

비선형 DRT 위성 중계시스템의 재밍 간섭 특성 분석

정희원 이 동 형*, 유 흥 균*, 김 기 근**, 최 영 균**

Analysis of Jamming Interference Characteristics in Nonlinear DRT Satellite Transponder System

Dong Hyung Lee*, Heung Gyoon Ryu*, Kie Keun Kim**, Young Kyun Choi**

Regular Members

요 약

본 논문에서는 DRT(Dehop/Rehop Transponder) 위성 중계시스템에서 HPA의 비선형성과 상·하향링크의 전대역 재밍 및 부분 대역 재밍을 고려하여, 지구국 수신기에서 요구되는 SNR값을 만족시키기 위한 각각의 상·하향링크 SNR값과 에러확률을 분석하였다. 분석결과, 위성 중계기 대역폭과 지구국 수신기 대역폭이 같은 경우, 상향링크 JSR 10[dB], 하향 링크 JSR 10[dB] 및 처리 이득 30[dB]를 기준으로 요구되는 전체 SNR 즉, $(S/N)_{total}$ 를 10[dB] 확보하기 위하여, 선형 위성 중계 시스템은 하향링크 SNR 14[dB]를 기준으로 상향링크 SNR이 14.2[dB]를 필요로 한다. 그러나, 출력 백오프 OBO 2[dB]를 고려한 비선형 시스템에서는 상향링크 SNR이 20.1[dB]를 필요로 하며, 약 6[dB]만큼의 손실이 있게 된다. 한편, 상향링크 SNR 10[dB], 상향링크 JSR 10[dB], 하향링크 JSR 10[dB] 및 처리이득 30[dB]을 고려한 전대역 재밍에서, OBO 2[dB]인 경우의 비선형 시스템이 OBO 0[dB]인 선형 시스템보다 성능이 나빠지므로 전력개선이 필요함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

For the DRT satellite transponder system, BER and total SNR to be required in the earth terminal are evaluated under the condition of HPA nonlinearity in the FBJ(full-band jamming) or PBJ(partial-band jamming) of uplink and downlink. In case that the satellite filter bandwidth (W_s) is same to the earth terminal bandwidth (W_e), in conditions of uplink JSR 10[dB], downlink JSR 10[dB] and processing gain 30[dB], linear transponder system shows that uplink SNR needs to be 14.2[dB] to achieve the total SNR 10[dB] requirement in downlink SNR 14 [dB]. However, Nonlinear transponder system with OBO(output backoff) 2[dB] requires 20.1[dB] uplink SNR. From the above results, the nonlinearity of HPA in the satellite transponder causes the degradation of BER performance so that it is of interest to consider the power increase.

I. 서 론

군용 위성통신 시스템에서 서로 다른 사용자간의 유연성 및 의도적인 재밍에 대처하기 위해, 도약 대역폭이 넓은 FH(Frequency Hopping) 스펙트럼 확

산 방식이 널리 쓰이고 있다^[1]. FH 시스템의 위성 중계 방식으로는 bent-pipe형 방식과 DRT형 중계 방식이 있다. 우선, bent-pipe형 위성 중계 방식은 상향링크에서 받아들인 신호와 재머 그리고 잡음을 주피수 천이시켜 하향링크로 재전송하는 방식이다.

* 충북대학교 전자공학과(ecomm@cubucc.chungbuk.ac.kr)

