

---

# 부분대역 재밍하에서 FH/CPFSK 시스템의 성능 분석

정근열\* · 박진수\*

Performance Analysis of FH/CPFSK System in the Partial-band Jamming Noise

Keun-Yeol Jeong\* · Jin-Soo Park

---

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다.

---

## 요 약

본 논문에서는 열잡음과 부분대역 재밍잡음 그리고 인접한 8개의 비트 패턴에 대한 심불간 간섭을 고려하여 FH/CPFSK 시스템의 성능을 분석하였다. 이와 같은 FH/CPFSK 시스템의 분석을 위한 파라메타는 비트율(bit rate)과 변조지수를 사용하였으며, 차동검파기(Differential Detector)를 이용한 최적수신 상관함수를 제시하고, FH/CPFSK 시스템과 FH/BFSK 시스템을 비교평가 하였다.

그 결과, 근사식과 실제식의 비트 오류 확률은 높은 신호대 잡음비에서 거의 일치함을 알 수 있었고, 재밍율에 따른 성능은 차동검파를 사용한 FH/CPFSK 시스템이 리미터-변별기를 사용한 FH/CPFSK 시스템보다 3dB 성능이 떨어지나 FH/BFSK 시스템보다는 2dB 성능이 우수함을 입증하였다.

## ABSTRACT

In this paper, we analyzed the performance of FH/CPFSK system with differential detection in thermal noise, partial-band jamming noise and adjacent interference of all eight bit pattern. The parameters to analyze performances of FH/CPFSK system have been used the bit rate, modulation index and performances of FH/CPFSK system with the differential detector have been presented with the optimum correlation function. And, we were compared with performance of FH/CPFSK and FH/BFSK system.

In result, we could know that bit error probability of the approximation equation and exact equation nearly accorded in the high signal-to-noise ratio. And, we have been proved that FH/CPFSK system with differential detection according to jamming fraction  $\gamma$  was worst to 3dB than FH/CPFSK system with limiter-discriminator, but was superior to 2dB than FH/BFSK.

## 키워드

Frequency Hopping, CPFSK, Jamming, FH/CPFSK

## 1. 서 론

대역 확산 통신(Spread Spectrum Communication)이란 전송하려는 신호의 주파수 대역폭보다 넓은 대역폭을 사용하여 통신하는 방식으로 확산 방법에 따라 DS(Direct Sequence), FH(Frequency

Hopping), TH(Time Hopping) 등의 방식이 있으며, 이들을 결합한 Hybrid방식이 있다.

주파수도약(FH)방식은 입력 신호에 의해 변조된 반송파의 스펙트럼을 일정한 주파수 대역내에서 랜덤(Random)하게 도약시키는 방식으로 동기포착시간(Acquisition Time)이 짧고, 대역 확산을 크게 할 수

---

\* 청주대학교 전자공학과

있으며, 부호 분할 다중 접근(Code Division Multiple Access)이 가능하여 고정밀 거리 측정 장치 및 컴퓨터 데이터 버스 등에 응용되고 있다[1].

주파수 도약 속도는 저속, 중속, 고속으로 구분되며 저속일 때는 초당 100회 이내이고, 고속일 때는 1000회 이상 도약한다. 주파수 도약에서 중요한 파라메타는 출력시간이며 이 시간이 짧을수록 재밍신호의 영향이 적어진다. 그러나, 고속으로의 주파수 도약은 도약기(Hopper)와 역도약기(Dehopper)의 하드웨어적인 제약이 따르므로, 대부분의 주파수 도약 시스템(FH)은 저속의 FH시스템을 사용하고 있다.

