

하이브리드 간섭제거기법을 적용한 이중전송률 MC-CDMA 시스템의 성능분석

정회원 김 남 선*

Performance Analysis of Dualrate MC-CDMA Systems Using Hybrid Interference Cancellation

Nam-sun Kim* *Regular Member*

요 약

다중 반송파(MC)기술과 CDMA기술이 결합된 MC-CDMA 시스템은 주파수 선택적 페이딩에 의한 신호감쇄를 완화시키면서 높은 전송률에 대한 요구를 만족시킬 수 있는 전송방식이다. 본 논문에서는 전송률이 서로 다른 다양한 서비스들을 지원하기 위한 비동기 MC-CDMA 시스템을 제안하고 다중간섭제거기를 적용한 시스템의 성능을 분석한다. 제안된 시스템에서는 전송속도에 따라 병렬 부 채널의 수(P)를 조절함으로써 다중전송률 MC-CDMA 시스템을 구성하였으며 효과적인 다중접속 간섭제거를 위해 하이브리드 간섭제거(HIC) 방식을 사용한다. 다중경로 환경 하에서 단일전송률을 갖는 시스템과 제안된 시스템의 성능을 분석하였으며 간섭제거기를 사용하여 성능이 향상됨을 보였다.

Key Words : Multirate system, MC-CDMA, Interference Cancellation

ABSTRACT

A Multicarrier code division multiple access(MC-CDMA) is a scheme that combines multicarrier modulation with CDMA. It offers robustness to frequency selective fading effect and can support higher rate data transmission with higher spectral efficiency. The objective of this article is proposed and analyzed a new asynchronous MC-CDMA system with various kinds of data rates which employs a multiple access interference (MAI) canceller. The proposed multirate MC-CDMA system can be accomplished by changing the number of parallel branch(P) according to their data rate and hybrid interference canceller(HIC) are used for MAI cancellation. We compare the performance of proposed system in terms of average bit error rate(BER) with that of a single rate MC-CDMA system. The results show the large improvement in performance that can be attained by the cancellation scheme under multipath environments.

I. 서 론

광대역 CDMA(WCDMA) 방식은 협대역 플랫 페이딩(flat fading)환경을 광대역 주파수 선택적(fre-

quency selective)환경으로 변화시키고 RAKE 수신기를 사용하여 채널의 경로 다이버시티(diversity)를 이용하여 이러한 다중경로 페이딩을 어느 정도 극복할 수 있다. 그러나 무선채널 환경에서 고속으로

※ 본 연구는 2005학년도 대전대학교 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

* 대전대학교 통신공학과 (kimns@daejin.ac.kr)

논문번호 : KICS2005-08-951, 접수일자 : 2005년 8월 20일, 최종논문접수일자 : 2006년 2월 17일

데이터를 전송할 경우 다중경로 페이딩에 의해 심각한 심벌간 간섭(ISI) 및 칩간 간섭(ICI) 등에 의해 그 성능이 매우 열화 되는 단점이 있다. 이러한 WCDMA 시스템의 단점을 보완하면서 높은 데이터 전송률 요구를 만족시키기 위해 다중 반송파(MC: multicarrier) 변조기법이 해결책으로 제시되었다. MC-CDMA 시스템은 현재의 디바이스로는 구현이 용이하지 않은 광대역 시스템을 여러 개의 협대역 시스템으로 나누고 이를 다수 반송파에 실어 단일 반송파와 같은 효과를 내는 기법이다. 이러한 MC-CDMA 시스템은 ISI에 강한 OFDM의 장점과 가입자 수용용량이 큰 CDMA의 장점을 동시에 취하는 다중 시스템으로 미래의 고속 무선 멀티미디어 통신을 위한 적합한 기법이다^{[1][3]}.

참고문헌 [3]-[6]의 MC-CDMA 기법은 본질적으로 부 반송파의 수(N)와 처리이득(PG)은 같다고 가정한다. 그러나 원래의 심볼율이 주파수 선택적 페이딩을 겪을 만큼 높다면 확산 전에 직/병렬(S/P)변환을 한다. 즉, 높은 심볼률을 갖는 직렬 데이터 열은 P 개의 병렬 데이터열로 변환되어 각각 부 반송파에 실어 데이터를 전송하게 된다. 이렇게 직/병렬 변환에 의하여 다수개의 병렬 부채널로 나누어 전송하므로 각 심볼의 주기가 증가하게 되어 상호 부호간 간섭에 강한 특성을 가지게 된다. MC-CDMA 시스템 역시 DS-SS와 마찬가지로 주파수 영역에서 다른 사용자와 같은 채널을 쓰기 때문에 타 사용자 간섭(MAI)으로 인한 용량의 감쇄 및 신호 품질 저하를 겪게 된다. 따라서 다중 전송률 MC-CDMA 시스템에서 간섭제거기를 이용하여 다중접속 간섭을 제거하기 위한 많은 연구가 이루어졌다^{[7][12]}.

본 논문에서는 전송속도에 따라 병렬 부 채널의 수(P)를 조절 하는 방법으로 구성된 이중전송률 비동기(asynchronous) MC-CDMA 시스템 모델을 제시하고 하이브리드 다중접속 간섭제거기를 적용한 MC-CDMA 시스템의 성능을 분석한다. 또한 제안된 시스템의 성능과 기존의 시스템의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 비교, 평가하고자 한다.

