

부반송파간 상관 관계가 존재하는 페이딩 채널에서 주파수 천이를 고려한 MC-CDMA 시스템의 성능분석

정회원 김태영*, 고균병*, 이영조**, 강창언*, 홍대식*

Performance Analysis of an MC-CDMA System with Frequency Offset in Correlated Multipath Fading Channel

Tae-young Kim*, Kyun-byoung Ko*, Yong-jo Lee**, Chang-eon Kang*, Dae-sik Hong*

Regular Members

요약

본 논문에서는 부채널간 상관 관계가 존재하는 다경로 페이딩 채널에서 주파수 천이를 갖는 MC-CDMA(Multi-Carrier Code Division Multiple Access) 시스템의 성능을 수식적으로 분석한다. MC-CDMA 시스템의 성능 저하를 야기하는 주파수 천이와 부반송파간의 상관 관계로 인하여 발생하는 간섭 신호 성분들을 수식적으로 전개하고 각각의 분산들을 유도한다. 각 간섭 신호들의 분산과 확률 밀도 함수를 이용하여 주파수 천이와 부반송파간 상관 관계를 고려한 평균 비트 오류 확률식을 유도한다. 분석 결과를 통해서 주파수 천이 정도와 부반송파 사이의 상관 관계 정도가 증가함에 따라서 MC-CDMA 시스템의 성능 저하가 심각하게 발생된다. 또한 수용할 수 있는 사용자 수도 현저하게 줄어든다.

ABSTRACT

The performance of an MC-CDMA(Multi-Carrier Code Division Multiple Access) system with carrier frequency offset in correlated multipath fading is mathematically analyzed. Conditional bit error rate is obtained from each deviation of the interference terms for uplink Rayleigh fading channel. To obtain the average bit error rate of the MC-CDMA system, the probability density function is derived. Derived average bit error rate shows that the performance of the MC-CDMA system is sensitive to the carrier frequency offset and the amount of correlation among subcarriers. Namely, the performance of the MC-CDMA system is severely degraded as the correlation between subcarriers and carrier frequency offset are increased. The capacity of the MC-CDMA system is also reduced.

1. 서론

다중 반송파 변조 기법(Multi-Carrier Modulation scheme)은 이동 통신에서 성능 저하의 주요 원인인 주파수 선택적인 페이딩(frequency selective fading) 채널에 강한 특성을 갖는다^[1]. 즉, 다중 반송파 변조 기법은 같은 정보 신호를 여러 개의 협대역 신호들을 통해서 전송하므로 주파수 다이버시티(frequency

diversity)를 이용하는 전송 기법이다. 이와 같은 주파수 다이버시티로 인하여 주파수 선택적인 채널에 대해 강한 특성을 갖게 되며, 주파수 대역을 사용하는데 있어서 효율적이다^[2].

하지만, 다중 반송파 변조 기법은 주파수 천이(frequency offset)로 인하여 심각한 성능 저하가 발생한다. 또한, 부반송파(subcarrier) 사이의 독립성이 보장되지 않는다면 이로 인해 다중 반송파 변조 기

* 연세대학교 전기 전자공학부 (Daesikh@catseye.yonsei.ac.kr)

** (주)LG전자

논문번호 : 00435-1109 접수일자 : 2000년 11월 9일

※ 이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업 핵심분야에 의하여 지원되었으며, (주)LG전자의 부분적인 연구 지원 하에 이루어 졌습니다.

법의 성능 저하가 현저하게 발생된다. 실질적인 채널 환경은 부반송파 사이의 독립성을 보장할 수 없기 때문에 이러한 특성은 다중 반송파 변조 기법의 심각한 성능 저하를 야기한다^{3)[4][5]}.

지금까지 다중 변조 기법에 대한 성능 분석이 다양하게 이루어져 왔다. 참고 문헌⁴⁾는 부반송파간 독립적인 관계를 가진다는 가정하에서 주파수 천이로 인한 MC-CDMA 시스템의 성능을 분석하였다. 반면, 참고 문헌⁵⁾은 부반송파 사이에 상관 관계로 인한 MC-CDMA 시스템의 성능을 경로수의 변화에 따라서 분석하였다. 이와 달리, 참고 문헌⁶⁾은 MC/DS-CDMA 시스템에서 부반송파 사이에 비독립적인 관계를 가질 경우에 대한 성능 분석을 수행하였다.

