

EMP간섭 영향에 의한 FH/DPSK 시스템의 오류 특성

장은영\*                      조성준\*\*                      김원후\*

\* 한국항공대학 전자공학과, \*\* 한국항공대학 통신정보공학과

Effect of Electromagnetic Pulse Interference on Error Performance of FH/DPSK System

Eun Young Chang\*                      Sung Joon Cho\*\*                      Won Hoo Kim\*

\* Dept. of Avionics Eng., Hankuk Aviation College

\*\* Dept. of Telecom. and Information Eng., Hankuk Aviation College

ABSTRACT: This paper analyzes the effect of nuclear EMP interference on FH/DPSK system. EMP-induced interferer at receiver is modeled by an exponential damped sinusoid in time. The probability of error performance of received FH/DPSK signal has been derived and evaluated. The numerical results are given in graphs to discuss the EMP-induced interference effect on the FH/DPSK system performance.

1. 서론

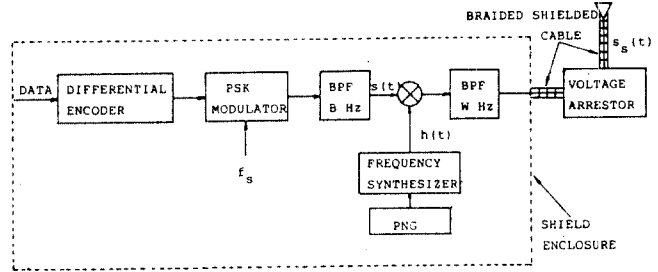
핵폭발등으로 발생하는 EMP(Electromagnetic pulse)는 매우 낮은 주파수대로부터 높은 주파수대의 넓은 대역에 걸쳐 높은 전력을 가지는 간섭파를 발생시킨다 [1,2]. 따라서 통신 시스템에 보호대책을 마련해야 한다. 보호대책이 마련된 통신 시스템내에 유기되는 간섭파는 외부에서 발생한 간섭파 보다는 세력이 작다. 시스템의 정상 동작하에서 시스템내에 유기된 간섭파형은 비교적 작은 전력치의, 시간에 따라 점차 감소되는 유한개의 정현파 형태로 단순화 시켜 표시된다 [2]. 즉 EMP에 의해 발생한 간섭파형의 간섭영향은 사용 주파수 대역내에서 시간에 따라 감소하는 진폭을 가지는 유한개의 간섭파가 시스템에 미치는 영향으로 해석할 수 있다. 백색가우스 잡음과 동일 채널 간섭이 존재할 때, 수신단에서의 합성 수신신호의 위상차에 대한 확률 밀도 함수를 구하여 유도한 기존의 이론을 해석 [3]을 이용하되 기존의 간섭신호 대신 유기된 EMP 간섭신호를 시간에 따라 진폭이 지수함수적으로 감쇠하는 tone 신호를 도입하여 해석한다. 해석에 있어서는 대역확산 시스템의 공진도 및 사용 주파수 대역에 따른 감쇠정수와 신호대 간섭전력비, 신호대 잡음전력비 등을 파라미터로 하여 DPSK 시스템의 오류특성을 유도하고 수치계산을 행하여 그 결과물 분석, 검토한다.

2. FH/DPSK 시스템

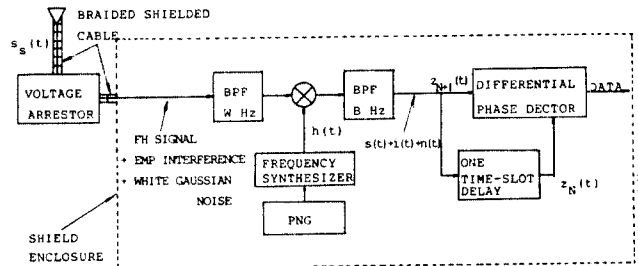
부신 주파수(RF)대에서 간섭 및 jamming으로 부터 전송 신호를 보호하기 위해 대역 확산 방식을 많이 사용하는데, 그 중 주파수 도약방식(FH)이 near/far 성능이 우수하고 비교적 회로구성이 쉽다. 그러나 주파수 도약에 따라 불연속적인 위상 상태가 발생되고, 주파수 도약음이 빠를 때에는 복조 과정에 있어 절대위상의 정확한 판별이 어렵게 되므로, 1차변, 복조방식으로 자동 변, 복조방식이 많이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 1차 변, 복조 방식으로서 DPSK 방식을 채용한 FH 통신시스템을 고찰한다.