FH/CPFSK 시스템은 일정한 진폭 특성(정진폭 변조 시스템)을 가지기 때문에 위성통신 시스템에서 고려하여야 하는 전력 증폭기(Power Amplifier)의 낮은 전력 효율면에서 우수하고, 이용가능한 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있기때문에 주어진 대역폭내에서 FH/CPFSK 시스템의 대역폭을 효율적으로 운영한다면 좀더 유용한 FH신호의 대역폭을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 대역폭을 효율적으로 이용할 수 있는 연속 위상 변조 형태인 CPFSK (Continuous Phase FSK)를 대역확산 통신 방식에 적용하여 부분 대역 잡음하에서 차동 검파(Differential Detection)을 이용한 시스템의 성능을 분석하였다[2][9].

## II. 시스템 분석

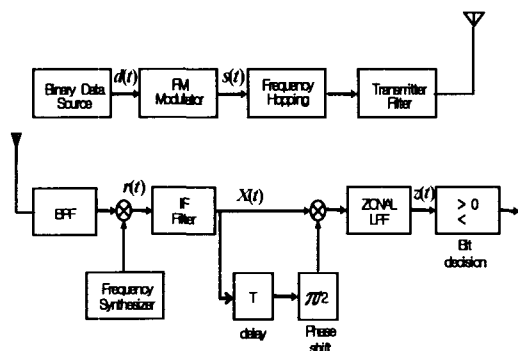


그림 1. FH/CPFSK 시스템의 송·수신기 블록도

Fig. 1 Block diagram of transmitter and receiver of FH/CPFSK system

차동 검파(Differential Detection)을 이용한 FH/CPFSK 시스템의 블록도는 그림 1에 나타내었고, 시스템에서 정보  $d(t)$ 는 이진 데이터 열(Binary Data Stream)로 주기가 T이고 진폭이  $\pm 1$ 인 펄스의 열이다.

수신기에서 IF Filter 입력 신호  $r(t)$ 는 다음과 같다[2][3].

$$r(t) = \sqrt{2S} \cos [2 \pi f_0 t + \theta(t)] + n(t) \quad (1)$$

여기에서 S는 신호 전력이고,  $f_0$ 는 IF Filter의 중심주파수이며  $\theta(t)$ 는 변조후의 데이터 위상이다. 식(1)에서 잡음항  $n(t)$ 는 재밍이 없을 때는 단축 스펙트럼 밀도가  $N_0$ 인 백색 가우시언 잡음(White Gaussian Noise)이고, 부분 대역 재밍이 존재할 때는  $N_0 + N_j/\gamma$ 의 값을 갖는다.

IF Filter의 전달함수  $H(f)$ 가  $e^{-\pi f^2 / 2 B^2}$ 로 정의되어졌을때 필터의 출력은 전달함수  $H(f)$ 의 임펄스 응답  $h(t)$ 와 수신 신호  $r(t)$ 의 컨볼루션으로 얻을 수 있다[5].

$$\begin{aligned} X_{IF}(t) &= h(t) * r(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{2S} \cos [w_0 \tau + \theta(\tau)] \\ &\quad \cdot 2h_0(t - \tau) \cos w_0(t - \tau) d\tau \\ &= \sqrt{2S} a(t) \cos [w_0 t + \phi(t)] + n(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서  $a(t)$ 와  $\phi(t)$ 는 각각

$$a(t) = \sqrt{[h_0(t) * \cos \theta(t)]^2 + [h_0(t) * \sin \theta(t)]^2}$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left\{ \frac{[h_0(t) * \sin \theta(t)]}{[h_0(t) * \cos \theta(t)]} \right\}$$

로 주어지는 진폭과 신호 위상이다.

