

다중 반송파 DS-CDMA 시스템의 항 재밍 성능분석

Anti-jamming Performance Analyses of Multicarrier DS-CDMA System

김 영 준*, 고 재 덕*, 유 흥 균*

(Young Jun Kim*, Jae Duck Ko*, Heung Gyoon Ryu*)

*정보통신부의 정보통신 우수 시범학교 자원사업에 의하여 수행된 것임.

요 약

본 논문은 확산된 데이터에 반송파를 1개가 아닌 여러 개의 반송파로 변조하는 MC DS-CDMA 시스템을 적용하여 페이딩 요소를 고려하지 않는 채널, 즉 Gaussian 채널에서 다중 사용자 간섭 및 부분대역 재머, 최악의 부분대역 재머 간섭 하에서 성능을 분석하여 단일 반송파를 사용한 기존의 DS-CDMA 시스템과 비교 분석한다. 또한, Gaussian 채널에서 고려된 간섭들에 대해 다중경로 페이딩 채널에서 시스템 성능을 분석하고 Gaussian 채널에서 분석된 시스템 성능과 비교한다.

ABSTRACT

In this paper, multicarrier direct sequence CDMA system is investigated, where data sequence multiplied by spreading sequence is modulated by multiple carriers. System performances over Gaussian channel are analyzed in multiple user interference and partial band jammer and worst case partial band jammer interference. The computer-analyzed performances are compared with those of single carrier system. System performance over multipath fading channel is also analyzed and compared with case of Gaussian channel.

I. 서 론

최근 DS-CDMA(direct sequency-code division multiple access) 통신방식을 다양하게 응용한 새로운 개념의 통신 방식에 대한 관심이 증가하고 있다. 이는 기존의 DS-CDMA 보다 다중 접근 능력이 우수하고 페이딩 및 간섭에 견실 성능 갖는 통신 시스템이 요구되기 때문이다. 기존의 DS-CDMA 시스템의 다중 접근능력의 증가 및 간섭에 효과적으로 대처하기 위한 방법으로 확산된 데이터에 한 개의 반송파로 변조하는 것이 아니라 여러개의 반송파로 변조하는 MC-CDMA(multicarrier CDMA)가 제안되었다[1][2].

MC-CDMA 시스템은 이미 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 방식과 DS-CDMA의 두 형태가 혼합된 형태로 제안되었다[1]. 이 형태는 확산 시퀀스가 직·병렬로 변환되고 각 칩(chip)은 다중 반송파로 변조된다. 이는 반송파 수가 처리이득과 같음을 의미하며, 각 반송파는 DS 파형보다 협대역 파형을 전송하게 된다. 이 방식은 각 반송파간의 직교성에 따라 반송파를 할당하기 때문에 직교성이 유지되는 한 상호간의 신호 간섭을 일으키지 않는다. 하지만, 도플러 주파수나 비동기 시스템에 의해서 직교성이 더 이상 유지되지 않는다면 각 반송파 대역내의 신호

들은 서로간의 간섭을 야기 시킨다. 그러므로 이런 불필요한 각 반송파간의 신호 간섭을 최소화하기 위해 Milstein과 Kondo는 대역 제한된 MC DS-CDMA를 제안했다[3]. 이들은 제안한 시스템이 기존의 DS-CDMA에 비해 페이딩에 강인하고 PBJ(partial band jammer)에 대해 항재밍 성능이 우수하다는 것을 분석을 통하여 보였다[3]. 이들 분석은 다중 경로 페이딩 환경에서 고려되었다. 만약 위성 통신과 같은 다중경로 페이딩 요소를 고려하지 않는 통신 채널일 경우 이들의 분석은 이와 같은 채널에 적합하지 않을 것이다.

본 논문은 Milstein과 Kondo가 제안한 MC DS-CDMA 시스템의 성능을 MUI(multiple user interference) 및 PBJ 간섭, 최악의 PBJ 간섭을 고려한 Gaussian 채널 환경에서 분석하고 기존의 단일 반송파 DS-CDMA와 시스템 성능을 비교 분석한다. 또한 Gaussian 채널에서 고려된 간섭들에 대해 다중경로 페이딩 채널에서 시스템 성능을 분석하고 Gaussian 채널에서 분석된 시스템 성능과 비교한다. 위와 같이 재밍 간섭을 고려한 성능 분석은 본 통신 시스템에 적합한 분석적 자료를 제공하게 될 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다중 반송파 시스템의 모델링을 제시하고 3장에서는 2장에서 제시된 시스템을 분석한다. 4장에서는 3장에서 분석된 결과를 바탕으로 기존의 DS-CDMA와 MC DS-CDMA 시스템과 성능을 비교 분석하여 5장에서 결론을 맺는다.

* 충북대학교 전자공학과
접수일자 : 1998년 4월 22일

II. 시스템 모델링

그림 1은 k번째 사용자에게 대한 송·수신기 구조이다. 여기서 $d_k^{(k)}$ 는 데이터를 나타내는 random binary 시퀀스이고 $c_n^{(k)}$ 는 PN 코드 시퀀스이다. 심벌당 칩 수는 N 칩이고 각 사용자는 서로 다른 시퀀스를 갖는다. 그림 1(a)의 송신기를 보면 시퀀스 $d_k^{(k)} c_n^{(k)}$ 는 임펄스열로 변조하고, 칩 웨이브 헤이핑 필터를 거쳐 다중 반송파로 변조하여 전송한다.

