

효과를 고려한 FH / FSK 에 관한 연구

正會員 朴 鎮 秀**

nce of FH / FSK Including Correlation Effects

PARK** *Regular Members*

要 約 잡음과 멀티톤 재밍의 존재하는 비동기 FH / FSK 시스템에서 랜덤과 조직적 재밍의 오류확률을 유도하고 그 성능을 분석하였으며, 또한 최악의 경우 partial-band 재밍간섭하에서 Hamming, BCH, Convolutional code 등의 오류정정 부호를 사용했을 때 각각에 대한 오류를 구하고 그에 따른 성능을 분석하였다.

ABSTRACT In the noncoherent FH / FSK system presence of the multitone jamming and noise, in the case random and the structured jamming model, the performance analyzed that random and structured jamming derived error probability. It is found that error probability and performance when error correcting code used Hamming, BCH, Convolutional code under the worst case partial-band jamming interference.

I. 서 론

확산 대역 통신(Spread Spectrum Communication) 방식은 협대역을 지양하는 통신방식과는 다르게 확산부호를 사용하여 기저대역(base bandwidth) 보다 훨씬 넓은 광대역(broad bandwidth)으로 확산하여 통신을 행하는 통신방식으로 위성통신(satellite communication)이나 컴퓨터 데이터 버스 및 다중접속(multiple access)에 이용하려는 연구가 진행되어왔다. 확산 대역 통신 방식은 상대방의 전송 정보를 쉽게 알 수 없을뿐 아니라 그 변조 방식이 복잡해서 쉽게 복조할 수 없으므로 보안성이 높다.

주파수 대역의 확산은 확산 부호를 사용하여 확산시키며, 송신단에서 정보 신호는 확산 부호에 의해 송신 신호의 대역폭이 확산되어지고

수신단에서는 송신단에서 사용한 확산 부호를 사용하여 역 확산(despreading)시켜 원래의 정보 신호를 검출할 수 있다.

이와 같은 확산 대역 통신에는 확산시키는 방법에 따라 1)직접확산(Direct Sequence) 방식 2)주파수 도약(Frequency Hopping) 방식 3) 시간 도약(Time Hopping) 방식 4) 하이브리드 방식등이 있다. 이 중에서 TH 방식이나 하이브리드 방식은 간섭과 제거능력이 낮은데서 일반적으로 스펙트럼 확산방식이라고 하며, 주로 확산 방식은 DS와 FH 방식을 의미한다. FH 방식은 DS 방식에 비하여 AT(Acquisition Time)이 짧으며, DS 방식에서 문제가 되는 다중 경로(Multi-path)나 페이딩(fading)에 대해서 유효하기 때문에 이동국으로서도 유리한 방식이라고 할 수 있다. 또한 FH 방식은 주파수가 랜덤(random)하게 되므로 재밍 간섭(jamming interference)에 대한 보호 기능과 메시지 보호 등 비화성이 강하기 때문에 널리 이용되고 있으

*忠州工業專門大學
Dept. of Electronics, Chung-ju Technical Junior College
**淸州大學校 電子工學科
Dept. of Electronics, Cheong-ju University
論文番號 : 91-40 (接受1991. 1. 17)

며, 단일 채널에서 많은 사용자가 동시에 이용할 수 있는 CDMA(code division multiple access)가 가능하다¹⁾.

또한 대역 확산 통신에 적용하는 오류 정정 부호는 AWGN(Aditive White Gaussian Noise)가 포함된 전송 채널상에서 발생하는 오류의 발생을 줄일 수 있는 기법으로 이용된다. AWGN 채널에서 부호화를 함으로써 성능이 향상 된다는 것은 잘 알려져 있는 사실이며, 오류 정정 부호에 대하여도 많은 연구가 지속되고 있다. 그러나 확산 스펙트럼 시스템에서 재밍(jamming)을 방지하는 기법으로서 사용하는 오류 정정 부호 사용에 대하여는 앞으로도 꾸준한 연구가 요구되는 중요한 분야라고 할 수 있다.

재밍에는 잡음 재밍, partial band jamming, pulss jamming이 있으며, 특히 FH(Frequency Hopping) 통신 방식에서는 partial band jamming 이 중요시 되고 있다.

본 논문에서는 재밍이 존재하는 비동기 FH/FSK 시스템에서 다음과 같은 사항을 수행하였다.

1. 잡음과 최악의 경우(worst case)에서 MJS (multitone jamming signal)의 영향을 받고 있을 때 시스템의 성능 분석
2. 랜덤 멀티톤 재밍과 조직적 멀티톤 재밍이 있을 때도 분류하여 최악의 경우 오류 확률을 구하고 그에 따른 성능 비교 분석
3. partial-band 재밍이 최악의 경우 partial band 재밍이라는 가정하에서 Hamming(7, 4), BCH(127, 92), BCH(127, 36), BCH(127, 64), GOLAY (23, 12), CONV(RATE1/3), CONV(RATE 1/4), CONV(RATE 1/2) 부호를 오류 정정 부호로 사용하였을 경우 각각의 오류 정정 부호에 대한 성능을 비교 분석하였다.

