

주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 Near/Far 영향을 받는 Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM 시스템의 성능 해석

정회원 노재성*, 강희조**, 김춘길***, 김언곤****, 조성준*****

Performance Analysis of Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM System with Near/Far Effect in Frequency Selective Multipath Fading Channel

Jae-Sung Roh*, Heau-Jo Kang**, Chun-Gil Kim***, Eon-Gon Kim****, Sung-Joon Cho*****
Regular Members

요 약

본 논문에서는 주파수 선택성 다중경로 페이딩과 Near/Far 영향을 받는 Multi-Carrier CDMA 시스템의 성능을 분석하였다. 성능 분석을 위해 사용한 파라미터들은 Multi-Carrier의 수, 다중사용자의 수, RAKE 수신기의 가지수, 주파수 선택성 다중경로 페이딩의 감쇄지수, 그리고 CDMA 다중사용자의 분포와 세기이다.

Multi-Carrier CDMA 시스템에서 Near/Far 영향을 분석하기 위하여 3가지의 간섭 분포 모델을 설정하였다. 첫 번째 모델은 다중사용자가 간섭과 대 반송파 비인 I/C를 -4 dB에서 4 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가지며 20 %씩 균일하게 분포하는 경우이다. 두 번째 모델은 다중사용자가 I/C비를 -2 dB에서 2 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가지며 33.3 %씩 균일하게 분포하는 경우이다. 그리고 세 번째 모델은 모든 다중사용자가 I/C가 0 dB로 신호 전력과 간섭 전력이 동일하게 분포하며 전력이 완전하게 제어된 경우이다.

그리고 본 논문에서는 주파수 선택성 다중경로 페이딩의 영향을 감소시키기 위하여 RAKE 수신기를 채용한 Multi-Carrier CDMA 시스템을 제안하였다. 이 시스템에서는 제시한 3가지의 간섭 분포 모델중에서 세 번째 모델 (완전 전력제어가 된 경우)이 가장 좋은 성능을 나타내었고, 간섭파의 전력과 신호파의 전력차이가 적을수록 희망 신호에 영향을 주는 간섭 신호의 전력량이 적어서 Multi-Carrier CDMA 시스템의 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The performance of a multi-carrier CDMA system is analyzed considering frequency selective multipath fading and Near/Far effects. The number of multicarrier, multiuser, and arms of RAKE receiver, and the decay ratio of frequency selective multipath fading are used as a parameter for the performance analysis. Moreover, the distribution and the strength of multiuser interference are also considered.

To evaluate the Near/Far effects in a multi-carrier CDMA system, three distribution models are assumed. In the first model, Interference to Carrier Ratio, I/C, ranges from -4 dB to 4 dB, and at each 2 dB interval, 20 %

* 강원도립대학 정보통신과 (jsroh@kangwonpu.ac.kr) ** 동신대학교 전기전자공학부 (hjkang@dongshinu.ac.kr)

*** 한국과학기술원 기초과학과 (kimcg@sorak.kaist.ac.kr)

**** 국립 대전산업대학교 정보통신공학과 (egk8996@hyenam.tnut.ac.kr)

***** 한국항공대학교 전자·정보통신·컴퓨터공학부 (sjcho@mail.hangkong.ac.kr)

논문번호: 99307-0809, 접수일자: 1999년 8월 9일

of multiuser is assumed to be uniformly distributed. In the second one, I/C ranges from -2 dB to 2 dB, and 33.3% of multiuser is assumed to be equally dispersed at each 2 dB interval. The third model is 0 dB of I/C, that is, with perfect power control, multiuser are assumed to be evenly located.

In this paper, multi-carrier CDMA system adopting RAKE receiver is proposed to mitigate the frequency selective multipath fading. From the results, the third model(i.e. perfect power control) shows the best performance, and the narrower range of I/C causes the less effects to the desired signal, which reads to the better performance.

I. 서론

정보화 사회가 가속화됨에 따라 무선 채널을 통한 고속 및 양질의 음성, 데이터, 영상을 동시에 주고받는 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 급속히 확대되어가고 있다^{[1],[2]}. 그러나 현재 디지털 셀룰러의 다중접속 방식으로 채택된 CDMA 방식은 많은 가입자를 수용할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 간섭 신호에 의해 시스템의 용량이 제한된다는 단점을 가지고 있다. 또한 현재 디지털 셀룰러 시스템은 데이터의 전송속도도 수십 k bps에 해당하는 저속 및 중속 데이터 전송에 이용되고 있는 현실이며, 무선 멀티미디어 통신과 같은 고속 데이터 전송에 적용할 경우, 데이터의 심볼간격이 작아져서 채널상의 지연확산(delay spread)으로 인한 인접 심볼간 간섭이 증가되어 심각한 성능저하를 초래한다. 그리고 RAKE 수신기에 의한 다이버시티 효과에도 불구하고 높은 칩전송율에 따른 처리속도의 한계가 예상되고 있어서 현재의 디지털 셀룰러 시스템은 미래의 고속 무선 멀티미디어 서비스에는 적합하지 못하다. 그래서 이러한 서비스에 대한 요구를 충족시키기 위하여 IS-95 규격을 적용한 기존의 셀룰러 방식에서 사용되고 있는 RF 대역폭보다 대역폭이 넓은 광대역 CDMA 시스템이 개발되고 있다. 또한 최근에는 기존의 CDMA 시스템에 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술을 결합함으로써 지연확산에 대한 영향을 줄이면서 전송율과 주파수 효율의 향상 그리고 협대역에서 간섭 억제 효과 등에 있어서 효율적인 Multi-Carrier CDMA 방식이 차세대 고속 무선 멀티미디어 전송 방식으로써 활발히 연구가 진행되고 있다^{[3],[5]}. 특히, 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 RAKE 수신기를 적용시 Multi-Carrier CDMA 시스템의 성능 개선의 정도와 CDMA 시스템에서 발생이 예상되고 있는 기지국과 다수의 단말기 사이에서 발생하는 Near/Far 문제를 분석하는 것이 효율적인

