잡음과 Multitone Jamming 하에서 FH/BFSK 시스템의 성능분석

○서 기 영 , 한 영 열
한양대학교 전자통신공학과

Performance Analysis of FH/BFSK System With Noise and Multitone Jamming

Kee Young Seo , Young Yearl Han
Dept. of Electronic Com. Eng. Hanyang Univ.

ABSTRACT

In this paper , the performance of noncoherent FH/FSK system in the presence of multitone jamming noise is analyzed.
Error probabilities of random and structured multitone jamming are shown as a function of number of jamming tone, jamming Power to Signal power ratio , one jamming tone power to signal power ratio .

1. 서 론

확산대역통신 (Spread Spectrum Communication) 은 원래 보내려하는 데이타의 주파수 대역폭보다 훨씬 더 넓은 주파수 대역폭을 가지고 통신하는 방식이다.[1]

주파수 대역의 확산은 주로 장치 구성이 쉽고 송신기와 동기를 이룰수 있는 PN (pseudo-noise) 부호를 사용하며 이 부호의 사용으로 송신신호의 대역폭이 넓어지며 수신측에서도 같은 PN부호를 사용하여 역확산 (Despreading) 하므로 원래의 신호를 검출해낼수 있다.

이러한 확산대역 (Spread Spectrum) 통신에는 확산시키는 방법에따라 크게 직접확산 (Direct Sequence), 주파수도약 (Frequency Hopping), 시간도약 (Time Hopping) 방식등과 이들을 조합한 방식이 이용되고 있다.

이중에서 FH (Frequency Hopping) 방식은 DS (Direct Sequency)에 비해 Aquisition Time 이 짧고 대역확산을 크게 할 수 있다는 장점이 있으며 부호분할 다중접근 (Code Division Multiple Access) 및 고성밀 거리측정 장치에까지 응용이 되어 있고, 근래에는 유선통신에까지 그 사용 영역이 확대되고 있다.

또한 이 방식은 PN부호에 의해 주파수가 랜덤 (random) 하게 뛰므로 인위적인 간섭파 (Jamming Interference) 에 강하며 도청자로부터의 메시지 보호기능 (Low Probability of Intercept) 등 비화성이 강하여, 통신기의 복잡성과 수신기에서 동기의 어려움이 있음에도 불구하고 군사통신등에 널리 이용되고 있다.

특히 내부분의 군사통신에 있어서 Jamming 의 영향은 매우 중요한 문제가 된다.

본 연구에서는 비동기 FH/FSK (Noncoherent Frequency Hopping / FSK) 시스템이 Noise 와 최악의 경우 (Worst case) 에서 Multitone Jamming 신호의 영향을 받고 있을때 시스템 성능을 분석하였으며, 특히 Random Multitone Jamming과 Structured Multitone Jamming이 있을 경우로 나누어 Worst Case 오율 (error probability) 을 구하고 그에 따른 성능을 비교 검토하였다.

2. 시스템의 개요

본 연구에서 통신 시스템은 2 진데이타계열 (Binary Data Sequence) 의 정보를 2 진FSK (Binary Frequency Shift Keying) 에 의해 보내는것으로 한다. 채널에서의 잡음은 전력스펙트럼밀도 (Power Spectral Density) 가 $N_o/2$인 A.W.G.N (Additive White Gaussian Noise) 이며 N_o는 Single-sided Power Spectral Density 이다.

여기서 채널은 Gaussian Noise와 Tone Jamming 에 의해 영향을 받고 (Jammed) 있다. 그러한 Jamming 간섭(Interference) 의 영향을 줄이거나 제거하기 위하여 통신자(Communicator) 는 Band 폭 W(Hz) 의 FH시스템을 사용하게 되며 다음과 같은 프로세스 이득 (Process Gain) 을 얻게 된다.

