

Dehop/Rehop 중계기를 이용한 FH-FDMA 위성통신방식 설계구조 및 성능분석

A study on the FH-FDMA MilSatCom system with Dehop/Rehop Payload

이광억, 정재수, 정병기, 안동명
국방과학연구소

요 약

군 위성통신 시스템의 생존성 향상을 위한 대전자전기능 설계기법으로 Dehop/Rehop 중계기를 사용하는 FH-FDMA 위성통신방식 설계구조를 제안하고 성능을 분석하였다. Dehop/Rehop방식은 적의 재밍조건하에서 필수적 통신링크를 보장하는 설계기법으로 Bent-Pipe방식에서의 Power Robbing, Hard-limiter에 의한 소신호 감쇄 등이 거의 없으며 광대역 도약으로 항재밍 능력의 개선이 가능하다. 본 연구에서는 75bps-2048kbps의 LDR/MDR/HDR 데이터 전송이 가능한 중계기 구조를 설계하고, SHF대역에서 도약대역폭에 따른 항재밍 성능분석과 Bent-Pipe방식 대비 Dehop/Rehop방식의 채널별 항재밍 성능분석결과 9-10dB내외의 성능개선이 가능함을 보였다.

I. 서론

군 위성통신의 특수한 요구조건인 생존성을 만족하는 첨단 위성통신 기법이 미국, 영국 등을 포함한 선진국에 의해 개발되고 있다^{[1][2]}. 이들은 주로 위성의 노출에 따른 취약성을 보완하여 적의 의도적 재밍 등에 대처능력을 보유하면서, 통신망의 유연성, 기동성 등을 보장하는 기법이다.

기존의 Bent-Pipe형 중계기는 의도적 재밍 신호 및 상호변조(Intr modulation)등에 의한 중계기 TWTA의 Saturation과 Power Robbing등의 발생으로 심각한 통신두절 및 성능열화를 유발하게 된다^{[3][4]}. 이러한 취약성을 보완하기 위하여 Hard Limiter를 탑재하기도 하나, 이는 1-6dB의 링크전력 손실을 초래하게 된다^[5].

재밍에 의한 취약한 통신구조를 개선하여 재밍 환경에서 생존성 보장을 위한 설계기법으로 Dehop/Rehop설계기법이 제안되었다^[6].

제안된 기법은 종래의 수동형 FH시스템과는 달리 지상단말들의 도약신호를 중계기에서 재도약하여, 중계기 대역을 작은 신호채널 별로 분해하여 처리하는 방식으로, 지상단말에서 대부분의 신호처리가 이루어지므로 새로운 Waveform 및 Protocol등의 수용이 용이한 장점이 있다.

또한 주파수 도약 통신방식은 광대역(500MHz @SHF)도약이 가능하고, 도약신호는 재밍신호와 일치할 경우에만 영향을 받으며 이 경우에도 채널내에서만 존재하는 재밍신호의 영향만 받게 되고, 여파된 채널을 각 사용자 망 또는 동일한 사용자 단말의 그룹으로 할당함으로써 동일한 중계기를 사용하는 여러 사용자간의 전력 균형에 대

한 필요성이 제거되어 망 제어가 상당히 단순화 되는 장점이 있다.

본 논문에서는 Dehop/Rehop 위성통신 시스템의 운용개념과 중계기 구조를 설계하고, 이의 운용단말별 대전자전 능력을 분석하였다.

II. 시스템 개념 및 구조설계

1. Dehop/Rehop 위성통신개념

Dehop/Rehop 중계기를 사용한 FH-FDMA 방식의 위성통신 시스템 개념도는 그림1과 같다.

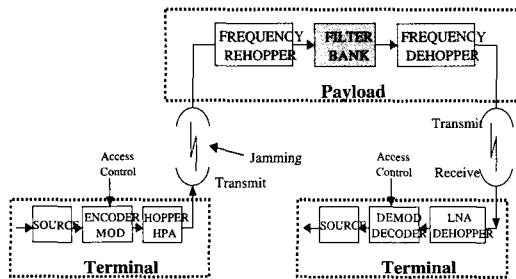


그림 1. Dehop/Rehop 위성통신 개념도

다시 말해서, 다수의 지상단말 상향링크 도약 신호들은 중계기에서 역도약을 행하여 IF주파수(70MHz)로 변환된 후, 채널별로 필터링, 신호증폭 및 리미팅을 수행하여 하향링크 주파수로 재