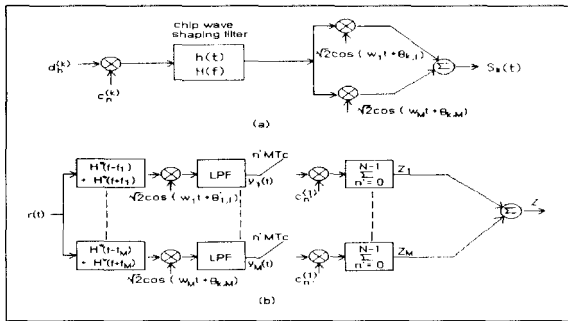


그림 1. 다중 반송파 시스템의 송·수신기 구성도. (a) k번째 사용자에게 대한 송신기, (b) 첫번째 사용자에게 대한 수신기
Fig. 1 Transmitter and receiver block diagrams.;(a) Transmitter for Kth user, (b)Receiver for the first user.

그림 2는 그림 1의 시스템에 의해서 생성된 psd(power spectrum density)로 단일 반송파 시스템과 비교하여 도시하였다. 그림 2(a)은 대역 제한된 단일 반송파 DS 파형의 psd로 전체 대역폭 BW1는 다음과 같다.

$$BW_1 = (1 + \alpha) \frac{M}{T_c} = (1 + \alpha) M \cdot N \quad (1)$$

여기서 α 는 roll-off factor, T_c 는 다중 반송파 시스템의 chip duration이고, M은 반송파 수이다. 또한 N은 $\frac{1}{T_c}$ 로 다중 반송파 시스템의 처리이득(processing gain)이다.

다중반송파 시스템에서의 대역 BW_M 은 그림 2(b)에서처럼 동일폭의 주파수 대역으로 분할된다. 따라서 각 주파수의 대역폭 BW_M 은 다음과 같다.

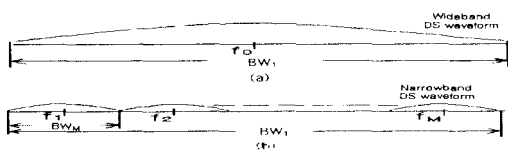


그림 2. DS 파형의 psd. (a) 단일 반송파 파형, (b) 다중 반송파 파형.
Fig. 2 Power spectrum density of DS waveform.;(a) Single-carrier DS waveform, (b) Multicarrier DS waveform

$$BW_M = \frac{BW_1}{M} = (1 + \alpha) \frac{1}{T_c} = (1 + \alpha) N \quad (2)$$

그림 1(b)의 수신기에 들어오는 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \left\{ \sqrt{2E_c} \sum_{i=-\infty}^{\infty} d_k^{(k)} c_n^{(k)} h(t - nMT_c - \tau_k) \cdot \sum_{m=1}^M \cos(w_m t + \theta_{k,m}) \right\} + n_w(t) + n_f(t) \quad (3)$$

여기서 E_c 는 칩당 에너지이고 K는 사용자 수이며 M은 반송파 수이다. τ_k 는 k번째 사용자의 칩 지연이고 $\theta_{k,m}$ 는 반송파 위상으로 $[0, 2\pi]$ 인 균일 분포를 갖는 랜덤 변수이다. 또한 $n_w(t)$ 는 $\eta_0/2$ 의 double-sided psd를 갖는 AWGN이고 $n_f(t)$ 는 제미 간섭이다.

III. 시스템 해석 및 성능분석

첫 번째 사용자 즉, 원하는 사용자 신호의 수신에 대하여 성능을 분석하기 위해서는 먼저 반송파, 코드 및 비트 동기화 완전히 이루어졌다고 가정한다. 그림 1(b)의 첫 번째 사용자(k = 1) 수신기에서 칩 웨이브 헤이핑 필터의 특성은 다음과 같다.

$$X(f) = \begin{cases} \frac{1}{W} & |f| \leq \frac{W}{2}(1 - \alpha) \\ \frac{1}{2W} \left[1 - \sin \left[\frac{1}{2\alpha} \left(\frac{2\pi|f|}{W} - \pi \right) \right] \right] & \frac{W}{2}(1 - \alpha) \leq \frac{W}{2}(1 + \alpha) \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $X(f) = |H(f)|^2$ 로 Nyquist 조건을 만족하며 $F^{-1} |H(f)|^2 \equiv x(t)$, $\int_{-\infty}^{\infty} |H(f)| df \equiv 1$ 인 관계가 성립한다. m번째 브랜치의 chip-matched filter의 출력 $y_m(t)$ 는 다음과 같이 기술한다.

$$y_m(t) = S_{ym}(t) + I_{ym}(t) + J_{ym}(t) + N_{ym}(t) \quad (5)$$

$$S_{ym}(t) = \sqrt{E_c} \sum_{i=-\infty}^{\infty} d_k^{(1)} c_n^{(1)} x(t - nMT_c) \quad (6)$$

$$I_{ym}(t) = \sum_{k=2}^K \left\{ \sqrt{E_c} \sum_{i=-\infty}^{\infty} d_k^{(k)} c_n^{(k)} x(t - nMT_c - \tau_k) \right\} \quad (7)$$

$$J_{ym}(t) = Lp \{ n'_{i,m}(t) \sqrt{2} \cos(w_m t + \theta_m) \} \quad (8)$$

$$N_{ym}(t) = Lp \{ n'_{w,m}(t) \sqrt{2} \cos(w_m t + \theta_m) \} \quad (9)$$

$S_{ym}(t)$ 는 신호원, $I_{ym}(t)$ 는 MUI이고, $J_{ym}(t)$ 는 PBJ의 간섭 원이며, $N_{ym}(t)$ 는 필터링된 AWGN이다. 완벽한 동기화 이루어졌다고 가정했으므로 $\tau_1 = 0$ 으로 설정한다. $n'_{i,m}(t)$ 와 $n'_{w,m}(t)$ 는 각각의 $n_f(t)$, $n_w(t)$ 가 m번째 대역통과