잡음항  $n(t)$ 는[3][4]

$$\begin{aligned} n(t) &= n_c(t) \cos [w_0 t + \phi(t)] \\ &\quad - n_s(t) \sin [w_0 t + \phi(t)] \end{aligned} \quad (3)$$

와 같이 정의 되므로 식(2)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$X_{IF}(t) = R(t) \cos[w_0 t + \phi(t) + \eta(t)] \quad (4)$$

여기에서

$$R(t) = \sqrt{[2Sa(t) + n_c(t)]^2 + n_s^2(t)}$$

$$\eta(t) = \tan^{-1} \frac{n_s(t)}{2Sa(t) + n_c(t)}$$

따라서, Filter의 출력식  $X_{IF}(t)$ 와  $X_{IF}(t)$ 신호를 심볼시간(Symbol time) T만큼 지연시키고,  $90^\circ$  만큼 위상 천이 시킨 신호와의 곱의 출력

$$Z(t) = R(t)[w_0 t + \phi(t) + \eta(t)] \times (-R(t-T) \cdot \sin[w_0(t-T) + \phi(t-T) + \eta(t-T)]) \quad (5)$$

$$= \frac{R(t)R(t-T)}{2} \sin[w_0 T + \Delta\phi(T)]$$

와 같이 된다. 여기에서 위상차  $\Delta\phi$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\phi(T) = \phi(t) - \phi(t-T) + \eta(t) - \eta(t-T) \quad (6)$$

### III. 시스템의 오류확률

#### 1. 재밍을 무시하였을때의 BER

CPFSK시스템에서 발생 가능한 비트 패턴은 모두 8개로

- 1 1 1 , 0 0 0 : All Ones or Zeros
- 0 1 0 , 1 0 1 : Alternating One-Zero
- 1 1 0 , 0 0 1
- 0 1 1 , 1 0 0

이고, 재밍의 영향을 받지않을때 시스템의 BER는 가능한 모든 비트 패턴의 평균값을 가지며, 1과 0를

전송할 확률은 같은 확률로 발생되므로 보수 패턴의 대칭성을 이용하여 BER는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P(e, \gamma, \lambda) = \sum_j P_r\{pattern\ j\} \times \frac{1}{2} [P_r\{z < 0 \mid \Delta\phi_j, U_j, W_j\} + P_r\{z > 0 \mid -\Delta\phi_j, U_j, W_j\}] = \sum_j P_r\{pattern\ j\} P(e, \gamma, \lambda \mid \Delta\phi_j, U_j, W_j) \quad (7)$$

여기에서 Differential Detector의 확률  $P_r\{z < 0\}$ 과  $P_r\{z > 0\}$ 는 Marcum's Q Function과 Bessel Function[8]으로 전개하면 다음과 같다.

$$P_r\{z < 0 \mid \Delta\phi_j, U_j, W_j\} = \frac{1}{2} [1 - Q(\sqrt{b_1}, \sqrt{a_1}) + Q(\sqrt{a_1}, \sqrt{b_1})] + \frac{1}{2} \frac{c_1 - c_2}{c_1 + c_2} \exp\{-\frac{a_1 + b_1}{2}\} I_0(\sqrt{a_1 b_1}) \quad (8)$$

$$P_r\{z > 0 \mid -\Delta\phi_j, U_j, W_j\} = \frac{1}{2} [1 - Q(\sqrt{b_0}, \sqrt{a_0}) + Q(\sqrt{a_0}, \sqrt{b_0})] + \frac{1}{2} \frac{c_2 - c_1}{c_1 + c_2} \exp\{-\frac{a_0 + b_0}{2}\} I_0(\sqrt{a_0 b_0}) \quad (9)$$

여기에서

$$a_1 = \frac{c_2 d_2(\Delta\phi)}{c_1 + c_2} = \frac{1}{1 - r^2} \{U - rW \cos \Delta\phi - \sqrt{1 - r^2} W \sin \Delta\phi\}$$

$$b_1 = \frac{c_1 d_1(\Delta\phi)}{c_1 + c_2} = \frac{1}{1 - r^2} \{U - rW \cos \Delta\phi + \sqrt{1 - r^2} W \sin \Delta\phi\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{c_1 d_1(-\Delta\phi)}{c_1 + c_2} = \frac{c_2 d_2(\Delta\phi)}{c_1 + c_2} \\
 b_0 &= \frac{c_2 d_2(-\Delta\phi)}{c_1 + c_2} = \frac{c_1 d_1(\Delta\phi)}{c_1 + c_2}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