그림 1에 EMP의 간섭영향을 줄이기 위해 차폐 및 접지방식을 채용한 FH/DPSK 시스템의 구성도를 나타낸

다 [2,3]. 여기서 전체대역 WHz와 도약 주파수 대역 BHz는  $B \ll W$ 인 관계에 있다. 기저대역 반송파  $f_s$ 는 차동 정보 부호열에 의해 위상 변조가 이루어진 후, 의사잡음 부호 발생기(PNG; Pseudo random noise generator)에서 발생하는 부호에 따라 제어되는 주파수 합성기에 의해 도약주파수  $h(t)$ 가 결정되는데 이것이 2차 변조 반송파로 작용한다.



(a) 송신기 Transmitter



(b) 수신기 Receiver

그림 1. FH/DPSK 송,수신기 구성도  
Fig. 1 FH/DPSK Transmitter and receiver block diagram.

수신단에서는 송신기 측에 동기시킨 FREQ에 의해 주파수 합성기에서 발생하는 반송파  $h(t)$ 에 의해, 수신된 신호를 1차 변조 신호  $s(t)$ 로 복조하고, 이  $s(t)$ 로부터 차동복조 방식을 사용하여 원래의 정보 부호열을 얻게 된다.

1차 변조 신호  $s(t)$ 와 주파수 합성기에서 발생하는 FH용 2차 반송파  $h(t)$  및 전송 신호  $s_s(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$s(t) = S \cos(2\pi f_s t + \phi(t)) \quad (1)$$

$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} p(t - nT_c) \cos(2\pi f_n t + \psi_n) \quad (2)$$

$$s_s(t) = s(t) \sum_{n=0}^{\infty} p(t - nT_c) \cos(2\pi f_n t + \psi_n) \quad (3)$$

- S : DPSK 신호의 최대진폭
- $\phi(t)$ : DPSK 신호의 정보 위상
- $f_s$ : DPSK 신호의 반송파 주파수
- $T_c$ : 2차 변조파의 존속 시간
- $p(t)$ : 단위 펄스 파형
- $f_n$ : n 번째 도약 주파수
- $\psi_n$ : n 번째 도약 주파수의 위상

### 3. EMP에 의한 간섭

핵폭발시에는 수 nano초의 상승시간을 지닌 강한 gamma-ray가 발생되고, 이 gamma-ray가 공기속을 지나 는 동안 compton 충돌 전자를 만들어 전리층 발생시켜 EMP가 발생된다[1]. 이러한 EMP로부터 기존의 차폐(Shielding), 접지(Grounding) 및 여파(Filtering) 방식등을 사용하여, 회로 소자 및 통신 시스템 전체를 보호를 하고 있다[4]. 그러나 이러한 보호 대책이 강구되었다 할지라도 차폐물의 품질, 접속단자간의 간격, 직접 노출된 안테나 및 전선을 통해 전계 및 자계가 유 기 되므로써 자유공간 보다는 작지만 무시 못할 EMP에 의한 간섭 현상이 발생된다. 본 연구에 있어서는 이러한 간섭현상을 해석하기 위해 유기된 EMP 간섭 신호를 다음과 같은 형태로 가정한다[2].

$$e_k(t) = E e^{-\alpha t} \cos 2\pi(f_c + k)t = v_k(t) e^{-\alpha t} \quad (4)$$