II. 다중 전송률 MC-CDMA 시스템

MC-CDMA 시스템은 확산 코드에 따라 부호화된 하나의 정보신호를 여러 개의 부 반송파로 전송하는 변조방법이며 여러 개의 협대역 신호들을 주파수축으로 확산시켜 주파수 다이버시티를 얻을 수 있는

변조 기법이다^{[3][5]}. 그림 1은 이러한 MC-CDMA 시스템의 송수신기와 수신기 구조를 보이고 있다.

그림 1에서 하나의 데이터 심볼은 N 개의 병렬 가지로 복사되며 각각의 가지는 길이가 N 인 의사 랜덤 부호(PN code)의 칩(chip)에 의해 곱해진다. 그 후 인접한 부 반송파로부터 F/T_s 만큼 떨어진 서로 다른 부반송파로 BPSK 변조되는데 여기서 F 는 정수이다. 만약 $F=1$ 일 때 OFDM과 같이 직교성을 갖는 최소 주파수 간격을 유지할 수 있다. 그림 1에서, 부반송파의 수와 처리이득은 같다고 가정한다. 그러나 원래의 심볼율이 주파수 선택적 페이딩을 겪을 만큼 높다면 높은 심볼률을 갖는 직렬 데이터 열은 P 개의 병렬 데이터 열로 변환되어 각각 부 반송파에 실어 데이터를 전송하게 된다.

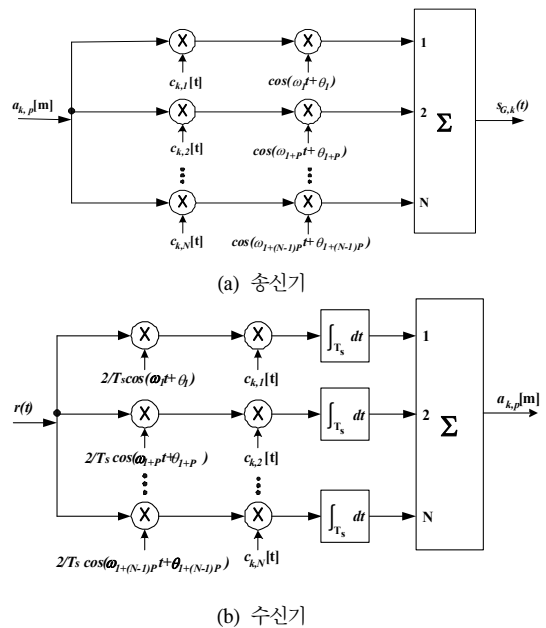


그림 1. MC-CDMA 시스템

그림 2는 이러한 MC-CDMA 시스템의 송수신기와 수신기 구조를 보이고 있다^{[1][2]}. P/T_s 의 전송률을 갖는 데이터열은 직/병렬 변환에 의해 주기가 T_s 인 P 개의 부채널로 나뉘어 진다. 각 부채널에 전송된 데이터는 N 개의 병렬 부채널에 같은 데이터를 실음으로 해서 주파수 다이버시티를 사용할 수 있다. 각각의 병렬 부채널에 있는 PN 개의 데이터는 같은 확산 시퀀스를 사용하여 확산 시킨다. 여기서 그림 1의 MC-CDMA 시스템은 그림 2의 시스템에서 $P=1$ 인 경우로 생각할 수 있다.

전송률이 서로 다른 다양한 서비스들을 하나로 통합한 다중 전송률(multirate) MC-CDMA 시스템 구현을 위해, 본 연구에서는 그림 2의 병렬 부채널의 수(P)를 변화시키는 방법으로 다중전송률 시스템을 구성한다. 사용자들은 전송률에 따라서 G 개의 그룹으로 나누어진다. G 번째 그룹의 사용자수와 전송률, 그리고 비트주기를 각각 K_G, R_G, T_G 로 나타내자. 여기서 각 그룹에 속하는 사용자들의 전송률은 $R_{G-1} = PR_G$ 의 관계를 만족하며 여기서 G 와 P 는 1보다 큰 정수이다. 또한 그룹 G 사용자의 한 비트 주기인 T_G 동안 $G-1$ 그룹의 사용자는 $T_{G-1} = T_G/P$ 인 P 개의 비트를 전송한다.

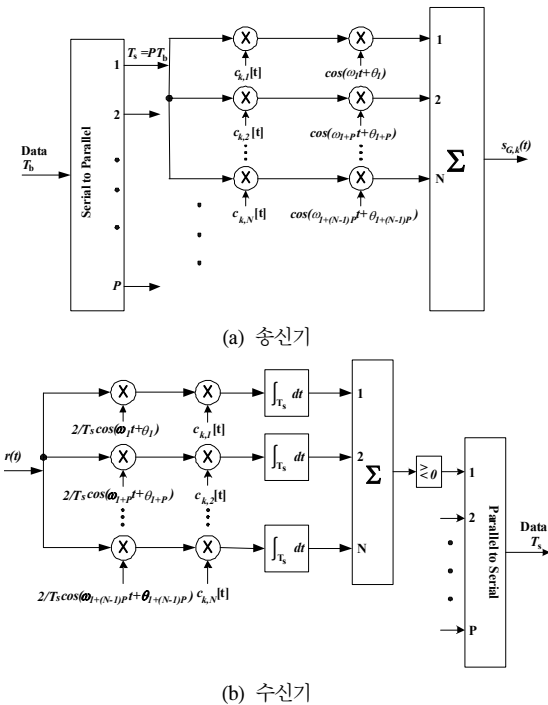


그림 2. 변형된 MC-CDMA 시스템

III. 이중 전송률 MC-CDMA 시스템

다중전송률 MC-CDMA 시스템에서, 그룹 G 에서 사용자 k 의 p ($p=1, 2, \dots, P$) 번째 신호를 전송하기 위한 출력신호는 식 (1)과 같다.