** 국방과학연구소 위성체계연구팀

논문번호 : 00077-0228, 접수일자 : 2000년 2월 28일

이 경우 재밍 성분이 하향링크 전송 전력에 포함되어 전체 SNR에 영향을 끼치게 된다. DRT 중계 방식은 위성 중계기의 수신부에서 주파수 호핑된 신호를 Dehop하고 필터를 통과한 후 다시 Rehop하여 중계하는 방식이다^[2]. 이 시스템에서 도약신호는 재밍신호와 일치할 경우에만 영향을 받으므로, 대역폭 내에서만 재밍신호의 영향만을 받게 되고, 지상단말에서 기저대역 신호처리가 이루어지므로 새로운 waveform 및 프로토콜 등의 수용이 용이한 장점을 가지고 있다^[1]. 일반적으로 고풍력 전송을 위하여 위성에서 HPA(High Power Amplifier)를 이용하게 되는데, 포화영역에서 동작할 경우 HPA의 비선형 왜곡으로 인하여 인접 심벌간 간섭(ISI)과 혼변조에 의한 인접 채널간 간섭(ICI) 등이 발생하는 단점이 있다^{[3][4]}. 기존의 연구에서는 선형 DRT 시스템에 대하여 분석하고 있으나, 이러한 비선형성과 dehopping에 의한 처리 이득의 성능 개선을 고려하지 않았다^[2]. 따라서, 본 연구에서는 이러한 처리 이득과 HPA에 의한 비선형성이 고려된 DRT 위성 중계 시스템에서, 상향 및 하향링크에 전대역 재밍 또는 부분 대역 재밍이 있는 환경을 다루었다. 지구국 수신기에서 요구되는 SNR값을 확보하기 위한 상·하향링크의 SNR값과 여러 확률론을 분석한다.

II. DRT 중계 시스템

변조방식으로 MFSK를 이용하였으며, MFSK의 톤은 직교이며 비동기 방식으로 가정한다. 그리고, 전체 주파수 도약 대역폭은 W_{ss} 이고, 재머의 특성은 대역 제한된 가우시안 잡음이며 상향링크만 재머에 영향이 있다고 하였으며, 비선형 증폭기를 이용한 위성 중계 시스템 모델은 그림 1과 같다.

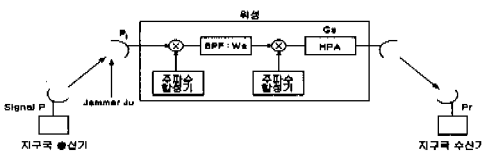


그림 1. DRT 시스템 구성도

지구국 송신기의 신호 전력은 P , 상향링크의 재머 전력은 J_u 이고, 위성에서 안테나 이득을 통과한 다음의 신호전력을 P_s 라고 놓는다. DRT 위성 중계 시스템에서 Dehop 과정을 거쳐 나온 IF신호는 W_s 대역폭을 갖는 BPF를 통과하고 다시 Rehop된다. 이

렇게 Rehop된 신호는 고풍력 증폭기를 통과하여 지구국 수신기로 보내진다. 이상적인 증폭기는 잡음이 없으며 이득 G_s, G_r 를 갖는 선형영역에서 동작하지만, HPA의 비선형성을 갖는 중계기는 일반적으로 single zero memory nonlinearity라고 가정한다. 이러한 HPA의 비선형성으로 인하여 AM/AM 및 AM/PM의 신호 왜곡이 이득 감소(gain compression)와 혼변조(intermodulation)의 곱으로 나타나 시스템 성능의 열화가 생긴다^[5]. 따라서, 시스템의 성능을 유지하기 위해서는 HPA의 출력을 포화영역에서 backoff 시켜줘야 하지만, 많은 양의 backoff는 HPA의 성능을 경감시키게 되어 적절한 backoff를 고려하여야 한다. HPA의 포화영역이 재밍의 영향을 받지 않는다고 가정할 때, HPA의 출력 전력은 입력 전력을 증폭하여 보내지만, 일반적으로 HPA가 포화영역에서 동작하지 않도록 적절히 backoff한다.