필터의 출력 값이다. 또한, θ_m 은 m 번째 브랜치의 주파수 위상이고, $\{L_p\}$ 는 서역통과 필터링을 나타낸다. 이때 m 번째 상관기(correlator)의 신호출력의 통계치를 Z_m 이라고 할 때 이는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_m = S_{Zm} + I_{Zm} + J_{Zm} + N_{Zm} \quad (10)$$

다른 MUI, PBI, AWGN은 서로 각각 독립적이라 가정하면, Z_m 의 분산(variance)은

$$\text{Var}\{Z_m\} = \text{Var}\{I_{Zm}\} + \text{Var}\{J_{Zm}\} + \text{Var}\{N_{Zm}\} \quad (11)$$

로 주어지고 각 항은 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} \text{Var}\{I_{Zm}\} &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} c_n^{(1)} c_m^{(1)} R_{Im}[(n-m)T_c] \\ &= NR_{Im}(0) + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq n}}^{N-1} c_n^{(1)} c_m^{(1)} R_{Im}[(n-m)MT_c] \quad (12) \\ &= NR_{Im}(0) + 2 \sum_{n=1}^m R_{Im}(lT_c) \sum_{i=1}^n c_i^{(1)} c_{i-l}^{(1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Var}\{J_{Zm}\} &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} c_n^{(1)} c_m^{(1)} R_{Im}[(n-m)T_c] \\ &= NR_{Im}(0) + 2 \sum_{n=1}^m R_{Im}(lT_c) \sum_{i=1}^n c_i^{(1)} c_{i-l}^{(1)} \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Var}\{N_{Zm}\} &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} c_n^{(1)} c_m^{(1)} R_{Nm}[(n-m)T_c] \\ &= \frac{N\eta_0}{2} \quad (14) \end{aligned}$$

$R_{Im}(\tau)$, $R_{Jm}(\tau)$, $R_{Nm}(\tau)$ 는 각각 $I_{y_m}(t)$, $J_{y_m}(t)$, $N_{y_m}(t)$ 의 자기상관 함수이다. 여기서 $R_{Im}(\tau)$ 는 $S_{I_c}(f)$ 의 역 푸리에 변환형이고 $I_{y_m}(t)$ 의 psd이다. 즉, $S_{I_c}(f)$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$S_{Im}(f) = \frac{(K-1)E_c}{2T_c} |H(f)|^2 \quad (15)$$

또한 $R_{Jm}(\tau)$ 는 $S_{Jm}(f)$ 의 역 푸리에 변환으로 $S_{Jm}(f)$ 는 다음과 같다.

$$S_{Jm}(f) = \frac{1}{2} [S_{n_f}(f-f_l) + S_{n_f}(f+f_l)] |H(f)|^2 \quad (16)$$

3.1 Gaussian 채널 성능분석

3.1.1 AWGN과 MUI에 대한분석

요구되는 신호 성분외의 잡음 성분은 AWGN과 MUI만이 존재하고 PBI는 없는 상태에서 시스템을 분석한다.

단, $l \neq 0$ 일 때 $R_{Im}(lMT_c) \sum_{i=1}^{N-l} c_i^{(1)} c_{i-l}^{(1)} = 0$ 이다. 따라서 식 (12)에서 MUI의 분산은 $R_{Im}(0)$ 이 된다. $R_{Im}(\tau)$ 가 식 (15)에 주어진 $S_{Im}(f)$ 의 psd를 갖는 $I_{y_m}(t)$ 의 자기상관 함수이므로 $R_{Im}(0)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{Im}(0) &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{Im}(f) df \\ &= \frac{(K-1)E_c}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) \quad (17) \end{aligned}$$

따라서 다중반송파 m 번째 상관기의 신호대 잡음비(μ_m)은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \mu_m &= \frac{N^2 E_c}{\frac{(K-1)NE_c}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{N\eta_0}{2}} \\ &= \left\{ \frac{K-1}{2N} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{1}{\frac{2NE_c}{\eta_0}} \right\}^{-1} \quad (18) \end{aligned}$$

다중 반송파 시스템의 수신기 구조에서 보듯이 총 신호대 잡음비는 다음과 같이 신호대 잡음비의 조합으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \mu &= \sum_{m=1}^M \mu_m \\ &= \left\{ \frac{K-1}{2NM} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \frac{1}{\frac{2NME_c}{\eta_0}} \right\}^{-1} \quad (19) \end{aligned}$$

이 식에서 NM 은 전체 처리이득을 뜻하고, $MNE_c = E_b$ 로 정보신호에 대한 비트 당 에너지를 말한다. 그러므로 비트오율 P_e 는 다음과 같다.

$$P_e = \left[\frac{1}{2} (1 - \mathcal{O}(\sqrt{\mu})) \right]^M \sum_k^{M-1} \binom{M-1+k}{k} \left[\frac{1}{2} (1 + \mathcal{O}(\sqrt{\mu})) \right]^k \quad (20)$$

$$\mathcal{O}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (21)$$

3.1.2 PBI 간섭을 고려한 분석

앞단에서는 특정 대역으로 들어오는 PBI가 없고 AWGN과 MUI가 존재하는 경우에 대한 다중 반송파 시스템의 성능을 분석하였다. 본 절에서는 AWGN과 MUI, PBI가 존재시 다중반송파 DS-CDMA 시스템의 성능을 분석하고 이를 단일반송파 DS-CDMA 시스템과 비교한다. 성능분석은 다음과 같은 조건에 의해서 분석한다.