- $E$ : 보호회로를 거친후에 있어서의 간섭 신호의 최대 진폭
- $\alpha = 2\pi f_c / 2Q$  : 감쇠정수
- $f_c$ : FH 수신기의 대역 통과 필터의 중심 주파수
- $U$ : 시스템의 공진도
- $l$ : 정수(integer)로서,  $-W/2 \leq l \leq W/2$
- $W$ : FH 수신기의 대역 통과 필터의 대역폭

여기서  $e_k(t)$ 는 전체 도약 주파수대역  $W$ Hz 내의 임의의 주파수의 간섭 성분들을 나타낸다. 이 간섭 신호는 수신단의 주파수 합성기에서 발생한 주파수 도약주파수에 의해 1차변조 대역의 신호로 변환되고, 1차변조 대역 통과 필터를 거쳐 다음과 같은 DPSK 수신 신호 대역  $W$ Hz 내의 간섭신호로 작용한다.

$$i(t) = \sum_{f_s - B/2}^{f_s + B/2} v_k(t) e^{-\alpha t} = I e^{-\alpha t} \cos(2\pi f_s t + \lambda) \quad (5)$$

- $f_s$ : DPSK 신호의 반송파 주파수
- $B$ : DPSK 신호의 통과 대역폭
- $I$ : 유기된 EMP간섭 신호의 최대 진폭
- $\lambda$ :  $[0, 2\pi]$ 범위에서 일양분포 하는 위상값

### 4. FH/DPSK 시스템의 오율 해석

일반적으로 q개의 tone 간섭 신호가 q개의 도약 주파수 대역내에 위치 할 때, n개의 전체 도약주파수에 대하여 간섭을 미칠 확률  $P_H$ 는 다음과 같이 정의된다[5].

$$P_H = q / n \quad (6)$$

그러나 EMP 간섭 신호는 FH 수신기의 전체 대역 WHz에 걸쳐 영향을 미치므로 multi-tone 간섭에 해당되며 일반적으로  $q \gg n$  이므로  $P_H=1$ 에 해당한다. 따라서 EMP 신호가 존속하는 한 간섭을 받는다고 볼 수 있다.

완전한 동기 상태에서 수신기의 주파수 합성기에서 발생한 반송파에 의해, 2차 변조 신호인 FH 신호가 1차 변조 신호인 DPSK 신호로 복조되어 이 신호가 차동복조단에서 랜덤한 가우스 잡음과 EMP 간섭신호의 영향을 받게 되는데, 이때 DPSK 신호의 전후 비트 시간내에 수신되는 두개의 합성 수신신호의 위상차에 대한 확률 밀도함수를 구하여 심볼의 오율식을 유도한다. 그림 2에는 DPSK 신호의 복조과정을 보인다.

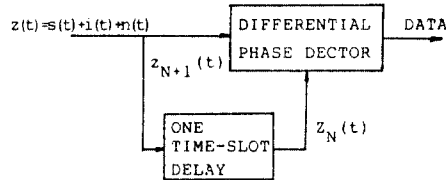


그림 2. DPSK 신호의 복조  
Fig. 2. Demodulation of the DPSK signal.

비트 존속시간이 1인 N번째 및 N+1번째 DPSK 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$s_N(t) = S \cos(2\pi f_s t + \phi), NT \leq t \leq (N+1)T \quad (7)$$

$$s_{N+1}(t) = S \cos[2\pi f_s t + \phi + \delta(t)], (N+1)T \leq t \leq (N+2)T \quad (8)$$

- $S$ : 신호진폭
- $f_s$ : 반송파 주파수로서,  $1/T$ 의 정수배의 값
- $\phi = \frac{2\pi}{M}$ : 위상정보 즉 위상천이량
- $\delta = 0, 1, \dots, M-1$
- $M$ : 신호의 ary 수