III. DRT 시스템에서 SNR 분석

3.1 선형 DRT 시스템인 경우

상·하향링크 대역폭을 각각 W_u, W_d 이며, 재머 전력을 J_u, J_d 라고 놓는다. 재머는 대역 제한된 가우시안 잡음이라고 가정하였으므로, 재머의 전력 스펙트럼 밀도는 각각 $N_u = J_u/W_u$ 와 $N_d = J_d/W_d$ 이다. 한편, AWGN 잡음의 잡음 전력 밀도는 각각 kT_u, kT_d 이다. 상·하향링크 모두 재머에 영향을 받으므로 전송 대역폭에 대한 (잡음+재머) 스펙트럼 밀도는 각각 $N_{ou} = kT_u + J_u/W_u, N_{od} = kT_d + J_d/W_d$ 이다. 그리고, P_s 는 위성 수신기에서 받아들이는 신호 전력이고, P_r 은 지구국 수신기(지구국 수신기 대역폭: W_r)에서 수신되는 전체 전력이라고 가정한다. 한편, 전체 주파수 대역폭이 재밍에 영향을 받는다고 가정할 때, 위성에서 Dehop한 다음의 신호와 재머의 관계는

$$\frac{E_b}{N_f} = \left(\frac{P_s}{J_u} \right) \left(\frac{W_{ss}}{R_b} \right) \quad (1)$$

이다. 여기서, E_b 는 한 비트에 해당하는 수신된 에너지이며, R_b 는 비트율 그리고, N_f 는 재머의 스펙트럼 밀도를 가리킨다. 그러므로, BPF를 통과한 다음의 신호 및 재머 전력은 다음과 같다.

$$E_b W_s = P_s \quad (2)$$

$$N_j W_s = \frac{J_u}{W_{ss}} W_s = J_u \frac{1}{G_p} \frac{W_s}{W_r} \quad (3)$$

여기서, $G_p = W_{ss}/W_r$ 이다. 그리고, BPF를 통과한 다음의 순수 잡음 성분은 다음과 같다.

$$N = kT_u W_s = kT_u W_r \frac{W_s}{W_r} = N_u \frac{W_s}{W_r} \quad (4)$$

한편, 하향링크의 경우도 같은 방법으로 생각할 수 있다. 식(2)~(4)을 이용하여 지구국 수신기에서의 전체 SNR은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{N}\right)_{total} &= \frac{P_r \left(\frac{G_{s,lin} P_i}{G_{s,lin} \left(P_i + J_u \frac{1}{G_p} \frac{W_s}{W_r} + N_u \frac{W_s}{W_r} \right)} \right)}{P_r \left(1 - \frac{G_{s,lin} P_i}{G_{s,lin} \left(P_i + J_u \frac{1}{G_p} \frac{W_s}{W_r} + N_u \frac{W_s}{W_r} \right)} \right) \frac{W_r}{W_s} + N_{od} W_r} \\ &= \left(\frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} + \frac{N_u}{P_i} + \frac{N_d}{P_r} + \frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} \frac{N_d}{P_r} \frac{W_s}{W_r} \right. \\ &\quad + \frac{N_u}{P_i} \frac{N_d}{P_r} \frac{W_s}{W_r} + \frac{J_d}{P_r} \frac{1}{G_p} + \frac{J_u}{P_i} \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p} \right)^2 \frac{W_s}{W_r} \\ &\quad \left. + \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p} \right)^2 \frac{N_u}{P_i} \frac{W_s}{W_r} \right)^{-1} \quad (5) \end{aligned}$$

식(5)를 Y_u, Y_d 및 k_i 에 대하여 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} \therefore \left(\frac{S}{N}\right)_{total, lin} &= \left(\frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} + Y_u^{-1} + Y_d^{-1} \right. \\ &\quad + \frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} Y_d^{-1} k_i + Y_u^{-1} Y_d^{-1} k_i + \frac{J_d}{P_r} \frac{1}{G_p} \\ &\quad \left. + \frac{J_u}{P_i} \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p} \right)^2 k_i + \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p} \right) Y_u^{-1} k_i \right)^{-1} \quad (6) \end{aligned}$$

이다. 여기서, $N_{od} W_r = N_d + J_d/G_p$, $Y_u = P_i/N_u$, $Y_d = P_r/N_d$, $k_i = W_s/W_r$ 이고, $G_{s,lin}$ 는 HPA의 선형 영역에서 동작하며, J_u/P_i 및 J_d/P_r 은 각각 상·하향링크 JSR을 의미한다.

