

스펙트럼 겹침이 있는 DS/SFH-SSMA 시스템의 다중톤 영향 분석

Effects of Multitone Interference on the Spectrum-Overlapped DS/SFH-SSMA System

박정민* · 유호진* · 김기근** · 유흥균*

Jeong-Min Park* · Ho-Jin Ryu* · Kie-Keun Kim** · Heung-Gyoon Ryu*

요 약

MAI와 다중톤 간섭채널에서 BPSK DS/SFH-SSMA의 스펙트럼 겹침이 있는 통신 시스템의 성능을 연구한다. DS 확산된 신호의 스펙트럼이 겹쳐지는 SSMA 시스템을 고려한다. 겹침의 증가는 ACI와 처리이득을 동시에 증가시키므로 시스템의 BER 성능을 최적화시키는 겹침이 있게 된다. 다중톤 간섭이 존재하는 채널에서 스펙트럼 겹침방식의 비트 에러 확률식을 유도하였다. 수치 분석과 시뮬레이션에 의한 분석 결과, 최적의 겹침을 사용한 시스템이 일반적인 시스템보다 BER 성능이 크게 개선된다.

Abstract

Performance of spectrum-overlapped BPSK DS/SFH-SSMA communication system is considered in MAI and MTI channel. SSMA system is studied that the frequency spectrums of DS spread signals are overlapped. The increase of overlapping makes ACI and processing gain larger simultaneously. Therefore, BER performance can be optimized by controlling the amount of overlapping. BER equation are derived for the overlapping BPSK DS/SFH-SSMA communication system in multitone interference channel. From the numerical analyses and the simulation results, it can be concluded that the BER performance is considerably improved in optimized overlapping system.

I. 서 론

스펙트럼 겹침방식 시스템 연구로서 L. L. Yang 과 L. Hanzo는 AWGN과 MAI 채널에서 DS 확산된 신호톤의 주파수 대역이 서로 중첩하는 MFSK DS/SFH-SSMA 시스템의 성능을 분석하여, 최적의 중첩을 사용한 시스템이 보다 성능이 개선됨을 보였다^[1]. Laxpati와 Gluck은 주파수 호핑 슬롯이 서로 겹치는 MFSK DS/SFH 시스템을 제안하여 다중톤 간섭 환경에서 겹치지 않는 시스템보다 더 우수한

성능을 나타내고 있음을 보였다^[2]. 콘볼루션 코딩을 적용한 겹쳐진 멀티캐리어 DS-CDMA 시스템을 제안하고^[3], 겹침을 변화에 대한 성능을 분석하여 정해진 서브밴드 캐리어 수에 따라 최적의 성능을 제공하는 겹침율을 제시하였는데, 성능변화는 rolloff 인자 β 값에 좌우됨을 확인하였다. 또한 코딩율과 다이버시티 차수가 동일한 경우 최적의 겹침율을 갖는 제안된 멀티캐리어 시스템이 기존의 멀티캐리어 시스템과 비교해 신호대 잡음비에서 약 6배의 성능개선 효과가 있음을 확인하였다. 위의 연구결과는

*충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

**국방과학연구소 위성체계연구팀(Satellite System Research Team, Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20001226-154

· 수정완료일자 : 2001년 1월 31일

최적의 겹침이 있는 시스템 성능이 더 우수함을 보여준다. 그러나, 종전 연구에서는 의도적인 다중톤 간섭 채널환경에서는 분석되어진 바가 없으며, 또한 PSK 계열의 변조방식을 이용한 경우도 없다.

따라서, 본 논문에서는 겹침을 고려한 BPSK 변조 방식의 DS/SFH-SSMA 통신 시스템의 성능이 AWGN, 다중접속 간섭, 다중톤 간섭 환경하에서 분석하였다. 수신된 신호의 위상각과 시간지연, 그리고 톤 간섭신호의 위상각이 상호 독립적인 랜덤변수라 가정하고, DS와 FH 확산을 위한 확산코드도 랜덤하다는 가정하에 BPSK DS/SFH-SSMA 시스템의 에러확률을 유도하였다. 수치 분석과 시뮬레이션 결과로부터 겹침을 최적화한 시스템이 일반 시스템보다 더 우수함을 보인다.