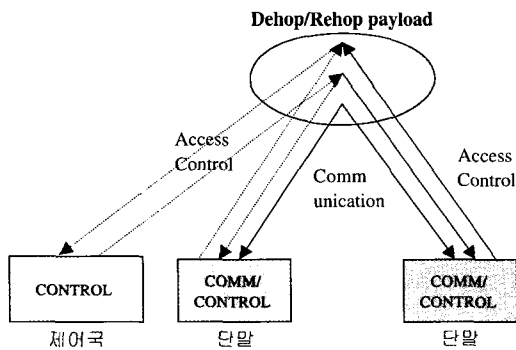


그림 2. 위성망 제어/운용도

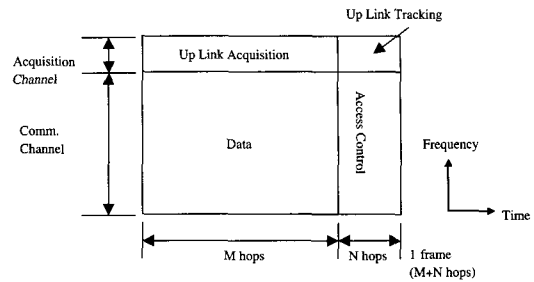


그림 3. 주파수 및 데이터 구조

도약을 하게된다. 또한, 중계기의 설계 제한요소인 무게 및 전력측면의 부담을 줄이기 위한 방법으로, 상/하향 도약신호는 그룹도약(Group Hopping)을 하여 중계기 주파수 합성기의 수량을 최소화하는 구조로 설계한다. 이때 이러한 그룹도약은 모든 단말들이 도약시간동기를 유지하여야 하며, 단말별 주파수는 도약그룹의 중간 주파수에서 이격/할당된 주파수를 사용한다. 이러한 위성을 이용한 위성통신 시스템은 그림2와 같이 Dehop/Rehop 중계기, 제어국, 단말의 3개 요소로 구성된다.

제어국의 운용/제어는 기본적으로 DAMA (Demand Assign Multiple Access)방식으로, 단말은 최초 운용시 제어국의 Control Unit로부터 Access Control 채널을 사용하여 동기신호를 획득하고 수신신호에 타이밍을 맞추어 하향 링크 신호를 수신하며, Uplink Acquisition/ tracking

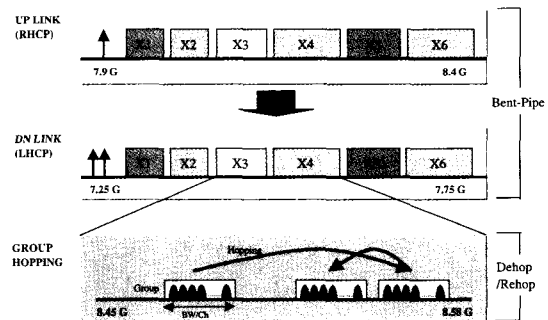


그림 4. FH-FDMA 방식 주파수 할당운용방식

채널을 사용하여 상향링크 도약신호 동기를 맞추게 된다. Call Set-up이 완료된 후에는 단말의 Comm Unit 및 Communication채널을 이용하여 단말간의 통화가 가능하게 된다. 이러한 통신링크 구성을 위한 주파수 데이터 형식은 그림3과 같다.

여기서 부호화, 압축화, 변조 및 주파수 호핑등의 모든 신호처리는 지상단말에서 수행된다. 이는 새로운 프로세싱 방법, Waveform 및 프로토콜을 수용할 수 있으므로 시스템 구현에 상당한 유연성을 제공한다.

2. 시스템 설계조건 정의

운용대역은 SHF(8/7GHz)대역의 상/하향 각각 500MHz 대역폭으로 하고, 안테나는 3중으로서 3도 및 12도 빔폭을 갖는 고정 영역과 3도 빔폭의 조정/이동가능범을 대상으로 하였다.

Bent-Pipe중계기는 그림4와 같이 전대역을 6개 채널로 분할하여 사용하며, Dehop/Rehop방식은 도약 대역폭을 채널 X1-X6중 선택적으로 조합하여 할당 운용하도록 한다.