하지만, 부반송파 사이에 상관 관계가 존재하는 채널 환경에서 주파수 천이로 인한 성능 저하에 대한 분석은 아직 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 주파수 천이와 부반송파간의 상관 정도에 따른 MC-CDMA 시스템의 성능을 수식적으로 분석하며 두 가지 성능 저하 요인으로 인해 발생하는 간섭 신호 성분들을 수식적으로 전개하여 각 간섭 신호 성분들의 통계적 특성을 유도한다. 앞에서 유도한 식들과 확률 밀도 함수를 이용하여 주파수 천이와 상관 관계가 있을 때의 평균 비트 오류 확률을 유도한다. 유도된 평균 비트 오류 확률식을 통해서 MC-CDMA 시스템의 성능을 비교 분석하고자 한다. 통계적 분석에서는 채널을 역방향 레일리(Rayleigh) 페이딩 채널로 가정하며 결합기법으로서 는 최대 이득 결합 기법(Maximum Ratio Combining : MRC)을 사용한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 MC-CDMA 시스템과 채널에 대해서 알아보고 부채널 계수들 사이의 상관 관계를 살펴본다. 3장에서는 주파수 천이로 인한 MC-CDMA 시스템의 간섭 신호 성분들의 통계적 특성과 조건부 신호 대 잡음비를 알아보고 부반송파 사이의 상관 관계를 고려한 확률 밀도 함수를 구해서 평균 비트 오류 확률을 유도한다. 4장에서는 유도된 평균 비트 오류 확률식을 이용하여 MC-CDMA 시스템의 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. MC-CDMA 시스템 및 채널 모델

MC-CDMA 시스템은 확산 코드에 따라서 부호화된 하나의 정보 신호를 여러 개의 부반송파로 전송하는 변조 방법이다²⁾. 부반송파 간의 직교성을

유지하기 위해서는 부반송파 간의 주파수 간격이 $1/T$ 의 정수배가 되어야 한다. 여기서 T 는 정보 신호의 지속 시간을 의미한다. 확산 부호로는 부호 간의 직교성이 유지되는 Walsh Hadamard 부호를 각각의 사용자에게 할당하여 사용한다⁷⁾.

MC-CDMA 시스템을 통해 송신되는 신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} a_m[k]c_m[i]p(t-kT)e^{j\frac{2\pi}{T}t} \quad (1)$$

여기서, $a_m[k]$ 와 $c_m[i]$ 는 각각 m 번째 사용자의 k 번째 정보 신호와 할당된 Walsh Hadamard 코드의 i 번째 칩을 의미한다. 또한, N 은 부반송파의 개수이며 M 은 사용자 수를 나타낸다. i 번째 부반송파의 기저 대역의 주파수는 i/T 로 구분되며 $p(t)$ 는 $[0, T)$ 내에서 구형파를 나타낸다.

MC-CDMA 시스템의 신호는 전체 주파수 대역에서 부반송파간에 비독립적이며 주파수 선택적인 느린 레일리 채널을 통과한다. 하지만, 각각의 부반송파로 전송되는 협대역 신호는 주파수 비선택적인 레일리 채널을 통과하게 된다²⁾. 따라서 각 부채널의 진폭과 위상은 한 심볼 주기동안 일정하다. 결국, m 번째 사용자에 대한 i 번째 부반송파의 채널 계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$h_{mi} = \rho_m e^{j\theta_m} \quad (2)$$

여기서, ρ_m 와 θ_m 는 각각 동일한 분포를 갖는 레일리 랜덤 변수이며 구간 $[0, 2\pi]$ 에서 균일한 분포를 갖는 랜덤 변수이다. h_{mi} 는 주파수 축에서의 복소수 가우시안 채널 계수를 나타내고 있다.

부채널간의 상관 관계는 부반송파간 주파수 차이와 채널의 시간적 퍼짐의 평균에 따라 표현될 수 있다. 즉, i 번째 부반송파와 k 번째 부반송파간의 상관 관계는 다음과 같다⁸⁾.

$$E[h_{mi}h_{mi}^*] = \frac{2\sigma_L^2}{1 - j(k-i)\Delta f T_m} \quad (3)$$

여기서는 $(i-k)\Delta f$ 는 i 번째 부반송파와 k 번째 부반송파 사이의 주파수 간격을 의미하며 m 번째 사용자에게 대한 채널 계수를 고려한 것이다. 이때, Δf 와 T_m 는 각각 인접하는 부반송파 사이의 주파수 이격과 채널의 시간적 퍼짐의 평균을 나타낸다. 또한, σ_L^2 은 주파수 축에서의 복소수 가우시안 채널 계수의 분산이다. 정규화된 채널을 가정하기 위해서

$2\sigma_{\epsilon}^2=1$ 로 가정한다. 또한, 시간적 퍼짐의 밀도 함수가 지수적으로 감소하며 도플러 주파수가 0이라고 가정한다.