$$PG = W / R_b$$

$$W >> R$$

R_b : Source Sequence 의 bit rate
W : 전 주파수 대역

Random Jamming은 Jammer 가 전 주파수 Slot에 걸쳐 임의로(Random) Tone Jamming을 걸어주고 Structured Jamming 은 Jamming 이 걸리는 Slot 에 한개의 Tone Jamming 이 걸리는 것이다. Jamming 신호는 총 J 의 Power 로 n_J개의 Jamming Tone을 주파수에 분포 시키게 된다. 여기서 Jamming Power 와 신호 Power 와의 관계를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$J/n_J = S/\alpha \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

J: 제한된 전체 Jamming Power

n_J :Jamming Tone 수 S: 신호 Power

α :1 개의 Jamming Tone Power와 신호 Power 와의 비

또 Multitone Jamming 은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$J(t) = \sqrt{2J/n_J} \sum_{n=1}^{n_J} \cos(w_n t + \phi)$$

J :전체 평균 Jamming Power

n_J :Jamming Tone수

W_n :Jamming 신호 주파수

ϕ : Jamming 신호 위상

여기서 ϕ는 0 과 2π 구간에서 독립적이고 일정(Uniform)하게 분포되어 있다. FH/FSK의 신호 파형은 다음과 같이 된다.

$$S_T(t) = \sqrt{2S}\cos(W_h + W_i)t$$

$$nT < t \leq (n+1)T$$

S : 평균 신호 Power

W_h: 도약 주파수

W_i: 신호 주파수

Hopping 속도와 신호의 Bit Rate는 같으며 신호 주파수W 는 i=1,과 2 로 다음과 같이 정의한다.

$S_1(t) = \sqrt{2S}\cos(W_h + W_1)t$ "Mark"

$S_2(t) = \sqrt{2S}\cos(W_h + W_2)t$ "Space"

그림 1.1은 수신기의 블럭도로 Dehopping 된후 수신된 신호 r(t)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

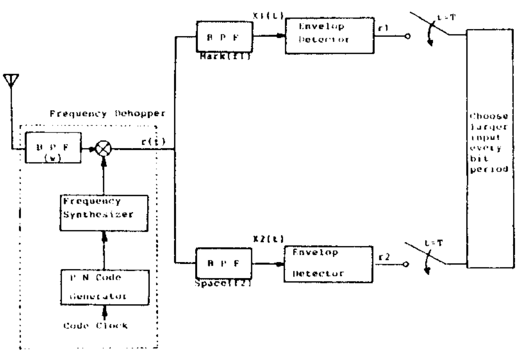

그림 1·1 Noncoherent FH/BFSK 수신기 블럭도

$$r(t) = \begin{cases} S(t) + n(t) + J(t) & : \text{Jamming 신호가 있는 경우} \\ S(t) + n(t) & : \text{Jamming 신호가 없는 경우} \end{cases}$$

3. 잡음과 Jamming 하에서 시스템의 오율

FH/FSK에서 Channel 에서 발생할 수 있는 Jamming 신호에 대해 각기 다른 3가지 경우를 생각할 수 있다.

각기의 경우에 대한 오율은 다음과 같이 정의한다.

$P_0(e)$: No Jamming Tone 일때의 오율 (Error Probability)

$P_1(e)$: One Jamming Tone 일때의 오율 (Error Probability)

$P_2(e)$: Two Jamming Tone 일때의 오율 (Error Probability)

우선 $P_1(e)$ 의 경우 Jamming 신호는 S_1에 걸쳐졌다(Hit) 가정하고 S_1을 보냈을 때와 S_2를 보냈을 때로 구분하여 계산한다.

1개의 Jamming Tone 이 있을때의 오율

$$P_1(e) = (1/2)P(e \mid S_1) + (1/2)P(e \mid S_2)$$

$$= 1/4\ \mathrm{EXP}\{-1/2(S/N_0 + J/N_0 n_J)\}$$

$$[\mathrm{EXP}\{\sqrt{S/N}\sqrt{J/N_0 n_J}\cos\phi\ I_0(\sqrt{S/N_0}\sqrt{J/N_0 n_J})]$$

$$+ 1/2\ Q(\sqrt{J/N_0 n_J}, \sqrt{S/N_0})$$

Marcum's Q function 은 다음과 같이 정의된다.

$$Q_M(a,b) = (1/a^{M-1})\int_b^{\infty} x^M \mathrm{EXP}[-(x^2 + a^2)]\ I_{M-1}(ax)dX$$

여기서 $I_0(x) = 1/2\pi \int_0^{2\pi} \mathrm{EXP}(x\cos\theta)\,d\theta$

$I_0(x)$ 는 zero order modified Bessel function of first kind 이다.