위성단말은 2중 모드로 운용되도록 하여, 평시(Unstressed)에는 Full Connectivity를 제공하여 고정모드 또는 FH-CDMA방식을 운용하고, 비상시 적의 위협수준에 따라 전시(Stressed)모드로 전환된다. 전시모드는 FH-FDMA방식으로 운용

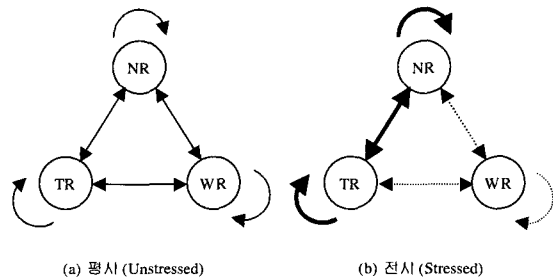


그림 5. 운용모드별 빔 연결도

되어 필수적 통신링크만을 지원하게 된다[그림5].

따라서 운용단말은 고정모드/도약모드 운용이 가능하고, 도약모드에서는 비직교도약인 FH-CDMA방식운용과 직교도약인 FH-FDMA방식이 가능한 것으로 가정하였다.

이러한 기본적 운용조건을 가정하여 설계된 위성통신 시스템은 31개의 64KHz, 40개의 400kHz와 9개의 3MHz로구성되며 총 80개의 능동채널을 수용하여, 시스템의 총 대역폭은 약 40MHz정도가 된다. 위성단말의 데이터 전송 속도는 LDR(75-2400bps), MDR(4.8-256kbps) 및 HDR(512-2048kbps)로 구분 적용하였다.

3. 시스템 설계 방안

LDR(75-2400bps)데이터 전송은 Non-coherent 방식으로 많이 채택되는 MFSK시스템을 고려하였다. 그림6에서와 같이 MFSK시스템을 고속도약(FFH)으로 설계할 경우 하나의 심볼은 L개의 서로다른 도약주파수에 실려 전송된다.

하나의 도약 주파수인 칩간격 T_c 는 변조기 출력인 심볼간격 $T_s(=KT_b)$ 보다 짧으므로, 직교 신호의 최소톤 간격인 $B=1/T_c = L/KT_b$ 이다. 따라서 전체 대역폭은 $W=mMB = mLm/KT_b$ 임을 알 수 있다. 단, m은 도약 대역폭 내의 채널수,

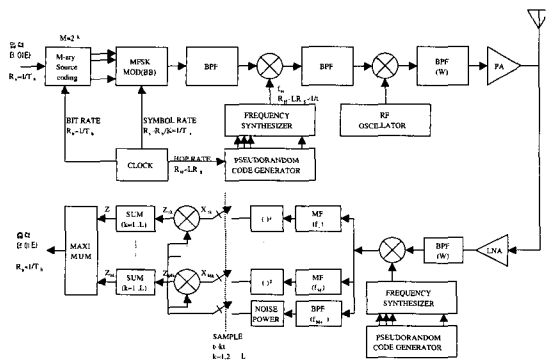


그림 24. FH-MFSK방식 단말 송수신 개념도

표1. LDR에 대한 도약율 및 대역폭 (@8-FSK)

Data Rate	Coding	Symbol Rate	Symbol Repeat	Hop Rate	Tone Spacing	BW
75	150	50	96	4800	8000	64KHz
2400	4800	1600	3	4800	8000	64KHz

$K=\log 2M$, T_b 는 데이터 비트시간 이다. 8-FSK 방식 LDR의 대역폭은 표1과 같다.

MDR은 4.8-19.2kbps와 64-256kbps로 구분하여 정의 하였으며, 변조기법으로 OQPSK를, 부호화 기법으로는 1/2 Convolution기법을 적용하는 것으로 가정하였다. 단, 소요 대역폭은 식(1)과 같이 산출되며, a 는 Raised cosine filter의 roll-off factor이다^[7].

$$BW = (DataRate) * (1 + a) / (CodingRate) \quad (1)$$

HDR데이터의 경우도 MDR과 동일방식으로 적용하여, 512k-2048k를 기준으로 정의하였다.