따라서 N, N+1번째 합성 수신신호는 각각 다음과 같다.

$$z_N(t) = s_N(t) + n_N(t) + i_N(t), \quad NT \leq t \leq (N+1)T \quad (9)$$

$$z_{N+1}(t) = s_{N+1}(t) + n_{N+1}(t) + i_{N+1}(t), \quad (N+1)T \leq t \leq (N+2)T \quad (10)$$

위상의  $n(t)$ ,  $i(t)$ 는 각각 잡음 및 EMP 간섭신호인데,  $n(t)$ 는 대역폭과된 백색가우스 잡음으로 다음과 같이 표현된다.

$$n(t) = n_c(t) \cos 2\pi f_s t - n_s(t) \sin 2\pi f_s t \quad (11)$$

여기서  $n_c(t)$ ,  $n_s(t)$ 는 평균값이 0 이고, 전력이  $\sigma_n^2$  인 저역가우스 랜덤 프로세스로서 서로 독립적이다. 대역폭과된 EMP 간섭신호  $i(t)$ 는 식(5)로부터  $i(t) = I e^{-\alpha t} \cos(2\pi f_s t + \lambda)$  로 주어지며 이는 시간에 따라 진폭이 지수함수적으로 감소하는 정현파이다. 실제적으로 N번째와 N+1번째 비트에 가해지는 EMP 간섭신호  $i_N(t)$ 와  $i_{N+1}(t)$ 는 크기가 서로 다르게 되지만 본 연구에서는 해석의 편의상 N 번째 비트와 N+1번째 비트 사이의 시점에 있어서의 EMP 간섭신호의 크기를 취해  $i_N(t)$ 와  $i_{N+1}(t)$ 로 삼아 2비트에 걸친 간섭신호의 크기가 같은 경우를 가정한다. 그림3은 위에서 설명한 연속된 두개의 합성 수신 신호에 대한 페이저도를 나타낸다.

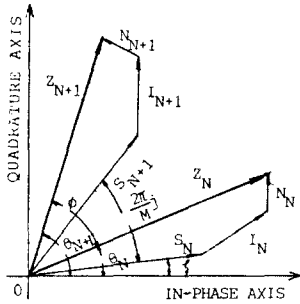


그림 3. 합성수신신호의 페이저도  
Fig. 3. Phasor diagram of received composite signals.

잡음과 간섭이 서로 독립적이므로, 각 정보비트내의 위상정보가 독립적이며 각 위상정보가 등확률로 발생된다고 하면 합성 수신신호 벡터  $Z_N$ 과  $Z_{N+1}$ 의 위상  $\theta_N, \theta_{N+1}$ 의 확률 밀도함수는 서로 동일한 형태가 되어 다음과 같다.

$$p_{\theta_N}(\theta) = p_{\theta_{N+1}}(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos m\theta \quad (12)$$

$$a_m = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{m}{2} \left[ \frac{\Gamma(m/2+l)}{\Gamma(m+1)} \right] (-1)^l \cdot r^{-l} e^{-2\alpha l t} \frac{\rho^{m/2+l}}{(l!)^2} {}_1F_1(m/2+l; m+1; -\rho)$$

$\rho = S/\sigma_n^2$ : 반송파대 잡음 전력비 (CNR)  
 $r = S/I^2$ : 반송파대 간섭 전력비 (CIR)  
 $\Gamma(\cdot)$ : Gamma 함수  
 ${}_1F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$ : 합류형 초월 기하 함수

서로 독립적인  $\theta_N$ 과  $\theta_{N+1}$ 로부터, 이상적인 위상 비교기를 통해 얻어지는 위상각  $\phi$ 는  $p_{\theta_N}(\theta)$ 와  $p_{\theta_{N+1}}(\theta)$ 의 convolution에 의해 다음과 같이 얻어진다[3].

$$p_{\phi}(\theta) = \int_0^{2\pi} p_{\theta_N}(\theta) p_{\theta_{N+1}}(\theta+\mu) d\mu = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} a_m^2 \cos m\theta \quad (13)$$