Multi-Carrier CDMA 시스템을 설계하는데 필요하다. 그리고 디지털 변조방식으로서 초기에는 BPSK 나 QPSK와 같은 변조방식이 주로 사용되었으나, 전송 용량을 증가시킬 수 있고, 주파수 이용 효율을 향상시킬 수 있는 QAM 방식이 적용되기에 이르렀다. QAM 방식은 고속 데이터 통신이나 화상통신 등에 적용할 경우 제한된 무선 대역폭을 효율적으로 이용할 수 있기 때문에 선진 각국에서는 이의 실제 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

지금까지 Multi-Carrier CDMA 방식은 전력제어가 완전하게 이루어진 상태에 대한 연구가 이루어졌으나^{[6],[7]}, 단말기의 이동과 이동국과 기지국사이의 거리차이 문제로 인하여 기지국에서 수신되는 이동국의 수신전력이 일정하지 않게 되는 현상을 연구하는 것이 필요하다. 이와 같이 기지국에서 수신되는 신호의 전력차가 발생하여 전력제어가 이루어지지 않으면 Multi-Carrier CDMA 시스템의 용량은 심각하게 줄어들 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 고속 무선 멀티미디어 전송을 위한 Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM 시스템을 제안하고, 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 Near/Far의 영향을 줄일 수 있는 RAKE 수신기법을 적용한 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능과 용량을 분석한다. 또한 Multi-Carrier CDMA 시스템에서도 CDMA 다중사용자 간섭에 의한 영향이 클것으로 예상되므로 다중사용자 간섭의 세기와 다중사용자 간섭의 분포를 고려한 사용자 모델을 설정한 후 정량적 해석을 수행하여 주파수 선택성 다중경로 페이딩과 Near/Far의 영향을 받는 Multi-Carrier CDMA 시스템을 분석한다.

II. Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM 시스템의 해석 모델

Multi-Carrier CDMA 방식은 데이터를 직·병렬 변환을 통해 저속도의 병렬 데이터로 만든 후, 각각의 저속 데이터를 각기 다른 부반송파(Subcarrier)로

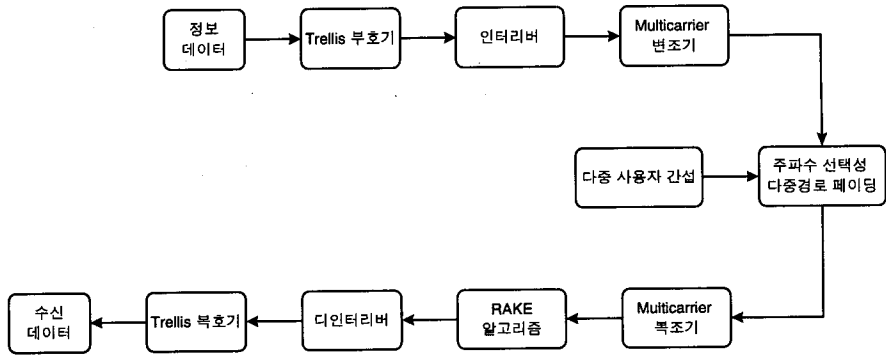


그림 1. Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM 시스템의 해석 모델

변조하여 전송하는 방식이다. 채널에서 고유하게 주어지는 동기 대역폭(Coherent Bandwidth)보다 광대역으로, 고속 데이터를 Multi-Carrier 변조방식을 적용하면, 적절한 주파수 인터리빙을 통한 주파수 다이버시티 송·수신 효과와 간단한 채널 등화 및 이동무선 통신 환경에서 주된 장애 요인인 다중경로 페이딩을 극복할 수 있다.

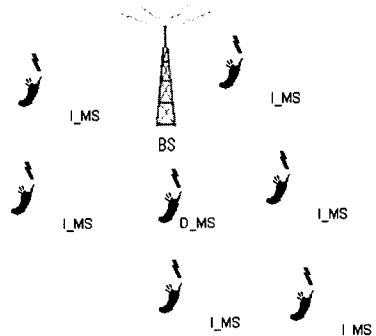
본 논문에서 설정한 Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM 시스템의 해석 모델은 그림 1과 같다. 해석 모델에서 정보 데이터는 Trellis 부호기를 거쳐서 부호화된 후 인터리버를 통과한다. 인터리빙된 직렬 데이터는 Multi-Carrier 변조기로 입력된다. Multi-Carrier 변조기에서 직·병렬 변환기에 의하여 고속의 직렬 데이터는 저속의 병렬 데이터로 변환되며 서로 직교성을 갖는 부반송파(sub-carrier)에 의하여 변조되어, 모든 부반송파가 합쳐진 후 무선채널로 전송된다. 주파수 선택성 다중경로 페이딩과 다중사용자 간섭채널을 통하여 수신된 Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM 신호는 Multi-Carrier 복조기에서 직·병렬 변환기에 의하여 부반송파 채널로 분리된 후 FFT에 의하여 각각의 부반송파 채널에서 복조가 이루어지고 RAKE 수신기에 의하여 주파수 선택성 다중경로 성분이 최대비 합성에 의하여 수신신호가 합성된다. RAKE 수신기를 통과한 비트는 송신부와 역의 과정을 통하여 디인터리버와 Trellis 복호기를 거쳐서 최종적으로 송신된 데이터와 비교를 수행한다.