II. BPSK DS/SFH-SSMA 시스템

2-1 송신 시스템

k 번째 사용자의 정보신호 $b_k(t)$ 가 송신되는 신호 $s_k(t)$ 는 다음과 같다.

$$s_k(t) = \sqrt{2P_S} b_k(t) a_k(t) \cdot \cos\{2\pi[f_c + f_k(t)]t + \theta_k + \alpha_k(t)\}, 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

여기서, f_c 는 캐리어 주파수, P_S 는 송신 신호의 전력, $b_k(t)$ 는 ± 1 의 크기를 갖는 상호 독립적인 랜덤 변수이다. $a_k(t)$ 는 k 번째 사용자의 확산코드로서, $lT_c \leq t < (l+1)T_c$ 에서 동일한 확률로 ± 1 를 갖는 구형 펄스 $a_l^{(k)}$ 의 시퀀스이다. $f_k(t)$ 는 도약 주파수이며, 전체 호핑슬롯의 수를 q 라고 할 때 h 번째 도약 주파수는 다음 $f_h^{(k)}$ 중에서 선택한다.

$$f_h^{(k)} \in \{(1-q)\Delta, (3-q)\Delta, \dots, -\Delta, \Delta, \dots, (q-3)\Delta, (q-1)\Delta\}$$

Δ 는 캐리어 주파수 f_c 와 신호톤 사이의 주파수 간격으로서 두 신호톤의 주파수 간격은 2Δ 이다. $\alpha_k(t)$ 는 위상 파형을 나타내며, h 번째 주파수 호핑 시간동안 $a_h^{(k)}$ 의 상수값을 갖는다. DS 확산된 이후의 BPSK 톤주파수와 중심주파수 f_c 와의 간격

이 $\Delta = d/T_b$ 가 되도록 하고, d 는 1이상인 정수로서 DS 확산된 주파수 톤의 간격이 최적화되어 다중 사용자 간섭의 영향을 최소화하도록 선택한다. 전체 확산 대역폭을 W_{SS} , DS 확산 대역폭을 W_{DS} , 기저대역 신호의 대역폭을 $W_d (= 2/T_b)$, DS 확산에 의한 처리이득을 $N_{DS} (= W_{DS}/W_d)$, 시스템 전체 처리이득을 $N (= W_{SS}/W_d)$ 이라고 하자. 호핑슬롯간에 겹침이 없는 경우 DS 확산이득은 N/q 로 고정되지만, 호핑슬롯간의 스펙트럼 겹침이 있는 시스템의 DS 확산이득 N_{DS} 는 다음과 같이 주어진다.

$$N_{DS} = \frac{W_{SS} - 2(q-1)\Delta}{W_d} = N - d(q-1) \quad (2)$$

$1 \leq d \leq N/q$ 인 경우 N_{DS} 는 N/q 이상의 값을 갖게 된다. 그러나, DS 확산된 이후에도 BPSK 신호톤의 주파수 스펙트럼이 겹치지 않는 경우에는 각 BPSK 신호톤들이 가질 수 있는 최대 DS 처리 이득은 N/q 가 된다. 송신신호 $s_k(t)$ 는 AWGN, 다중접속 간섭, 다중톤 간섭이 존재하는 채널을 통과한다. W_{SS} 의 확산 대역폭에 대해 N_I 개의 동일한 전력을 갖는 다중톤 간섭이 존재하고, 다중톤 간섭 신호는 q 개의 가능한 신호톤 주파수와 정확하게 일치하는 주파수로 전송되어진다고 가정한다. 또한, 각각의 톤 간섭신호는 q 개의 호핑슬롯중 서로 다른 하나의 호핑슬롯에만 영향을 줄 수 있으며, 톤 간섭신호간의 주파수 간격이 충분히 커서 하나의 호핑슬롯에 두개 이상의 톤 간섭신호가 존재할 수 없다고 가정한다. 이것은 n=1-band MTI로 분류된다^[4]. 다중톤 간섭신호는 다음과 같다.