$$S_{G,k}(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{S_k} a_{k,p}[t] c_{k,n}(t) \cos(\omega_i t + \theta_{k,i}) \quad (1)$$

여기서 $a_{k,p}[t]$ 는 사용자 k 의 P 개의 데이터열(data

stream)중에서 p 번째 신호를 표시한다. 또한 $c_{k,n}(t)$ ($n=1, 2, \dots, N$)는 사용자 k 가 갖는 확산부호의 n 번째 칩(chip)을 나타낸다. 또한 여기서 $\omega_i = 2\pi f_i$ 이며, f_i 는 식 (2)와 같다²⁾.

$$f_i = f_c + (i-1)/T_s, \quad i = p + (n-1)P \quad (2)$$

전송되는 신호는 단일 경로에 대하여 각 부 반송파 주파수와 사용자에 따라 각각 다른 값을 가지므로 다음과 같은 임펄스응답을 갖는 채널을 통과한다고 가정한다.

$$h_k(t) = \beta_{k,i} e^{j\varphi_{k,i}} \quad (3)$$

여기서 $\beta_{k,i}$ 과 $\varphi_{k,i}$ 는 각각 사용자 k 의 i 번째 부반송파에 대한 감쇄성분과 위상변이 성분이다. $\beta_{k,i}$ 는 레일리(Rayleigh) 페이딩분포를 가지며 $\varphi_{k,i}$ 는 구간 $[0, 2\pi)$ 에서 균일분포(uniform distribution)를 갖는다고 가정한다.

본 연구에서는 이중전송률을 갖는 시스템을 고려하기로 한다. BPSK 변조방식을 사용한 이중 전송률 MC-CDMA 시스템에서, 고 데이터율(R_1) 사용자 그룹(G_1)의 사용자 수는 K_1 이고 저 데이터율(R_2) 사용자 그룹(G_2)의 사용자 수는 K_2 라 한다. 총 $K(=K_1 + K_2)$ 명의 사용자가 존재하고 $R_1 = 2R_2$ 의 관계를 갖는 이중전송률 MC-CDMA 시스템의 수신기에 수신된 수신신호 $r(t)$ 는 식 (4)와 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K_1} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sqrt{S_k} \beta_{k,i} a_{k,p}[t - \tau_k] c_{k,n}(t - \tau_k) \cos(\omega_i t + \phi_{k,i}) + \sum_{l=1}^{K_2} \sum_{n=1}^N \sqrt{S_l} \beta_{l,j} a_{l,1}[t - \tau_l] c_{l,n}(t - \tau_l) \cos(\omega_j t + \phi_{l,j}) + n(t) \quad (4)$$

f_j 는 식 (2)를 따르며 $\phi_{k,i} (= \theta_{k,i} + \varphi_{k,i} - \omega_i \tau_k)$ 는 위상왜곡성분, τ_k 는 사용자 k 의 수신신호의 지연 시간으로 $[0, T_s)$ 에서 균일한 분포를 갖는다. 또한 $n(t)$ 는 단측 전력밀도 스펙트럼이 N_0 인 가산성 백색 가우시안(AWGN) 잡음이다. 그룹 G_1 의 k_1 번째 사용자를 기준 사용자라고 할 때, 사용자 k_1 의 p 번째 비트에 대한 정합필터 수신기의 결정변수는 식 (5)와 같으며, k_1 번째 사용자의 p 번째 비트에 대한 추정치는 식 (6)으로 표현된다.

$$Z_{G_1, k_1}[p] = \int_{T_s} r(t) \sum_{n=1}^N c_{k_1, n}[t - \tau_{k_1}] \frac{2}{T_s} \cos(\omega_i t + \phi_{k_1, i}) dt \quad (5)$$

$$\widehat{a}_{k_1, p}[t] = \text{sgn}(Z_{G_1, k_1}[p]) \quad (6)$$

여기서 $\widehat{a}_{k_1, p}$ 는 비트 추정에러 확률(probability of bit estimate error) $\text{Pr}_{k_1, p}$ 을 갖는 $a_{k_1, p}$ 의 추정값이다¹³⁾.

IV. 하이브리드 간섭제거기법을 적용한 이중 전송률 MC-CDMA 시스템

간섭제거기법은 타 사용자 간섭성분을 단순히 잡음성분으로 간주하지 않고 모든 사용자의 신호를 동시에 검출함으로써 MAI를 추가적인 정보로 활용하는 기법이다. 본 연구에서는 하이브리드 간섭제거기법을 고려한다. 하이브리드 간섭제거기는 직렬 간섭제거기법(SIC)과 병렬 간섭제거기법(PIC)의 특성을 혼합한 형태로써, 같은 전송률을 갖는 사용자들을 그룹화(grouping)하여 그룹간에는 직렬 간섭제거기로 동작하고 그룹 내에서의 사용자들간에는 병렬 간섭제거기로 동작시킨다.

