

# 레이리 페이딩 채널환경에서 재머 상태 정보를 이용한 복합재머에 대한 FH/MFSK의 성능 분석

정회원 이동형\*, 손종원\*, 김용로\*, 유흥균\*

## Performance Analysis of FH/MFSK System against Combined Jammer using Jammer Side Information over Rayleigh Fading Channel

Dong Hyung Lee\*, Jong-Won Son\*, Yong-Ro Kim\*, and Heung Gyoon Ryu\* *Regular Members*

### 요약

잡음 재밍과 톤 재밍의 혼합 재밍이 존재하는 Rayleigh 페이딩 환경에서 재머상태정보(JSI)를 이용한 FH/MFSK 시스템의 성능 향상을 분석하였다. 송신 신호와 재머 성분은 각각 Rayleigh 페이딩 환경의 영향을 받으며, 재머상태 정보는 잡음 잡음의 전력이나 톤 재밍의 크기 및 전력을 알 수 있다고 가정하였다. 분석 결과, JSI를 이용한 시스템이 잡음성 재밍의 비율 변동에 관계없이 JSI를 고려하지 않는 시스템보다 성능 향상을 얻을 수 있다.  $E_s/J_0 = 10$  [dB]인 Rayleigh 페이딩환경에서 JSI가 없는 시스템의 경우, 잡음재밍이 비율에 관계없이 최대의 성능 열화값을 갖는 톤 재밍의 비율은 0.1이나, JSI를 이용한 시스템은 다른 값을 가지게 되어, 잡음성 재밍과 톤 재밍의 적절한 비율이 시스템의 성능저하에 최대로 영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

### ABSTRACT

A BER is analyzed for the FH-MFSK system employing jammer state information(JSI) against combined tone and noise jammers. The channel is assumed to be a Rayleigh fading channel, and both information signal and combined jammers are also affected by fading environment respectively. In Rayleigh fading channel, the system with JSI makes more positive effect on overall system performance than one without JSI, regardless of the variation of the noise jamming ratio. In Rayleigh fading channel with  $E_s/J_0 = 10$  [dB], system performance without JSI is the poorest when the tone jamming ratio is 0.1. Thus, the proper combination of noise and tone jamming may be used to get better jamming performance.

### I. 서론

군용 위성통신 시스템에서 서로 다른 사용자 간의 유연성 및 의도적인 재밍에 대처하기 위해, 고속의 FH(frequency hopping) 방식이 널리 쓰이고 있다<sup>[1][2]</sup>. 항재밍 성능을 개선시키는 방법으로 주파수

도약을 DS와 혼합하는 방법, 채널코딩을 이용하는 방법, Complex Arithmetic Processor(CAP)를 이용한 재밍을 억압하는 방법 및 변조 방식을 혼합하는 방법이 있다<sup>[1]~[4]</sup>. 그러나, 주파수 도약에는 한계가 있으며, 코딩을 많이 할수록 처리율이 떨어지는 단점이 있다. 그래서 대역폭내에서 재머의 정보를 이

\* 충북대학교 전자공학과(ecomm@cubucc.chungbuk.ac.kr)  
논문번호: 00189-0601, 접수일자: 2000년 6월 1일

용하여 수신단에서 효과적으로 대처하는 재머 분석 장치가 필요하게 된다<sup>5)</sup>. 이 장치에서 얻을 수 있는 정보는 잡음성 잡음의 전력이나 톤 재밍의 크기 및 전력 등이다. 비트 에러를 증가시키는 재밍으로는 잡음 재밍, 다중 톤재밍 등이 있으며, 이러한 재밍의 영향에 따른 FH-MFSK 시스템에 대한 성능분석과 페이딩 채널을 고려한 연구는 폭넓게 이루어지고 있다<sup>7)18)</sup>. 한편, 다중 톤 재밍의 경우 Rician fading 환경에 대한 분석 및 FFH/ BFSK 시스템에서 self-normalizing 수신기의 성능 개선 등이 있다<sup>9)10)</sup>. 이와 같은 논문들은 재머의 상태 정보를 이용하지 않는 경우의 일반적인 시스템에서 재밍이나 채널의 영향에 의한 성능을 개선시키는 방법에 대한 연구이다. 재밍 상태 정보와 다이버시티 기법을 이용하여 시스템의 성능을 개선한 연구도 있으나 잡음성 재밍환경에서만 분석이 이루어진 것이다<sup>11)</sup>.