$$I(t) = \sqrt{\frac{2P_{I_T}}{N_I}} \sum_{i=1}^{N_I} \cos[2\pi(f_c + f_i(t))t + \theta_i(t)] \quad (3)$$

여기서, $f_c + f_i(t)$ 는 i 번째 톤 간섭신호의 주파수이며, $f_i(t)$ 는 다음의 주파수 시퀀스 f_i 중에서 선택된다.

$$f_i \in \{(1-q)\Delta, (3-q)\Delta, \dots, -\Delta, \Delta, \dots, (q-3)\Delta, (q-1)\Delta\}$$

또한, P_{I_T} 는 전체 다중톤 간섭신호의 전력을 나

타낸다. P_I 를 N_I 개 중에서 하나의 톤 간섭신호 전력이라고 하면 $P_I = P_{I_r} / N_I$ 이다.

2-2 수신 시스템

첫번째 사용자의 첫번째 송신신호 b_0 를 수신한다고 가정하자.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t - \tau_k) + I(t) + n(t) \quad (4)$$

여기서, τ_k 는 기준 신호에 대한 상대적인 시간 지연으로, $[0, T_b]$ 에서 독립적인 랜덤변수로 모델되어진다. 수신 신호 $r(t)$ 는 주파수 역확산되고 BPF를 통과한다.

$$r_d(t) = \sqrt{\frac{P_S}{2}} \sum_{k=1}^K b_k(t - \tau_k) a_k(t - \tau_k) \cos\{2\pi[f_c + f_k(t - \tau_k) - f_1(t)]t + \phi_k(t)\} + \sqrt{\frac{P_{I_r}}{2N_I}} \sum_{i=1}^{N_I} \cos\{2\pi[f_c + f_i(t) - f_1(t)]t + \theta_i(t)\} + \hat{n}(t) \quad (5)$$

여기서, $\phi_k(t) = \theta_k - 2\pi[f_c + f_k(t - \tau_k)]\tau_k + \alpha_k(t - \tau_k) - \beta_1(t)$, $\hat{n}(t)$ 는 $n(t)$ 의 대역제한된 형태로 $N_o/8$ 의 스펙트럼 밀도를 갖는다. 또한, $\theta_i(t) = \theta_i(t) - \beta_1(t)$ 이다. $\beta_1(t)$ 는 첫번째 기준사용자의 주파수 역도약기에 의한 위상 파형으로서, k 번째 주파수 호핑 시간동안 $\beta_k^{(1)}$ 의 상수값을 갖게 된다. $r_d(t)$ 신호에 대해 DS 역확산과 BPSK 복조를 한 후 동기방식 상관기를 거친 후의 신호 Z_1 은 다음과 같다.

$$Z_1 = \sqrt{\frac{P_S}{8}} T_b \left[D + \sum_{k=2}^K U(k, 1) + I + N \right] \quad (6)$$

D 는 기준 사용자의 신호성분으로 $D = b_0^{(1)}$ 으로 주어진다. N 은 평균이 0이고, 분산이 $(2E_b/N_o)^{-1}$ 인 잡음항을 나타낸다.

한편, $U(k, 1)$ 은 기준사용자에 대한 k 번째 사용자의 간섭이며, 연속시간 부분상관 함수 $R_c[\tau_k, m_{-1}^{(k)}$,

$\phi_{-1}^{(k)}$]과 $\hat{R}_c[\tau_k, m_0^{(k)}, \phi_0^{(k)}]$ 를 이용하면 다음과 같다.