식 (6)과 같이 정합필터(Matched Filter) 수신기를 이용하여, Group 1 사용자들에 대한 초기비트 추정치를 구할 수 있다. 한 그룹에 속하는 사용자들은 평균적으로 비슷한 수신신호 세기를 가지기 때문에, Group 1 사용자들에 대해 병렬간섭제거기법을 적용하여 그룹내 사용자들 사이의 간섭에 의한 영향을 줄여줄 수 있다. 정합 여파기로 얻은 추정된 비트 $\widehat{a}_{k_1, p}$ 는 신호크기의 추정값으로 스케일(scale)된 후에 해당 코드 파형에 의해 재 확산된다. 정합여파수신기에서 나온 초기 비트추정치들을 이용하여 얻어낸 Group 1의 k_1 번째 사용자의 전송신호의 추정치는 식 (7)과 같다.

$$\widehat{x}_{G_1, k_1}(t) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sqrt{S_{k_1}} \beta_{k_1, i} \widehat{a}_{k_1, p}[t] c_{k_1, n}(t - \tau_{k_1}) \cos(\omega_i t + \phi_{k_1, i}) \quad (7)$$

Group 1의 k_1 번째 사용자에 대한 Group 1 사용자의 다중접속 간섭신호는 Group 1의 k_1 번째 사용자를 제외한 다른 사용자들의 전송신호 추정치를 모두 더해서 얻을 수 있다. Group 1에 속하는 모든 사용자에 대해서 다중접속 수신신호에서 빼 준 다

음 각 사용자에 대한 정합필터를 통과시켜서 새로운 비트 추정치를 얻어낸다. Group 1의 k_1 번째 사용자에 대한 다중접속 간섭신호가 제거된 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r_{G_1, k_1}^{(I)} = r(t) - \sum_{k=1, k \neq k_1}^{k_1} \widehat{x}_{G_1, k}(t) \quad (8)$$

여기서 위첨자 (I)는 간섭 제거과정을 나타낸다. 고 데이터율 사용자의 데이터는 직/병렬 변환에 의해 $p(p=1, 2..P)$ 개의 데이터 열로 변환된다. 이렇게 변환된 데이터 열 중에서 검출하고자 하는 데이터가 $p=1$ 인 경우와 $p \neq 1$ 경우로 나누어서 고려하고자 한다. 그 이유는 어떤 경우인가에 따라서 발생하는 간섭성분들이 다르기 때문이다. 본 연구와 같이 고 데이터율 사용자 그룹과 저 데이터율 사용자 그룹의 전송률이 $R_1=2R_2$ 의 관계라면 $p=2$ 로 생각해도 무방하다.

4.1 $p=1$ case

Group 1의 k_1 번째 사용자의 p 번째 비트에 대한 새로운 결정변수 $Z_{G_1, k_1}^{(I)}[p]$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Z_{G_1, k_1}^{(I)}[p] &= D_{G_1, k_1}^{(p)} + \overline{I_{G_1, k_1}} + \widehat{I_{G_1, k_1}} + \widetilde{I_{G_1, k_1}} + \eta_{G_1, k_1} \\ &= \int_{T_s} r_{G_1, k_1}^{(I)}(t) \sum_{n=1}^N c_{k_1, n}[t - \tau_{k_1}] \frac{2}{T_s} \cos(\omega_i t + \phi_{k_1, i}) dt \end{aligned} \quad (9)$$

상관기 출력은 크게 사용자 신호, MAI 및 잡음성분의 합으로 구성된다. 여기서 η_{G_1, k_1} 은 평균(mean)이 0이고 분산(variance)이 $N_0 N / T_s$ 인 AWGN 잡음이다. 또한 $\overline{I_{G_1, k_1}}$, $\widehat{I_{G_1, k_1}}$ 과 $\widetilde{I_{G_1, k_1}}$ 들은 MAI 성분들로서 각각 동일 그룹(G_1)내 같은 주파수를 사용하는 다른 사용자들로부터 발생하는 간섭성분, 동일 그룹(G_1)내 다른 주파수를 사용하는 다른 사용자들로부터 발생하는 간섭성분 및 타 그룹(G_2)내 동일 주파수를 사용하는 사용자들로부터 발생하는 간섭성분들을 의미하며 다음 식들로 표현된다.

$$\overline{I_{G_1, k_1}} = \sum_{k \neq k_1}^{K_1} \sum_{n=1}^N \sqrt{S_k} \beta_{k, i} [a_{k, 1}[t] - \widehat{a}_{k, 1}[t]] I_{k_1, k} \quad (10)$$

$$\widehat{I_{G_1, k_1}} = \sum_{k \neq k_1}^{K_1} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sqrt{S_k} \beta_{k, i} [a_{k, p}[t] - \widehat{a}_{k, p}[t]] J_{k_1, k} \quad (11)$$

$$\widetilde{I}_{G_i, k_1} = \sum_{l=1}^{K_2} \sum_{n=1}^N \sqrt{S_l} \beta_{l,j} a_{l,1} [t] I_{k_1, l} \quad (12)$$

여기서

$$I_{k_1, k} = \frac{1}{T_s} \int_{T_s} c_{k_1, n} [t - \tau_{k_1}] c_{k, n} [t - \tau_k] \cos(\phi_{k_1, i} - \phi_{k, i}) dt \quad (13)$$

$$J_{k_1, k} = \frac{1}{T_s} \int_{T_s} c_{k_1, n} [t - \tau_{k_1}] c_{k, n} [t - \tau_k] \cos((\omega_i - \omega_j)t + \phi_{k_1, i} - \phi_{k, i'}) dt \quad (14)$$

$$I_{k_1, l} = \frac{1}{T_s} \int_{T_s} c_{k_1, n} [t - \tau_{k_1}] c_{l, n} [t - \tau_l] \cos(\phi_{k_1, i} - \phi_{l, j}) dt \quad (15)$$