II. 시스템 분석

본 연구에서 사용된 통신 시스템을 그림 1에서 보여주고 있다. 시스템에서 FSK에 의해 보내지는 정보는 2진 정보 계열(binary data sequency)로 전송되어지며, 채널에서 부가되는 잡음은

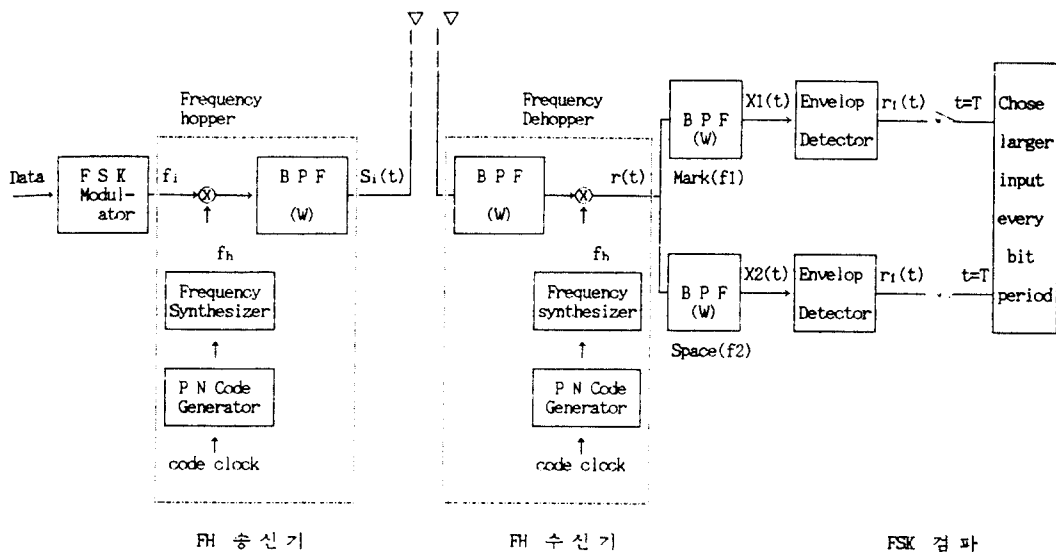


그림 1. 비동기 FH/FSK 통신 시스템
Fig. 1. Communication System of the Noncoherent FH/FSK.

평균 "0"인 백색 가우시언 잡음(AWGN : additive white gaussian noise)으로 전력 스펙트럼 밀도(power spectral density)가 $N_0/2$ 이다.(N_0 : 단측 스펙트럼 밀도)

채널상에서 인위적인 방해신호로 존재하는 재밍은 크게 잡음 재밍과 pulse 재밍으로 나눌 수 있으며, 잡음 재밍은 광대역 잡음 재밍(broadband noise jamming)과 부분 대역 잡음 재밍(partial band noise jamming), 그리고 pulse jamming에는 단일 톤 재밍(single-tone jamming) 과 다중 톤 재밍(multitone jamming)으로 나눌 수 있다.

부분 대역 재밍은 J/W_J (J : 재밍 전력, W_J : 재밍의 주파수 대역)의 전력 밀도를 가지고 주파수 대역에 $W_J/W_{ss}(=\rho)$ 인 비로 주파수 대역에 방해신호로서 일정하게 영향을 미친다. 멀티톤 재밍의 경우는 주파수의 각 칩(chip)에 재밍 신호를 걸어주게 된다.

송신단에서 전송된 정보 신호를 $S_i(t)$ 라고 하면, 시스템에서 신호의 파형은 다음과 같다²⁾⁽³⁾.

$$S_1(t) = \sqrt{2S} \cos(\omega_h + \omega_1)t \quad nT < t \leq (n+1)T, \quad (1)$$

n : 정수
 S : 평균 신호 전력
 ω_h : 도약 주파수
 ω_1 : 신호 주파수

시스템에서 주파수 도약 속도와 비트 율(bit rate)이 같다고 가정하면, 정보 신호의 주파수 ω_i ($i=1, 2$)는 다음과 같이 정의한다³⁾.

$$S_1(t) = \sqrt{2S} \cos(\omega_h + \omega_1)t \quad \text{"Mark"} \quad (2)$$

$$S_2(t) = \sqrt{2S} \cos(\omega_h + \omega_1)t \quad \text{"Space"}$$

그림 1에서 입력된 정보는 FSK 변조기를 통하여 마크(Mark) 신호 f_1 과 스페이스(Space) 신호 f_2 가 확산 부호인 PN 부호가 주파수 합성기에 의해 생성된 도약 주파수 f_h 와 곱하여저 대역폭이 ω 인 대역 여파기(BPF)를 통과한 후

채널을 통하여 전송된다. 수신기에서 수신된 신호는 송신기에서 행해진 역순에 의해 정보 신호를 검출하며, 수신된 신호는 잡음 및 간섭 신호와 더해진 신호로서 $r(t)$ 로 표현할 수 있다.