3.2 비선형성을 고려한 경우

식(6)의 선형인 경우에서, HPA의 비선형영역에서 동작되는 $G_{s,non}$ 를 이용하여 비선형관계로 정리할 수 있다. 한편, HPA의 출력 전력은 입력 전력을 비선형 증폭하여 보내며 포화영역에서 동작하지 않도록 적절히 backoff해야 한다.

$$\begin{aligned} G_{s,non}(P_i + J_u \cdot 1/G_p \cdot k_i + N_u k_i) \\ = OBO \cdot G_{s,lin}(P_i + J_u \cdot 1/G_p \cdot k_i + N_u k_i) \quad (7) \end{aligned}$$

여기서, OBO는 입력 백오프에 의한 출력 백오프를 나타낸다. 식(7)을 이용하여 비선형성을 고려한 전체 SNR은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{N}\right)_{total, non} &= \left(\frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} + Y_u^{-1} + OBO \cdot Y_d^{-1} \right. \\ &\quad + OBO \cdot \frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} Y_d^{-1} k_i + OBO \cdot Y_u^{-1} Y_d^{-1} k_i \\ &\quad + OBO \cdot \frac{J_d}{P_r} \frac{1}{G_p} + OBO \cdot \frac{J_u}{P_i} \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p} \right)^2 k_i \\ &\quad \left. + OBO \cdot \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p} \right) Y_u^{-1} k_i \right)^{-1} \quad (8) \end{aligned}$$

IV. 에러 확률 분석

직교 MFSK 신호의 최적화된 비동기 수신 심볼 에러 확률 P_s 는

$$P_s = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (-1)^j \binom{M}{j} \exp \left[-X \left(\frac{j-1}{j} \right) \right] \quad (9)$$

이다^[7]. 여기서, X 는 심볼 에너지대 잡음 밀도비이다. $P_b = 2^{m-1}/2^m - 1 \cdot P_s$ 및 $m = \log_2 M$ 를 이용하여, 식(9)를 P_b 로 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} P_b &= \frac{1}{2(M-1)} \sum_{j=2}^M (-1)^j \binom{M}{j} \\ &\quad \cdot \exp \left[-X \left(\frac{j-1}{j} \right) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

이다. 식(10)은 상한값을 갖게 되어 근사화하면,

$$P_b \leq \frac{M}{4} \exp(-X/2) \quad (11)$$

이고 $M=2$ 일 경우, 식(10)과 식(11)은 같은 결과를 가진다.

한편, 재머는 상·하향링크에서 각각 대역폭 W_u, W_d 를 가지며, $\rho_u < 1$, $\rho_d < 1$ 인 부분에 걸쳐 분포되는 잡음 재머로 가정하였으므로, 부분 대역 재머는 평균 잡음 밀도 N_u/ρ_u 와 N_d/ρ_d 인 링크에서 부분대역 $\rho_u W_u, \rho_d W_d$ 에 분포된 잡음 특성을 가진다고 볼 수 있다. 일반적으로 부분대역 재밍 밀도가 열잡음 밀도보다 아주 크므로 N_o 를 무시할 수 있다. 한편,

심벌 당 흡수를 나타내는 L을 이용하여 slow FH 시스템과 fast FH 시스템의 경우에 대해 고려한다.

4.1 상/하향링크 모두에서 ρ_u, ρ_d 의 확률로 방해를 받는 경우

1) Slow FH 시스템(L=1)인 경우

L=1이면 심벌당 흡수가 하나인 상태로서 slow FH 시스템이라고 볼 수 있다. $Y_u = \rho_u X_u$ 와 $Y_d = \rho_d X_d$ (단, X_u, X_d 는 각각 상·하향링크의 심벌 에너지대 재머 밀도비)에 대해 상향링크 재밍이 없는 경우와 하향링크 재밍이 없는 경우로 표현하면, P_b 의 상한값은 각각 $\frac{M}{4}(1-\rho_u)\rho_d \exp(-\rho_d X_d/2)$, $\frac{M}{4}(1-\rho_d)\rho_u \exp(-\rho_u X_u/2)$ 이다. 따라서, 전체 DRT 위성 통신 시스템의 P_b 값은

$$P_b \leq \frac{M}{4} [(1-\rho_u)R(X_d, \rho_d) + (1-\rho_d)R(X_u, \rho_u) + \rho_u \rho_d \exp(-(S/N)_{total}/2)] \quad (12)$$

이다. 여기서, $R(X_d, \rho_d) = \rho_d \exp(-\rho_d X_d/2)$, $R(X_u, \rho_u) = \rho_u \exp(-\rho_u X_u/2)$ 이다.