1. $X(t)$ 는 식 (4)에 보여진 것과 같은 raised-cosine 필터이다.
2. PBI는 대역 제한된 백색 가우시안 잡음이다. 즉, PBI의 psd $S_{n_f}(f)$ 는 아래와 같다.

$$S_{n_f}(f) = \begin{cases} \frac{W_f}{2}, & f_j - \frac{W_f}{2} \leq |f| \leq f_j + \frac{W_f}{2} \\ 0, & elsewhere \end{cases} \quad (22)$$

여기서 f_j 와 W_f 는 각각 간섭 신호의 중심 주파수

와 대역폭이다.

- 그림 3와 같이 재밍 대역폭은 각 반송파의 대역과 동일하거나 대역의 정수 배로 나타난다. 즉, $W_j = n \cdot W_M$ 이고 여기서 n 은 $1 \leq n \leq M$ 인 정수이다.

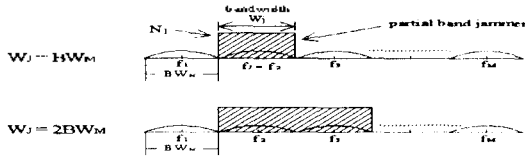


그림 3. PBJ 환경에서의 PSD
Fig. 3 PSD of partial band jammer.

다음의 성능 분석에 있어서 전체 시스템 대역폭을 $M \cdot BW_M$ 으로 단일 반송파 시스템에 대하여 동일하게 유지한다. 식 (22)의 $S_{m_i}(f)$ 를 식 (16)에 대입하고 식 (4)의 펄스 웨이핑 필터의 전달함수를 이용하여 부분대역 간섭 신호의 전력을 계산하면 아래의 식을 얻는다.

$$R_{jm}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{jm}(f) df \tag{23}$$

$$= \frac{nJ}{2} \left(1 - \alpha - \frac{\alpha}{\pi} \sin \frac{\pi}{\alpha} \right)$$

PBJ는 JSR(jammer to signal ratio)의 함으로 표현되고 이는 다음과 같이 간섭신호의 크기 및 대역폭 그리고 신호 전력으로 표현된다.

$$JSR = \frac{\text{jammer power}}{\text{signal power}} = \frac{N_j W_j}{\frac{E_b}{T}} \tag{24}$$

여기서 T는 정보데이터 $d_b^{(1)}$ 의 duration이다.

PBJ 간섭은 그림 3에서와 같이 psd 형성된다면 부분대역 재밍 간섭에 대한 총 신호대 잡음비는 각 상관기에 시 나온 신호대 잡음비의 조합으로 표현한다.

$$I(jsr) = \sum_{j=1}^B \gamma_j + \sum_{i=1}^{M-B} \beta_i \tag{25}$$

첫번째 항은 재밍된 신호대 잡음비 요소이고, 두번째 항은 재밍되지 않은 신호대 잡음비의 요소이다. 이때, γ_j 는 재밍된 j번째 상관기에서 나온 신호대 잡음비를 말하고, β_i 는 재밍되지 않은 i번째 상관기에서 나온 신호대 잡음비를 말한다. B는 재밍된 부 대역의 수를 말하고, M은 반송파에 의해서 할당된 총 부 대역의 수를 말한다. 각 상관기에서 나온 신호대 잡음비 β_i 는 식 (18)과 동일하고, γ_j 는 다음과 같다.

$$\gamma_j = \left\{ \frac{K-1}{2N} \left(1 - \frac{\alpha}{4} \right) + \frac{1}{\frac{2NE_c}{\eta_0}} + \frac{1}{2N} \left(1 - \alpha - \frac{\alpha}{\pi} \sin \frac{\pi}{\alpha} \right) JSR \right\}^{-1} \tag{26}$$

따라서 다중 반송파 시스템의 PBJ 간섭에 따른 비트 오류율은 다음과 같다.

$$P_e(\rho) = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \mathcal{D}(\sqrt{I(jsr)}) \right) \right]^M \sum_{k=0}^{M-1} \binom{M-1+k}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \mathcal{D}(\sqrt{I(jsr)}) \right) \right]^k \tag{27}$$

단일반송파 시스템일 경우 PBJ는 확산된 전 대역(Wss) 내에서 특정 재밍 수파수 폭 W_j 에 대한 전체 평균 재밍 전력 J의 크기로 분포되어 있다. 여기서 band fraction ρ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\rho = \frac{W_j}{W_{SS}} \leq 1 \tag{28}$$

재밍이 걸린 확률이 ρ 일 때, 신호내에 재밍이 걸리지 않을 확률은 $1 - \rho$ 이다. 따라서 단일 반송파 시스템의 PBJ 환경에서 조건부 에리 확률은 다음과 같다.

$$P(e|\rho) = (1 - \rho) Q(\sqrt{\lambda_s}) + \rho Q(\sqrt{\lambda_s^{(jam)}}) \tag{29}$$

여기서 λ_s 는 재밍되지 않은 대역의 신호대 잡음비로 식 (19)과 동일하고 $\lambda_s^{(jam)}$ 는 재밍된 대역의 신호대 잡음비로 다음과 같다.

$$\lambda_s^{(jam)} = \left\{ \frac{K-1}{2N'} \left(1 - \frac{\alpha}{4} \right) + \frac{1}{\frac{2N'E_c}{\eta_0}} + \frac{1}{2N'} \left(1 - \alpha - \frac{\alpha}{\pi} \sin \frac{\pi}{\alpha} \right) JSR \right\}^{-1} \tag{30}$$

여기서, N' 는 전체 처리 이득으로 $N \cdot M$ 과 같다.