윗 식으로부터  $a_0 = a_1$ ,  $b_0 = b_1$ 이기 때문에 식(10)과 (11)을 식(8)과 식(9)에 대입하면 지수를 포함하는 항이 없어지므로 다음과 같은 조건부 비트 오류 확률을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(e; r, \lambda | \Delta\phi, U, W) \\
 = \frac{1}{2} [1 - Q(\sqrt{b_1}, \sqrt{a_1}) + Q(\sqrt{a_1}, \sqrt{b_1})]
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

식(13)의 표현은 Cross-quadrature 상관계수  $\lambda$ 를 유지하기가 힘들다. 따라서 그 값을 편리하게 zero로 가정한다.[2]

$$\begin{aligned}
 P(e; \gamma, 0 | \Delta\phi, U, W) \\
 = \frac{1}{2} [1 - \sqrt{1 - \beta^2/a^2} I_e(\beta/a, a)]
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

여기에서  $I_e(\cdot, \cdot)$ 는 Rice function이고,  $a$ 와  $\beta$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$a = (a_1 + b_1)/2, \quad \beta = \sqrt{a_1 \cdot b_1}$$

식(14)을 다시 적분을 포함하는 식으로 나타내면

$$\begin{aligned}
 P(e; \gamma, 0 | \Delta\phi, U, W) \\
 = \frac{\sqrt{a^2 - \beta^2}}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\exp[-(a - \beta \cos \theta)]}{a - \beta \cos \theta} d\theta
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

결과적으로 잡음을 고려하지 않았을 때, 각각의 비트 패턴에 따른 BER의 평균은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(e) &= \frac{1}{8} \{ [P(e|000) + P(e|111)] \\
 &\quad + 2[P(e|011) + P(e|100)] \\
 &\quad + [P(e|010) + P(e|101)] \}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

## 2. BER의 근사식 표현

자유도  $\nu$ 와 noncentrality 파라메타  $d$ 를 갖는 noncentral chi-squared 분포는 다음과 같은 근사식으로 표현된다.[6][7]

$$\begin{aligned}
 P_r\{\chi^2 > x | \nu, d\} \\
 = Q(\sqrt{x - (\nu - 1)/2} - \sqrt{d + (\nu - 1)/2})
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

여기에서  $Q(\cdot)$ (한개의 독립변수를 갖는)는 가우시언 보수 분포함수이다. 여기에서 Marcum's Q-Function은 다음 식으로 근사 된다.

$$\begin{aligned}
 Q(a, \beta) &= P_r\{\chi^2 > \beta^2 | 2, a^2\} \\
 &= Q(\sqrt{\beta^2 - 1/2} - \sqrt{a^2 + 1/2}) \\
 &\approx Q(\beta - a)
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

그러므로, 식(12)의 조건부 BER로부터 근사식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P(e; r, 0 | \Delta\phi, U, W) \approx Q(\sqrt{b_1} - \sqrt{a_1})
 \tag{18}$$

## 3. 재밍을 포함했을때의 BER

재밍을 포함했을 때의 BER는 다음 식과 같이 재밍이 없는 경우의 확대로 간주할 수 있다.

$$P(e; \gamma) = (1 - \gamma)P_a + \gamma P_b
 \tag{19}$$

$$P_a =$$

CNR에 대한 각 패턴의 평균 BER =  $E_b/N_0$

$P_b =$

CNR에 대한 각 패턴의 평균 BER =  $E_b/N_T$

#### IV. 시스템의 성능분석 및 검토

부분 대역 재밍을 고려한 FH/CPFSK시스템에서 차동 검파(Differential Detection)방식을 사용하였을 때의 성능을 분석하기 위해 재밍을 무시하였을 경우의 성능과 재밍을 포함했을 경우 재밍을  $\gamma$  에 따른 성능을 분석하기 위해 재밍을 무시하였을 때의 오류 확률식을 식(15)에 나타내었고, 재밍을 포함했을 때의 오류 확률식을 식(19)에 나타내었다.