이며 i' 는 i 와 같지 않은 정수이다. 타 사용자에게 의한 간섭성분들은 각각 평균이 0인 가우시안 랜덤변수로 근사화시킬 수 있고, 이 성분들은 서로 상관되지 않는 가우시안 랜덤변수 이므로 이들의 합 역시 가우시안 랜덤변수가 된다. 고 전송률 그룹(G_i)에서 k_1 사용자의 첫 번째 데이터($p=1$)를 검출하는 경우에, 결정변수의 평균과 분산은 각각 식 (16)과 (17)로 주어진다^{[7]-[9]}.

$$E[Z_{G_i, k_1}^{(l)} [p]] = \sqrt{S_{k_1}} a_{k_1, 1} [t] \sum_{n=1}^N \beta_{k_1, i} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[Z_{G_i, k_1}^{(l)} [p]] &= \frac{2(K_1 - 1)S_k \bar{P}_k}{3N} (2Pr_{k_1, 1}) \\ &\cdot \sum_{p=2n=1}^P \sum_{i=1}^N \frac{1}{(i-i')^2} + \frac{2K_{2S} \bar{P}_1}{3N} + \frac{N_0 \cdot N}{T_s} \\ &+ \frac{2(K_1 - 1)S_k \bar{P}_k}{4\pi^2 N} (2Pr_{k_1, p}) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $\bar{P}_{k, i} = \frac{1}{2} E[(\beta_{k, i})^2]$ 는 사용자 k 의 i 번째 부반송파의 국부평균전력(local mean power)이며, 반송파의 국부평균전력이 동일하다고 가정하면 사용자 k 의 총 국부평균전력은 $\bar{P}_k = N\bar{P}_{k, i}$ 가 된다^[10]. $\beta_{Tot} = \sum_{n=1}^N \beta_{k_1, i}$ 가 주어진 경우 조건부 비트 오류율(BER)은 식 (18)과 같다^{[2][8]}.

$$P[e|\{\beta_{Tot}\}] = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{\frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^N \beta_{k_1, i} \right)^2}{\sigma_{Z_{G_i, k_1}^{(l)} [p]}^2}} \right) \quad (18)$$

여기서 $\sum_{n=1}^N \beta_{k_1, i}$ 는 i.i.d Rayleigh 분포를 갖는 랜덤변수의 합이며, 평균과 분산은 각각 $\mu_{\beta_{Tot}} = \sqrt{\frac{\pi}{2} N \bar{P}_{k_1}}$, $\sigma_{\beta_{Tot}}^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \bar{P}_{k_1}$ 이다. 전체 오류식은 식 (18)를 이 랜덤변수에 대해 평균을 구함으로서 얻을 수 있다. N 이 크다고 가정하고 Central Limit Theorem (CLT)의 근사화 방법을 이용하여 평균 비트 오류확률을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{b, 1}(e) &= \int_{-\infty}^{\infty} P[e|\{\beta_{Tot}\}] f(\beta_{Tot}) d\beta_{Tot} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\beta_{Tot}}^2}} e^{-\frac{(\beta_{Tot} - \mu_{\beta_{Tot}})^2}{2\sigma_{\beta_{Tot}}^2}} \cdot \\ &\quad \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{\frac{1}{2} \left(\sum_{n=1}^N \beta_{k_1, i} \right)^2}{\sigma_{Z_{G_i, k_1}^{(l)} [p]}^2}} \right) d\beta_{Tot} \end{aligned} \quad (19)$$

신호전력(S)을 1로 가정하고, 검출에 의한 평균 비트오류 확률은 식 (20)과 같다. 여기서 $\bar{P}_{k_1(p=1)}$ 을 \bar{P}_1 으로 표시하였다.

$$p_{b, 1}[e] = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{\frac{\pi}{4} \frac{N \bar{P}_1}{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \bar{P}_1 + Y}}{1}} \right) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} Y &= \frac{4(K_1 - 1)\bar{P}_k (Pr_{k_1, 1})}{3N} + \frac{(K_1 - 1)\bar{P}_k (Pr_{k_1, 1})}{\pi^2 N} \\ &\quad \sum_{p=2n=1}^P \sum_{i=1}^N \frac{1}{(i-i')^2} + \frac{2K_{2S} \bar{P}_1}{3N} + \frac{N_0 \cdot N}{T_s} \end{aligned}$$

4.2 $p \neq 1$ case

사용자 k_1 을 기준사용자라고 할 경우라도 k_1 사용자의 첫번째 데이터 이외의 데이터를 검출하는 경우도 발생하므로, 이 절에서는 $p \neq 1$ 경우를 위한 신호의 검출을 고려한다. 본 연구의 해석을 위해서는 $p=2$ 로 놓고 해석해도 무방하다. k_1 사용자의 p 번째 데이터를 검출하기 위한 결정변수는 식 (21)

과 같다.

$$Z_{G_1, k_1}^{(j)}[p] = \int_{T_s} r_{G_1, k_1}^{(j)}(t) \sum_{n=1}^N c_{k_1, n} [t - \tau_{k_1}] \frac{2}{T_s} \cos(\omega_i t + \psi_{k_1, i}) dt$$

$$= D_{G_1, k_1}^{(p)} + \bar{I}_{G_1, k_1} + \hat{I}_{G_1, k_1} + \tilde{I}_{G_1, k_1} + \eta_{G_1, k_1} \quad (21)$$