3.1.3 최악의 PBJ(worst case PBJ) 고려할 분석

최악의 PBJ일 경우는 그림 4에서 보듯이 재밍 대역비인 ρ 에 따라 재밍 psd가 다음과 같이 형성될 때를 말한다.

$$\eta_j = \frac{J}{\rho} \tag{31}$$

즉 재밍 전력은 일정하지만 ρ 값에 따라 재밍 psd가 변화하게 된다. 이와 같이 ρ 값에 따라 변하는 재밍 psd의 조합에 의해 형성된 재밍을 최악의 PBJ라고 한다[4][5].

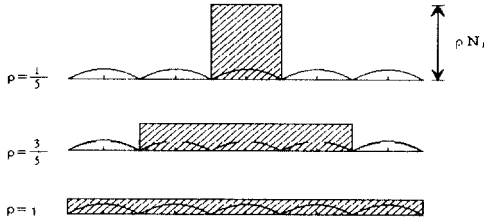


그림 4. 최악의 PBJ의 특성
Fig. 4 Property of partial band jammer.

이때 최악의 PBJ에 대한 신호대 잡음비는 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_w(jsr) = \sum_{j=1}^M \gamma_j^w(\rho) + \sum_{j=1}^M \beta_j^w \quad (32)$$

그러므로 β_j^w 는 식 (18)과 동일하고, $\gamma_j^w(\rho)$ 는 다음과 같다.

$$\gamma_j^w(\rho) = \left\{ \frac{K-1}{2N'} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \left(\frac{2E_b}{M \cdot \eta_0}\right)^{-1} + \left(1 - \alpha - \frac{\alpha}{\pi} \sin \frac{\pi}{\alpha}\right) \left(\frac{2\rho E_b}{M \cdot N_j}\right)^{-1} \right\}^{-1} \quad (33)$$

다중 반송파 시스템의 비트 오류식은 다음과 같다.

$$P_e(\rho) = \left[\frac{1}{2} (1 - \Phi(\sqrt{\Gamma_w(jsr)})) \right]^M \sum_{k=0}^{M-1} \binom{M-1+k}{k} \left[\frac{1}{2} (1 + \Phi(\sqrt{\Gamma_w(jsr)})) \right]^k \quad (34)$$

단일 반송파 시스템일 경우는 ρ 에 의한 대역 비의 조 건부 확률 식에 의해서 성능식이 표현된다.

$$P_w(e|\rho) = (1-\rho) Q(\sqrt{\lambda_s^w}) + \rho Q(\sqrt{\lambda_s^{w(iam)}}(\rho)) \quad (35)$$

λ_s^w 는 식 (29)의 λ_s 와 동일하고, $\lambda_s^{w(iam)}(\rho)$ 는 다음과 같다.

$$\lambda_s^{w(iam)}(\rho) = \left\{ \frac{K-1}{2N'} \left(1 - \frac{\alpha}{4}\right) + \left(\frac{2E_b}{\eta_0}\right)^{-1} + \left(1 - \alpha - \frac{\alpha}{\pi} \sin \frac{\pi}{\alpha}\right) \left(\frac{2\rho E_b}{N_j}\right)^{-1} \right\}^{-1} \quad (36)$$

여기서 N' 은 전체 처리이득($N \cdot M$)을 말한다.

3.2 다중경로 페이딩 채널

다중 경로 페이딩 채널에서 수신된 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^K \left\{ \sqrt{2E_c} \sum_{l=-\infty}^{\infty} d_k^{(l)} c_k^{(l)} h(t - nMT_c - \tau_k) \cdot \sum_{m=1}^M \alpha_{k,m} \cos(\omega_m t + \theta_{k,m}) \right\} + n_u(t) + n_j(t) \quad (37)$$

여기서 $\alpha_{k,m}$ 은 k 번째 사용자 신호의 m 번째 상관기에 대한 감쇠 요소인 레일리 랜덤 변수로 가정한다. 각 상관기에 출력된 신호는 다음과 같이 조합된다.

$$Z = \sum_{m=0}^M g_m Z_m \quad (38)$$

여기서 g_m 는 m 번째 브랜치의 이득이다. Z 의 신호대 잡음비를 최대화하기 위해 g_m 는 다음과 같이 놓는다.

$$g_m = \frac{E\{Z_m|\alpha_{1,m}\}}{\text{Var}\{Z_m|\alpha_{1,m}\}} \quad (39)$$

여기서 $\alpha_{1,m}$ 은 Z 의 평균과 분산을 정확하게 평가하기 위해 매우 천천히 변하는 감쇠 요소로 가정한다. 그러므로 신호대 잡음비 ρ_m 은 다음과 같이 표현한다.

$$\rho_m = \frac{E\{Z_m|\alpha_1\}}{\text{Var}\{Z_m|\alpha_1\}} = N^2 E_c \gamma \quad (40)$$

$$\gamma = \sum_{m=1}^M \frac{\alpha_{1,m}^2}{\text{Var}\{Z_m|\alpha_{1,m}\}} \equiv \sum_{m=0}^M q_m \quad (41)$$