$$U(k, 1) = \frac{1}{T_b} \{ R_c[\tau_k, m_{-1}^{(k)}, \phi_{-1}^{(k)}] + \hat{R}_c[\tau_k, m_0^{(k)}, \phi_0^{(k)}] \} = \frac{1}{T_b} \left\{ \int_0^{\tau_k} b_{-1}^{(k)} a_k(t - \tau_k) a_1(t) \cdot \cos[2\pi(m_{-1}^{(k)} - m_1)\Delta t + \phi_{-1}^{(k)}(t)] dt + \int_{\tau_k}^{T_b} b_0^{(k)} a_k(t - \tau_k) a_1(t) \cdot \cos[2\pi(m_0^{(k)} - m_1)\Delta t + \phi_0^{(k)}(t)] dt \right\} \quad (7)$$

여기서, $b_{-1}^{(k)}$ 와 $b_0^{(k)}$ 는 각각 $[0, \tau_k]$ 와 $[\tau_k, T_b]$ 구간에서 기준사용자와 비교되는 k 번째 사용자의 송신 데이터 비트를 나타내며, $\phi_{-1}^{(k)}$ 와 $\phi_0^{(k)}$ 는 각각 이때의 위상각을 나타낸다. 이 위상각은 $[0, 2\pi]$ 에 대해 균일하게 분포되는 i.i.d 랜덤변수이다. 또한, $m_{-1}^{(k)}$ 와 $m_0^{(k)}$ 는 각각 $[0, \tau_k]$ 와 $[\tau_k, T_b]$ 구간에서 k 번째 사용자의 호핑 주파수의 위치를 나타내는 변수로서 $m_{-1}^{(k)}, m_0^{(k)} \in \{1 - q, 3 - q, \dots, -1, 1, \dots, q - 3, q - 1\}$ 이다.

BER 성능을 구하는데 있어서, 모든 간섭은 부가적인 잡음으로 취급되며 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 또한, 다른 사용자들로부터의 간섭은 상호 독립적인 랜덤변수로 취급된다. k 번째 사용자 신호에 의한 간섭항은 평균이 0인 가우시안 분포를 갖는 랜덤 변수로 근사화된다. 여기서 $x_k = m_{-1}^{(k)} - m_1$,

$\hat{x}_k = m_0^{(k)} - m_1$ 이고, x_k 와 \hat{x}_k 에 대해 조건적인 간섭항의 분산을 구한다^[2].

$$Var[U(k, 1)]_U = \frac{1}{q} \left\{ \frac{1}{3(N - d(q - 1))} + \frac{N - d(q - 1)}{2\pi^2 q^2 d^2} \left[1 - \sin c \left(\frac{2\pi q d}{N - d(q - 1)} \right) \right] + \sum_{n=1}^{\frac{q}{2} - 1} \frac{N - d(q - 1)}{4\pi^2 n^2 d^2} \left[1 - \sin c \left(\frac{4\pi n d}{N - d(q - 1)} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

$$Var[U(k, 1)]_L = \frac{1}{q} \left\{ \frac{1}{3(N - d(q - 1))} + \sum_{n=1}^{q-1} \frac{N - d(q - 1)}{8\pi^2 n^2 d^2} \left[1 - \sin c \left(\frac{4\pi n d}{N - d(q - 1)} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

여기서, U 와 L 은 각각 상한과 하한을 나타낸다. 한편, I_s 는 다중톤 간섭신호 성분으로 하나의 톤 간섭신호 성분 I_s 는 다음과 같이 표현된다.

$$I_s = \frac{1}{T_b} \sqrt{\frac{P_I}{P_S}} \int_0^{T_b} a_1(t) \cdot \cos\{2\pi(m_i - m_1)\Delta t + \theta_i\} dt \quad (10)$$

m_i 와 m_1 은 톤 간섭신호와 기준사용자 신호의 호핑 주파수의 위치를 나타내는 변수로서 $m_i, m_1 \in \{1-q, 3-q, \dots, -1, 1, \dots, q-3, q-1\}$ 이다.

$$\text{Var}[I_s] = \frac{P_{I_r}}{2P_S N_I (N-d(q-1))} \cdot \sin^2\left\{\frac{\pi x_i d}{N-d(q-1)}\right\} \quad (11)$$

여기서, $x_i = m_i - m_1$ 이다.