$$r(t) = \begin{cases} S(t) + n(t) + J(t) & \text{: 재밍 신호가 존재하는 경우} \\ S(t) + n(t) & \text{: 재밍 신호가 존재하지 않는 경우} \end{cases} \quad (3)$$

신호 $J(t)$ 는 멀티톤 재밍 신호로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J(t) = \sqrt{\frac{2J}{n_J}} \sum_{n=1}^{n_J} \cos(\omega_n t + \Phi) \quad (4)$$

J : 전체 평균 재밍 전력
 ω_n : 재밍 신호 주파수
 n_J : 재밍 톤 수
 Φ : 재밍 신호 위상

여기서 Φ 는 0과 2π 구간에서 일정하게 분포되어 있으며 독립이다. 또한 재밍 신호는 총 J 의 전력으로 n 개의 톤 재밍을 주파수에 분포시키게 되므로 재밍 전력과 신호 전력과의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{J}{n_J} = \frac{S}{\alpha} \quad (5)$$

S : 신호 전력
 α : 신호전력과 1개의 톤 재밍 전력과의 비($0 < \alpha \leq 1$)

III. 시스템의 오류 확률(error probability)

전송 채널상에서 정보 신호가 재밍 신호의 영향으로 인하여 오류가 발생할 수 있는 경우는 3가지 경우로 다음과 같다.

1) Mark와 Space 신호에 톤재밍이 존재하지 않을 경우 오류 확률 : $P_0(e)$

Mark와 Space 신호에 재밍이 존재하지 않을 경우는 가우시언 잡음만이 존재하는 경우로 이때 오류 확률 $P_0(e)$ 는 다음과 같다⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

$$P_0(e) = \frac{1}{2} \exp \left[\frac{-S}{2N_0} \right] \quad (6)$$

2) Mark와 Space중 하나의 신호에 톤재밍이 존재할 경우 오류 확률 : $P_1(e)$.

Mark와 Space 신호중 하나에 재밍이 존재할 경우는 신호 S_1 과 S_2 에서 오류가 발생할 오류 확률을 합한 것이 $P_1(e)$ 가 된다⁽²⁾.

$$\begin{aligned} P_1(e) &= \frac{1}{2} P(e|S_1) + \frac{1}{2} P(e|S_2) \\ &= \frac{1}{4} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{S}{N_0} + \frac{J}{N_0 n_J} \right\} \right] \cdot \\ &\quad \left\{ \exp \left[-\sqrt{\frac{S}{N_0}} \frac{J}{N_0 n_J} \cos \Phi \right] \right. \\ &\quad \left. - I_0 \left[\sqrt{\frac{S}{N_0}} + \sqrt{\frac{J}{N_0 n_J}} \right] \right\} \\ &\quad + \frac{1}{2} Q \left[\sqrt{\frac{J}{N_0 n_J}} \sqrt{\frac{S}{N_0}} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 Marcum's의 Q함수는 다음과 같다.

$$Q_M(a, b) = \frac{1}{a^{M-1}} \int_0^{\infty} X^M \exp \left[\frac{-(X^2 + a^2)}{2} \right] I_{M-1}(ax) dx \quad (8)$$

$$I_0(X) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp [X \cos(\theta)] d(\theta) \quad (9)$$

3) "Mark"와 "Space" 신호 모두 톤재밍이 존재할 경우 오류 확률 : $P_2(e)$

"Mark"와 "Space" 신호에 톤재밍이 존재할

경우는 전송 신호 S_1 과 S_2 의 주파수에 톤재밍이 존재하게 되므로 전 주파수 대역에 재밍 신호가 존재한다고 할 수 있다.

따라서 재밍 신호는 잡음 신호로 J/n_J 의 전력을 갖는 i 번째 주파수 칩의 잡음으로서 $\sqrt{2J/n_J} \cos(\omega_i t + \Phi)$ 로 모델화 되어진다. 그러므로 신호 S_1 와 S_2 의 주파수 대역에 재밍 신호가 일정한 밀도로 존재할 경우 신호 관점에서는 단측파 전력 스펙트럼 밀도가 $2J/n_J$ 인 가우스 잡음을 볼 수 있다.

$$J = \frac{N_J}{T} \quad (10)$$

N_J : 재밍 잡음 밀도

$1/T$: 대역 폭

J : 재밍 전력

$T=1$ 일 때 $J=N_J$ 이므로 $2J/N_J$ 의 단측파 밀도가 된다. 그러므로 오류 확률 $P_2(e)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2(e) = \frac{1}{2} \exp P \left[\frac{-n_J}{4(J/S)} \right] \quad (11)$$

IV. 랜덤 멀티톤 재밍 및 조직적 멀티톤 재밍

랜덤과 조직적 멀티톤 재밍의 분포도로 랜덤 재밍은 재머가 전 주파수 대역에 걸쳐 임의(random)로 톤 재밍을 걸어주고 조직적 재밍은 재밍이 걸리는 슬롯(slot)에 한개의 톤 재밍이 걸리는 것이며, 랜덤과 조직적 멀티톤 재밍 전략을 그림2에 나타내었다.