III. 주파수 천이와 부반송파간 상관 관계가 존재할 때의 성능 분석

1. 조건부 신호 대 잡음 비

MC-CDMA 시스템의 수신 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{mi} a_m[k] c_m[i] p(t-kT) e^{j(2\pi f_i t + \theta_{mi})} + n(t) \quad (4)$$

여기서 ρ_{mi} 와 θ_{mi} 는 m 번째 사용자의 i 번째 부채널 계수의 크기와 위상을 나타내며 $n(t)$ 는 단측 전력 밀도 스펙트럼이 N_0 인 가산성 백색 가우시안 잡음이다. 수신 신호 식(4)은 MRC 결합 기법을 사용하는 MC-CDMA 시스템의 수신기를 통과하여 결정 변수를 얻게 된다. 단, 원하는 사용자는 0번째 사용자라고 가정한다.

$$\begin{aligned} \nu_0 = & \frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{mi} \rho_{0i} a_m[k] c_m[i] \\ & c_0[i] \cos \tilde{\theta} + \frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} \sum_{s=0}^{M-1} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{mi} \rho_{0s} a_m[k] c_m[i] c_0[s] \cos \tilde{\theta} \frac{\epsilon}{\epsilon + s - i} + \eta \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\epsilon(-0.5 < \epsilon < 0.5)$ 는 주파수 천이를 나타내며 한 심볼 내에서는 일정한 값을 갖는다고 가정한다. η 는 가산성 백색 가우시안 잡음인 $n(t)$ 가 MC-CDMA 시스템의 수신기를 거친 뒤의 성분을 나타내며 $\tilde{\theta} = \theta_{mi} - \theta_{0s} - 2\pi k \epsilon + \pi \epsilon$ 이다. 식(5)은 5개의 항으로 분리될 수 있다. 원하는 사용자의 신호(D), 두개의 간섭 신호들(Inter-Chip Interference : ICI), 다중 사용자 간섭 신호(Multiple Access Interference : MAI), 잡음 신호(η)로 나뉘어 진다.

식(5)에서 0번째 사용자 신호와 주파수 천이로 인해 원하는 사용자 신호의 다른 반송파로 인한 간섭 신호(ICI₁)를 유도하면 다음과 같다.

$$D : \frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} a_0[k] \cos(2\pi k \epsilon + \pi \epsilon) \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0i}^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} ICI_1 : & \frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0i} \rho_{0s} a_0[k] c_0[i] \\ & \cdot c_0[s] \cos \tilde{\theta} \frac{\epsilon}{\epsilon + s - i} \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)의 간섭 신호 성분은 자기 신호, 즉 0번째 사용자의 인접 반송파로 인한 간섭 성분을 의미한다. 하지만, 자기 신호가 아닌 신호에 의해 받는 간섭 신호들이 있다. 이러한 간섭 신호들은 근접 반송파에 의해 받는 간섭 성분과 같은 반송파로 인한 간섭 성분으로 분류할 수 있으며 각각 ICI₂와 MAI로 정의한다

다중 사용자 간섭 신호, MAI와 ICI₂는 식(5)로부터 유도하면 다음과 같다.

$$MAI : \frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{mi} \rho_{0i} a_m[k] \cdot c_m[i] c_0[i] \cos \tilde{\theta} \quad (8)$$

$$ICI_2 : \frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} \sum_{s=0}^{M-1} \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{mi} \rho_{0s} a_m[k] \cdot c_m[i] c_0[s] \cos \tilde{\theta} \frac{\epsilon}{\epsilon + s - i} \quad (9)$$

식(5)로부터 얻어진 간섭 신호 성분들(MAI, ICI₁, ICI₂)은 Central Limit Theorem에 의하여 근사적으로 가우시안 분포를 갖는다고 가정한다. 이와 같은 가정을 할 수 있는 이유는 각 간섭 성분들의 식들, 식(7), 식(8), 식(9)에는 모두 레일리 분포의 동위상 성분을 포함하고 있기 때문이다^[9]. 그러므로, 식(5)은 근사적으로 가우시안 분포를 갖는 간섭 신호들과 상수, 원하는 사용자의 신호의 합으로 구성된 식이 되며 가우시안 분포를 갖는 신호가 된다.