III. 비트에러 확률

DS/SFH-SSMA 시스템의 비트에러 확률은 다음과 같다.

$$P_e|_R = \frac{N_I}{q} P_e(HI|_R) + \left(1 - \frac{N_I}{q}\right) P_e(HNI|_R) \quad (12)$$

여기서, $P_e(HI|_R)$ 는 톤 간섭신호의 영향을 받은 경우의 에러확률이고, $P_e(HNI|_R)$ 는 톤 간섭신호의 영향을 받지 않는 경우의 에러확률을 나타낸다. 톤 간섭신호가 호핑슬롯에 영향을 주지 않는 경우, 전체 간섭신호는 AWGN과 $(K-1)$ 명의 타사용자 간섭성분만을 포함한다. 그러므로 이러한 경우의 정규화된 분산 $\sigma_{HNI}^2(\mathcal{R})$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{HNI}^2(\mathcal{R}) = (K-1) \text{Var}[U(k, 1)]_R + \left(\frac{2E_b}{N_o}\right)^{-1} \quad (13)$$

여기서, \mathcal{R} 은 상한과 하한을 나타내는 U 와 L 을 나타낸다. 따라서, $(K-1)$ 명의 타사용자 간섭을 고려하고, 톤 간섭신호의 영향을 받지 않는 DS/SFH-SSMA 신호의 에러확률 $P_e(HNI|_R)$ 은 다음과 같다.^[5]

$$P_e(HNI|_R) = Q\left(\sqrt{\frac{1}{\sigma_{HNI}^2(\mathcal{R})}}\right) \quad (14)$$

한편, 톤 간섭신호가 호핑슬롯의 신호톤과 정확히 hit 되는 경우, 전체 간섭신호는 AWGN, 타사용자 간섭성분, 톤 간섭신호 성분을 포함한다. 이때, x_i 은 0이 되므로 단일 톤 간섭신호의 분산은 $\text{Var}[I_s] = P_{I_r}/[2P_S N_I (N-d(q-1))]$ 가 된다. 따라서, 이러한 경우의 전체 간섭신호에 대한 정규화된 분산 $\sigma_{HI}^2(\mathcal{R})$ 은

$$\sigma_{HI}^2(\mathcal{R}) = (K-1) \text{Var}[U(k, 1)]_R + \frac{P_{I_r}}{2P_S N_I (N-d(q-1))} + \left(\frac{2E_b}{N_o}\right)^{-1} \quad (15)$$

이 된다. 그러므로 톤 간섭신호가 호핑슬롯의 신호톤과 정확히 hit 되는 경우에 대한 DS/SFH-SSMA 신호의 에러확률 $P_e(HI|_R)$ 은 다음과 같다.

$$P_e(HI|_R) = Q\left(\sqrt{\frac{1}{\sigma_{HI}^2(\mathcal{R})}}\right) \quad (16)$$

IV. 성능 분석과 결론

그림 1은 다중톤 간섭이 없고 전체 사용자수가 $K=100$ 인 경우 BER성능을 이론치와 시뮬레이션 결과

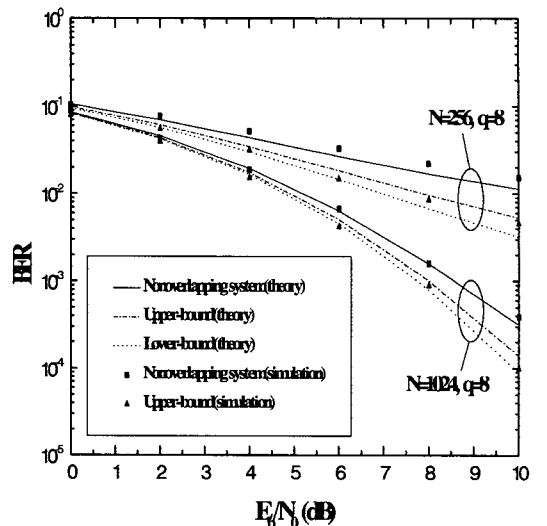


그림 1. MAI와 AWGN 환경에서 BER.
Fig. 1. BER in MAI and AWGN channel.