따라서 M상 DPSK 심볼 오율  $P_e(M)$ 은 에러 영역  $[\pi/M \leq |\theta| \leq \pi]$ 의 구간에서  $p_{\phi}(\theta)$ 를 적분함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$P_e(M) = 2 \int_{\pi/M}^{\pi} p_{\phi}(\theta) d\theta = 2 \int_{\pi/M}^{\pi} \left[ \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} a_m^2 \cos m\theta \right] d\theta = 1 - \frac{1}{M} - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} a_m^2 \frac{1}{m} \sin \frac{m\pi}{M} \quad (14)$$

$$a_m = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{m}{2} \left[ \frac{\Gamma(m/2+l)}{\Gamma(m+1)} \right] (-1)^l \cdot r^{-l} e^{-2\alpha l t} \frac{\rho^{m/2+l}}{(l!)^2} {}_1F_1(m/2+l; m+1; -\rho)$$

식(14)가 바로 구하고자 하는 가우스 잡음 및 EMP 간섭신호의 영향을 받은 M상 DPSK 신호의 심볼 오율 식이다.

### 5. 수치해석 및 검토

앞에서 유도한 식(14)를 이용하여 M=2, 4, 8 인 DPSK 신호에 대해 CIR 및 CNR과 감쇠 정수  $\alpha$ 를 파라미터로 하여 시간의 변화에 따른 심볼오율을 구해 이를 그래프 프로 나타냈다. 감쇠정수  $\alpha$ 로는 실제 사용중인 FH 시스템의 파라미터를 감안하여  $t_c=33.2\mu\text{Hz}$ 와  $D=10$ ,  $D=30$  값을 사용했다. 실제 EMP 간섭신호의 존재하에서는 CIR이 CNR보다 우세할 것이 예상되므로 CIR이 0 dB와 5 dB 일 때 CNR을 10dB로 잡고 감쇠 정수  $\alpha=1.04 \times 10^{-6}$ 과  $\alpha=3.48 \times 10^{-6}$ 에 대해 M=2, 4, 8인 DPSK의 심볼오율을 분석한 결과, 그림4, 5, 6에서와 같이 EMP 간섭신호의 영향은 감쇠정수가 작을수록 시간이 경과함에 따라 더욱 빨리 감소하였고, 초기에 유기된 간섭신호가 작을 수록, 또한 DPSK 신호의 ary 수가 작을수록 오율이 감소한다는 것을 알 수 있었다.

따라서 EMP의 발생이 예상될 때에는 이의 대비책으로서 EMP로부터 유기되는 간섭신호의 크기를 최소화 시킬 수 있는 접지(Grounding), 차폐(Shielding), 여파(filtering), 접속(Bonding)등의 보호대책은 물론, 통신시스템의 공진도를 향상시키는가, 사용 주파수대역을 낮추어 감쇠정수를 작게 할 수 있는 회로구성과 DPSK 신호의 ary 수를 바꿀 수 있는 시스템의 구성이 요구된다.

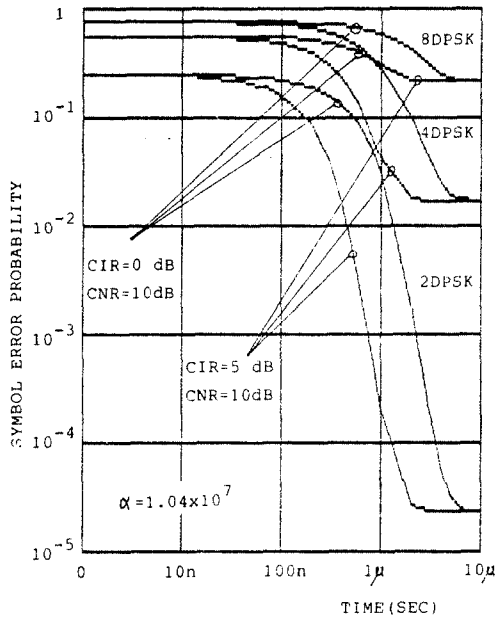


그림 4. 감쇠정수  $\alpha=1.04 \times 10^7$  일때 시간경과에 따른 심볼오류의 변화  
 Fig. 4 The transition of the symbol error probability with time when the damped factor  $\alpha=1.04 \times 10^7$ .