2) Fast FH 시스템(L>1)인 경우

Fast FH 시스템은 심벌이 1회 이상(L>1)의 호핑 주파수에 분산되는 경우이다. 따라서, 각 흡의 에너지는 심벌의 에너지를 L로 나눈값이 된다 ($E_n = E_d/L$). 여기서, 재머가 어느 흡에 영향을 준다고 가정하면, 전체 DRT 위성 통신 시스템의 P_b 값은 다음과 같다.

$$P_b \leq \frac{M}{4} [(1-\rho_u)R(X_d/L, \rho_d) + (1-\rho_d) \cdot R(X_u/L, \rho_u) + \rho_u \rho_d \exp(-(S/N)_{total}/2)]^L \quad (13)$$

4.2 상/하향링크 모두에서 전대역 재밍(FBJ)이 있는 경우

1) 선형 DRT 시스템인 경우

선형 DRT 시스템을 고려하면, $(S/N)_{total}$ 은 식(6)에서 $Y_u = X_u, Y_d = X_d$ 인 경우이므로,

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{total, lin} = \left(\frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} + X_u^{-1} + X_d^{-1} + \frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} X_d^{-1} k_i + X_u^{-1} X_d^{-1} k_i + \frac{J_d}{P_r} \frac{1}{G_p}\right)^{-1}$$

$$+ \frac{J_u}{P_i} \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p}\right)^2 k_i + \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p}\right) X_u^{-1} k_i \quad (14)$$

이 되고, BER은 식(12)에서 $\rho_u=1, \rho_d=1$ 이므로 다음과 같다.

$$P_b \leq \frac{M}{4} \rho_u \rho_d \exp(-(S/N)_{total}/2) \quad (15)$$

2) 비선형 DRT 시스템인 경우

비선형을 고려하면, $(S/N)_{total}$ 은 식(8)에서 위 경우에서처럼 $Y_u = X_u, Y_d = X_d$ 인 경우이므로,

$$\begin{aligned} \left(\frac{S}{N}\right)_{total, non} &= \left(\frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} + X_u^{-1} + OBO \cdot X_d^{-1} \right. \\ &+ OBO \cdot \frac{1}{G_p} \frac{J_u}{P_i} X_d^{-1} k_i + OBO \cdot X_u^{-1} X_d^{-1} k_i \\ &+ OBO \cdot \frac{J_d}{P_r} \frac{1}{G_p} + OBO \cdot \frac{J_u}{P_i} \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p}\right)^2 k_i \\ &\left. + OBO \cdot \frac{J_d}{P_r} \left(\frac{1}{G_p}\right) X_u^{-1} k_i\right)^{-1} \quad (16) \end{aligned}$$

이다.

4.3 상/하향링크 모두에서 부분 대역 재밍(PBJ)이 있는 경우

부분 대역 재머가 상·하향링크에서 독립적으로 최대의 영향을 준다고 가정한다.