1. 랜덤 멀티톤 재밍의 오류 확률

랜덤인 경우 전체 오류 확률은 슬롯에 톤 재밍이 존재할 확률과 존재하지 않을 확률에 대한 3가지 경우의 확률을 합한 것이 전체 랜덤 멀티톤 재밍의 오류 확률이 된다.

| | Random | Structured |
|---|------------|------------|
| 2R _b | X X | X |
| | Not jammed | X |
| W _{...} =N _c R _b | X X | Not jammed |
| | X X | X |
| | X | Not jammed |

그림 2. 랜덤과 조직적 멀티톤 재밍 진인

$$P(e) = \beta_{h0}P_0(e) + \beta_{h1}P_1(e) + \beta_{h2}P_2(e) \quad (12)$$

(1) β_{h0} : 1개의 슬롯에 톤 재밍이 존재하지 않을 확률

$$\beta_{h0} = \left[1 - \frac{n_J}{n_c}\right] \left[1 - \frac{n_J}{n_c - 1}\right] = \frac{n_c^2 - n_c - 2n_c n_J + n_J + n_J^2}{n_c^2 - n_c} \quad (13)$$

n_c : 전체 칩수

n_J : 전체 톤 재밍 수

(2) β_{h1} : 1개의 슬롯에 톤 재밍이 1개 존재할 확률

$$\beta_{h1} = \frac{2n_J}{n_c} \left[1 - \frac{n_J - 1}{n_c - 1}\right] = \frac{2n_c n_J - 2n_J^2}{n_c^2 - n_c} \quad (14)$$

(3) β_{h2} : 1개의 슬롯에 톤 재밍이 2개 존재할 확률

$$\beta_{h2} = \frac{n_J}{n_c} \frac{n_J - 1}{n_c - 1} = \frac{n_J^2 - n_J}{n_c^2 - n_c} \quad (15)$$

따라서 랜덤 멀티톤 재밍에서 전체 오류 확률

$P(e)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽²⁾.

$$P(e) = \frac{n_c^2 - n_c - 2n_c n_J + n_J + n_J^2}{n_c^2 - n_c} \cdot \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{S}{2N_0}\right] + \frac{2n_c n_J - 2n_J^2}{n_c^2 - n_c} \cdot \left[\frac{1}{4} \exp\left[-\frac{1}{2} \left\{\frac{S}{N_0} + \frac{J}{N_0 n_J}\right\}\right] \cdot \left\{\exp\left[-\sqrt{\frac{S}{N_0}} \sqrt{\frac{J}{N_0 n_J}} \cos\Phi\right] - I_0\left[\sqrt{\frac{S}{N_0}} + \sqrt{\frac{J}{N_0 n_J}}\right]\right\} + \frac{1}{2} Q\left[\sqrt{\frac{J}{N_0 n_J}} \sqrt{\frac{S}{N_0}}\right] + \frac{n_J^2 - n_J}{n_c^2 - n_c} \cdot \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{n_J}{4(J/S)}\right] \right] \quad (16)$$

여기서 식(5)인 $J/n_J = S/\alpha$ 을 이용하면 $J/N_0 n_J = J/N_0 \cdot 1/(J/S) \cdot \alpha$ 가 된다. 랜덤 멀티톤 재밍의 오류 확률 및 조직적 멀티톤 재밍 오류 확률 $P(e)$ 에서 $J/N_0 n_J$ 대신 $J/N_0 \cdot 1/(J/S) \cdot \alpha$ 을 대입하면 전체 식은 $n_c, n_J, S/N, J/S, \alpha$ 의 함수로 유도되어진다.

2. 조직적 멀티톤 재밍의 오류 확률

조직적 멀티톤 재밍의 오류 확률은 재밍 신호가 걸리는 슬롯에 1개의 톤 재밍을 걸게 되므로 전체 오류 확률은 다음과 같다.