($\alpha_{1,m}$, $m = 1, \dots, M$)는 iid인 레일리 랜덤 변수이기 때문에 q_m 는 다음과 같은 지수 분포를 갖는다.

$$f_q(q_m) = \sigma_m^2 \exp(-\sigma_m^2 q_m) \quad (42)$$

$$\sigma_m^2 = \text{Var}\{Z_m|\alpha_{1,m}\} \quad (43)$$

moment-generating 함수 γ 가

$$\Phi_\gamma(s) = \prod_{m=1}^M \frac{\sigma_m^2}{\sigma_m^2 - s} \quad (44)$$

로 주어지면 γ 의 pdf $f_\gamma(\gamma)$ 은 푸리에 역변환에 의해서 구해진다.

$$f_\gamma(\gamma) = \mathbf{F}^{-1}\{\Phi_\gamma(s)\} \quad (45)$$

최종적으로, 비트 오류식은 다음에 의해서 표현된다.

$$Pe = \int_0^\infty \phi(-\sqrt{N^2 E_c \gamma}) f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (46)$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt \quad (47)$$

VI. 분석 결과

본 논문에서 분석한 성능분석은 취 웨이브 셰이핑 필터의 roll-off factor α 가 0.5이고 전체 치리이득($N \cdot M$)이 30[dB]일 때를 기준으로 하여 분석한다.

그림 5, 6은 동시 사용자수가 60명이고 $E_b/N_o = 10$ [dB]일 때 전대역 재밍 간섭 즉, M개의 부대역내에 재밍이 모두 들어올 때($W_j = MBW_M$)에 대해 분석한 것이다. 그림 5는 Gaussian 채널에서, 그림 6은 다중경로 페이딩 채널 환경에서 다중 반송파 증가에 따른 성능 분석이다. 분석한 결과를 보면 반송파수 M이 증가할수록 성능이 향상되는 것을 볼 수 있다. M이 1인 경우는 단일 반송파 시스템에 해당되며 M이 증가할수록 각 브랜치의 치리이득은 줄어들지만 전체적으로 주파수 다이버시티 이득만큼 BER 성능이 개선됨을 볼 수 있다.

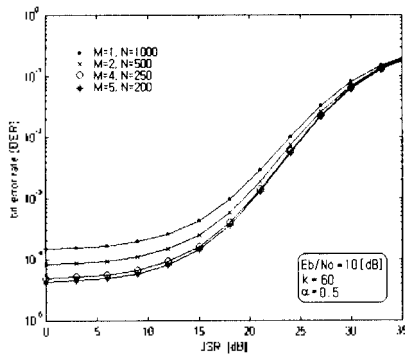


그림 5. Gaussian 채널 성능분석
Fig. 5 Performance over Gaussian channel.

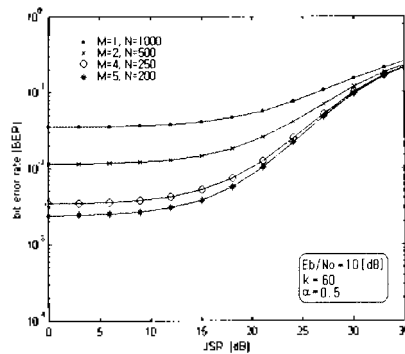


그림 6. 다중 경로 페이딩 채널 성능분석
Fig. 6 Performance over multipath fading channel.

그림 7~12의 분석은 다중 반송파수 M이 5일 때에 대해서 분석한 것이다.

그림 7은 전 대역 재밍 간섭 즉, 5개의 부대역내에 재밍이 모두 들어올 때($W_j = 5BW_M$)에 대해 분석한 것으

로 동시 사용자수는 60명이고, $E_b/N_o = 10$ [dB]이다. Gaussian 채널에서의 시스템 성능을 보면 JSR이 낮을 때 (10[dB] 미만 일 때)는 대체적으로 다중 반송파 시스템의 성능이 다소 우수하지만 JSR이 점점 커지면 단일 반송파 시스템과의 성능 차가 점점 좁혀지는 것을 볼 수 있다. 이렇게 볼 때 전 대역 재밍 환경에서 다중 반송파 시스템은 단일 반송파 시스템보다 다소 성능이 좋지만 효과적인 항 재밍 특성이 나타나지 않는다고 볼 수 있다. 페이딩 채널에서의 시스템 성능을 보면 다중 반송파 시스템이 JSR이 15[dB] 이하일 때 단일 반송파 시스템보다 재밍 간섭의 영향을 덜 받는다는 것을 볼 수 있다. 사실 DS 기법을 사용하는 시스템은 전 대역 재밍보다 PBJ가 성능을 더 악화시킨다[5]. 그러므로 항 재밍 특성을 효과적으로 분석하려면 PBJ 환경에 대해서 분석되어야 한다.

그림 8은 그림 3에서 $W_j = BW_M$ 인 PBJ 환경에 대해서 동시 사용자 수가 60명이고, $E_b/N_o = 10$ [dB]일 때 분석한 성능이다. Gaussian 채널에서 분석한 결과를 보면 다중 반송파 시스템은 JSR이 증가해도 BER이 심하게 증가하지 않는 반면 단일 반송파 시스템은 JSR이 15[dB] 이상에서 급격히 BER이 증가하는 것을 볼 수 있다. 페이딩 채널에서 다중 반송파 시스템 성능은 단일 반송파 시

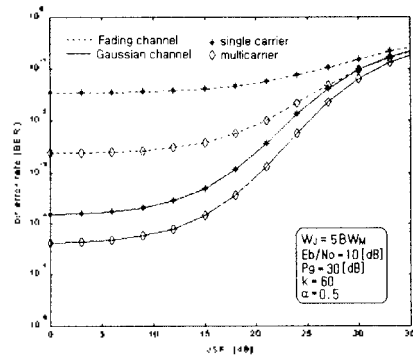


그림 7. 전 대역 재밍의 성능분석
Fig. 7 performance in full band jammer.