여기서 \overline{I}_{G_1, k_1} , \widehat{I}_{G_1, k_1} 과 \widetilde{I}_{G_1, k_1} 들은 MAI 성분들로서 각각 동일 그룹(G_1)내 같은 주파수를 사용하는 사용자들로부터 발생하는 간섭성분, 동일 그룹(G_1)내 다른 주파수를 사용하는 다른 사용자들로부터 발생하는 간섭성분 및 타 그룹(G_2)내 다른 주파수를 사용하는 사용자들로부터 발생하는 간섭성분들을 한다. 4.1절의 해석방법에 따라, 고 전송률 그룹(G_1)에서 검출하기 위한 신호가 k_1 사용자의 p 번째 데이터라 할 경우에, 결정변수의 평균과 분산은 각각 식 (22)과 (23)로 주어지며, 검출에 의한 평균 비트 오류 확률은 식 (24)과 같다.

$$E[Z_{G_1, k_1}^{(j)}[p]] = \sqrt{S_{k_1}} a_{k_1, p}[t] \sum_{n=1}^N \beta_{k_1, i} \quad (22)$$

$$\text{Var}[Z_{G_1, k_1}^{(j)}[p]] = \frac{4(K_1 - 1)S_k \bar{P}_k (\text{Pr}_{k, p}) + \frac{(K_1 - 1)S_k \bar{P}_k}{\pi^2 N} (\text{Pr}_{k, p})}{3N} \cdot \sum_{p=2}^P \sum_{n=1}^N \frac{1}{(i - i')^2} + \frac{K_2 S_1 \bar{P}_1}{2\pi^2 N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{(i - j)^2} + \frac{N_0 \cdot N}{T_s} \quad (23)$$

$$p_{b, p}[e] = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{\pi}{4} \frac{N \bar{P}_p}{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \bar{P}_p + Y'}} \right) \quad (24)$$

$$Y' = \frac{4(K_1 - 1)\bar{P}_k (\text{Pr}_{k, p}) + \frac{(K_1 - 1)\bar{P}_k}{\pi^2 N} (\text{Pr}_{k, p})}{3N} \sum_{p=2}^P \sum_{n=1}^N \frac{1}{(i - i')^2} + \frac{K_2 \bar{P}_1}{2\pi^2 N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{(i - j)^2} + \frac{N_0 \cdot N}{T_s}$$

여기서 $\bar{P}_{k_1 (p \neq 1)}$ 을 \bar{P}_p 으로 표시하였다. 전송되는

비트는 동일 확률을 갖는 P 개의 병렬가지를 통해 전송된다고 가정하면 고 전송률을 갖는 시스템의 평균 비트오류율은 식 (20)과 (24)에 의해 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$p_b(e) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P p_{b, p}(e) \quad (25)$$

또한 Group 1의 k_1 번째 사용자의 P 번째 비트에 대한 새로운 추정치는 다음과 같다.

$$\widehat{a}_{k_1, p}^{(j)}[t] = \text{sgn}(Z_{G_1, k_1}^{(j)}[p]) \quad (26)$$

새로운 비트 추정치를 이용하여 Group 1 사용자들에 대한 전송신호를 재 추정한다. 간섭제거 과정 후에 Group 1의 k_1 번째 사용자에 대한 전송신호의 추정치는 식(27)과 같이 주어진다.

$$x_{G_1, k_1}^{(j)}(t) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \sqrt{S_{k_1}} \beta_{k_1, i} a_{k_1, p}^{(j)}[t] c_{k_1, n}(t - \tau_{k_1}) \cos(\omega_i t + \phi_{k_1, i}) \quad (27)$$

그룹간 MAI제거를 위해 그룹단위(group-wise) 직렬 간섭제거기법이 사용된다. 직렬 간섭제거기는 정합필터의 출력을 바탕으로 혹은 진폭추정값을 바탕으로 수신된 신호들의 전력순위를 판단하여, 최대 전력을 가지는 그룹(group)의 신호를 제일 먼저 추정한 후 수신신호에서 감산하고 그 나머지에서 또 다시 연속적으로 그 다음 전력 사용자 그룹의 신호 추정치를 제거하게 된다. 이와 같은 과정을 가장 작은 세기의 그룹 신호가 검출될 때까지 반복 수행한다. Group 1 사용자들에 대한 전송신호의 추정치를 모두 더해 수신신호로부터 제거하여 $r'(t)$ 를 얻는다.

$$r'(t) = r(t) - \sum_{k=1}^{K_1} x_{G_1, k}^{(j)}(t) \quad (28)$$

$r'(t)$ 를 새로운 수신신호로 하여 Group 2 사용자들에 대한 초기비트 추정치를 정합여과기를 이용하여 구한다. Group 2의 k_2 번째 사용자의 p 번째 비트에 대한 결정변수 $Z_{G_2, k_2}[p]$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_{G_2, k_2}[p] = \int_{T_s} r'(t) \sum_{n=1}^N c_{k_2, n}$$

$$[t - \tau_{k_2}] \frac{2}{T} \cos(\omega_j t + \phi_{k_2, j}) dt \quad (29)$$

Group 2의 k_2 번째 사용자의 p 번째 비트에 대한 추정치는 다음과 같이 주어진다.