$$P(e) = \beta_{h0}P_0(e) + \beta_{h1}P_1(e) \quad (17)$$

(1) β_{h0} : 1개의 슬롯에 톤 재밍이 존재하지 않을 확률

$$\beta_{h0} = 1 - \beta_{h1} = \frac{n_c - 2n_J}{n_c} \quad (18)$$

(2) β_{h1} : 톤 재밍이 슬롯당 1개 존재할 확률

$$\beta_{h1} : \frac{n_j}{n_c^2/2} = \frac{2n_j}{n_c} \quad (19)$$

(3) β_{h2} : 1개의 슬롯에 본 재밍이 2개 존재할 확률

$$\beta_{h2}=0 \quad (20)$$

따라서 조직적 멀티톤 재밍의 전체 오류 확률 $P(e)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P(e) = & \frac{n_c - 2n_j}{n_c} \cdot \frac{1}{2} \exp \left[\frac{-S}{2N_0} \right] + \frac{2n_j}{n_c} \\
 & \left[\frac{1}{4} \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{S}{N_0} + \frac{J}{N_0} \frac{1}{(J/S)\alpha} \right\} \right] \right. \\
 & \cdot \exp \left[-\sqrt{\frac{S}{N_0} \frac{J}{N_0} \frac{1}{(J/S)\alpha}} \cos \Phi \right] \\
 & \left. - \log \left[\sqrt{\frac{S}{N_0} \frac{J}{N_0} \frac{1}{(J/S)\alpha}} \right] \right] \\
 & + \frac{1}{2} Q \left[\sqrt{\frac{J}{N_0} \frac{1}{(J/S)\alpha}} \cdot \sqrt{\frac{S}{N_0}} \right] \quad (21)
 \end{aligned}$$

V. 최악의 경우 partial-band 재밍 간섭에 대한 오류 정정 부호의 성능 분석

부호화를 하지 않은 FH/SS 시스템에서 가장 크게 효과적으로 영향을 미치는 재밍은 평균 전력이 제한된 partial band 재밍이다. partial band 재밍은 fill factor ρ 로 조정되고, partial band 재밍은 최대 출력으로서 시스템의 성능에 영향을 미친다. ρ 는 주파수 대역이 재밍화된 퍼센트 또는 전송된 비트, 그리고 심볼이 재밍되었을 확률로 정의한다($0 \leq \rho \leq 1$).

본 논문은 PN 부호가 확산 부호로 사용된 SS 시스템에서 partial band 재밍이 존재하는 FH/FSK 시스템에 대하여 분석하였으며, partial band jamming이 존재하는 FH/FSK 시스템의 성능 분석은 오류 정정 부호의 영향에 대하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 최악의 경우 partial band 재밍은 ρ 의 선택에 의해 BER이 최대가 된다.
- 재밍은 한번 도약과 다음 도약과는 독립이며, 일정한 확률 ρ 을 가지고 있다.
- 재밍 전력은 제한된 평균 전력이다.
- 일 삽음은 재밍 삽음과 비교하여 무시한다.

부호화 되어진 비트는 채널을 통해 하나의 주파수 또는 L개의 주파수로 전송되어진다. 최악의 경우 partial band 재밍 간섭에 대한 성능은 다음과 같은 2진 부호에 대하여 분석하였다.

- binary Hamming Code
- binary Golay Code
- binary BCH Code
- binary Convolution code

또한 수신기에서의 검파는 최대 출력이 검파기의 최대값과 일치하는 M ary 심볼을 선택하며, 수신기는 각 도약(hopping)동안 재밍이 존재하는지의 여부를 알 수 없다고 가정한다.

1. 부호화를 하지 않은 시스템의 성능

partial band jamming 채널은 확산 스펙트럼 대역폭의 일부인 ρ 에 관한 최대 삽음 밀도 N_0/ρ 를 갖는 AWGN에 의해 특성되어 지고, 평균 삽음 밀도 N_0 가 산출된다. 최악의 partial band jamming 상황에서 비동기 검파를 갖는 M ary 적각 신호 전송에 대한 BER(bit error rate)은 다음과 같다⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

$$\begin{aligned}
 P_b(\rho) = & \frac{\rho}{2(M-1)} \exp(-\rho k E_b / N_0) \\
 & \sum_{i=1}^M (-1)^i \left\{ \frac{M}{i} \right\} \cdot \exp(\rho k E_b / i N_0) \quad (22)
 \end{aligned}$$

최악의 경우에 대하여

$$P_b = -C / (E_b / N_0), \quad E_b / N_0 > x_0$$

$$\left[\frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=0}^{M-1} (-1)^i \left\{ \frac{M}{1} \right\} \right] \cdot \exp \left[-\frac{k(i-1)E_b}{iN_0} \right], \quad E_b / N_0 \leq x_0 \quad (23)$$

그리고

$$\rho^* = \frac{X_0 N_0}{E_b} \quad (24)$$

여기서 C, x_0 와 $(E_b / N_0)_{dB}$ 에는 $M=2$ 에서 $M=32$ 까지 표 1에 주어졌으며, 최악의 경우 partial-band 재밍 환경에서 부호의 성능은 표

2에 요약하였다.