1) Slow FH 시스템(L=1)인 경우

부분 대역 재밍은 $\rho_u < 1, \rho_d < 1$ 인 부분에 걸쳐 분포되는 잡음 재머로 가정하였으므로, $\rho_u = 2/X_u < 1$ 의 경우 $R(X_u, \rho_u) = \rho_u \exp(-\rho_u X_u/2) = 2/X_u \cdot e^{-1} < 1$ 이므로, $\rho_u = 2/X_u$ 일 때가 상향링크에서 재밍이 최대로 영향을 준다. 하향링크에서도 마찬가지로 $\rho_d = 2/X_d$ 인 경우에 발생하므로, $R(X_u, \rho_u)$ 와 $R(X_d, \rho_d)$ 의 최대값은 각각 $R_u = 2/(eX_u)$, $R_d = 2/(eX_d)$ 이다. 따라서, 각각 선형 DRT와 비선형 시스템의 $(S/N)_{total}$ 은 식(17-1)과 식(17-2)와 같다. 최적화된 재머는 확산대역과 심볼 SNR을 일정하게 유지하기 때문에, $(S/N)_{total}$ 은 X_u, X_d 와 관계없이 지상 수신기와 DRT의 필터 대역폭의 비 k_i 와 관계가 있다. 위의 파라미터와 식(12)을 사용하면 BER은

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{total, lin} = \frac{4G_p}{2\left(\frac{J_u}{P_i}\right)(2+k_i) + G_p(4+k_i) + 2\left(\frac{J_d}{P_r}\right)\left(2+2\frac{1}{G_p}\left(\frac{J_u}{P_i}\right)k_i\right)} \quad (17-1)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{total, non} = \frac{4G_p}{2\left(\frac{J_u}{P_i}\right)(1+OBO \cdot k_i) + G_p(2+2OBO+OBO \cdot k_i) + 2OBO\left(\frac{J_d}{P_r}\right)\left(2G_p+2\left(\frac{J_u}{P_i}\right)\frac{1}{G_p}k_i+k_i\right)} \quad (17-2)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{total, lin} = \frac{9L^2}{3L\left(\frac{J_u}{P_i}\right)(3L+k_i) + G_p(6L+k_i) + \left(\frac{J_d}{P_r}\right) \cdot 3L\left(3L+\frac{1}{G_p}\left(\frac{J_u}{P_i}\right)k_i \cdot 3L+k_i\right)} \quad (19-1)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{total, non} = \frac{G_p \cdot 9L^2}{\left(\frac{J_u}{P_i}\right)(9L^2+OBO \cdot k_i \cdot 3L) + G_p(3L+3L \cdot OBO+OBO \cdot k_i) + OBO\left(\frac{J_d}{P_r}\right) \cdot 3L\left(3L+3L\left(\frac{J_u}{P_i}\right)\frac{1}{G_p}k_i+k_i\right)} \quad (19-2)$$

$$P_b \leq \frac{M}{2e} \left\{ \left(1 - \frac{2}{X_u}\right) \cdot \frac{1}{X_d} + \left(1 - \frac{2}{X_d}\right) \cdot \frac{1}{X_u} + \frac{2}{X_u X_d} \exp\left(-\left(S/N\right)_{total}/2\right) \right\} \quad (18)$$

$$P_b \leq \frac{M}{4} \left[\left(1 - \frac{3L}{X_u}\right) \frac{4L}{eX_d} + \left(1 - \frac{3L}{X_d}\right) \frac{4L}{eX_u} + \frac{9L^2}{X_u X_d} \exp\left(-\left(S/N\right)_{total}/2\right) \right]^L \quad (20)$$

가 된다.

2) Fast FH 시스템(L>1)인 경우

부분 대역 재밍이 상·하향링크에서 최대로 영향을 주는 것은 Chernoff 계수 λ를 최소화하는 것과 같은 경우로서,

$\min_{0 \leq \lambda \leq 1} \left\{ \frac{\rho}{1-\lambda^2} \exp\left[-\frac{\lambda}{1+\lambda} \cdot \rho\left(\frac{E_b}{N_f}\right)\right] \right\}$ 를 만족시키기 위한 λ의 값은 1/2의 값이다^[8]. 여기서, ρ는 상향링크의 경우 ρ_u, 하향링크의 경우는 ρ_d로 나타낼 수 있으며, E_b는 홉 에너지, 그리고 N_f는 재머의 전력 스펙트럼 밀도이며 상향링크의 경우는 N_u, 하향링크의 경우는 N_d로 표현할 수 있다. 예를 들어, 상향링크의 경우

$$R(X_u/L, \rho_u) = \min_{0 \leq \lambda \leq 1} \left\{ \frac{\rho_u}{1-\lambda^2} \exp\left[-\frac{\lambda}{1+\lambda} \cdot \left(\frac{\rho_u X_u}{L}\right)\right] \right\}$$

이다. 이와 같은 파라미터를 고려하고 λ=1/2를 대입하여 보면, ρ_uX_u=3L, ρ_dX_d=3L인 경우가 상·하향링크에서 재밍의 영향을 최대로 받는 경우가 된다.