그러므로 Rayleigh 페이딩 채널에서 잡음성 재밍과 톤 재밍 성분이 혼합된 능동적인 재밍 환경을 고려하여 재머상태정보(JSI)를 이용하여 시스템의 성능을 분석하였다. 수신기 형태는 hard decision (HD)방법을 이용하며, JSI가 없는 경우와 이용하였을 경우를 고려한다.

## II. 시스템 구성 및 분석

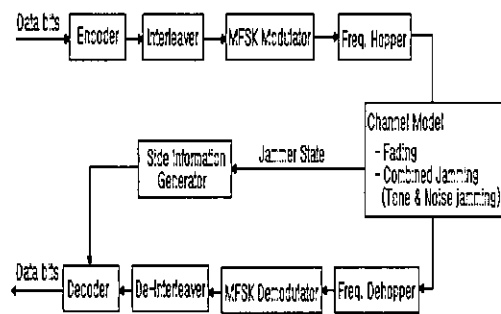


그림 1. 시스템 구성도

재머는  $M$  슬롯중에서 한 개의 슬롯에 있다고 가정한다. 전체 주파수 대역  $W_s$ , 전체 재밍 전력  $J$ , 각 슬롯의 대역폭  $B (= 1/T_h)$ , 및 전체 대역에서 잡음 재밍의 비율은  $\epsilon$ (단,  $0 \leq \epsilon \leq 1$ )이다. 톤 재밍의 전력은  $(1-\epsilon)J$ 이다. 전체 대역에 대한 재밍의 스펙트럼 밀도는 재밍 전력이 균일 분포되어있다고 가정하므로  $J_0 (J_0 = J/W_s)$ 이다. 잡음 재밍의 스펙트럼 밀도는  $\epsilon J_0$ 이다. 잡음 재밍 전력은  $N = \epsilon J_0/T_h$

(단,  $T_h$ 는 호핑 주기)이다.  $S$ 는 수신된 M-ary 신호 전력,  $E_s (= ST_h)$ 는 심벌 에너지, 그리고  $m = \log_2 M$ 이므로, 신호와 잡음재머전력의 관계를  $SNJR$ 로 나타내면,

$$SNJR = \frac{S}{\epsilon J_0/T_h} = \frac{1}{\epsilon} \frac{E_s}{J_0} \quad (1)$$

이다.

전체 주파수 슬롯수  $N_h (N_h = W_s T_h)$ 이며, 톤 재머의 경우  $M$ 슬롯중에서 단지 한 개의 슬롯에만 있다고 가정하였으므로, 톤 재밍의 톤 개수는  $N_{MT} (= W_s/MR_h)$ 이고, 톤재밍의 fractional ratio  $\rho$ 는  $M \cdot N_{MT}/N_h$ 이다. 이러한 톤 재밍의 fractional ratio  $\rho$ 는 부분 대역 재밍환경에서의 fractional ratio  $(J/W_s)$ 와 유사하다. 단일톤 전력  $I (= (1-\epsilon)J/N_{MT})$ 을 고려한 신호와 톤 재머전력의  $SJIR$ 를 구하면 다음이다.

$$SJIR = \frac{S}{(1-\epsilon)J/N_{MT}} = \frac{\rho}{(1-\epsilon)M} \cdot \frac{E_s}{J_0} \quad (2)$$

또한, 톤 재밍과 잡음성 재밍전력의 관계  $INJR$ 를 구할 수 있다.

$$\frac{I}{N} = \frac{(1-\epsilon)M}{\rho \epsilon} \quad (3)$$

주파수 도약된 신호  $s(t)$ 를 고려해본다.

$$s(t) = \sqrt{2} a_c \cos \{ 2\pi [ f_c + (m-1)\Delta f + f_h(t) ] t + \theta(t) \} \quad (4)$$

여기서,  $\Delta f$ 는 MFSK의 직교성을 유지하는데 필요한 주파수 간격( $\Delta f = 1/T_h$ 로 가정),  $f_h$ 는 주파수 합성기 출력값 집합  $\{v_1, v_2, \dots, v_q\}$ 중에서 선택되는 주파수 호핑 패턴값,  $1 \leq m \leq M$ ,  $0 \leq t \leq T_s$ , 및  $\theta(t)$ 는 MFSK의 위상값을 나타내는 랜덤 변수를 나타낸다. Rayleigh 페이딩 채널환경은 다음이다.