Slot에 1개의 Jamming Tone도 없을 경우 오율 $P_0(e)$ 는 Gauuian Noise 만 있는경우로 다음과 같이 된다.

$$P_0(e) = 1/2\ \mathrm{EXP}(-S/2N_0)$$

주파수 Slot에 2개의 Jamming tone이 모두 있는 경우의 오율 $P_2(e)$ 는 2개의 주파수에 모두 Jamming 신호가 존재하므로 신호 관점(통신자입장) 에서 볼때 전 주파수 내역에 걸처 Jamming 신호가 존재한다고 볼수있다.

즉 Jamming 신호는 특정한 주파수에서의 잡음 신호로 Model 화 된다. 즉 $\sqrt{2J/n_J}\cos(W_i t + \phi)$ 는 J/n_JPower 를 갖는 i th Frequency chip 의 잡음이다. 그러므로 Tone Jamming신호가 Binary FSK에서 2개의 주파수내에 균일한 Jamming density 로 걸린경우 Signal관점에서는 $2J/n_J$의 Single sideded Power Spectral Density 가 걸린 Gaussian Noise 로 볼수있다.

$J = N_J/T$ N_J: Jamming noise density
$1/T$: Band 폭
J : Jamming Power

$T=1$ 일때 $J=N$ 이므로 $2J/n_J$ 의 Single sided density 가 된다. 그러므로 $P_2(e)$는 다음과 같이 된다.

$$P_2(e) = 1/2\ EXP\{-n_J/4(J/S)\}$$

4. Random Multitone Jamming

Random 인경우 전체 오율은 다음과 같이 된다.

$$P(e) = \beta_{h0} P_0(e) + \beta_{h1} P_1(e) + \beta_{h2} P_2(e)$$

① β_{h0}: 1 개의 Slot에 Jamming tone 이 하나도 없을 확률

$$\beta_{h0} = (1 - n_J/n_c)(1 - n_J/(n_c - 1)) = (n_c^2 - n_c - 2n_c n_J + n_J + n_J^2) / (n_c^2 - n_c)$$

n_c: 전체 주파수 대역(W)에서 전체 Chip수

n_J: 전체 Jamming tone 수

② β_{h1}: 1 개의 Slot에 Jamming tone 이 1개 있을 확률

$$\beta_{h1} = 2(n_J/n_c)(1 - (n_J - 1)/(n_c - 1)) = (2n_c n_J - 2n_J^2)/(n_c^2 - n_c)$$

③ β_{h2}: 1 개의 Slot에 Jamming tone이 2개 있을 확률

$$\beta_{h2} = n_J/n_c \cdot (n_J - 1)/(n_c - 1) = (n_J^2 - n_J)/(n_c^2 - n_c)$$

여기서 $\beta_{h0} + \beta_{h1} + \beta_{h2} = 1$

그러므로 Random Multione Jamming 에서의 오율은

$$P(e) = (n_c^2 - n_c - 2n_c n_J)/(n_c^2 - n_c)\ 1/2\ EXP\{-S/2N_0\}$$
$$+ (2n_c n_J - 2n_J^2)/(n_c^2 - n_c)$$
$$[\,1/4\ EXP(-1/2(S/N_0 + J/N_0 n_J)) \cdot \{EXP(\sqrt{S/N}\sqrt{J/N_0 n_J}\cos\phi) - I_0(\sqrt{S/N_0}\sqrt{J/N_0 n_J})\}$$
$$+ 1/2\ Q(\sqrt{J/N_0 n_J}, \sqrt{S/N_0})\,]$$
$$+ (n_J^2 - n_J)/(n_c^2 - n_c)\ 1/2\ EXP\{-n_J/4(J/S)\}$$

여기서 (1) 식을 이용하면
$J/N_0 n_J = J/N_0 \cdot 1/(J/S)\alpha$ 이 된다. 즉 $P(e)$ 에서 $J/N_0 n_J$ 대신 $J/N_0 \cdot 1/(J/S)\alpha$ 을 대입하면 전체 식은 n_c, n_J, S/N, J/S, α의 함수로 표현이 된다.