조건부 비트 오류 확률을 구하기 위하여 0번째 사용자의 채널 계수들의 집합 $\rho_{0i}, (i=1, \dots, N-1)$ 이 조건으로 주어졌다고 가정한다. 각 간섭 신호들은 위상이 포함된 식들이므로 서로 독립적인 관계를 갖고 있다. 따라서, MC-CDMA 시스템의 결정 변수, ν_0 에서 전체 간섭 신호의 분산, σ_{int}^2 은 각각 간섭 신호, MAI, ICI₁, ICI₂ 분산들의 합으로 표현될 수 있다. 간섭 신호들의 평균값은 모두 0이며 잡음 성분인 η 도 평균이 0인 가우시안 랜덤 변수이다.

위와 같은 가정하에서 다중 사용자 간섭 신호, MAI의 분산 σ_{MAI}^2 은 다음과 같다^[10].

$$\sigma_{MAI}^2 = \left(\frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} \right)^2 \frac{2(M-1)}{N} \bar{p}_0 \bar{p}_m \quad (10)$$

여기서 \bar{p}_m 는 m 번째 사용자의 전체 평균 전력을 의미하며 $\bar{p}_m = N \bar{p}_{mi}$ 로 정의한다. 이때, 부채널 사이의 관계는 비독립적이지만 동일한 분포를 갖는다고 가정한다. \bar{p}_{mi} 는 m 번째 사용자의 i 번째 부반송

과 신호의 평균 전력을 의미한다^[2].

간섭 신호 성분 ICI_1 의 분산, $\sigma_{ICI_1}^2$ 와 ICI_2 의 분산, $\sigma_{ICI_2}^2$ 을 유도하도록 한다.

$$\sigma_{ICI_1}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} \right)^2 \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{i \neq s}^{N-1} E[\rho_{0i}^2 \rho_{0s}^2] \cdot \left\{ \frac{\epsilon^2 \cos(4\pi k \epsilon + 2\pi \epsilon)}{\epsilon^2 - (s-i)^2} + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + s - i} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

$$\sigma_{ICI_2}^2 = \left(\frac{\sin \pi \epsilon}{\pi \epsilon} \right)^2 \frac{2(M-1)}{N^2} \cdot \bar{p}_0 \bar{p}_m \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{i \neq s}^{N-1} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon + s - i} \right)^2 \quad (12)$$

여기서, 식(11)내의 $E[\rho_{0i}^2 \rho_{0s}^2]$ 은 부채널 계수간의 상관 관계로 인해 생긴 것이다. 즉, 부반송파간 비 독립적이므로 이와 같은 항을 포함한다. 이 부분을 계산하기 위해서 상관 관계가 있는 채널을 모델링 한 방법을 이용하여 다음과 같이 유도된다^[4,6].

$$E[\rho_{0i}^2 \rho_{0s}^2] = 4\sigma_L^4 \left\{ 1 + \frac{1}{1 + [(i-s)\Delta f T_m]^2} \right\} \quad (13)$$

이 식은 0번째 사용자의 i 번째 부채널 계수와 s 번째 부채널 계수와의 상관 관계가 존재할 경우이다.

마지막으로 MC-CDMA 시스템의 수신단을 통과 한 가산성 백색 잡음 $n(t)$ 의 성분, η 의 분산은 $\sigma_\eta^2 = 2N_0 \bar{p}_0 / T$ 이다. 따라서 결정 변수, ν_0 의 신호 대 잡음 비(Γ)는 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{D^2}{\sigma_{int}^2 + \sigma_\eta^2} \cong \frac{\left(\frac{\sin 2\pi \epsilon}{2\pi \epsilon} \right)^2 \left(\sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0i}^2 \right)^2}{\sigma_{int}^2 + \sigma_\eta^2} = \frac{4 \left(\frac{\sin 2\pi \epsilon}{2\pi \epsilon} \right)^2 \gamma^2}{\sigma_{int}^2 + \sigma_\eta^2} \quad (14)$$

이때, $\gamma = \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0i}^2 / 2$ 로 정의한다. 식(14)에서 가정한 것은 0번째 부채널 계수를 알고 있다는 것이다. 즉, γ 를 알고 있다는 가정과 동일한 것이다. 따라서 평균적인 비트 오류 확률을 구하기 위해서 γ 에 대한 확률 분포 함수를 구해야 한다^[9].

식(14)을 이용하여 조건부 비트 오류 확률을 구하면 다음과 같다.

$$p(e|\gamma) = Q(\sqrt{\Gamma}) \quad (15)$$

여기서 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 로 정의된다.