따라서, R(X_u/L, ρ_u)와 R(X_d/L, ρ_d)는 각각 R_u=4L · e⁻¹/X_u, R_d=4Le⁻¹/X_d=3L이다. Y_u=ρ_uX_u, Y_d=ρ_dX_d=3L인 경우, 각각 선형 DRT와 비선형 시스템의 (S/N)_{total}은 식(19-1), 식(19-2)이다. 전체 채널의 BER P_b를 구하면 다음과 같다.

V. 상·하향링크 위성 중계 시스템 분석

그림 2,3,4는 상향링크 JSR 10[dB], 하향링크 JSR 10[dB]처리 이득 30[dB]를 기준으로 지구국 수신기에서 요구되는 전체 SNR값 즉, (S/N)_{total} 10[dB]를 만족시키기 위하여, 위성 중계기 대역폭과 지구국 수신기 대역폭의 비율(k_i=W_s/W_r)을 k_i=1, 4, 10 변화에 따른 상·하향링크 SNR값의 관계이다. 그림 2는 선형 DRT 시스템인 경우로서, 위성 중계기 대역폭과 지구국 수신기 대역폭의 비율(k_i=W_s/W_r)이 같을 경우가 최적의 상·하향링크의 SNR값을 얻을 수 있다. 한편, 그림 3은 HPA의 비선형성을 고려하였을 경우 k_i의 변화에 따른 상·하향링크 SNR의 관계를 보여주고 있다. OBO 2[dB]로 하였을 경우 그림 2와 비교해보면, 위성 중계기 대역폭과 지구국 수신기 대역폭이 같을 경우, 요구되는 전체 SNR 즉, (S/N)_{total}를 10[dB] 확보하기 위하여 선형 시스템은 하향링크 SNR 14[dB]를 기준으로 상향링크 SNR이 14.2[dB]를 필요로 한다. 그러나, 출력 백오프 OBO 2[dB]를 고려한 비선형 시스템에서는 상향링크 SNR이 20.1[dB]를 필요로 하여, 약 6[dB]만큼의 손실이 있게 된다. 그림 4는 k_i=1로 하여 OBO를 0~2[dB]로 변화시켰을 경우를 보여주고 있다.

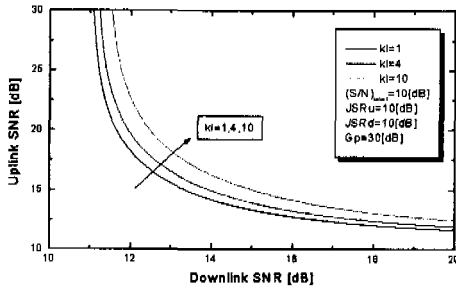


그림 2. k_f 의 변화에 따른 상·하향링크 SNR의 관계

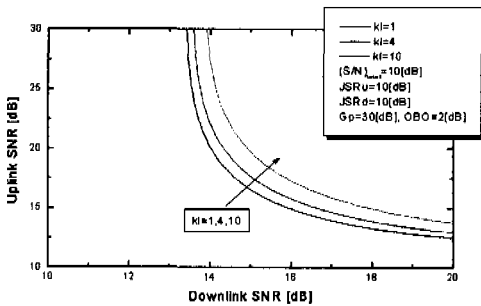


그림 3. k_f 의 변화에 따른 상·하향링크 SNR의 관계(비선형을 고려한 경우 OBO=2[dB])