5. Structured multitone Jamming

Jammer 는 jamming 신호가 걸리는 slot에 1개의 jamming tone을 발생한다. 이때 Structured multitone Jamming의 전체 오율은 다음과 같이 된다.

$$P(e) = \beta_{h0} P_0(e) + \beta_{h1} P_1(e)$$

① β_{h1} : jamming tone이 slot 당 1개가 걸릴 확률.

$$\beta_{h1} = n_J / (n_c/2) = 2n_J/n_c$$

② β_{h0} : jamming tone이 1개도 걸리지 않을 확률.

$$\beta_{h0} = 1 - \beta_{h1} = 1 - 2n_J/n_c = (n_c - 2n_J)/n_c$$

③ β_{h2} : jamming tone이 2개 걸릴 확률

$$\beta_{h2} \triangleq 0$$

$$P(e) = \{(n_c - 2n_J)/n_c\}\ (1/2)\ EXP[-S/2N_0]$$
$$+ (2n_J/n_c)\ [(1/4)\ EXP[-(1/2)\{(S/N_0) + (J/N_0)(1/(J/S)\alpha)\}]$$
$$[EXP[\sqrt{(S/N_0)(J/N_0)(1/(J/S)\alpha)}\cos\phi] - I_0(\sqrt{(S/N_0)(J/N_0)(1/(J/S)\alpha)})]$$
$$+ (1/2)\ Q(\sqrt{(J/N_0)(1/(J/S)\alpha)}, \sqrt{(S/N_0)})]$$

6. Simulation 결과및 검토

결과에 대한 분석에서 S/N =7dB 로 고정 시켰다. n_c는 10^4개로 하였으며 J/N 은 S/N 과 J/S 에 의해 결정된다. 즉 Pe는 α, n_J, J/S, ϕ의 함수로 되며 여기서 ϕ 에 대해 평균을 취한 결과와 Worst case의 Jamming 위상에서의 결과가 1 dB 가량의 차이가 생기므로[4] ϕ 는 결과에 큰 영향을 주지 못한다. 실제로 그림 1-4는 J/S = 10 dB 일때 α 와 Pe 과의 관계를 나타낸 것으로 $\phi = 3\pi/4$, $\pi/2$, $\pi/4$ 일때 Pe에는 큰 차이가 없다.

Structured multitone Jamming에 대한 시뮬레이션 분석에서도 S/N = 7 dB, $n_c = 10^4$ 으로 고정시켰다. 그림 1-2, 1-3 에서 α = 1 일때 최대 오율이 됨을 알수있다.

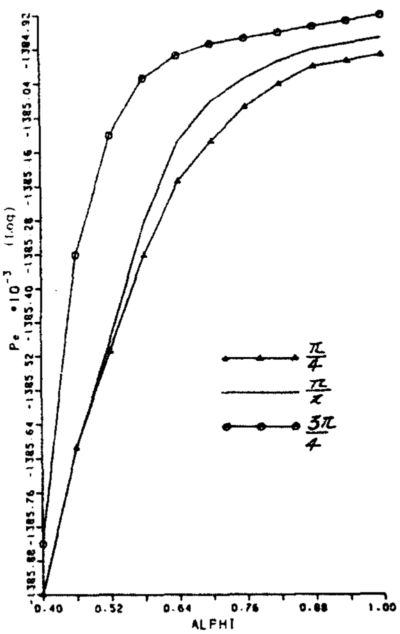

그림 1-2 Random Multitone Jamming에서 α 에 대한 오율 (J/S=10dB, S/N=7dB)