본 논문에서는 기지국과 단말기 사이의 Near/Far 문제와 주파수 선택성 다중경로 페이딩이 존재하는 무선 통신로를 고려하였으며 그림 2는 기지국과 이동국 사이에서 기지국의 서비스 영역에 따른 이동국의 분포를 나타낸다. CDMA 시스템에서 Near/Far 문제는 간섭에 의하여 CDMA 시스템의 성능과 용

량이 제한되기 때문에 발생하는 것으로, 전자파의 전파 특성이 CDMA 시스템에 영향을 주어 발생하는 CDMA 방식의 고유한 문제이다. Near/Far 문제를 극복하기 위해서는 기지국에서 수신되는 이동국의 수신전력이 일정하도록 이동국의 송신전력을 조정하여야 한다. 즉, 기지국에 가까이 있는 이동국은 낮은 송신출력으로 송신을 하며, 먼 곳에 있는 이동국은 큰 전력으로 송신하도록 하여야 한다. 이를 전력제어라고 하며 CDMA 시스템에서는 매우 정교한 전력제어 시스템이 구현되어야 한다.

III. Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM 시스템의 성능 해석

그림 3은 Multi-Carrier CDMA 시스템의 송신기 구조를 나타낸다. Multi-Carrier CDMA 시스템은 정보비트를 주어진 확산 코드를 이용하여 주파수 영역에서 서로 다른 반송파로 확산시킨다. 그림 3에서 Multi-Carrier의 수와 처리이득이 M_c 인 경우를



D_MS : Desired Mobile Station
I_MS : Interference Mobile Station

그림 2. 서비스 영역에서 이동국의 분포

도시한 것이다. 입력된 m번째 사용자의 k번째 정보 심볼은 먼저 M_c 번 복사되어 m번째 사용자에게 할당된 각각의 부호 ($C_m(M_c-1)$)와 곱해진 후 Multi-Carrier에 의하여 변조된다.

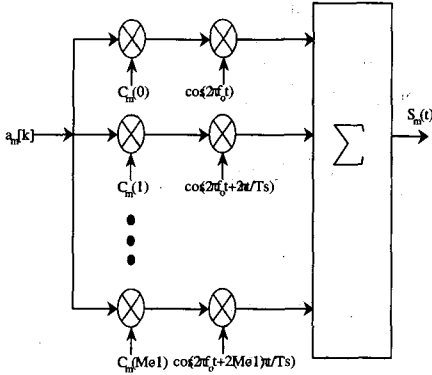


그림 3. Multi-Carrier CDMA 시스템의 송신기 구조

해석을 간략화하기 위하여 대역의 방사를 최소화 하기 위해 window 함수로는 구형과 함수를 사용하였다.

$$P_T(t) = \begin{cases} 1 & : 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

그리고 Multi-Carrier CDMA 시스템의 송신기 구조에서 $a_m[k]$ 는 송신단에 입력되는 데이터 열을, m은 사용자를, k는 입력 데이터 심볼의 순서를 나타낸다면 전송되는 m번째 사용자의 k번째 Multi-Carrier CDMA 신호는 다음과 같이 나타내진다.

$$s_m(t) = a_m[k] \sum_{k=0}^{M_c-1} C_m(k) e^{j2\pi(f_0+k/T_s)t} \quad (2)$$

여기서 f_0 는 반송파 주파수를 나타내며 시스템의 최대 용량에 해당되는 M_c 명의 사용자가 동시에 사용할 경우 전송되는 Multi-Carrier CDMA 신호는 다음과 같다.

$$S(t) = \sum_{m=0}^{M_c-1} \sum_{k=0}^{M_c-1} a_m[k] C_m(k) e^{j2\pi(f_0+k/T_s)t} \quad (3)$$

심볼 구간 (T_s) 동안에 무선채널을 통하여 수신기에서 복조된 신호는 $R(t)$ 다음과 같다.

$$R(t) = S^{(1)} + \sum_{k=2}^M \alpha_k I^{(1,k)} + \int_0^{T_s} \sum_{n=1}^{M_c} N(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt \quad (4)$$

여기서 α_k 는 다중사용자의 분포에 따른 다중사용자 간섭 전력 대 신호 전력 비, $I^{(1,k)}$ 는 간섭 성분, U 는 다중사용자의 수, M_c 는 Multi-Carrier의 수, $S^{(1)}$ 는 원하는 신호 성분으로 다음과 같다.

$$S^{(1)} = a_0^{(1)} T_s \sqrt{\frac{M_c P}{2}} \quad (5)$$

여기서 $a_0^{(1)}$ 는 정보 데이터 열이고 P 는 송신 신호의 전력이다.

식 (4)에서 잡음 성분의 분산은 $M_c N_0 T_s / 4$ 이고, $M_c=1$ 인 경우는 단일 반송파 DS/CDMA 전송에서 잡음 성분의 분산과 동일하다. 그리고 k 번째 사용자의 다중사용자 간섭의 전력은 다음과 같다^[7].

$$I^{(1,k)} = \sqrt{\frac{2P}{N}} \{ \cos \phi_k [a_{-1}^{(k)} R_{ul,uk}(\tau_k) + a_0^{(k)} \hat{R}_{ul,uk}(\tau_k)] - \sin \phi_k [a_{-1}^{(k)} R_{ul,uk}(\tau_k) + a_0^{(k)} \hat{R}_{ul,uk}(\tau_k)] \} \quad (6)$$

여기서

$$R_{x,y}(\tau) = \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt$$

$$\hat{R}_{x,y}(\tau) = \int_{-\tau}^{T-\tau} x(t)y(t-\tau)dt \quad (7)$$

위 식 (6)과 식 (7)을 정리하면 $I^{(1,k)}$ 는 다음과 같다.