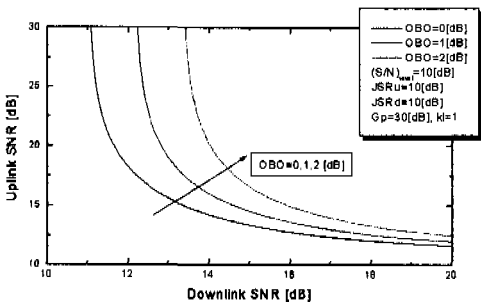


그림 4. OBO의 변화에 따른 상·하향링크 SNR 관계

그림 5는 선형 DRT 시스템을 고려한 경우로서, $k_f=1$, $M=2$, $(S/N)_{total}=10[dB]$, 상향링크 SNR 10[dB], 상향링크 JSR 10[dB], 하향링크 JSR 10[dB] 및 처리 이득 30[dB]로 가정하여 상·하향링크에서 모두 전대역 재밍이 있는 경우이다. 상향링크 SNR=10[dB]인 경우 BER이 약 5.0×10^{-3} 에서 error floor 현상이 일어나며, 시뮬레이션과 이론값이 거의 일치함을 확인할 수 있다.

그림 6은 선형 DRT 시스템을 고려한 경우로서, $k_f=1$, $M=2$, $(S/N)_{total}=10[dB]$, 상향링크 SNR 10[dB], 상향링크 JSR 15[dB], 하향링크 JSR

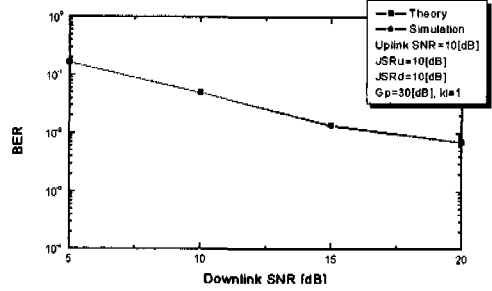


그림 5. 전대역 재밍이 있을 경우의 오류 변화 (선형 DRT 시스템인 경우)

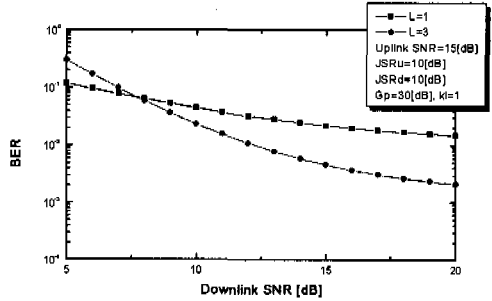


그림 6. 부분 대역 재밍이 있을 경우의 오류 변화 (선형 DRT 시스템인 경우)

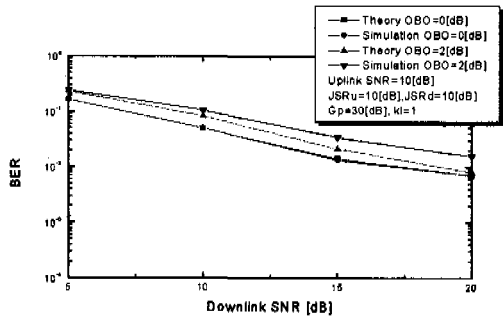


그림 7. 전대역 재밍이 있을 경우의 선형과 비선형 특성 비교

10[dB] 및 처리 이득 30[dB]로 가정하여 상향링크에서 부분 대역 재밍이 있는 경우이다. 심벌 당 흡수를 나타내는 L의 변화에 따른 slow FH 시스템과 fast FH 시스템의 에러확률을 보여주고 있다. fast FH 시스템(L=3)이 slow FH 시스템보다 보다 좋은 에러 확률을 얻을 수 있다. L=3의 경우 선형 위성 중계 시스템은 BER이 약 1.6×10^{-3} 에서 error floor 현상이 일어난다.

그림 7은 상향링크에서 전대역 재밍이 있을 경우, 선형 위성 중계 시스템과 HPA의 OBO를 고려한 비선형 중계 시스템의 비교를 보여준다. 상향링크