$$h(t) = \sum_{l=1}^L \beta_l \chi(t-\tau_l) \exp(j\phi_l) \quad (5)$$

여기서,  $\beta_l$ ,  $\tau_l$  및  $\phi_l$ 은 각각 경로의 이득, 지연 시간 및 위상 지연을 나타내며, 전체 경로수는  $L$ 이다. 이 값은 상호 독립적이라고 가정한다<sup>9)</sup>. 송신 신호와 같이 재밍 성분도 또한 Rayleigh 페이딩 채널 환경에 영향을 받는다고 가정하므로, AWGN을 고려한 전체 채널에서 수신 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = (s(t) + J(t)) * h(t) + n(t) \quad (6)$$

여기서,  $J(t)$ 는 톤 재밍과 잡음성 잡음 재밍이 혼재하는 재밍 신호이다.  $J(t)$ 를 톤 재밍과 잡음 잡음 재밍성분으로 구하자.

$$J_c(t) = \sqrt{2} a_{j_i} \cos \{2\pi [f_c + (m-1)\Delta f + f_{h_i}(t)]t + \theta_j(t)\} \quad (7-1)$$

$$J_s(t) = J_{c_i}(t) \cos w_i t - J_{s_i}(t) \sin w_i t \quad (7-2)$$

여기서,  $a_{j_i}$ 는 톤 재밍의 진폭,  $w_i$ 는  $i$ (단,  $1 \leq i \leq N_m$ ) 번째 슬롯의 중심주파수,  $J_{c_i}(t)$ 와  $J_{s_i}(t)$ 는 평균이 0인 독립적인 가우시안 랜덤 프로세스이다. 한편,  $a_k$  ( $k = c, j_i$ )는 Rayleigh density를 갖는 랜덤 변수이므로<sup>[9]</sup>,

$$f(a_k) = \frac{a_k}{a_k^2} \exp\left(-\frac{a_k^2}{2a_k^2}\right) U(a_k) \quad (8)$$

이다. 여기서, 신호의 평균 전력은  $2a_c^2$ ,  $U(\cdot)$ 는 unit step 함수이다.

재밍 분석 장치로부터 재밍 상태 정보는 정확하다고 가정하고, 이러한 재밍 상태 정보를 벡터  $z_i$  (단,  $1 \leq i \leq M$ )라고 가정한다. 벡터  $z_i$ 는 몇 가지의 종류로 나눌 수 있는데, 예를 들어  $z_1$ 은 신호와 재밍이 같은 주파수 슬롯에 있을 상태를 나타내며, 그림 1에서 복조기 내부의 포락선 검파기 출력값 ( $R_1, R_2, \dots, R_M$ )에 대한 조건부 p.d.f.는 다음과 같다.

$$p(R_1|z_1) = \frac{R_1}{N} \exp\left(-\frac{R_1^2 + a_c^2}{2N}\right) I_0\left(\frac{a_c R_1}{N}\right) \quad (9)$$

$$p(R_k|z_1) = \frac{R_k}{N} \exp\left(-\frac{R_k^2}{2N}\right) \quad (k=2, \dots, M) \quad (10)$$

여기서,  $I_0$ 는 제1종 수정 Bessel 함수이고,  $a_c^2 = 2S + 2I + 2\sqrt{2S}\sqrt{2I} \cos \theta$  (단,  $\theta$ 는 신호와 톤 재밍의 위상차를 가리키며,  $[0, 2\pi]$ 의 범위를 갖는 랜덤 변수이다.) AWGN 및 재밍 환경에서 최대 수신할 수 있는 data rate를 cutoff rate( $R_0$ )로 되는데, 이러한 cutoff rate  $R_0$ 는 파라미터 D의 함수<sup>[11]</sup>로 나타낼 수 있으며, Chernoff bound 파라미터  $\lambda$ 를 이용하면,

$$D(\epsilon, \rho, \lambda) = E\{\exp(\lambda \cdot [\mu(Y, X = m', Z) - \mu(Y, X = m, Z)]) | X = m, m' \neq m\} \quad (11)$$

이다.  $\mu(y, x = m, z)$ 는 전송되는 심벌이  $m$ (단,  $1 \leq m \leq M$ )이고 부분 대역 톤 재밍의 상태 벡터가  $z$ 일 때 수신기의 행렬식을 의미한다. 이러한 확률에 대한 Chernoff bound를 파라미터 D로 쓸 수 있다. 톤 재밍 환경에 대한 파라미터 D의 평균값은 다음이며,  $D(\epsilon, \rho)$ 값이 최소값을 가지는 적절한  $\epsilon$ 과  $\rho$  값을 선택해야 한다.

