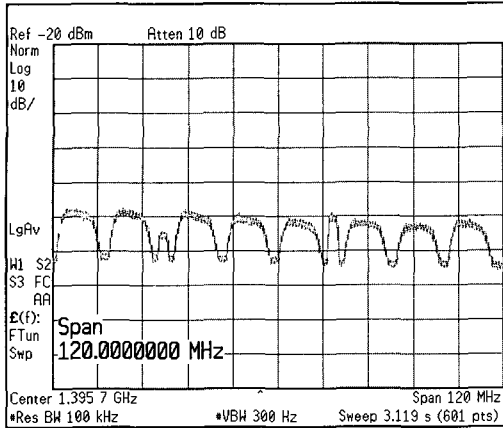


그림 9. Ka대역 중계기 최대지원용량 시험 스펙트럼

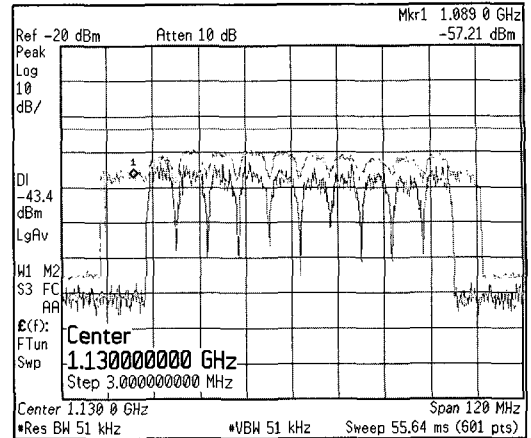


그림 10. 부분대역재밍 스펙트럼($p=0.8$)

표 4. 최대지원용량 vs 소수케리어 시험

단말연결성	항목	최대지원용량	소수케리어운용
단말 A송신, 단말 B수신	EIRP	40dBW	40dBW
	C	-37.7dBm	-37.6dBm
	N_0	-106.2dBm/Hz	-106.2dBm/Hz
	전체링크 C/ N_0	68.5dBHz	68.6dBHz
	BER	10^{-7}	10^{-7}
단말 B송신, 단말 A수신	EIRP	42dBW	42dBW
	C	-62.7dBm	-62.5dBm
	N_0	-131.4dBm/Hz	-131.4dBm/Hz
	전체링크 C/ N_0	68.7dBHz	68.9dBHz
	BER	10^{-7}	10^{-7}

표 5. 항재밍 시험결과(부분대역 재밍)

항목	결과	비고
재밍타입	부분대역재밍	
부분대역비	0.8	
J/S비	28dB	재밍 대 신호전력비
예상 E_b/N_0	10.7dB	10^{-3} BER 예측
데이터품질	3×10^{-3}	BER 성능측정
음성품질	음성통화 가능	정상적인 방법 측정

도 중계기 대역이 지원하는 최대용량운용이 가능할 것으로 예상된다.

4.3 항재밍 성능 시험

위성통신은 통신가능영역에 있는 인가받지 않은 단말에 의해 의도적인 전자적인 위협을 받을 수 있는 가능성을 가지고 있으므로, 위성링크에 대한 항재밍 성능에 대한 분석 및 이에 대한 시험이 요구된다.

위성통신링크에 대한 항재밍 성능시험이 매우 중요함에도 불구하고, 실 위성중계기에 리미트모드로의 운용 전환 또는 중계기 이득의 하향조정 등 전자전 위협 대응이 충분히 준비되지 않은 상태에서 재밍을 송출하여 시험을 진행하는 것은 재밍의 유입으로 인해 위성중계기의 TWTA가 포화에 이룸에 따라 자칫 위성중계기의 수명단축 또는 최악의 경우 고장을 일으킬 수 있는 위험을 가진다.

모의위성은 지상의 타워에 위치하여 성능의 열화 또는 고장이 나는 경우에도 수리가 가능하기 때문에 이와 같은 시험은 모의위성으로 진행하는 것이

매우 유용하다. 모의위성을 통해 다양한 종류의 재밍위협에 대한 여러 시험을 진행함으로써 위성통신 링크에 대한 항재밍 성능을 도출하고, 재밍 시 대응 시나리오를 구성하는데 있어 큰 도움이 될 수 있다.

항재밍 시험은 다음과 같이 진행하였다.

- 절차 1) 예상되는 재밍 타입(광대역재밍/부분대역 재밍/톤재밍 등) 및 시험레벨(재밍전력 대 신호전력 비 : J/S 비)을 정의한다.
- 절차 2) 다양한 단말간 연결성에 대해 여러 전송 속도를 가지는 데이터 호 및 음성 호를 가지는 링크를 구성한다.
- 절차 3) 여러 재밍 타입에 대해 재밍 전력을 증가 시키면서, 데이터 호의 경우 BER 계측기로 통신품질을 정량적으로 측정하고, 음성 호의 경우 정상적인 방법으로 음성품질저하를 관측한다.

그림 10에는 전체 중계기 대역에 대한 재밍대역의 비율을 나타내는 부분대역비(p) 0.8, 재밍전력 대 신호전력비(J/S)가 28dB가 되는 부분대역 재밍의 스펙트럼을 나타내며, 표 5는 DRT 중계기가 적용된 링크에 대한 시험결과를 간략하게 나타내었다.