$$I^{(1,k)} = \sqrt{\frac{2P}{N}} \sum_{n=0}^{M_c} = N \left\{ A_n \sin \frac{2\pi n \tau_k}{T_s} + B_n \cos \frac{2\pi n \tau_k}{T_s} \right\} \quad (8)$$

여기서

$$A_n = \frac{c_n^{(k)} c_n^{(1)} \sin \phi_k}{2} \{ a_{-1}^{(k)} \tau_k + a_0^{(k)} [T_s - \tau_k] \} + \frac{T_s \cos \phi_k [a_{-1}^{(k)} - a_0^{(k)}]}{2\pi}$$

$$\left\{ \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{n [c_n^{(k)} c_i^{(1)} + c_n^{(k)} c_n^{(1)}]}{n^2 - i^2} + \frac{c_n^{(k)} c_n^{(1)}}{2n} \right\} \quad (9)$$

그리고

$$B_n = \frac{c_n^{(k)} c_n^{(1)} \cos \phi_k}{2} \{ a_{-1}^{(k)} \tau_k + a_0^{(k)} [T_s - \tau_k] \} + \frac{T_s \sin \phi_k [a_{-1}^{(k)} - a_0^{(k)}]}{2\pi}$$

$$\left\{ \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{n c_n^{(k)} c_i^{(1)} + i c_n^{(1)} c_i^{(k)}}{i^2 - n^2} - \frac{c_n^{(k)} c_n^{(1)} a_0^{(k)}}{2n} \right\} \quad (10)$$

본 논문에서는 CDMA 동일채널간섭을 Gaussian 잡음으로 간략화하여 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능을 구하려고 한다. 랜덤한 신호열을 고려한다면 Multi-Carrier CDMA 시스템에서 간섭의 분산 평균치 $E[\text{Var}\{I^{(1,k)}\}]$ 는 다음과 같다^[7].

$$E[\text{Var}\{I^{(1,k)}\}] = \frac{\alpha_k P T_s^2}{4\pi^2 M_c} \left\{ \sum_{n=1}^{M_c} \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{3n^2 + i^2}{(n^2 - i^2)^2} \right\} + \frac{2\pi^2}{3} \quad (11)$$

모든 사용자로부터의 간섭을 독립적이라고 가정하면, 전체의 간섭전력은 식 (11)에서 제시한 각각의 $\text{Var}\{I^{(1,k)}\}$ 의 합이 된다. 따라서 식 (11)을 모든 사용자에게 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$E[\text{Var}\{I\}] = \frac{\sum_{k=2}^M \alpha_k P T_s^2}{4\pi^2 M_c} \left\{ \sum_{n=1}^{M_c} \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{3n^2 + i^2}{(n^2 - i^2)^2} \right\} + \frac{2\pi^2}{3} \quad (12)$$

모든 사용자로부터의 간섭과 잡음을 고려한 Multi-Carrier CDMA 시스템의 등가 신호 전력 대 전체 잡음 전력비 γ_{eq} 는 다음과 같다.

$$\gamma_{eq} = \frac{M_c P T_s^2 / 2}{\frac{\sum_{k=2}^M \alpha_k P T_s^2 A^*}{4\pi^2 M_c} + \frac{M_c N_0 T_s}{4}} \quad (13)$$

$$A^* = \sum_{n=1}^{M_c} \sum_{i=1, i \neq n}^{M_c} \frac{3n^2 + i^2}{(n^2 - i^2)^2} + \frac{2\pi^2}{3}$$

식 (13)에서 분모와 분자를 정리하면 Multi-Carrier CDMA를 적용한 시스템에서 등가 신호 전력 대 전체 잡음 전력비 γ_{eq} 는 다음과 같다.

$$\gamma_{eq} \approx \left(\frac{\sum_{k=2}^M \alpha_k A^*}{2M_c^2 \pi^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-1} \quad (14)$$

여기서 E_b 는 하나의 심볼 구간 T_s 동안에 전송되는 신호의 에너지이고, U 는 다중사용자의 수, M_c 는 Multi-Carrier의 수, α_k 는 다중사용자 분포에 따른 다중사용자 간섭 전력 대 신호 전력 비이다.

Trellis Coded 16 QAM 신호의 비트 오율 P_b 는 유한개의 지배적인 에러 경로를 포함하는 union bound에 의하여 근사화될 수 있다. Union bound는

주로 비트 오율의 upper bound로 사용된다^[8].

$$P_b \leq \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w(j) P_j(x \rightarrow \hat{x}) \quad (15)$$

여기서, $w(j)$ 는 유클리드 거리 d_i 를 가지는 j 번 째 에러 경로에서의 정보 비트 에러의 총 수이며, d_i 는 $d_1 = d_{free} < d_2 < d_3 \dots$ 이다. Trellis Coded 신호의 오율식에서 2가지의 bound 오율식은 다음과 같다^[8].

$$\frac{N(d_{free})}{m} Q\left(\sqrt{\frac{m d_{free}^2 \gamma_{eq}}{2}}\right) \leq P_b(e) \leq \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n u(j) P_j(x \rightarrow \hat{x}) \quad (16)$$

여기서, d_{free} 는 trellis 부호의 최소 자유 거리, $N(d_{free})$ 는 송신 경로로부터 d_{free} 만큼의 거리가 떨어진 에러 경로에서의 정보비트 에러의 총 수, m 은 trellis 부호기로 들어가는 입력 비트의 수, γ_{eq} 는 등가 순시 신호 전력 대 전체 잡음 전력비이다. 그리고 $Q(x)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2/2} dy \quad (17)$$

식 (16)에서 2가지의 bound 오율식은 신호 전력 대 잡음 전력비가 큰 경우에는 유사하게 된다. 계산량을 제한하기 위하여 유한개의 에러 경로만을 고려해서 계산하며 나머지는 무시될 수 있다^[9]. 그러므로 신호 전력 대 잡음 전력비가 큰 경우에는 부호기의 전달 함수를 사용하지 않고 근사적으로 부호의 비트 오율을 구할 수 있으며, 가장 작은 유클리드 거리를 갖는 신호 사이에 발생하는 에러에 의하여 오율은 지배적인 영향을 받는다. 결과적으로 잡음 채널에서 등가 신호 전력 대 전체 잡음 전력비 γ_{eq} 를 적용하여 Multi-Carrier CDMA Trellis Coded 16 QAM 신호의 비트 오율을 계산할 수 있다.