2. Block Code의 성능

M ary ($M=2^d$) block 부호의 부호 심볼(k bit) 오류 확률은 다음과 같이 근사화 할 수 있다¹⁾.

$$P_{sym} \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i! \binom{n}{i} P_s^i (1-P_s)^{n-i} \quad (25)$$

여기서 $E = [(d-1)2]$ 는 채널의 비트 오류 수이고, 이것은 block 부호에 의해 정정되어질다고 할 수 있다(d는 부호의 최소거리, $[S]_1$ 는 s와 같거나 또는 s 보다 작은 최대 정수로 표

표 1. 최악의 경우 partial band 재밍 환경에서 파라메타 성능

Table 1. Performance Parameters in worst case partial-band jamming environment.

| M(=2 ^k) | c | x ₀ | E _b N ₀ dB | M-ary Gain dB |
|---------------------|--------|----------------|-------------------------------------|------------------|
| 2 | 0.3679 | 2.000 | 45.66 | 0 |
| 4 | 0.2329 | 1.192 | 34.67 | 1.99 |
| 8 | 0.1954 | 0.927 | 42.91 | 2.75 |
| 16 | 0.1813 | 0.798 | 42.59 | 3.07 |
| 32 | 0.1746 | 0.723 | 42.43 | 3.23 |

표 2. 최악의 경우 partial-band 재밍 환경에서 부호 성능

Table 1. Coded performance in the worst-case partial-band jamming environment.

| Code | Binary or M ary M(=2 ^k) | Effective Code Rate (R=kr) | Worst Case Jamming Fill Factro.(ρ*) | E _b - dB N ₀ | Coding Gain (dB) |
|---------------------|---|----------------------------------|---|--|------------------------|
| Hamming(7,4) | Binary | 1/7 | 6.983 × 10 ³ | 27.0 | 18.66 |
| Golay(23,12) | Binary | 12/23 | 5.053 × 10 ² | 18.8 | 26.86 |
| BCH(127,92) | Binary | 92/127 | 3.573 × 10 ² | 18.8 | 26.86 |
| BCH(127,64) | Binary | 64/127 | 1.171 × 10 ³ | 15.3 | 30.36 |
| BCH(127,36) | Binary | 36/127 | 2.391 × 10 ³ | 14.7 | 30.96 |
| Convolutional(2,1)7 | Binary | 1/2 | 7.62 × 10 ² | 17.2 | 28.46 |
| Convolutional(3,1)7 | Binary | 1/3 | 3.01 × 10 ³ | 13.0 | 32.66 |
| Convolutional(4,1)7 | Binary | 1/4 | 4.3 × 10 ³ | 12.7 | 32.96 |
| Convolutional(8,1)7 | Binary | 1/8 | 8.69 × 10 ³ | 12.65 | 33.11 |

시). n 은 block 길이이고, 부호화를 하지 않은 채널에서 심볼 오류율 P_s 는 E_b 을 rE_b 을 바꾸어 놓고 $(2^k-1)/(2^{k-1})$ 을 식(23)에 곱해서 얻을 수 있다.

$$P_s = \begin{cases} \frac{C(2^k-1) N_o}{(2^{k-1}) rE_b} & E_b / N_o > x_o / r \\ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (-1)^i \left\{ \frac{M}{i} \right\} \exp \left[-\frac{kr(i-1)E_b}{iN_o} \right] & E_b / N_o \leq x_o / r \end{cases} \quad (26)$$

복호된 BER은 다음과 같다.

$$P_B = \left[\frac{2^{k-1}}{2^k-1} \right] P_{sym} \cong \left[\frac{2^{k-1}}{(2^k-1)n} \right] \sum_{i=1}^n i \left\{ \frac{n}{i} \right\} P_s^i \cdot (1-P_s)^{n-i} \quad (27)$$

최악의 경우 partial-band 재밍의 fill factor는 식(24)에 E_b 대신 rE_b 을 바꾸어 대입한 것과 같다.

3. Convolutional code의 성능

가장 좋은 율 1/2에 대하여 constraint-length 7인 2진 convolution 부호는 2진 채널($M=2$)을 사용하였고, 이것은 다음과 식(28)과 같다 (9x10).

$$P_B \leq \frac{1}{2} (36D^{10} + 211D^{12} + 1404D^{14} + \dots) \quad (28)$$

일반적으로 사용된 율 1/3에 대하여 constraint-length 7인 2진 Convolution 부호는 식(29)와 같다.

$$P_B \leq \frac{1}{2} (D^{14} + 20D^{16} + 53D^{18} + \dots) \quad (29)$$

여기서 $D=2\sqrt{P(1-P)}$, P 는 $M=2$ 일 때 식(26)으로 부터 얻을 수 있다.

$$D = 2\sqrt{\frac{P(1-P)}{M-1}} + \left[\frac{M-2}{M-1} \right] P \quad (30)$$

M -ary 변조에서 M -ary convolution 각각 부호화된 성능은 upper bound가 되어진다고 할 수 있다.

$$P_B \leq \frac{1}{2} (7D^7 + 39D^8 + 104D^9 + 352D^{10} + 1348D^{11} + \dots) \quad (31)$$

(율 1/2, $k=7$, 4-ary)

$$P_B \leq \frac{1}{2} (D^7 + 4D^9 + 49D^{10} + 92D^{11} + \dots) \quad (32)$$

(율 1/3, $k=7$, 8-ary)

여기서 D 는 식(30)에 의해서 주어진다.