$$D(\epsilon, \rho, \lambda) = P_s(z_1)D(\epsilon, \rho, \lambda|z_1) + P_s(z_2)D(\epsilon, \rho, \lambda|z_2) + (M-2)P_s(z_3)D(\epsilon, \rho, \lambda|z_3) + P_s(z_0)D(\epsilon, \rho, \lambda|z_0) \quad (12)$$

여기서, 파라미터 D와 코딩을 고려한 비트 에러 확률의 일반적인 관계식은  $P_b \leq G(D)$ 이다<sup>[11]</sup>. 톤 재밍에 대해 hard decision과 JSI를 이용할 경우, 식 (12)를 다시 쓰면<sup>[1]</sup>

$$D(\epsilon, \rho, \lambda, c) = \frac{\rho}{M} [e^{-\lambda(1-(M-1)A)} + e^{\lambda A} + (M-2)A] + \frac{(M-1)\rho}{M} [e^{-\lambda c B} + e^{\lambda c} \frac{1-B}{M-1} + \frac{(M-2)(1-B)}{M-1}] + (1-\rho)[e^{-\lambda(1-(M-1)C)} + e^{\lambda C} + (M-2)C] \quad (13)$$

여기서,  $A, B$  및  $C$ 에 대한 값은 식(8)의 경우처럼 신호와 재밍성분이 각각 Rayleigh 페이딩환경에 영향을 받는다고 가정하여, 두 성분이 페이딩 채널을 통과한 다음의 재밍 상태 벡터에 따른 조건부 확률을 구한 것이다.

① 재밍 상태 벡터  $z_1$ 에 대한 조건부 확률

신호와 톤 재밍 성분이 각각 Rayleigh 페이딩을 거친 후, 톤 재밍과 신호의 주파수가 서로 일치할 경우 이므로, 수신기 출력신호의 전력은 다음과 같다<sup>[10]</sup>.

$$a_c^2 \Rightarrow a_c^2 + a_{j_i}^2 + 2a_c a_{j_i} \cos \theta \quad (14)$$

여기서,  $\theta$ 는 신호와 톤 재밍의 위상차이다.  $a_c, a_{j_i}$ 에 대한 조건부 에러확률을 구한다.

$$A = P_s[R_{m'} > R_j \text{ (all } j \neq m', m' \neq 1) | z_1] = P_s(\text{hop jammed} | \text{signal branch jammed}, a_c, a_{j_i}, z_1) = \sum_{k=1}^{M-1} (-1)^{k+1} \binom{M-1}{k} \cdot \frac{1}{k+1} \cdot \exp\left(-\frac{a_c^2 + a_{j_i}^2}{\sigma_n^2} \frac{k}{k+1}\right) \quad (15)$$

$a_c, a_j$ 에 대해 Rayleigh 페이딩채널을 고려하면, 신호가 있는 슬롯에 톤 재밍의 영향이 있을 경우의 심벌 에러 확률값은 다음과 같다.

$$A = \int_0^\infty f(a_j) \int_0^\infty f(a_c) P_s(\text{hop jammed signal branch jammed}, a_c, a_j, z_1) da_c da_j$$

$$= \sum_{k=1}^{M-1} (-1)^{k+1} \binom{M-1}{k} \cdot \frac{1}{k+1} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{k}{k+1} \left( \frac{S}{N} + \frac{I}{N} \right)} \right) \quad (16)$$

② 재밍 상태 벡터  $z_2$ 에 대한 조건부 확률

신호와 톤 재밍 성분이 각각 Rayleigh 페이딩채널을 통과한 후, 신호와 톤 재밍이 서로 다른 주파수 슬롯에 있는 것을 의미하는 것으로,  $B$ 를 구하면 다음과 같다<sup>[10]</sup>.

$$B = P_s[R_1 > R_j \text{ (all } j) | z_2]$$

$$= P_s(\text{hop jammed signal branch not jammed}, z_2)$$

$$= 1 - \frac{1 + SNJR}{2 + SNJR + INJR} + \sum_{k=1}^{M-2} (-1)^k \binom{M-2}{k} \cdot \frac{1}{1 + k(1 + SNJR)} \left( 1 - \frac{(1 + INJR)(1 + k(1 + SNJR))}{2 + SNJR + INJR + k(1 + SNJR)(1 + INJR)} \right) \quad (17)$$