주파수 선택성 다중경로 페이딩 환경에서 Coherent RAKE 수신기를 통과하고 최대비 결합기를 거친 후의 신호 전력 대 잡음 전력비는 각 경로당 신호 전력 대 잡음 전력비의 합이 된다. 따라서 주파수 선택성 다중경로 페이딩 환경에서의 신호 전력 대 잡음 전력비는 다음과 같이 구해진다.

$$\text{SNR} = \gamma_{eq} \cdot \sum_{k=0}^L \alpha_k^2 = \sum_{k=1}^L \gamma_k \quad (18)$$

각각의 $\{\gamma_k\}$ 는 자유도가 2인 chi-squared distri-

bution에 따라 분포한다. 즉,

$$p(\gamma_k) = \frac{1}{\bar{\gamma}_k} \exp^{-\gamma_k/\bar{\gamma}_k} \quad (19)$$

여기서 $\bar{\gamma}_k$ 는 k 번째 경로에 대한 평균 SNR 이며 다음과 같다.

$$\Psi_{r_k}(jv) = \frac{1}{1 - jv \bar{\gamma}_k} \quad (20)$$

γ_b 는 L개의 통계적 독립 성분 $\{\gamma_k\}$ 의 합이므로, γ_b 의 특성함수는 다음과 같다.

$$\phi_{r_b}(jv) = \prod_{k=1}^L \frac{1}{1 - jv \bar{\gamma}_k} \quad (21)$$

γ_b 의 확률밀도함수는 γ_b 에 대한 특성함수의 역 푸리에 변환에 의하여 다음과 같이 얻어진다^[10].

$$p(\gamma_b) = \sum_{k=1}^L \frac{\pi_k}{\gamma_k} e^{-\gamma_b/\bar{\gamma}_k}, \quad \gamma_b \geq 0 \quad (22)$$

여기서, π_k 는 다음과 같다.

$$\pi_k = \prod_{i \neq k} \frac{\bar{\gamma}_k}{\gamma_k - \bar{\gamma}_i} \quad (23)$$

식 (16)에서 주어진 잡음 환경에서의 오율식과 식 (22)에서 주어진 확률밀도함수를 이용하여 평균을 취하면 다음과 같이 주파수 선택성 다중경로 페이딩 환경에서의 오율식이 유도된다.

$$P_{e \text{ fade}} = \frac{N(d_{\text{free}})}{2m} \sum_{k=1}^L \pi_k \left[1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_k}{1 + \bar{\gamma}_k}} \right] \quad (24)$$

여기서 $\bar{\gamma}_k$ 는 $E[a_i^2] \cdot \gamma_{\text{eq}} \cdot (m d_{\text{free}}^2)/4$ 이다. 또한 $\sum_{k=1}^L E[a_i^2] = 1$ 을 만족하는 Exponential MIP(Multi-path Intensity Profile)를 고려하면, $E[a_i^2]$ 는 다음과 같다.

$$E[a_i^2] = \frac{\exp[-k \cdot \beta]}{\sum_{k=1}^L \exp[-k \cdot \beta]} \quad (25)$$

여기서 β 는 MIP 모델의 감쇄지수이다.

IV. 수치 계산 및 검토

본 논문에서는 주파수 선택성 다중경로 페이딩

채널에서 참고문헌 [11]에서 제시한 다중사용자 간섭 모델을 적용한 Multi-Carrier CDMA 시스템에서 Near/Far 문제를 분석하였다. 그리고 주파수 선택성 다중경로 페이딩과 다중사용자 간섭에 따른 Near/Far의 영향을 극복하기 위하여 RAKE 수신기법과 Trellis 부호화를 적용하여 Multi-Carrier의 수, 다중사용자의 수, RAKE 수신기의 가지수, 주파수 선택성 다중경로 페이딩의 감쇄지수, 그리고 CDMA 동일채널간섭의 세기와 분포에 따른 시스템의 성능을 분석하였다. 그리고 본 논문에서 사용한 Trellis 부호기는 상태수가 8, 부호화율이 3/4, 부호기의 구조가 $(h^{(0)}, h^{(1)}, h^{(2)}) = (11, 2, 4)$ 인 Ungerboeck의 Trellis 부호기를 적용하였다^{[12]-[14]}.

본 논문에서는 3가지 형태의 다중사용자 간섭 분포를 고려하였다. Case I은 자기 자신의 신호 성분을 제외한 25명의 사용자가 I/C 비=-4 dB, -2 dB, 0 dB, 2 dB, 4 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가지며 다중사용자가 20 %씩 균일하게 분포하는 경우이고, Case II는 자기 자신의 신호 성분을 제외한 25명의 사용자가 I/C = -2 dB, 0 dB, 2 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가지며 33.3 %씩 균일하게 분포하는 경우이다. 그리고 Case III는 자기 자신의 신호 성분과 25명의 다중사용자 신호 성분의 I/C 비가 0 dB로 신호 전력과 간섭 전력이 동일하게 분포하는 경우이다.