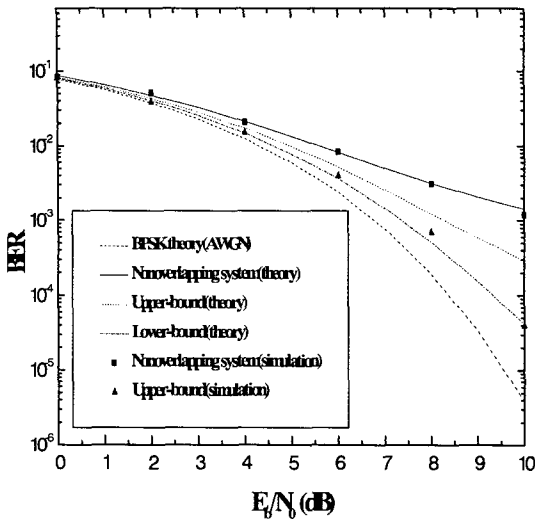


그림 2. MAI, MTI와 AWGN에서 BER.
Fig. 2. BER in MAI, MTI and AWGN.

과이다. MATLAB을 이용한 시뮬레이션 결과가 이론치와 일치하므로 최종 BER 수식의 타당성을 입증할 수 있다. 동일한 q 에 대해 N 이 더 클 경우 시스템의 성능이 더 우수하며, 동일한 N 에 대해 최적의 겹침을 사용한 시스템의 성능이 더 우수하다. 그림 2는 $N=2048$, $q=32$, $SIR=-20$ dB, $N_T=10$, $K=100$ 인 조건하에서 BPSK DS/SFH-SSMA 시스템의 BER 성능을 이론치와 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 겹침이 없는 경우는 $\Delta=64/T_b$ 를 사용하였으며, 겹침이 있는 시스템에서는 그림 1 처럼, 상한의 최적값인 $\Delta=62/T_b$ 를 사용하였다. 다중 사용자 접속과 다중톤 간섭이 있는 환경에서

박 정 민

1999년 2월: 충북대학교 전기전자공학과(공학사)
2001년 2월: 충북대학교 대학원 전기전자공학과 (공학석사)
2001년 3월: LG전자

김 기 근

1990년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)
1992년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학석사)
1992년 2월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원

최적으로 겹친 시스템이 일반적인 시스템보다 더 우수함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] L. L. Yang and L. Hanzo, "Overlapping M-ary Frequency Shift Keying Spread Spectrum Multiple Access Systems Using Random Signature Sequences," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, pp. 1984 -1995, Nov., 1999.
- [2] M. A. Laxpati and W. Gluck, "Optimization of a Hybrid SFH/DS MFSK Link in the Presence of Worst Case Multitone Jamming," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 2118 - 2125, June, 1995.
- [3] 오정현, 박광철, 김기두, "중복된 멀티캐리어 DS-CDMA 시스템의 서브밴드 중복을 변화에 따른 성능개선 연구," 대한전자공학회 논문지, 제37권, 9호, 2000년 9월.
- [4] K. C. Teh, A. C. Kot, and K. H. Li, "Multitone Jamming Rejection of FFH/BFSK Spread-Spectrum System over Fading Channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, pp. 1050-1057, Aug., 1998.
- [5] R. C. Robertson and J. Sheltry, "Multiple Tone Interference of Frequency-Hopped Noncoherent MFSK Signals Transmitted over Rician Fading Channels," *IEEE MILCOM '95*, vol. 1, pp. 330-334, 1995.

유 호 진

1987년 3월~1993년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 3월~1998년 2월: 충북대학교 대학원 (공학석사)
1998년 3월~2000년 2월: 충북대학교 박사과정 수료
1993년 3월~현재: KBS(한국방송공사)

유 흥 균

1988년 2월~현재: 충북대학교 전기전자공학부 정교수
[주 관심 분야] 디지털 이동통신, 통신신호 처리시스템, 통신회로 및 설계 등