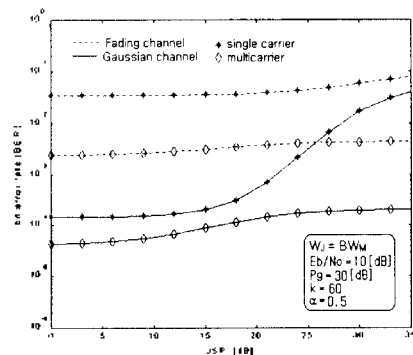


그림 8. PBJ의 성능분석($W_j = BW_M$)
Fig. 8 Performance in PBJ($W_j = BW_M$).

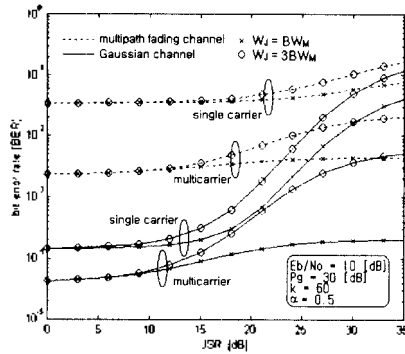


그림 9. PBI가 $W_j = BW_M, 3BW_M$ 일 때 성능분석
Fig. 9 Performance in PBI ($W_j = BW_M, 3BW_M$).

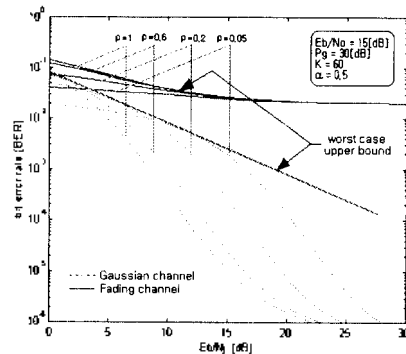


그림 11. 최악의 PBI 간섭에서 단일 반송파 시스템의 성능분석
Fig. 11 Performance of single carrier systems in worst case PBI.

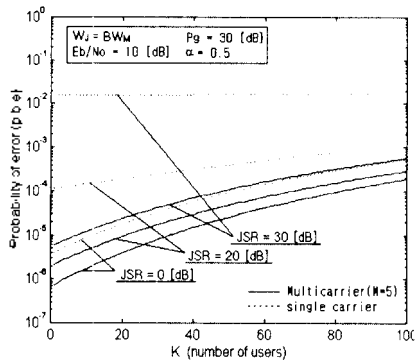


그림 10. 사용자에 따른 PBI 환경에서의 성능분석
Fig. 10 Performance for user of numbers in PBI.

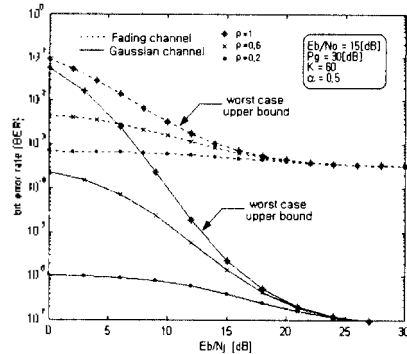


그림 12. 최악의 PBI 간섭에서 다중 반송파 시스템 성능분석
Fig. 12 Performance of multicarrier systems in worst case PBI.

템과 비교해 볼 때 페이딩 영향을 적게 받는 것을 볼 수 있다. 그러므로 다중 반송파 시스템은 페이딩에 강인하며 PBI 간섭에 우수한 항 재밍 특성이 있다는 것을 분석을 통하여 알 수 있다.

그림 9은 PBI 환경에서 $BW_M, 3BW_M$ 일 때 성능분석 결과이다.

그림 10은 $W_j = BW_M$ 일 경우 Gaussian 채널에서 다중 사용자에 따른 PBI 간섭에서 분석한 성능 결과이다. 그림에서 나타나듯이 PBI 환경에서 다중 반송파 시스템인 경우 사용자수 증가에 따른 JSR이 0[dB], 20[dB], 30[dB]로 증가함에 따라 BER이 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면, 단일 반송파 시스템은 JSR의 증가에 BER이 급격히 증가되는 것을 볼 수 있다. 그러므로 다중 반송파 시스템은 PBI 환경에서 JSR이 증가해도 단일 반송파 시스템보다 항 재밍 효과가 우수하므로 동시사용자 용량을 늘리는데 기여할 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 11, 12는 최악의 PBI 간섭에서 나타나는 성능분석으로 그림 4와 같이 ρ 값의 조합에 의해서 형성된 재밍 간섭에 대한 분석이다. 이때 동시 사용자수는 60명이고 $E_b/N_0 = 15[\text{dB}]$ 이며, ρ 에 따라 재밍의 스펙트럼 밀도는 변하지만 전체 재밍 평균전력은 동일하다는 가정 하

에서 성능 분석한 것이다.