그림 4는 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 RAKE 수신기의 가지수에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 이 경우 주파수 선택성 다중경로 페이딩의 감쇄지수는 0.3, Multi-Carrier의 수는 127, 다중사용자의 수는 26명, CDMA 다중사용자 간섭의 세기에 따른 분포는 전

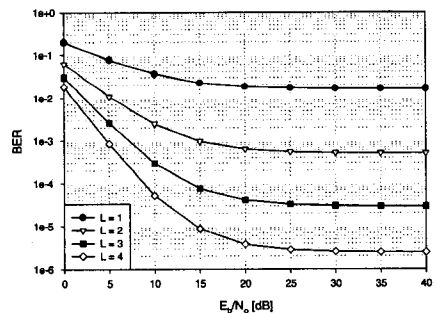


그림 4. 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 RAKE 수신기의 가지수에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능 ($\beta = 0.3$, 다중사용자 수=26, Multi-Carrier의 수=127, 다중사용자 간섭분포 : Case I)

체의 다중접속 사용자의 수는 26명이고 자기 자신의 신호 성분을 제외한 25명의 사용자는 I/C 비 = -4 dB ~ 4 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가지며 20 % (5명)씩 균일하게 분포한 Case I의 경우이다. RAKE 수신기의 가지수 L이 증가함에 따라서 시스템의 오율 성능은 개선되었으나 L이 커짐에 따라서 BER의 개선 폭은 점차 감소하였다. 예를 들어 BER = 10⁻³ 을 기준으로 L=2와 L=3과의 차이는 7.5 dB이었으나 L=3과 L=4와의 차이는 2.5 dB로 감소되어 L이 3이상으로 증가됨에 따라서 BER이 개선되는 정도는 적었다.

그림 5는 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널 특성(β)에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 다중접속 사용자수는 26명이고 Multi-Carrier의 수는 127, RAKE 수신기의 가지수는 4개 그리고 CDMA 다중사용자의 간섭 분포는 그림 3과 동일한 Case I으로 설정하였다. 주파수 선택성 다중경로 페이딩을 나타내는 MIP 모델에서 β 값이 증가함에 따라서 오율이 증가함을 알 수 있고, BER = 2 × 10⁻⁵ 을 기준으로 β = 0.1과 β = 0.5 사이는 1 dB, β = 0.5과 β = 0.9 사이는 6 dB의 BER 차이가 있었다.

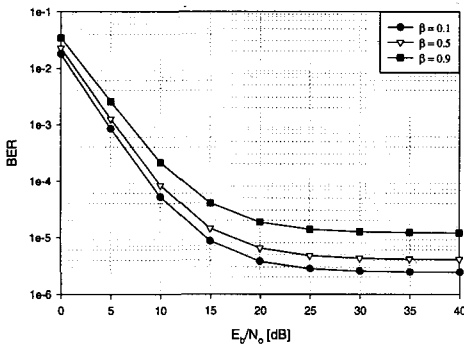


그림 5. 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널 특성(β)에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능 (다중사용자 수=26, Multi-Carrier의 수=127, 다중사용자 간섭분포 : Case I, RAKE 수신기의 가지수=4)

그림 6은 β = 0.1인 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 Multi-Carrier의 수에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 다중접속 사용자수는 26명이고 CDMA 다중사용자 간섭의 분포는 Case I으로 설정하였다. 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널의 보상을 위한 RAKE 수신기의 가지수는 4개이다. 주파수 선택성 다중경로 페이딩과 CDMA 다중사용자 간섭 환경에서 Multi-

Carrier의 수를 63에서 511까지 증가함에 따라서 시스템의 BER은 오율 성능은 개선되었고, Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능을 4 × 10⁻⁶ 까지 향상시킬 수 있다. 그러나 신호 전력 대 잡음 전력비가 큰 경우에도 시스템의 성능이 개선되지 않는 영역이 존재하는 이유는 CDMA 시스템이 간섭에 의해서 제한되는 특성에 기인하기 때문이다.

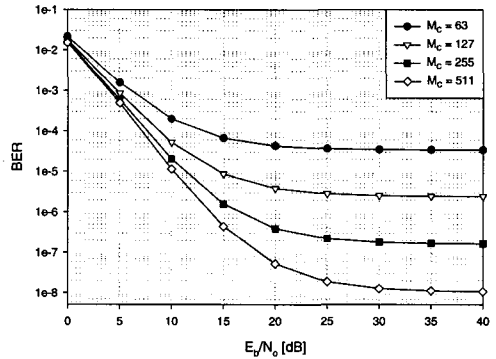


그림 6. 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 Multi-Carrier의 수에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능 (β = 0.1, 다중접속 사용자수=26, 다중사용자 간섭분포 : Case I, RAKE 수신기의 가지수 = 4)

그림 7은 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 다중사용자 간섭의 3가지 분포 형태에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 그림 7은 주파수 선택성 다중경로 페이딩의 채널 특성 β는 0.1, 다중사용자의 수 U는 26명, RAKE 수신기의 가지수는 4, Multi-Carrier의 수는 127인 환경이다. 결과 그래프에서 Case I은 자기 자신의 신호 성분을 제외한 25명의 사용자가 I/C = -4 dB ~ 4 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가지며 다중사용자가 20 %씩 균일하게 분포하는 경우이고, Case II는 자기 자신의 신호 성분을 제외한 25명의 사용자가 I/C = -2 dB ~ 2 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가지며 33.3 %씩 균일하게 분포하는 경우이다. 그리고 Case III는 자기 자신의 신호 성분과 25명의 다중사용자 신호 성분의 I/C 비가 0 dB로 균일하게 분포하는 경우이다. 3가지 경우를 통하여 자기 자신의 신호 전력과 다중사용자 간섭의 전력이 동일한 경우(Case III, C/I=0 dB)가 가장 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 반면에 Case II는 Case I보다 다중사용자 간섭의 분포 범위가 좁기 때문에 정보 신호에 미치는 간섭의 양이 적음을 알 수 있었다.