먼저 재밍을 무시하였을 때 식(15)와 식(17)을 사용하여 신호대 잡음비에 따른 정확한 값과 근사값을 구하여 그림 2에 나타내었고, 그 결과 낮은 SNR에서는 근사식의 오류 확률이 낮게 나타나나 SNR이 높아질수록 거의 일치함을 알 수 있었다.

그림 3은 열잡음이 일정하고 부분 대역 재밍이 존재할 때 재밍을  $\gamma$ 와  $E_b/N_T$ 값에 따른 성능 분석으로 전 대역에 걸쳐 재밍이 존재하는 것보다 어느 한 대역에 재밍이 존재하는 것이 오류를 일으킬 확률이 높아짐을 알 수 있었다.

마지막으로 열잡음이 일정하고 최악의 재밍을  $r_{uc}$ 에서 각 시스템의 성능을 그림 5에 나타내었다.

#### V. 결론

본 논문의 결과는 재밍을 무시하였을 때 정확한식과 근사식의 비교 결과는 근사값이 낮은 SNR에서는 실제값에 비해 낮은 에러 확률을 가지지만 높은 SNR에서는 거의 같은 값을 얻을 수 있음을 알 수 있었고, 재밍을 포함했을 때 열잡음을 일정하게 두고 신호대 재밍비와 재밍을  $\gamma$  값의 변화에 따른 성능 분석 결과 전 대역에 걸쳐 재밍을 걸어 주는 것보다 어느 한 대역에 집중적으로 재밍을 걸어주는 것이 에러를 일으킬 확률이 높아짐을 알 수 있었다.

또한, 같은 조건하에서 리미터-변별기(Limiter-Discriminator) 검파방식을 사용했을 때보다

차동검파(Differential Detection)를 했을 때의 성능이  $10^{-5}$  오류확률에서 약 3dB 정도 성능이 떨어지나 FH/BFSK 시스템보다는 2dB 성능이 우수함을 알 수 있었다.

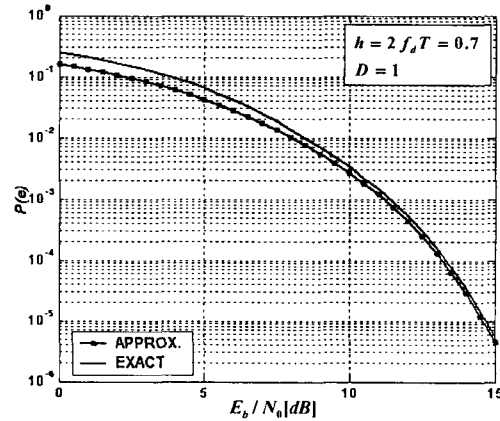


그림 2. Differential Detector 사용시 Exact와 Approximation의 성능 비교

Fig. 2 Compare Exact and Approximation with Differential Detector

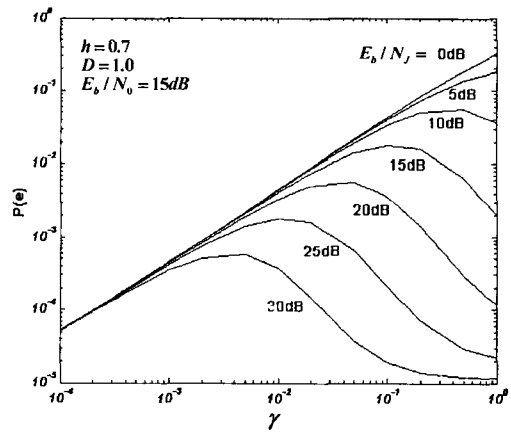


그림 3. 차동검파 사용시 부분 대역 재밍하에서  $E_b/N_o = 15.0dB$  일때, 재밍율  $\gamma$  에 따른 비트 오류 확률

Fig. 3 Bit Error Probability for  $\gamma$  and  $E_b/N_o = 15.0dB$  in the Partial Band Jamming with Differential Detector