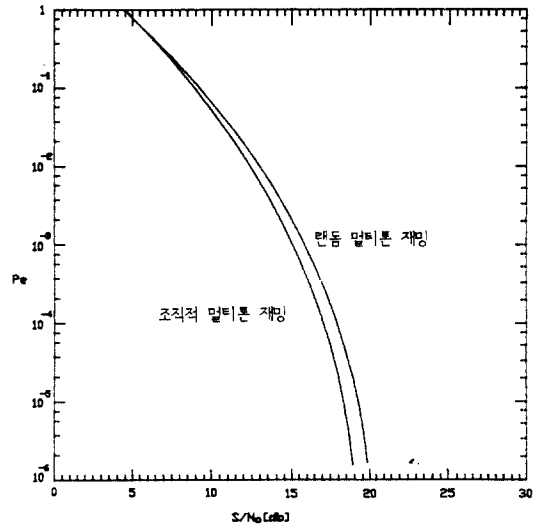


그림 3. 조직적 멀티톤 재밍과 랜덤 멀티톤 재밍의 오류 확률
Fig 3. Probability of error in random multitone jamming and structured multitone jamming

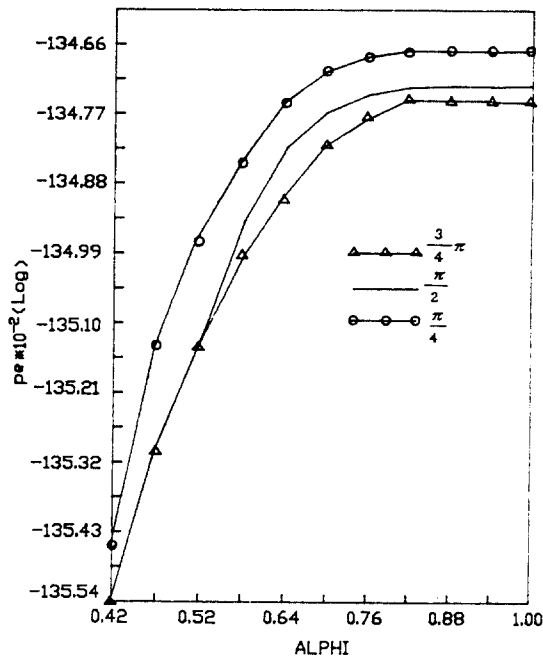


그림 4. 랜덤 멀티톤 재밍에서 α 에 대한 오류
($J/S=20\text{dB}$, $S/N=7\text{dB}$)

Fig 4. Probability of error versus in the random multitone jamming

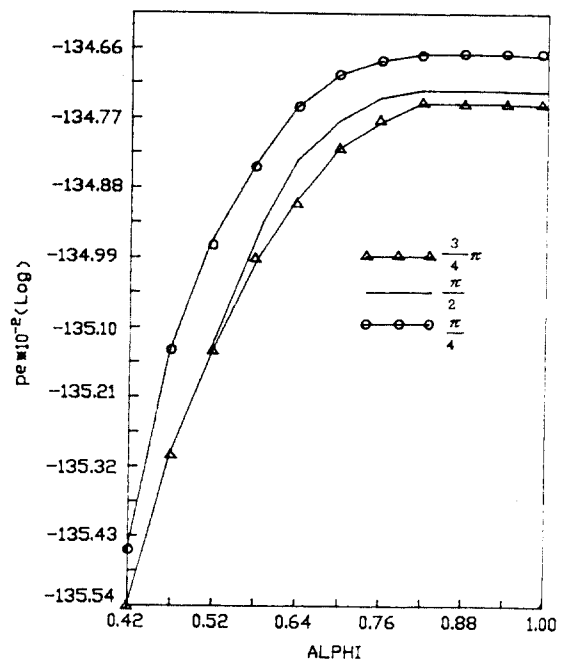


그림 5. 조직적 멀티톤 재밍에서 α 에 대한 오류
($J/S=20\text{dB}$, $S/N=7\text{dB}$)

Fig 5. Probability of error versus in the structured multitone jamming.

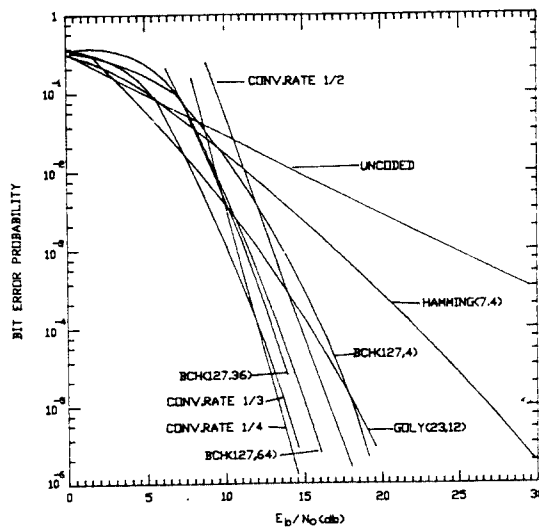


그림 6. 최악의 경우 partial band 재밍 환경에서 2진 오류 정정 부호의 성능

Fig 6. Performance of binary error correcting code in a worst case partial band jamming environment