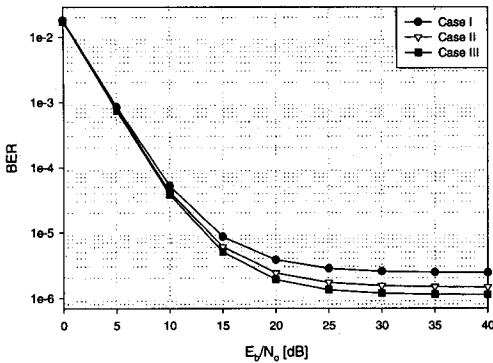


그림 7. 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 다중사용자 간섭의 분포 특성에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능 ($\beta=0.1$, 다중사용자 수=26, RAKE 수신기의 가지수=4, Multi-Carrier의 수=127)

그림 8은 $\beta=0.1$ 인 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 다중사용자의 수에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 그림 8에서 Multi-Carrier의 수는 127이고 CDMA 다중사용자 간섭의 분포 특성은 Case III로 설정하였고, RAKE 수신기의 가지수는 4개인 환경이다. 결과 그래프로부터 다중사용자의 수가 증가함에 따라서 시스템의 오율 성능은 열화되었고, 다중사용자의 수가 40명인 경우에도 $E_b/N_0=20$ dB 이상에서 $BER=1 \times 10^{-5}$ 이하를 얻을 수 있다.

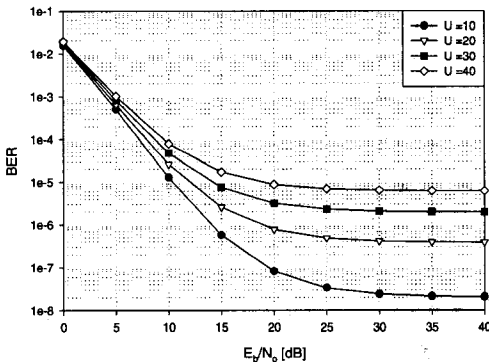


그림 8. 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널에서 다중사용자의 수에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능 ($\beta=0.1$, Multi-Carrier의 수=127, 간섭분포: Case III, RAKE 수신기의 가지수=4)

그림 9는 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널 특성과 다중사용자 수 U 에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 그림 9에서 Multi-Carrier의 수는 127, E_b/N_0 는 15 dB, CDMA 다중사용자 간섭의 분포 특성은 Case III로

설정하였고, RAKE 수신기의 가지수는 4개인 환경이다. 다중사용자 수의 증가와 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널 특성 β 의 증가에 따라서 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능은 열화되고 있다.

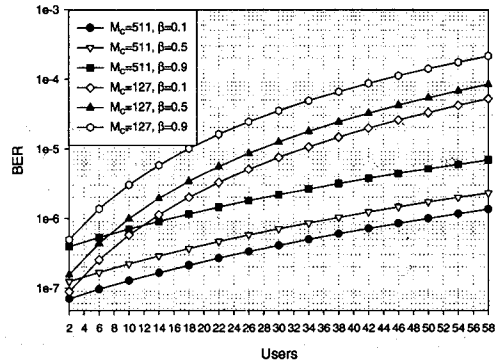


그림 9. 주파수 선택성 다중경로 페이딩 채널 특성과 다중사용자 수에 따른 Multi-Carrier CDMA 시스템의 오율 성능 ($E_b/N_0=15$ [dB], 간섭분포: Case III, RAKE 수신기의 가지수=4, Multi-Carrier의 수=127)

V. 결론

본 논문에서는 Multi-Carrier CDMA 시스템을 설계할 때 고려해야 할 주파수 선택성 다중경로 페이딩과 Near/Far의 영향을 Multi-Carrier의 수, 다중사용자의 수, RAKE 수신기의 가지수, 주파수 선택성 다중경로 페이딩의 감쇄지수, 그리고 CDMA 다중사용자 간섭의 세기와 분포(Case I, II, III)에 따라서 분석하였다. 특히 다중사용자 간섭 신호 대 원하는 신호사이의 전력비가 -4 dB ~ 4 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가져며 다중사용자의 수가 20%씩 균일하게 분포하는 경우, -2 dB ~ 2 dB 사이에서 2 dB씩의 차이를 가지며 다중사용자의 수가 33.3%씩 균일하게 분포하는 경우, 모든 사용자의 전력비가 0 dB로 균일하게 분포하는 경우로 각각 모델링하여 Near/Far가 존재하는 다중경로 페이딩 환경에서 Multi-Carrier CDMA 시스템의 전송특성 및 성능을 다루었다.

분석결과, 3가지의 CDMA 다중사용자 간섭의 세기와 분포를 통하여 자기 자신의 신호 전력과 다중사용자 간섭의 전력이 동일한 경우가 가장 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있었다. 그리고 다중사용자 간섭의 분포 범위가 좁은 경우가 정보 신호에 미치는 다중사용자 간섭의 영향이 적어짐을 알 수 있었다.