③ 재밍 상태 벡터  $z_0$ 에 대한 조건부 확률

재밍 상태 벡터  $z_0$ 는 톤 재밍의 영향이 없는 경우이므로 페이딩채널을 통과한 신호만 있다. 우선, AWGN 채널환경에서 MFSK 신호의 심벌 에러 확률은 다음과 같다.

$$C = P_s[R_m > R_j \text{ (all } j \neq m', m' \neq 1) | z_0] \quad (18)$$

$$= P_s(\text{hop not jammed}, a_c, z_0)$$

$$= \sum_{k=1}^{M-1} (-1)^{k+1} \binom{M-1}{k} \frac{1}{1+k} \exp\left(-\frac{a_c^2}{2\sigma_n^2} \frac{k}{1+k}\right)$$

식 (18)를 Rayleigh 페이딩 채널 환경을 고려한 전체 심벌 에러 확률은 다음과 같다<sup>[5]</sup>.

$$C = \int_0^\infty P_s(\text{hop not jammed}, a_c, z_0) f(a_c) da_c$$

$$= \sum_{k=1}^{M-1} (-1)^{k+1} \binom{M-1}{k} \frac{1}{1+k} \frac{1}{1 + \frac{1}{1+k} \cdot \frac{E_s}{N_0}}$$

$$= \sum_{k=1}^{M-1} (-1)^{k+1} \binom{M-1}{k} \frac{1}{k+1 + k \cdot SNJR} \quad (19)$$

### III. 성능 분석과 논의

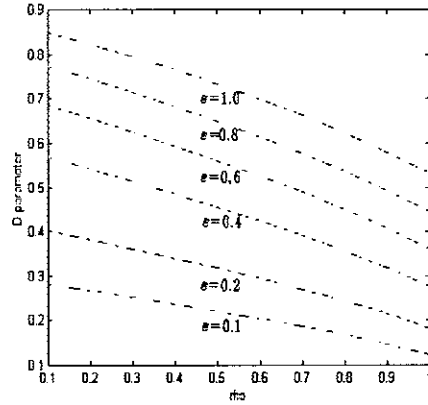


그림 2. 4-FSK에서 JSI를 이용하지 않는 Hard decision 인 경우 ( $E_s/J_0 = 10$ [dB]).

그림 2는  $E_s/J_0$  값이 10[dB]일 때, 톤 재밍 fraction ratio  $\rho$ 와 전체 주파수 대역중에서 잡음 재밍이 차지하는 비율  $\epsilon$ 의 관계를 그린 것이다.  $E_s/J_0$ 의 값이 증가할수록 파라미터  $D$  값이 감소되며,  $\epsilon$ 와  $\rho$ 의 변동에 따라 파라미터  $D$  값이 다른 값을 갖게 된다. JSI를 이용하지 않는 시스템을 나타내는 그림 3과 비교하면, JSI를 이용함으로써  $\epsilon$ 의 변동에 관계없이 전체적으로 성능 향상을 얻을 수 있다.

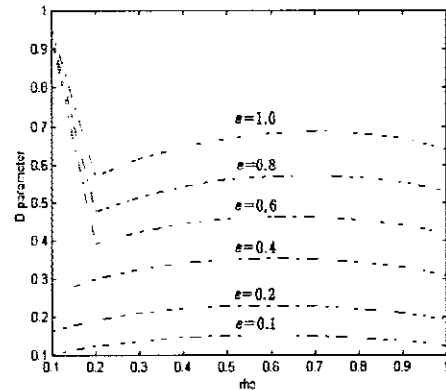


그림 3. 4-FSK에서 Hard decision과 JSI를 이용한 경우 ( $E_s/J_0 = 10$ [dB])

따라서, 완벽한 JSI와 hard decision 방법을 사용할 경우 잡음성 재밍과 톤 재밍의 적절한 비율이 시스

템의 성능저하에 최대로 영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다.