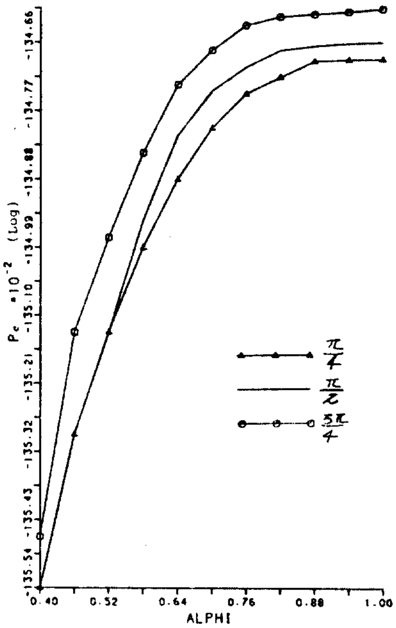

그림 1.3 Random Multitone Jamming에서 α 에 대한 오율(J/S=20dB, S/N=7dB)

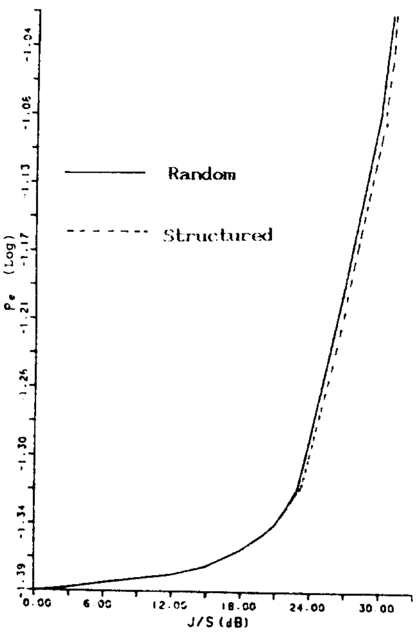

그림 1.4 Worst case Multitone Jamming에서 J/S(dB) 에 대한 오율

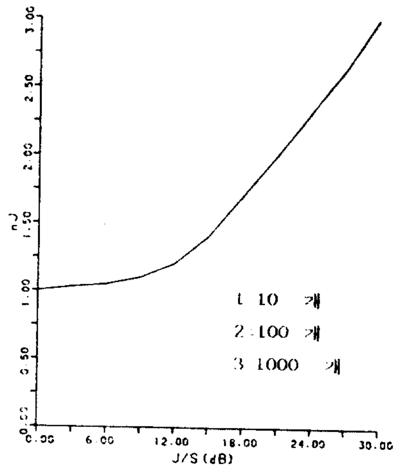

그림 1.5 Worst case Multitone Jamming에서 J/S 와 Jamming Tone 수(n_J)

5. 결론

비동기 FH/FSK에서 잡음과 multitone jamming이 있을 경우에 대해 정량적(quantitative) 분석을 하였고 random과 Structured Multitone Jamming에 대한 각각의 오율을 J/S (jamming to signal power ratio), n_J (jamming tone 수)와 α (1 개의 Tone jamming power to Signal power ratio)의 함수로 구했으며 오율은 Jamming 신호 위상(ϕ) 에 큰 영향을 받지 않음을 알수 있었다.

또 α = 1 일때, 즉 1개의 jamming tone power와 신호 power 가 같을때 최악(worst case)의 오율이 됨을 알수 있다. J/S ≥ 25 dB 이상에서 오율은 크게 증가하며 Random과 Structured Multitone Jamming 전략(strategy) 에 무관하다. 즉, Random과 Structured 에서의 오율 Performance 는 거의 같음을 알수있다.

REFERENCE

1. 한 영열, " 스펙트럼 확산 통신 시스템 (FH,DS,CDMA)" ,대한전자공학회 단기강좌, 1986.
2. Don J.Torrieri ," Principle of Military Communication Systems", Artech,1981.
3. Zimer/Tranter , " Principle of Communication " ,Houghton Mifflin ,1985.
4. James E. Blanchard ," Performance of M ary FSK/FH against Optimum Multitone Jamming " , IEEE International Communication Conference ,1982.