그리고 다중사용자 간섭의 Near/Far 문제나 주파수 선택성 다중경로 페이딩에 의한 영향을 보상하기 위해 Trellis 부호화 기법과 RAKE 수신기를 적용하여 Multi-Carrier CDMA 16 QAM 시스템을 고속의 무선전송 방식으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] R. Prasad, *Universal wireless personal communications*, Artech House Publishers, 1998.
 [2] S. Sampei, *Applications of digital wireless technologies to global wireless communications*, Prentice Hall, 1997.
 [3] R. Prasad and S. Hara, "An overview of multi-carrier CDMA," *Proc. of IEEE ISSSTA '96*, pp. 107-114, 1996.
 [4] E. A. Sourour and M. Nakagawa, "Performance of orthogonal multicarrier CDMA in a multipath fading channel," *IEEE Trans. on Comm.* vol. COM-44, pp. 356-367, Mar. 1996.
 [5] N. Yee, J. P. Linnartz, and G. P. Fettweis, "Multi-Carrier CDMA in indoor wireless radio networks," *IEICE Trans., Commun.*, vol. E77-B, no. 7, pp. 900-904, July 1994.
 [6] K. Fazel and G. P. Fettweis, *Multi-Carrier Spread-Spectrum*, Kluwer Academic Publishers, 1997.
 [7] T. F. Ho, "Performance evaluation for multi-carrier CDMA system," *Proc. IEEE VTC '96*, pp. 1101-1105, 1996.
 [8] C. Tellambura and K. Bhargava, "Error performance of MPSK trellis-coded modulation over nonindependent Rician fading channels," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 47, pp. 152-162, Feb. 1998.
 [9] F. Gagnon and D. Haccoun, "Bounds on the error performance of coding for nonindependent Rician fading channels," *IEEE Trans. on Comm.* vol.COM-40, pp.351-360, Feb. 1992.
 [10] J. G. Proakis, *Digital communications*, New York, McGraw-Hill, 1995.
 [11] C. L. Weber, G. K. Huth, and B. H. Batson, "Performance considerations of code division multiple access systems," *IEEE Trans., on*

Veh. Tech., vol.30, no. 1, pp. 3-10, Feb. 1981.
 [12] S. H. Jamali and T. L. Ngoc, *Coded-modulation techniques for fading channels*, Kluwer Academic Publishers, 1994.
 [13] G. Ungerboeck, "Channel coding with multi-level/phase signals," *IEEE Trans., on Inform. Theory*, vol. IT-28, pp. 55-67, Jan. 1982.
 [14] G. Ungerboeck, "Trellis-coded modulation with redundant signal sets II:State of the art," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 25, pp. 12-21, 1987.

노 재 성(Jae-Sung Roh)

정회원



1990년 2월: 한국항공대학교
 항공통신정보공학과 졸업
 (공학사)
 1992년 2월: 한국항공대학교
 대학원 항공통신정보공학
 과 졸업 (공학석사)

1990년 1월~1997년 5월:(주) 한화정보통신 무선
 가입자망 연구그룹
 1997년 8월~현재: 한국항공대학교 대학원 항공통
 신정보공학과 박사과정 재학중
 1999년 3월~현재: 강원도립대학 정보통신과 전임
 강사
 <주관심 분야> 무선채널 모델링, 이동전파전파, 이
 동통신 시스템 성능 분석, EMI/EMC

강 희 조(Heau-Jo Kang)

정회원



1986년 2월: 원광대학교 전자공
 학과(공학사)
 1988년 2월: 숭실대학교 대학원
 전자공학과 (공학석사)
 1994년 2월: 한국항공대학교 대
 학원 항공전자공학과
 (공학박사)

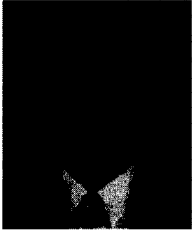
1994년 7월~1995년 12월: 한국전자통신연구소 위
 성망연구소 초빙연구원
 1996년 8월~1997년 8월: 오사카대학교 공학부 통신
 공학과 객원교수
 1998년 3월~현재: 한국전자통신연구소 위성망연구
 소 초빙연구원
 1996년 5월~현재: 한국전자파학회 호남지부 총무
 1990년 3월~현재: 동신대학교 전기전자공학부 부교

수

<주관심 분야> 통신시스템, 대역확산통신, 이동통신, 위성통신, EMI/EMC

김 춘 길(Chun-Gil Kim)

정회원



1965년 2월: 한국항공대학교
졸업 (공학사)
1983년 9월: 명지대학교 대학원
졸업 (공학석사)
1993년 2월: 한국항공대학교
대학원 졸업 (공학박사)

1982년 11월~1982년 12월: 독일 G.T.Z 연수
1988년 4월~1990년 4월: 독일 Gesamt Hoch
Schule/Universitat Kassel 연수
1996년 3월~1996년 6월: 미국 University of
Southern California 교환 교수
1984년 3월~현재: 한국과학기술원 기초과학 과정
교수
<주관심 분야> 통신정보처리시스템, 무선통신

김 언 곤(Eon-Gon Kim)

정회원

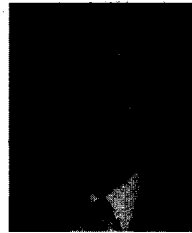


1978년 3월~1982년 2월: 한국
항공대학교 항공통신정보
공학과 (공학사)
1982년 3월~1985년 2월: 한국
항공대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)

1992년 8월~1997년 2월: 한국항공대학교 대학원
전자공학과 (공학박사)
1984년 12월~1995년 1월: 삼성전자 통신연구소 선
임연구원
1995년 2월~현재: 대전산업대학교 정보통신공학과
조교수
1999년 8월~현재: (주)알에프에스 기술이사
<주관심 분야> 무선통신, 이동통신, 위성통신, 환경
전자공학

조 성 준(Sung-Joon Cho)

종신회원



1969년 2월: 한국항공대학교
졸업 (공학사)
1975년 2월: 한양대학교 대학원
졸업 (공학석사)
1981년 2월: 오사카대학교 졸업
(공학박사)

1972년 8월~현재: 한국항공대학교 전자·정보통신·
컴퓨터공학부 교수
<주관심 분야> 무선통신, 이동통신, 위성통신, 환경
전자공학