그림 11은 단일 반송파 시스템의 성능분석이다. ρ 에 따른 재밍 환경에서 발생하는 성능곡선의 upper bound가 최악의 PBI에 대한 성능 분석이므로[5][6] Gaussian 채널에서는 ρ 의 변화에 대한 성능 곡선의 맨 위 부분에 해당되는 upper bound가 최악의 PBI 간섭에 대한 성능 분석으로 실선으로 표시했다. 페이딩 채널에서는 ρ 값에 따른 성능 곡선들이 E_b/N_0 가 증가할수록 $\rho=1$ 인 성능곡선에 접근되므로 $\rho=1$ 인 곡선이 upper bound가 되어 최악의 PBI 간섭의 성능 분석이 된다.

그림 12는 다중 반송파 시스템의 성능 분석으로 그림 4에서 ρ 값의 변화에 따라 나온 결과이다. 그림을 보면 Gaussian 채널과 페이딩 채널의 ρ 값에 따른 성능곡선들은 E_b/N_0 가 증가할수록 $\rho=1$ 인 곡선에 점점 접근하는 것을 볼 수 있다. 이런 경향에서 볼 때 그 보다 작은 ρ 값들도 $\rho=1$ 인 성능곡선을 초과하지 않는다는 것을 쉽게 유추할 수 있다. 그러므로 $\rho=1$ 일 때의 성능곡선이 upper bound가 되어 최악의 PBI 간섭에 대한 성능곡선이 된다.

결론적으로 그림 11과 그림 12의 upper bound 곡선을 비교해 보면 알 수 있듯이 최악의 PBI 간섭에서 다중 반

송과 시스템이 단일 반송파 시스템보다 페이딩에 강인하다는 것을 볼 수 있고 항 재밍 성능도 우수하다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 페이딩 요소를 고려하지 않는 채널 즉, Gaussian 채널에서 MUI, PBI 간섭 및 최악의 PBI 간섭을 고려하여 MC DS-CDMA 시스템 성능을 분석하고 단일 반송파 시스템인 기존의 DS-CDMA와 성능을 비교 분석하였다. 또한 Gaussian 채널에서 고려된 간섭들을 페이딩 환경에서 시스템 성능을 분석하여 Gaussian 채널 성능과 비교하였다.

분석한 결과를 보면, PBI 간섭에서 다중 반송파 시스템은 JSR이 증가해도 성능이 심하게 감소하지 않는 반면 단일 반송파 시스템은 JSR이 증가함에 따라 급격히 성능이 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 단일 반송파 시스템은 페이딩 영향에 매우 취약한 반면 다중 반송파 시스템은 페이딩 요소에 강인한 특성을 갖고 있다는 것을 분석을 통하여 알 수 있었다. 그러므로 다중 반송파 시스템은 PBI 환경에서 단일 반송파 시스템보다 항 재밍 효과가 우수하므로 동시사용자 용량을 늘리는데 기여할 수 있다는 것을 알 수 있다.

최악의 PBI 간섭 환경에서 분석된 upper bound 곡선을 비교해보면 알 수 있듯이 다중 반송파 시스템이 단일 반송파 시스템보다 강인한 페이딩 특성을 갖고 있고 항재밍 성능도 우수하다는 것을 분석을 통하여 알 수 있었다.

이와 같이 항 재밍 성능이 우수한 다중 반송파 MC DS-CDMA 시스템을 군 통신에 이용하면 상당히 효과적인 통신 방식이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. S. Hara and R. Prasad : "DS-CDMA, MC-CDMA and MT-CDMA for Mobile Multi-Media Communications," Proc. of IEEE VTC'96, Atlanta, US, Theory A, April 1996.
2. Khaled Fazal, Gerhard P. Fettweis. Multi-carrier Spread-Spectrum: Kluwer Academic Publishers, 1997.
3. S. Kondo and L. B. Milstein. "Performance of Multicarrier DS CDMA system," IEEE Trans. Commun., vol. 44, no. 2, Feb 1996.
4. M. K. Simon, J. K. Omura, R. A. Scholtz and B. K. Levitt. Spread Spectrum Communication. New York: McGraw-Hill, 1994.
5. R. E. Ziemer and D. J. Peterson. Digital Communication and Spread Spectrum System. New York: Macmillan.
6. J. Proakis, Digital Communication. New York: McGraw-Hill, 1995.
7. Feher. Kamilo. Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communication: Prentice Hall, 1997.
8. R.L. Pickholtz, D.L. Schilling, and L.B. Milstein, of spread spectrum communications-A tutorial," IEEE Trans. Commun., vol. COM-30, no. 5, May 1982.

9. A. Chouty, A. Brajal, and S. Jourdan, "Orthogonal multi-carrier technique applied to direct sequence spread spectrum CDMA systems," in Proc. of GLOBECOM '93, Houston, TX, Nov, 1993.
10. A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Process. New York: McGraw-Hill, 1991.

▲유 흥 균(Hcung-Gyoon Ryu)

1982년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사)
 1984년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학석사)
 1989년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학박사)
 1988년 2월 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학과 부교수
 ※ 주관심분야 : 디지털 통신공학, 이동/위성통신 시스템, 스펙트럼 확산통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리



▲김 영 준(Young-Jun Kim)

1997년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)
 1997년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학과(석사과정)
 ※ 주관심분야 : 디지털 통신공학, 이동/위성통신 시스템, 스펙트럼 확산통신 시스템, 통신 신호처리

▲고 재 덕(Jae-Duck Ko)

1997년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)
 1997년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전자공학과(석사과정)
 ※ 주관심분야 : 디지털 이동/위성통신 시스템, 디지털 통신회로 설계