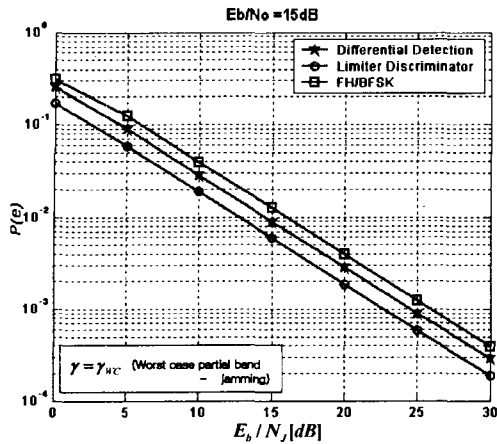


그림 4.  $E_b/N_o = 15.0dB$  일때, 최악의 부분대역 재밍을  $\gamma_{wc}$ 에 따른 비트 오류 확률  
 Fig. 4 Bit Error Probability for  $E_b/N_o = 15.0dB$  in the Worst Case Partial band jamming

참고 문헌

[1] 대한전자공학회, "스펙트럼 확산 통신방식", 통신연구회단기강좌.  
 [2] MARVIN K. SIMON, CHARLES C. WANG, "Differential Versus Limiter-Discriminator Detection of Narrow-Band FM", IEEE Trans. on Commun., Vol. COM-31, pp. 1227 -1234, November 1983.  
 [3] R.F. Pawula, "On the Theory of Error Rates for Narrow band Digital FM", IEEE Trans. Commun., Vol. COM-29, pp. 1634 -1643, November 1981.  
 [4] R.F. Pawula, S.O. Rice, and J.H.Roberts, "Distribution of the Phase Angle Between Two Perturbed by Gaussian Noise", IEEE Trans. Commun., Vol. COM-30, p.1828-1841, August 1982.  
 [5] M. Schwartz, W.R. Bennett, and Stein, Communication Systems and Techniques. New York : Mcgraw-Hill 1966.  
 [6] M. Sankaran, "Approximations to the

Non-Central Chi-Square Distribution", Biometrika, Vol 50 (1963), pp 199-204  
 [7] L.E. Miller, "Computing R.O.C. for Quadratic Detectors", NSWC/WOL TR 76-148, October 1976(AD-A050477).  
 [8] J. S. Lee, "Theory of Modulation for Digital Cellular System Applications", J. S. Lee Associates, Inc.  
 [9] J. K. Kwak, J. S. Park, "부분대역 재밍하에서 열잡음을 고려한 FH/CPFSK 시스템의 성능 분석" 1991 대한 전자공학회 학술발표회.

저 자 소 개



정근열(Keun-Yeol Jeong)  
 1993년 청주대학교 전자공학과 졸업(학사)  
 1995년 청주대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 2000년 청주대학교 대학원 전자

공학과 박사수료

※관심분야 : 디지털 이동통신, 대역확산 통신, Multimedia 통신



박진수(Jin-Soo Park)  
 1975년 한양대학교 전자공학과 졸업(학사)  
 1977년 한양대학교 대학원 전자통신공학과(공학석사)  
 1985년 한양대학교 대학원 전자통신공학과(공학박사)

1978~현재 : 청주대학교 정보통신공학부 교수  
 1999~현재 : 청주대학교 정보통신연구센터 소장  
 2000~현재 : 한국정보처리학회 충북지부 지부장  
 ※관심분야 : 디지털 이동통신, 부호이론, 대역확산 통신, Multimedia 통신, 영상통신