LDR(75-2400bps)과 MDR-I(4.6-19.2kbps)의 전송은 64kHz의 채널을, MDR-II(64-256kbps)는

표2. MDR에 대한 도약율 및 대역폭

	Coding	Modulation	Hop Rate	Roll-Off	BW
4.8k	9.6k	4.8k	4800	0.5	7.2K
9.6k	19.2k	9.6k	4800	0.5	14.4K
19.2k	38.4k	19.2k	4800	0.5	28.8K
64k	128k	64k	4800	0.5	96K
128k	256k	128k	4800	0.5	192K
256k	512k	256k	4800	0.5	384K

표3. HDR에 대한 도약율 및 대역폭

	Coding	Modulation	도약속도	Roll-off	BW(MHz)
512	1024	512	4800	0.5	0.768
1024	2048	1024	4800	0.5	1.536
2048	4096	2048	4800	0.5	3.072

400kHz의 채널을, HDR(512-2048kbps)는 3 MHz의 채널을 각각 사용하도록 한다. 또한 모든 운용단말은 Dehop/Rehop 중계를 사용하여 그룹 도약을 하여야 하므로, 도약속도는 LDR을 기준으로 4800hops/sec로 동일하게 적용하였다.

따라서, 위성단말별 전송속도에 기준하여 볼때 LDR은 고속도약(FFH)을, MDR 및 HDR은 저

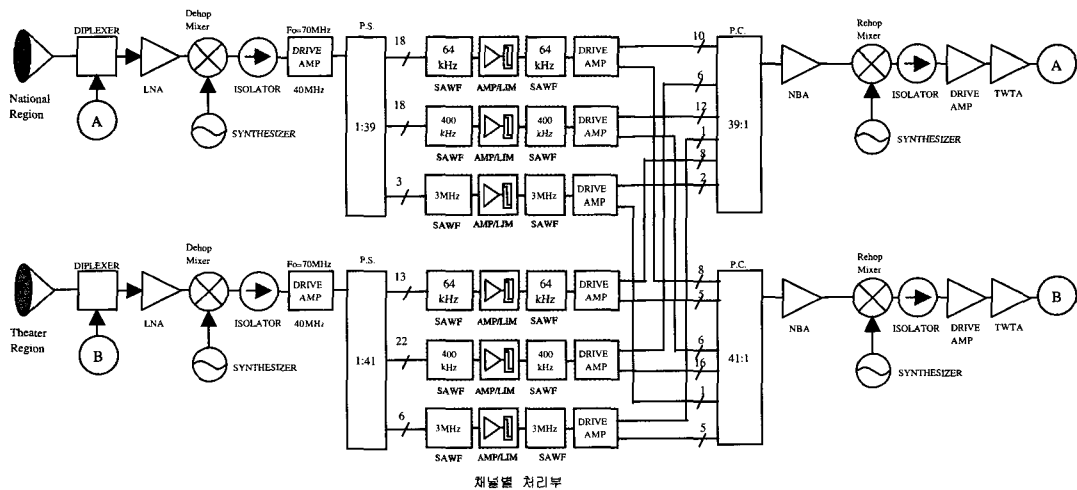


그림 7. Dehop/Rehop중계기 구조도

속도약(SFH)이 된다. 표1-3의 내용을 종합하면 표4와 같이 된다.

표 4. 운용모드별 모뎀특성

항목	특성			
	LDR(bps)	MDR(kbps)		HDR(kbps)
전송속도	75-2400	4.8-19.2	64-256	512-2048
Eb/No	8 dB	8 dB	8 dB	8 dB
변복조	8-FSK	OQPSK	OQPSK	OQPSK
부호화	1/2 Conv.	1/2 Conv.	1/2 Conv.	1/2 Conv.
도약속도	4800hops/s	4800hops/s	4800hops/s	4800hops/s
톤간격	8000Hz	-	-	-
사용채널	64KHz	64KHz	400KHz	3MHz

서비스 빔영역 3종에 대한 SHF대역 중계기의 제원 및 특성을 정리하면 표5과 같다.

표5. 중계기 제원 및 특성

사용대역	빔영역	상향링크			하향링크			
		빔폭(도)	이득(dBi)	G/T(dB/K)	빔폭(도)	이득(dBi)	HPA 출력(W)	EIRP(dBW)
SHF	TR	3	31	1.5	3	31	60	47
	NR	3	31	1.5	3	31	80	50
	WR	12	19	-10	12	19	80	38

*TR : Theater Region *NR : National Region
*WR : Wide Region

위성운용단말을 6종으로 하여, 단말간 빔 연결도 및 통신링크 수를 표6과 같이 가정하였다.