2. 평균 비트 오류 확률

평균 비트 오류 확률을 구하기 위해서는 조건부 비트 오류 확률값, $p(e|\gamma)$ 와 γ 의 확률 밀도 함수, $f_\gamma(\gamma)$ 를 이용하여 구할 수 있다. 조건부 비트 오류 확률값은 앞 절에서 유도하였으며 확률 밀도 함수 역시 부반송파 사이의 통계학적 관계를 이용하여 유도될 수 있다^{[8][9][11]}.

$$p(e) = \int_0^\infty p(e|\gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (16)$$

여기서 $p(e)$ 는 평균 비트 오류 확률을 나타내며 γ 의 확률 밀도 함수는 다음과 같이 유도된다.

$$f_\gamma(\gamma) = \begin{cases} \frac{\gamma^{N-1}}{(N-1)! \lambda^N} e^{-\frac{\gamma}{\lambda}}, & \lambda_i = \lambda \\ \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i^{N-2}}{\prod_{j=1, j \neq i}^N (\lambda_i - \lambda_j)} e^{-\frac{\gamma}{\lambda_i}}, & \lambda_i \neq \lambda \end{cases} \quad (17)$$

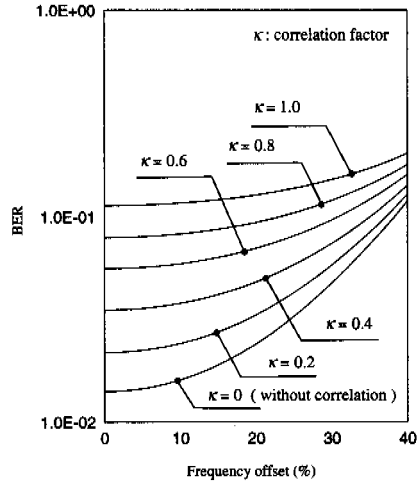


그림 1. 부채널간의 상관 관계 정도, κ 가 변할 때 주파수 편이의 변화에 따른 비트 오류 확률 곡선 (SNR=10dB, MRC, N=64, M=16)

여기서, λ_i 는 $\lambda_i/2$ 를 나타내며 λ_i 는 행렬 \mathbf{R}_h 의 i 번째 고유치이다. 또한, 행렬 \mathbf{R}_h 는 부채널 계수의 상관 행렬을 나타낸다. 식(17)에서 λ_i 가 동일할 때는 부반송파 사이의 상관 관계가 없을 때, 즉 독립적인 부반송파일 때이며 λ_i 가 서로 다를 때는 부반송파간에 상관 관계가 존재할 때를 의미한다.

이와 같은 식(15), 식(17)을 이용하여 평균 비트

오류 확률을 유도할 수 있다. 유도된 결과식을 이용하여 MC-CDMA 시스템에서 부채널 사이의 상관 관계가 있을 때, 동시에 주파수 천이가 발생되었을 때의 평균 비트 오류 확률을 계산할 수 있으며 식 (16)을 이용하여 부채널간의 상관 관계와 주파수 천이로 인한 MC-CDMA 시스템의 성능을 비교 분석할 수 있다.

IV. 수식적인 결과와 성능 비교 분석

MC-CDMA 시스템의 수식적인 분석 결과는 식 (15), 식(16), 식(17)을 이용하여 얻어진다. 이와 같은 수식 결과를 이용하여 주파수 천이와 부반송파간의 상관 관계에 따른 성능을 비교한다. 우선, 부채널 사이의 상관 관계 정도를 정량화하기 위해서 상관 관계 정도를 나타내는 $\kappa = \log_N(\Delta f T_m)^{-1}$ 를 정의한다. 따라서, 부채널간 상관 관계 정도는 κ ($0 \leq \kappa \leq 1$)를 통해서 나타내며 κ 가 1에 가까워질수록 상관관계의 증가를 의미한다. 기존의 성능 분석에서는 $\kappa=0$ 일 경우, 부반송파간 독립적인 경우만 고려하였지만 본 논문에서는 κ 가 0이 아닐 경우일 때 도 분석한다. 주파수 천이 정도는 최소 주파수 이격 $1/T$ 의 비로써 나타낸다. 즉, 20%의 주파수 천이라면 $0.2/T$ 만큼의 주파수 차이를 의미한다.

그림1에서는 부채널 사이의 상관 관계 정도가 변할 때 주파수 천이에 따른 MC-CDMA 시스템의 비트 오류 확률을 구한 것이다. 고려되는 부반송파수와 사용자수는 64개, 16명이며 SNR은 10dB일 때이다. 주파수 천이의 정도가 커질수록 MC-CDMA 시스템의 비트 오류 확률은 커지게 된다. 이와 더불어 부반송파 사이의 상관 관계 정도가 증가할수록, 즉 κ 가 1에 가까워질수록 성능이 떨어짐을 그림1을 통해서 알 수 있다.