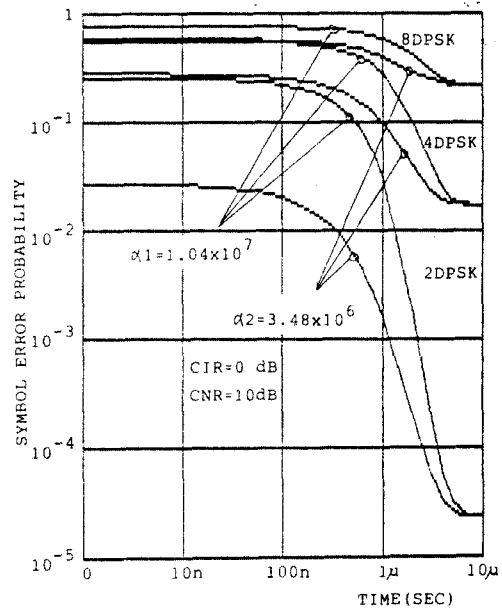


그림 6. 감쇠정수의  $\alpha$  변화에 따른 심볼오류의 비교  
 Fig. 6 The comparison of the symbol error probabilities for various damped factor  $\alpha$ .

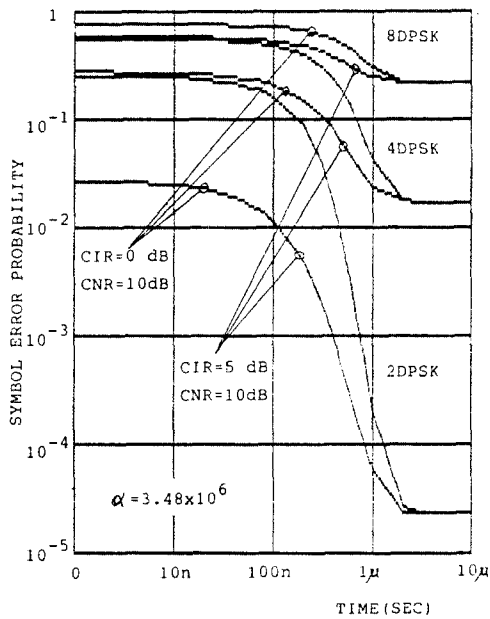


그림 5. 감쇠정수  $\alpha=3.48 \times 10^6$  일때 시간경과에 따른 심볼오류의 변화  
 Fig. 5. The transition of the symbol error probability with time when the damped factor  $\alpha=3.48 \times 10^6$ .

#### 참 고 문 헌

- [1] C.L.Longmire, "On the electromagnetic pulse produced by nuclear explosions," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. AP-26, no.1, pp.3-13, Jan. 1978.
- [2] B.Prasad et al., "EMP effects on the performance of a direct sequence spread spectrum communication system," IEEE Trans. on Communication, vol. COM-32, no.12, pp.1251-1259, Dec. 1984.
- [3] 趙成俊 외 2인, "M-ary DPSK error performance with noise and interference," 電子工學會誌, 제16권 5호, 1979년 10월.
- [4] B.E.Keiser, "Principles of electromagnetic compatibility," Massachusetts:Artech House, Inc., pp.40-52, 1981.
- [5] H.P.Simon, "The performance of M-ary FH/DPSK in the presence of partial band multitone jamming," IEEE Trans.on Communication, vol. COM-30, no.5, pp.953-958, May 1982.