표 6. 단말별 연결도와 통신용량(예)

A-B	TR-TR	NR-TR	NR-NR	Chs
A	LS LS LS NS	TS LS LS LS LS	TS LS LS	
B	LS PS AS NS	LS NS PS AS SS	TS LS PS	
LDR	8 2	12 2 2	5	31
MDR(I)	4	6	7	17
MDR(II)	2 6	2 4	4 5	23
HDR	2	2	3 2	9
Chs	24	30	26	80

위성단말의 운용조건 및 환경에 따른 일반적 제한요소를 감안하고, 위성통신링크 설계결과를 토대로 아래 표7과 같이 단말 6종에 대한 예상되는 제원 및 특성을 정리하였다.

표7. 위성단말 종류별 제원 및 특성

단말	형태	직경(m)	EIRP(dBW)	G/T(dB/K)	Max.Data(kbps)
TS	Transport	3.5	78	24	2048
LS	Vehicle	1.7	65	17	1024
NS	Shipborne	1.2	58	15	64
PS	Manpack	0.6	39	6	19.2
AS	Airborne	0.6	49	4	2.4
SS	Submarine	0.3	48	0	2.4

표6의 단말별 연결도와 통신용량을 고려하여 Dehop/Rehop 중계기 구조를 설계하면 그림7과 같다. 그림에서 보면, 수신된 상향링크 신호는 LNA를 거쳐 증폭된후 Dehop하여 70MHz의 고정 IF주파수로 변환된다. 그후 Power Divider를 통하여 동일 신호가 각 채널처리부로 보내지는데, 64kHz, 400kHz, 3MHz들로 병렬로 나열된 채널뱅크에서 각 채널별로 SAW Filter를 사용한 필터링 및 증폭을 한후 간섭신호의 감쇄를 위한 신호 Limiting을 취한다. 그 다음 적정한 신호레벨로 증폭한 후 다른 신호와 Power Combiner를 통하여 합하여진다. 마지막으로 하향링크로 신호의 재전송을 위하여 Rehopping을 행하게 된다.

III. 시스템 성능분석

1. 직교 및 비직교 도약모드

주파수 도약시 홉간 충돌을 발생시키는 비직교도약과 직교도약간의 성능을 비교하면^[8], 그림

에서의 Bent-Pipe의 Hard Limiter 소신호 감쇄(Ls)에 대한 효과와 신호대 잡음비(C/N)만에 의한 성능차이를 분석해 보면 그림8과 같이 됨을 볼 수 있다.

$$F = \frac{n \cdot S_i}{n \cdot S_i + J} \quad (2)$$

$$\frac{T_{nonorthogonal}}{T_{orthogonal}} = 1 - \left(\frac{1}{L_s} \right) \cdot \left(\frac{\frac{C}{N}}{1 + \frac{C}{N}} \right) \cdot F \quad (3)$$

여기서, Ls는 소신호 감쇄(small signal suppression), J는 재머전력, Si는 각 단말신호이다.

동일재머에서 직교모드는 사용자가 늘어날 수록 비직교모드에 비해 Throughput의 증대되며, 소신호 감쇄(Ls)를 고려시 Throughput은 C/N비만 고려시보다 상대적으로 감소됨을 볼 수 있다. 따라서 다수 사용자의 운용조건에서는 직교도약이 상당히 유리하다.

Dehop/Rehop운용방식은 직교모드 운용으로 홉간 충돌 손실과, 채널별 처리로 인한 소신호 감쇄현상을 제거할 수 있다.

2. FH-FDMA 시스템 성능분석

Dehop/Rehop방식의 위성통신 시스템의 성능 분석을 위하여 표8과 같이 주요설계 파라미터에

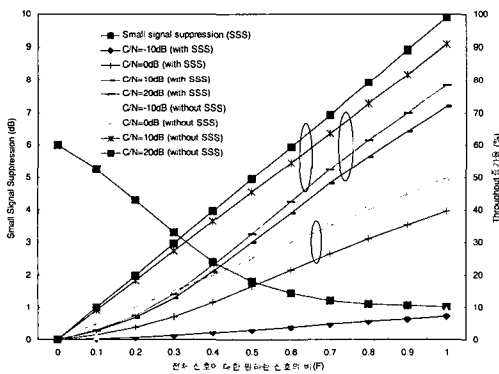


그림 8. 직교 및 비직교 도약모드간 성능비교

대한 가정하고, Link Budget 계산식을 정의하고 적용하였다. 우선, 상향링크에 대한 신호대 잡음비를 상향링크 재밍을 고려하여 정의하면 식(4)과 같다.