$$\widehat{a}_{k_2, p}(t) = \text{sgn}(Z_{G_2, k_2}[p]) \quad (30)$$

정합 여파기로부터 얻은 추정된 비트 $\widehat{a}_{k_2, 1}$ 는 신호 크기의 추정값으로 스케일(scale)된 후에 해당 코드 파형에 의해 재 확산된다. 정합여파 수신기에 서 나온 초기 비트추정치를 이용하여 얻어낸 Group 2의 k_2 번째 사용자의 전송신호 추정치는 다음과 같 이 주어진다.

$$\widehat{x}_{G_2, k_2}(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{S_{k_2}} \beta_{k_2, n} \widehat{a}_{k_2, 1} [t] c_{k_2, n}(t - \tau_{k_2}) \cos(\omega_j t + \phi_{k_2, j}) \quad (31)$$

Group 2 내에서 사용자간의 간섭신호의 영향을 병렬간섭제거기법을 사용하여 구하기 위하여, Group 2의 k_2 번째 사용자에 대한 다중접속 간섭신호가 제 거된 수신신호는 다음과 같이 주어진다.

$$r_{G_2, k_2}^{(j)}(t) = r(t) - \sum_{l=1, l \neq k_2}^{K_2} \widehat{x}_{G_2, l}(t) \quad (32)$$

Group 2의 k_2 번째 사용자의 p 번째 비트에 대한 개선된 결정변수 $Z_{G_2, k_2}^{(j)}[p]$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Z_{G_2, k_2}[p] &= \int_T r_{G_2, k_2}^{(j)}(t) \sum_{n=1}^N c_{k_2, n}[t - \tau_{k_2}] \frac{2}{T} \cos(\omega_j t + \phi_{k_2, j}) dt \\ &= D_{G_2, k_2}^{(p)} + \overline{I_{G_2, k_2}} + \widehat{I_{G_2, k_2}} + \widetilde{I_{G_2, k_2}} + \eta_{G_2, k_2} \end{aligned} \quad (33)$$

여기서 $\overline{I_{G_2, k_2}}$, $\widehat{I_{G_2, k_2}}$ 과 $\widetilde{I_{G_2, k_2}}$ 는 MAI 성분들로서 각 동일 그룹(G_2)내 같은 주파수를 사용하는 다른 사용자들로부터 발생하는 간섭성분, 타 그룹(G_1)에 같은 주파수를 사용하는 사용자들로부터 발생하는 간섭성분 및 타 그룹(G_1)내 다른 주파수를 사용하는 사용자들로부터 발생하는 간섭성분들을 나타낸다. 결정변수의 평균과 분산은 각각 식 (34)과 (35)로 주어진다.

$$E[Z_{G_2, k_2}^{(j)}[p]] = \sqrt{S_{k_2}} a_{k_2, p} [t] \sum_{n=1}^N \beta_{k_2, n} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[Z_{G_2, k_2}^{(j)}[p]] &= \frac{2(K_2 - 1)S_2 \overline{P}_l}{3N} (2Pr_{l, 1}) + \frac{2K_1 S_1 \overline{P}_k}{3N} (2Pr_{k, 1}) \\ &+ \frac{2K_1 S_1 \overline{P}_k}{4\pi^2 N} \sum_{p=2}^P \sum_{n=1}^N \frac{1}{(i-j)^2} + \frac{N_0 \cdot N}{T_s} \end{aligned} \quad (35)$$

Group 2의 k_2 번째 사용자의 개선된 p 번째 비트에 대한 추정치는 다음과 같이 구해진다.

$$\widehat{a}_{k_2, 1}^{(j)}[t] = \text{sgn}(Z_{G_2, k_2}^{(j)}[p]) \quad (36)$$

V. 성능 분석

본 논문에서는 하이브리드 다중접속 간섭제거기를 적용한 다중전송률 비동기 MC-CDMA 시스템의 성능을 분석하였으며, 이 절에서는 제안된 기법을 통한 성능과 기존의 시스템의 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해 비교, 평가하고자 한다.

성능분석을 위해, 전체 K 명의 사용자가 존재하는 이중전송률 MC-CDMA 에서 고 데이터율(R_1) 사용자 그룹(G_1)의 사용자 수는 K_1 이고 저 데이터율(R_2) 사용자 그룹(G_2)의 사용자 수는 K_2 라 한다. 또한 $R_1 = 2R_2$ 의 관계를 가정하므로 $P = 2$ 라 한다. 이론적으로 평가한 BER 성능을 사용자 수(K)와 비트 에너지대 잡음전력비(E_b/N_0)를 파라미터로 하여 AWGN과 레일리 페이딩 통신로에서 EGC 다이버시티 수신기법 사용하는 것으로 하여 평가한다. 여기서 각 사용자에 대한 완전한 전력제어(power control)가 이루어진 것으로 가정한다.

그림 3은 간섭제거기를 사용하지 않은 시스템의 성능분석을 위해 단일 전송률을 갖는 참고문헌 [6]의 시스템과 제안된 시스템의 성능을 비교하였다.