분석결과 10^{-3} 의 통신품질을 예측하였으나, 이보

다 약간 저하된 3×10^{-3} 수준의 통신품질을 얻을 수 있었다. 음성품질은 잡음이 증가하고 음질이 저하되는 현상이 있었으나, 통화는 가능한 수준이었다. 수신 측의 스펙트럼상에서 나타나는 도약 패턴은 중계기의 DRT 모듈에서 필터링되지 않은 재밍신호로 인해 전체적으로 잡음이 증가하였으며, 이러한 잡음의 증가가 통신품질의 저하를 가져오는 것으로 판단된다. 따라서, 이보다 높은 항재밍 능력을 가지기 위해서는 도약대역폭을 증가시켜서 주파수확산에 의한 변환이득(Processing Gain)을 높이거나, 케리어에 할당된 변조대역폭을 높여 항재밍 능력을 더욱 향상시킬 수 있는 waveform 적용이 필요할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문은 국내최초로 군용 중계기가 탑재된 무궁화 5호 위성통신 시스템에 대해 위성망 자원할당 및 분석 툴(SNRAT)을 이용하여 링크 성능, 항재밍 성능 및 망 운용 성능을 예측 및 분석하고, 모의위성망을 이용하여 이를 검증한 결과를 나타내었다.

분석 및 검증은 개별 링크에 대한 성능시험, 중계기별 최대 지원용량 시험과 항재밍 성능 시험으로 실시하였다. 개별 링크에 대한 성능시험에서는 중계기별로 단말의 송신전력을 변화시켜가면서, 수신 케리어 전력 및 케리어 대 잡음비를 측정하였다. 측정결과와 SNRAT 툴의 예측결과와 최대 2dB 이하의 오차를 나타내었다. 중계기별 최대 지원용량 시험에서는 최대 지원용량 운용과 소수 케리어 운용에서 40dBW 수준의 송신출력에서 동일한 수준의 C/N. 및 BER 성능(10^{-7} 수준의 통신품질)을 나타내어, 양산 완료 이후의 최대 지원용량 운용 가능성을 확인하였다. 마지막으로 항재밍 시험을 실시하였으며, 0.8의 부분대역비와 28dB의 J/S비를 가지는 부분대역재밍 조건에서 툴의 예측한 결과와 매우 유사한 데이터 및 음성 품질을 나타내어, 적절한 재밍 대응 시나리오를 구축하는데 매우 유용한 시험이 될 것으로 판단된다.

즉, SNRAT 툴로 예측한 링크 및 망운용 성능은 모의위성망에서의 시험결과와 유사함을 확인하였으며, 이로 인해 지상단말 및 망 운용/관제장비 등 개발 위성장비의 신뢰성을 확보하고 무궁화 5호 위성에서의 망 개통시험 시간을 크게 단축하여 한국군의 통신능력의 조기 확장 및 중계기 운용 효율을 증가하는데 기여하였다.

SNRAT 툴은 실위성 채널환경에 맞게 수정 및

보완하여, 무궁화 5호 위성을 경유하는 위성링크 및 망운용 시험 분석에도 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 앞으로 AWGN 채널, 재밍 채널뿐만 아니라 인접위성에 의한 간섭이나 지상 Microwave 망과의 간섭에 의한 영향 분석과 같은 다양한 운용 환경에서의 위성망 성능분석에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] Walter R. Braun, and Teresa M. McKenzie, "CLASS: A Comprehensive Satellite Link Simulation Package," *IEEE Journal on selected areas in communications*, pp.129-137, Jan 1984.
- [2] Yogi Y. Krikorian, Milton K. Sue, and Giadira V. Leon, "Dynamic Proximity Communication Link Analysis Tool for Orbiting Satellites and Ground Assets on Mars," *Aerospace Conference*, 2006 IEEE, Mar 2006.
- [3] Ali Telli, and Alphan Es, "Link Analysis for BILSAT-1," *Aerospace Conference*, 2006 IEEE, Mar 2006.
- [4] Bruce Bennet, Kensing Quock, Jim Marshall, George Kinal and Richard Gibbons, "DVB Link Analysis Using Commercial and Wideband Gapfiller Satellites", *Military Communications Conference*, pp.1206-1211, Oct. 2005.
- [5] James R. Fleming, and David N. Meadows, "Test Facility for SHF(C And Ku-band) Satellite Communications," *Military Communications Conference*, pp.953-956, Nov. 1997.
- [6] G.Maral, M.Bousquet, *Satellite Communications Systems*, JOHN WILEY & SONS, pp.46-73, 2000.
- [7] B.Sklar, *Digital Communications*, PRENTICE HALL pp.155~175, 2001.
- [8] 이광역, 최영균, 안동명, "군용 탑재체 대전자전 기술과 DRT-FH-FDMA 통신방식," *위성 응용산업과 위성개발*, pp.56~68, 2000.
- [9] 장재웅, 백광훈, 사공창대, "군 위성통신체계 수동/DRT 시스템 항재밍 성능 분석," *국방기술연구*, pp.231~239, 2004
- [10] "Technical Note On Analytical Treatment Of Uplink Jamming Effects," *Matra Marconi*

Space 기술보고서, 2001.

- [11] "KOREASAT5 Military Payload EIRP&G/T Performance Analysis," *Alcatel Space 기술보고서*, 2003.

장 재 웅 (Jaewoong Jang)

정회원



2000년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업

2002년 2월 : 광주과학기술원 기계전자공학과 석사

2002년 1월~현재 : 국방과학연구소 연구원

<관심분야> 위성통신 시스템설

계, 위성링크 항재밍 성능분석