그림2는 주파수 천이 정도가 다를 때 부반송파 사이의 상관 관계의 변화에 따른 MC-CMDA 시스템의 비트 오류 확률을 나타내고 있다. 부반송파수가 64개, 사용자 16이며 SNR이 10dB일 때의 비트 오류 확률을 보여준다. 부반송파 사이의 상관 관계 정도, κ 가 1에 가까워질수록 시스템의 비트 오류 확률은 커진다. 이 같은 현상은 주파수 천이가 존재할 때도 나타난다. 이때 주파수 천이가 0~10% 이내일 때는 성능에 큰 차이가 없다. 하지만 그 이상의 주파수 천이가 존재할 때는 심각한 성능 저하가 발생한다. 지금까지 살펴본 그림들을 통해서 주

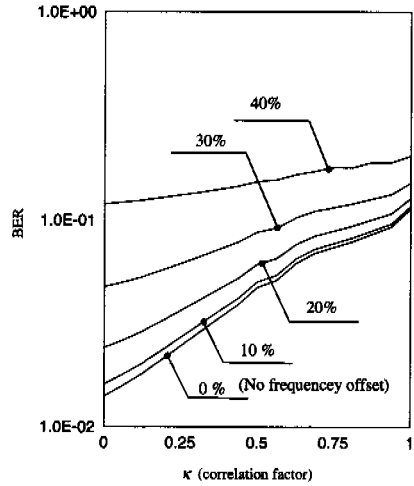
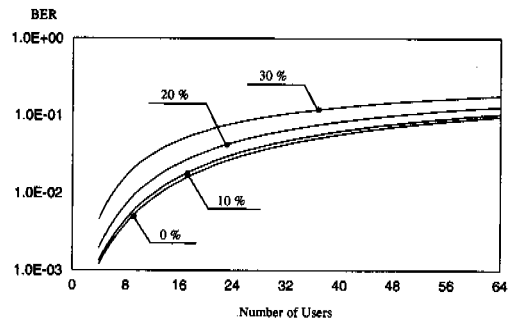


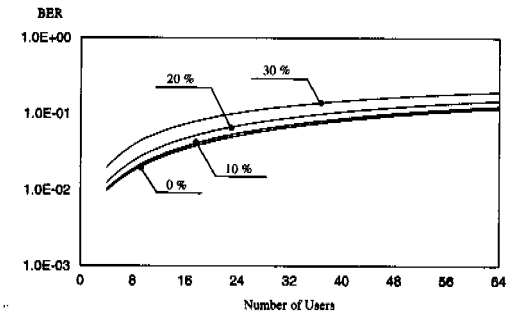
그림 2. 주파수 천이가 변할 때 부반송파간의 상관 관계 정도에 따른 비트 오류 확률 곡선 (SNR=10dB, MRC, N=64, M=16)

파수 천이와 부반송파 사이의 상관 관계의 존재는 MC-CDMA 시스템의 성능 저하를 발생시킴을 확인하였다.

그림3은 주파수 천이 정도가 변할 때 사용자 수



(a) $\kappa = 0$ (without correlation)



(b) $\kappa = 0.4$ (with correlation)

그림 3. 부채널간 상관 관계 정도가 다를 때 사용자 수에 따른 비트 오류 확률 곡선 (N=64, SNR=10dB)

에 따른 비트 오류 확률을 나타낸다. 그림3(a)과 그림3(b)는 각각 $\kappa=0$ 일 때와 $\kappa=0.4$ 일 때의 비트 오류 확률을 나타낸다. 이때 부반송파 수는 64개, SNR은 10dB일 때이다. 부반송파 사이의 상관 관계 정도, κ 가 증가하면 MC-CDMA 시스템이 수용할 수 있는 능력은 줄어들게 된다. 예를 들어, 비트 오류 확률이 10^{-2} 일 때 $\kappa=0$ 인 채널 환경에서 수용할 수 있는 사용자 수는 약 14명인데 비해 $\kappa=0.4$ 인 경우는 약 5명 정도를 수용할 수 있다. 또한 주파수 천이로 인하여 시스템이 수용할 수 있는 사용자 수는 줄어든다. 예를 들어 부반송파 사이의 상관 관계가 없는 경우, 즉 $\kappa=0$ 일 때 주파수 천이가 없는 MC-CDMA 시스템은 약 14명의 사용자를 수용할 수 있다. 하지만 주파수 천이가 30%일 때는 수용할 수 있는 사용자 수는 약 4명이다.