표 8. 주요설계 파라미터

시스템 변수	제원 및 특성
Frequency band	7.25-7.75GHz, 7.9-8.4GHz
Distance to satellite	36,000km
Rain fade margin (L _{UF} , L _{DF})	2.2dB@7.8G, 2.9@8.4G
Transponder Gain (dB)	130dB
Satellite Noise Temperature (T _{sat})	900 K
Channel Bandwidth (B _{ch})	64kHz, 400kHz, 3MHz

$$\left(\frac{C}{N_o + N_{Jo}} \right)_U = \quad (4)$$

$$\frac{\frac{Eirp_{es} G_{satR} B_{ch}}{L_U L_{UF}}}{(k T_{sat} B_{ch} + \frac{Eirp_{jam} G_{satR}}{L_U L_{JF}})}$$

또한, 상향링크 재밍전력이 하향링크에 미치는 영향을 고려하여 하향링크에 대한 신호대 잡음비를 정의하면 식(5)와 같다.

$$\left(\frac{C}{N_o + N_{Jo}} \right)_D = \quad (5)$$

$$\frac{\frac{Eirp_{sat} G_{esR} B_{ch} F}{L_D L_{DF}}}{(k T_{es} B_{ch} + \frac{Eirp_{sat} G_{esR} (1-F)}{L_D L_{DF}})}$$

식(2)의 신호와 잡음의 합에 대한 신호의 전력비 F는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$F = \frac{\frac{Eirp_{es} G_{satR}}{L_U L_{UF}}}{L_S (\sum S_i + k T_{sat} B_{ch} + \frac{Eirp_{jam} G_{satR}}{L_U L_{JF}})} \quad (6)$$

식(4)-(6)의 관계식을 이용하여 재밍환경하에서 전송가능한 전송속도(R)를 정의하면 다음식(7)과 같이 정의된다.

$$R_{supportable} = \left(\frac{C}{N_o + N_{Jo}} \right)_T / \left(\frac{E_b}{N_o} \right) \quad (7)$$

FH-FDMA방식은 FH-CDMA방식과 달리 전대역 도약이 가능하므로 이는 재머로 하여금 전대역 재밍을 하도록 하여 재머 효율을 떨어 뜨리게 한다. 즉, 전체 도약대역폭 FHBW와 중 계기 채널 대역폭 Bch의 비에 따라 식(8)과 같이 유효 재머전력 (NJo)effective은 현저히 줄어들게 된다.

$$(N_{Jo})_{effective} = N_{Jo} \cdot \frac{B_{ch}}{FHBW} \quad (8)$$

그림7의 중계기 설계구조, 표7-8의 주요 제원 및 특성과 식(4)-(7)의 관계식을 이용하여 성능분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

그림9에서는 LS-PS 단말간에 19.2kbps 전송시 도약대역폭의 증가에 따른 항재밍능력의 개선 정도를 보여주며, 100M에서 80dBW를 500M에서 90dBW로서 10dB내외의 항재밍 성능차이가 예상된다. 실제, Bent-pipe형태는 도약대역폭을 결정하는 중계기 대역폭이 100MHz정도로 설계 제한이 있으나, 500MHz(@SHF)대역폭으로 설계가 가능한 Dehop/Rehop 방식이 유리함을 알 수 있다. Dehop/Rehop방식 전송링크별 항재밍 성능을 Bent-Pipe로 전송한 경우와 비교하면 그림10과 같다.