VI. 결 론

비동기 FH / FSK 시스템에서 랜덤 멀티톤 재밍과 조직적 멀티톤 재밍에 대하여 최악의 경우 오류확률을 유도하여 그 성능을 비교 분석하였고, 그 결과 랜덤 멀티톤 재밍과 조직적 멀티톤 재밍은 오류 확률에서 큰 차이가 없음을 알 수 있었으며, 최악의 경우 partial band 재밍 환경에서 2진 전송으로, Hamming (7, 4) 부호, Golay (23, 12) 부호, 세개의 BCH (127, K) 부호, 그리고 세개의 constant length 7 convolution code를 포함한 2진 오류 정정 부호에 대하여 BER을 비교한 결과 convolution 부호의 성능은 최악의 경우 partial band 재밍 환경을 방지하는데 가장 좋은 부호임을 알 수 있었다.

“이 논문은 1988년도 문교부 학술 연구 조성비 지원에 의하여 연구되었음.”

參 考 文 獻

1. 한영연, "스펙트럼 확산 통신 방식" 전기전자 1986.
2. 안중수, 박진수, "멀티톤 제어를 고려한 비동기 FH/FSK 성능 분석에 관한 연구", 대한전자공학회 27권 10호 1990.
3. SCHWARTZ, BENNETT, STEIN, "Communication System and Techniques", McGRAW HILL BOOK COMPANY.
4. H. Taub and D.L. Schilling, "Principles of Communication Systems".
5. A. BRUCE CRALSON, "Communication Systems", McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS.
6. HAMMING, "Coding and Information Theory", PRENTICE-HALL.
7. A.J. Viterbi, "Spread spectrum communications Myths and realities", IEEE Commun. Soc. Mag., Vol. 17, pp. 11~18, May 1979.
8. B.K. Levitt and J.K. Omura, "Coding tradeoffs for improved performance of FH/FSK systems in partial band noise", in Nat. Telecommun. Conf. Rec., Nov 1981, pp. D9.1.1 D9.1.5.
9. J.K. Omura and B.K. Levitt, "Coded error probability evaluation for antijam communications systems", IEEE Trans. Commun., Vol. COM-30, pp. 896~903, 1982.
10. P.d. Shaft, "Low rate convolutional code applications in spread spectrum communications", IEEE Trans. Commun., Vol. COM-25, pp.815~821, Aug. 1977.
11. Vincent F. Alisouskas and Wayne Tonas, "Digital and Data Communications", NTICE HALL.
12. FEHER, "Advanced Digital Communications", PRENTICE-HALL, INC.
13. Shimbo, "Transmission Analysis in Communication Systems Design", Volum. 1, Volum 2. COMPUTER SCIENCE PRESS.
14. MARTINGS, RODEN, "Digital Communication Systems Design", PRENTICE-HALL INTERNATIONAL.
15. Zumer, Tranter, "Principles of Communication Systems", HOUGHTON MIFELIN COM.
16. Zimer., Peterson, "Digital Communications and Spread Spectrum Systems", MACHILLAN PUBLISHING COM.
17. Leon W. Couch, "Digital and Analog Communication Systems".
18. W.C. Lindsey, "Phase-Shift-Keyed signal detection with noisy referencsignals", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., pp. 393~401, July 1966.
19. Lee, Messerschmitt, "Digital Communication", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
20. H.L. Van Trees, "Detection, Estimation, and Modulation Theory", [24] J.H. Park", On Binary DPSK Reception ", IEEE Trans. Commun., Vol CO M-26, pp. 484~486, April 1978.
21. V.K. Prabhu, "Error Rate Performance for Differential PSK", IEEE Trans. Commun., Vol. COM-29, March 1981.
22. R.E. Ziemer and W.H. Tranter, "Principles of Communications" (Boston : Houghton Mifflin, 1976).
23. R.A. Scholtz, "Frame Synchronization Techniques", IEEE Trans. Commun., Vol. 28, pp. 1204~1212, August 1980.
24. J.J. Stiffler, "Theory of Synchronous Communications (Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall, 1971), Part 2.



安 重 守 (Jung Soo AHN) 正會員
 1944年 8月 11日生
 1975年 2月 : 명지대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학 석사)
 1991年 現在 : 청주대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중
 1991年 現在 : 충주공업 전문대학 전자과 교수
 주관심 분야 : Digital 통신 시스템, Spread Spectrum 통신 시스템



朴 鎮 秀 (Jin Soo PARK) 正會員
 1948年 8月 30日生
 1975年 2月 : 漢陽大學校 電子工學科(學士)
 1977年 2月 : 漢陽大學校 大學院 電子通信工學科(碩士)
 1985年 2月 : 漢陽大學校 大學院 電子通信工學科(博士)
 1987年 2月~1988年 2月 : Univ. of Colorado at Cololado Spring(Post Doc.)
 1987年 2月~現在 : 淸州大學校 電子工學科 教授
 1988年 2月~現在 : 淸州大學校 産業科學研究所 所長