V. 결론

본 논문에서는 부반송파 사이에 상관 관계가 존재하는 채널 환경에서 주파수 천이로 인하여 발생되는 MC-CDMA 시스템의 성능 저하를 정량적으로 분석하였다. MC-CDMA 시스템의 성능은 평균 비트 오류 확률을 통해서 비교 분석한다. 따라서 주파수 천이와 부반송파간의 상관 관계를 고려한 조건부 비트 오류 확률과 γ 의 확률 밀도 함수를 이용하여 평균 비트 오류 확률을 유도하였다. 분석 결과를 통해 MC-CDMA 시스템에서 주파수 천이와 부반송파간의 상관 관계는 시스템의 성능 저하를 발생시키는 주요 원인이다. 즉, 주파수 천이가 약 30 ~ 40% 정도일 경우 MC-CDMA 시스템이 수용할 수 있는 사용자 수는 주파수 천이가 없을 때에 비해 50% 이상으로 줄어들었으며 부반송파간의 상관 관계 정도를 의미하는 κ 가 0.4까지 증가하면 부반송파간 독립적인 관계를 가지는 MC-CDMA 시스템의 성능에 비해 대략 60% 정도 시스템 수용 능력이 줄었다.

부 록

ICI₁성분의 분산에서 서로 다른 부채널 계수들간의 이차 상관 함수

식(11)은 ICI₁ 성분의 분산을 보여주고 있다. 이 식에는 $E[\rho_{0i}^2 \rho_{0j}^2]$ 항이 있는데 이것을 구하기 위해서는 우선 확률 밀도 함수, $p(\rho_{0i}, \rho_{0j})$ 를 알아야 한다. 여기서 확률 밀도 함수는 i 번째와 j 번째 부채널 계

수들의 곱에 해당하는 것이다. 이와 같은 일반적인 경우를 고려하기 전에 서로 인접한 부채널의 계수를 고려한다. 따라서 첫 번째 부채널 계수, ρ_{01} 와 인접한 두 번째 부채널 계수, ρ_{02} 를 r_1, r_2 로 치환한다.

$p(r_1 r_2)$ 은 r_1 과 r_2 가 레일리 분포를 갖는 랜덤 변수이므로 각각의 계수의 실수부와 허수부가 서로 결합 가우시안 분포(jointly Gaussian distribution)를 갖는다. 따라서, 이 같은 성질을 이용하여 구할 수 있다^{[8][12]}.

$$p(r_1 r_2) = \frac{r_1 r_2}{\sigma_L^4 (1-\rho^2)^2} e^{-\frac{r_1^2 + r_2^2}{2\sigma_L^2 (1-\rho^2)}} \cdot I_0\left(\frac{r_1 r_2 \rho}{\sigma_L^2 (1-\rho^2)}\right) \tag{A-1}$$

이때 $I_0(x)$ 는 0차 베셀 함수(Bessel function)이며 $2\sigma_L^2$ 은 주파수 축에서 부채널 계수의 분산을 나타낸다. 그리고 ρ^2 은 다음과 같이 정의된다.

$$\rho^2 = \frac{1}{1 + (\Delta f T_m)^2} \tag{A-2}$$

여기서 Δf 는 부채널 사이의 주파수 차이를 의미하며 T_m 은 평균 시간적 퍼짐을 나타낸다.

식(A-1)을 사용하여 $E[r_1^2 r_2^2]$ 을 구하면 아래와 같다^{[9][13]}.

$$\begin{aligned} E[r_1^2 r_2^2] &= \int_0^\infty \int_0^\infty r_1^2 r_2^2 p(r_1 r_2) dr_1 dr_2 \\ &= \int_0^\infty \frac{r_2^2}{\sigma_L^2 (1-\rho^2)^2} e^{-\frac{r_2^2}{2\sigma_L^2 (1-\rho^2)}} dr_2 \\ &\quad \cdot \int_0^\infty r_1^2 e^{-\frac{r_1^2}{2\sigma_L^2 (1-\rho^2)}} I_0\left(\frac{r_2 \rho}{\sigma_L^2 (1-\rho^2)} r_1\right) dr_1 \\ &= 2(1-\rho^2) \int_0^\infty r_2^2 e^{-\frac{r_2^2}{2\sigma_L^2 (1-\rho^2)}} \\ &\quad \cdot {}_1F_1\left(2; 1; -\frac{r_2^2 \rho}{2\sigma_L^2 (1-\rho^2)}\right) dr_2 \end{aligned} \tag{A-3}$$

여기서 ${}_1F_1$ 은 degenerate hypergeometric 함수이며 위에서의 적분식은 수학 공식을 이용하여 전개할 수 있다^[13].