예로서, LS-SS간의 데이터 전송능력을 보면 Dehop/Rehop모드 운용시 105dBW의 재밍조건에서 2400bps의 데이터 전송이 가능하며, Bent-Pipe운용모드는 96dBW이상의 재밍조건에서 성

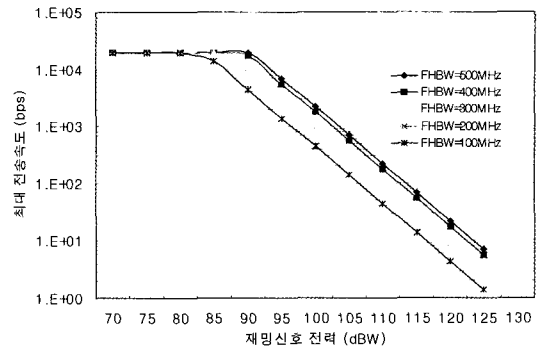


그림 9. 재밍에 대한 TR-TR영역의 LS-PS통신링크의 최대전송속도

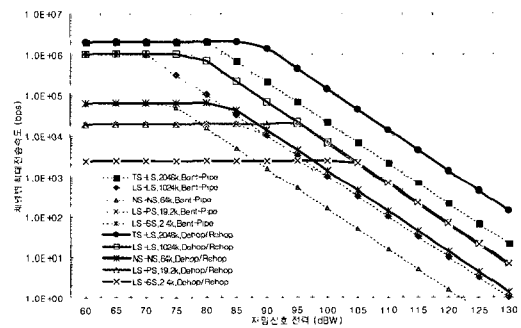


그림 10. Bent-Pipe와 Dehop/Rehop방식의 링크별 항재밍 성능분석

능이 열화됨을 볼 수 있으며, 이 경우 9dB정도의 항재밍 능력이 개선됨을 볼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 FH-FDMA 위성통신방식에 대한 운용개념과 요구조건을 가정하고, 75bps-2048kbps의 데이터 전송을 고려하여 위성단말 및 Dehop/Rehop 중계기 설계구조를 제안하고, 대전자전 능력을 분석하였다.

Dehop/Rehop방식은 Bent-Pipe에 비해 9-10 dB 내외의 항재밍 능력개선능력이 있으며, 도약

대역폭의 증대에 비례하여 성능이 개선되므로 전 대역 500MHz를 도약대역으로 활용 가능하다는 측면과 다수 사용자의 전력제어가 단순화 될 수 있는 점 등으로 미루어 군의 전시환경하의 필수 적 통신링크 구성방안으로 적합하다고 판단된다.

제안된 시스템은 SHF대역을 가정하였으나, 향후 Ka(30/20)대역과 EHF(44/21)대역을 사용하면 각각 상향링크 1GHz, 2GHz의 광대역 주파수 도약이 가능하므로, 수행이득(Processing Gain)이 64kHz채널에 대하여 각각 32dB, 35dB로서 항재밍 능력면에서 향상되게 된다.

또한 상용 Ka(30/20)대역을 활용시 비교적 경제적인 상용부품의 활용으로 비용대 효과측면에서 다소 유리할 것으로 기대된다.

중계기 채널처리부는 병렬구조로서 소모전력 및 무게는 수용 채널수의 증가에 비례하고, 동시에 개발비 증가의 직접적인 원인이 된다.

따라서, 고속 VLSI, ASIC 및 ADC 소자기술의 급속한 발전으로 FFT 프로세서를 사용한 DSP구현이 가능한 수준이므로, 이를 적용한 소형화 경량화 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

[1] A. Nejat Ince, Digital Satellite Communications Systems and Technologies, pp72-80, Kluwer Academic Publisher, 1992.

[2] M.S. Asato, R.R. Cagnon, L.B.Jocic,"A High-capacity, Anti-jam EHF "Bent-pipe Satellite/Central-hub System Architecture Concept," IEEE Proceedings of MILCOM '95, San Diego,CA, November 1995, pp.722-730.

[3] B. Sklar, "Digital communications", pp.555-562, PTR Prentice Hall, 1988.

[4] R.M.Gagliardi,"Satellite Communications", pp , Van Nostrand Reinhold, 1991.

[5] J.J.Spilker,"Digital communication by satellite",pp.226-230, Prentice-Hall, 1977.

[6] S.A. Hovanessian, L.B. Jocic , J.K. Kreg, G.L. Lui, S.H. Raghavan, "Multiuser Trans- parent dehop MILSATCOM System", IEEE Proceedings of MILCOM '95, San Diego,CA, November 1995, pp.340 -346.

[7] J.W.Strater, "Universal modem system (UMS) medium data rate, high capacity waveform", American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 1996, pp.287-295.

[8] A.M.Sooberts, J.W. Marshall,"Advantages of orthogonal hopped waveforms in a hard limited SHF satellite transponder", IEEE proceedings of MILCOM '90, pp.11-16.