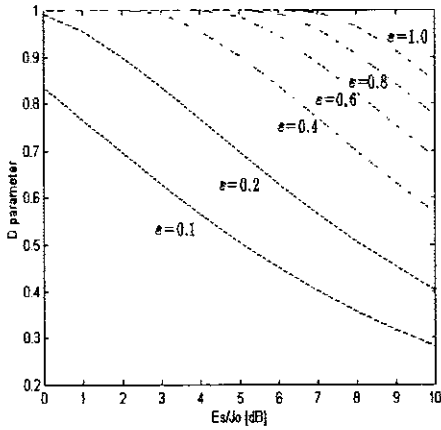


그림 4. 4-FSK에서 JSI를 이용하지 않는 Hard decision방법의 경우( $\rho=0.1$ )

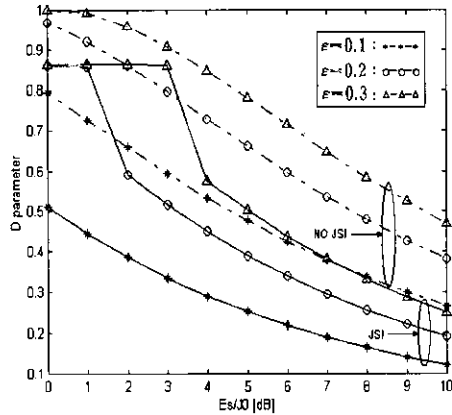


그림 5. 4-FSK에서 JSI있는 경우와 아닌 경우의 성능비교

또한, 그림 3에서 잡음성 재밍만 있는 경우 즉,  $\epsilon=1.0$ ,  $E_s/J_0=10$  [dB]인 조건에서 톤 재밍의 fractional ratio값이 1인 경우가 1보다 작은 값을 가질 때보다 더 좋은 성능을 나타내는데, 이것은 기존의 연구결과<sup>[11]</sup>와 같은 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그림 4는 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서 JSI를 이용하지 않은 hard decision방법을 고려한 시스템에서  $E_s/J_0$ 와 파라미터 D의 관계를 보여주고 있다.  $\epsilon$ 의 변동에 관계없이 파라미터 D의 값이 감소되어 어느 정도의 성능 향상을 얻을 수 있으나,  $E_s/J_0=10$  [dB],  $\rho=0.1$  및  $\epsilon=0.1$ 를 기준으로 그

림 2과 그림 4를 비교하여 볼 때, JSI를 이용한 시스템이 더 성능 향상이 있음을 알 수 있다.

그림 5는 4FSK에서  $\epsilon$ 과  $E_s/N_0$ 의 변화에 따른 JSI가 있는 시스템과 JSI가 없는 시스템을 비교하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 JSI를 이용한 시스템이 JSI를 이용하지 않은 시스템보다 더 성능향상을 얻을 수 있다.

#### IV. 결론

잡음 재밍과 톤 재밍 성분이 혼합된 능동적인 재밍이 존재하는 Rayleigh 페이딩 채널환경에서 JSI를 이용한 FH/MFSK 시스템의 성능 향상을 분석하였다.  $E_s/J_0$ 의 값이 증가할수록 파라미터 D값이 감소되나,  $\epsilon$ 의 변동에 따라 파라미터 D값이 다른 값을 가지게 된다. 따라서, Rayleigh 페이딩 채널 환경에서 완벽한 JSI와 hard decision방법을 사용함으로써, 잡음성 재밍과 톤 재밍 성분이 혼합된 능동적인 재밍의 적절한 조합비율이 시스템의 성능저하에 최대로 영향을 끼칠 수 있음을 알 수 있다. 그러나, JSI를 이용하지 않는 시스템은 JSI를 이용한 시스템보다 전체적으로 성능 열화가 생기며, 또한, JSI를 고려한 시스템의 경우, 잡음성 재밍과 톤 재밍의 적절한 값을 통해서도 어느 정도의 성능 향상이 있다. 따라서, Rayleigh 페이딩과 같은 채널환경에서 재밍 상태 정보를 이용함으로써 보다 개선된 FH/MFSK 시스템의 성능을 얻을 수 있게 된다.

#### 참고 문헌

- [1] Hyuck M.Kwon and Pil Joong Lee, "Combined Tone and Noise Jamming Against Coded FH/MFSK ECCM Radios", *IEEE J. Select. Areas in Comm.* vol. 8, June, 1990
- [2] J.Scott Chuprun, Chad S. Bergstrom and Amy M.Guzek, "Advanced Interference Rejection and Antijam Methods for Low Power Mobile Battlefield Communications", *IEEE Trans.*, on Comm. 1997
- [3] Klaus Dostert, "Automatic classification of Jammers in Spread Spectrum Burst Transmission Systems", *IEEE Trans.*, on Commun. 1983
- [4] Hyuck M.Kwon, "Capacity and Cutoff Rate of