식(A-3)의 결과식에서 r_2 를 t 로 치환하고 수학 공식을 참조하여서 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E[r_1^2 r_2^2] &= (1-\rho^2) \int_0^\infty t e^{-\frac{t}{2\sigma_L^2 (1-\rho^2)}} \\ &\quad \cdot {}_1F_1\left(2; 1; -\frac{\rho}{2\sigma_L^2 (1-\rho^2)} t\right) dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 4\sigma_L^4(1-\rho^2)^3 F(2, 2; 1; \rho^2) \\
 &= 4\sigma_L^4 F(-1, -1; 1; \rho^2) \\
 &= 4\sigma_L^4(1+\rho^2)
 \end{aligned}
 \tag{A-4}$$

여기서 $F(a, b; c, z)$ 는 hypergeometric 함수를 나타낸다. 위에서의 식들을 이용하여 식(A-4)을 최종적으로 쓰면 다음과 같이 정리된다.

$$E[\rho_{01}^2 \rho_{02}^2] = 4\sigma_L^4 \left\{ 1 + \frac{1}{1 + (\Delta f T_m)^2} \right\} \tag{A-5}$$

식(A-5)을 통해서 일반적인 경우, 즉 i 번째와 j 번째 부채널 계수들의 이차 상관 함수를 고려하면 다음과 같다.

$$E[\rho_{0i}^2 \rho_{0j}^2] = 4\sigma_L^4 \left\{ 1 + \frac{1}{1 + [(i-j)\Delta f T_m]^2} \right\} \tag{A-6}$$

여기서 i 번째와 j 번째 부채널 사이의 주파수 차이는 $(i-k)\Delta f$ 로 표현된다.

참 고 문 헌

- [1] Michael Schell and Stefan Kaiser, "Diversity Considerations for MC-CDMA Systems in Mobile Communications", *Proc. ISSSTA '96*, pp. 131-135, 1996.
- [2] N. Yee, J. Linnartz and G. Fettweis, "Multi-carrier CDMA in Indoor Wireless Radio Networks", *Proc. PIMRC '93*, pp. 109-113, 1993.
- [3] T. Pollet, "BER Sensitivity of OFDM Systems to Carrier Frequency Offset and Wiener Phase Noise", *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 43, no. 2/3/4, pp. 191-193, Feb./Mar./Apr., 1995.
- [4] Yousun Kim, Keukjoon Bang, Sooyong Choi, Chulwoo You, Daesik Hong, "Effect of Carrier Frequency Offset on Performance of MC-CDMA Systems", *Electronics letters*, vol. 35, no. 5, pp. 378-379, 1999.
- [5] Joonhyun Park, Joceung Kim, Sooyong Choi, Namsin Cho, Daesik Hong, "Performance of MC-CDMA Systems in Non-independent Rayleigh Fading", *IEEE ICC '99*, pp. 506-510, 1999.
- [6] W. Xu, L. B. Milstein, "Performance of Multi-carrier DS CDMA Systems in the Presence of Correlated Fading", *Vehicular Technology Conference*, 1997.
- [7] J. Proakis, *Digital Communications*. New York : McGraw-Hill, 1989.
- [8] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*. London, Tokyo: CRC, 1993.
- [9] A. Papulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, McGraw-Hill, 1991.
- [10] 고균병, "다단계 간섭 제거 기법과 RBF를 적용한 MC-CDMA 시스템에서의 다중 사용자 겹파 기법에 관한 연구", *연세대학교 석사 학위 논문*, 1999년 8월.
- [11] J. N. Pierce and S. Stein, "Multiple Diversity with Non-independent Fading", *Proc. IRE*, vol. 48, pp.89-104, Jan., 1960.
- [12] William C. Jakes, *Microwave Mobile Communication*. John Wiley & Sons, 1974.
- [13] G. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*. ACADEMIC, 1980.
- 김 태 영(Tae-young Kim) 정회원
1998년 2월 : 연세대학교 전자공학 공학사
2000년 2월 : 연세대학교 전기 컴퓨터공학과 석사
2000년 3월~현재 : 연세대학교 전기 전자공학과 박사과정
<주관심 분야> 통신공학, 신호 처리, 이동통신
- 고 균 병(Kyun-byoung Ko) 정회원
1997년 2월 : 연세대학교 전자공학 공학사
1999년 8월 : 연세대학교 전기 컴퓨터공학과 석사
1999년 9월~현재 : 연세대학교 전기 전자공학과 박사과정
<주관심 분야> 신호처리, 이동통신, 통신공학
- 이 영 조(Yong-jo Lee)
한국통신학회 논문지 제24권, 제1A호 참조
- 강 참 언(Chane-eon Kang) 종신회원
한국통신학회 논문지 제23권, 제2호 참조
- 홍 대 식(Dae-sik Hong) 종신회원
한국통신학회 논문지 제21권, 제8호 참조