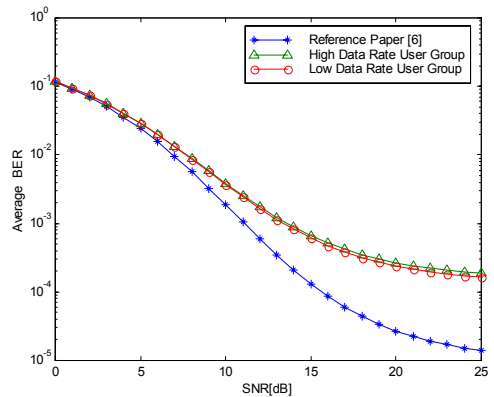


그림 3. 간섭제거전의 평균오류률

여기서 $N=15$ 이며 총 20명의 사용자가 존재한다고 가정한 상태에서 각 그룹의 사용자는 각각 10명으로 하였다. 그림 3에서 간섭 제거전의 성능은 G_1 과 G_2 그룹의 성능이 유사하다. 이것은 간섭제거를 하지 않은 상태에서의 성능은 M.F.(Matched Filter) 수신기 출력단의 BER 성능을 분석한 것 이기 때문에 사용자가 속한 그룹의 의미는 크지 않기 때문이다. 그러나 단일 전송률을 갖는 시스템보다는 성능이 떨어지는 것을 알 수 있다.

그림 4는 $E_b/N_0=10\text{dB}$, $N=15$ 에 대하여 각 그룹별 사용자 증가에 따른 오류율의 변화를 표시하였다. 한 그룹 사용자의 수는 고정시키고 다른 그룹 사용자의 수를 변화시키면서 각 그룹별 사용자 증가에 따른 오류율의 변화를 표시하였다. 그림에서 보듯이 사용자 수가 20명 이상으로 증가하는 경우 신호를 복구하기 힘들 정도로 오류율이 높아짐을 알 수 있었으며 고 데이터율 사용자의 수의 증가가 저 데이터율 사용자 수의 증가보다 시스템의 성능 저하에 더욱 더 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

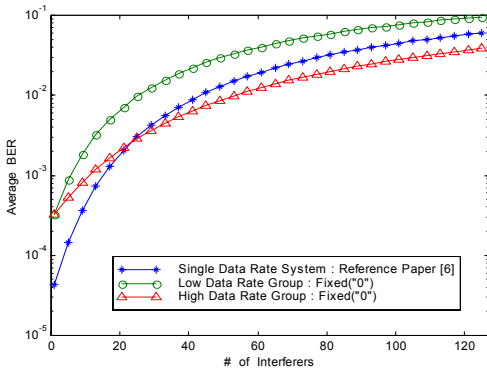


그림 4. 그룹 내 사용자 변화에 따른 평균오류율

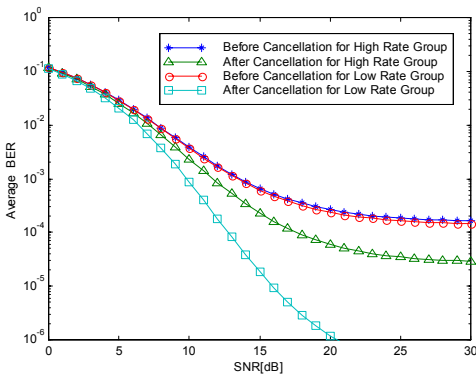


그림 5. 간섭제거전과 후의 평균오류율 성능

그림 5는 간섭잡음을 제거하기 전과 후의 BER 성능개선을 보여주고 있다. 여기서 $N=15$ 이고, 전체 사용자(K)는 20명으로 고려 하였고 각 그룹의 사용자는 각각 10명으로 동일하다고 가정 하였다. 또한 모든 사용자는 동일한 전력을 갖는 것으로 가정하였으며, 완벽한 비트추정(bit estimate)으로 분석하였다. 간섭제거 후의 성능분석은 비트 추정이 완벽하다는 가정하에 성능분석을 했기 때문에 많은 성능향상을 보이고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 단일 전송률 MC-CDMA 시스템의 기능을 향상하여, 전송률이 서로 다른 다양한 멀티미디어 서비스를 지원하기 위한 다중전송률 비동기(asynchronous) MC-CDMA 시스템 모델을 제시하였고, 하이브리드 다중접속 간섭제거기를 적용한 MC-CDMA 시스템의 성능을 분석하였다. 제안된 MC-CDMA 기법은 본질적으로 부 반송파의 수(N)와 처리이득(PG)은 같다고 가정하고, 높은 심볼률을 갖는 직렬 데이터 열은 P 개의 병렬 데이터열로 변환되어 각각 부 반송파에 실어 데이터를 전송하게 된다. 본 연구에서는 $P=2$ 로 가정하였다. 여기서 채널 환경은 레일리 페이딩 채널을 고려하였다.

성능분석은 수학적인 방법과 컴퓨터 시뮬레이션이 이용되었다. 분석 결과는 다중접속방식에서 타 사용자에 의한 간섭 신호가 전체 시스템 성능에 많은 영향을 미치고 있었으며, 하이브리드 간섭제거기법을 통해 간섭의 영향을 많이 감소시킬 수 있었다. 또한 고, 저 전송그룹으로 분리된 경우, 고 사용자 그룹의 성능보다 저 사용자 그룹의 성능이 좋은 것을 알 수 있는데, 이것은 그룹별 직렬간섭제거기법을 통하여 저 사용자의 신호를 검출할 때는 고 사용자들에 의한 간섭성분들이 제거되기 때문이다.

참고 문헌

- [1] E.A. Sourour and M. Nakagawa, "Performance of Orthogonal Multicarrier CDMA in Multipath Fading Channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 3, pp. 356-367, Mar. 1996.
- [2] X. Gui and T. S. Ng, "Performance of Asynchronous Orthogonal Multicarrier CDMA System in Frequency Selective Fading Channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 7, pp.

1084-1091, July 1999.

[3] Shinsuke Hara, "Overview of Multicarrier CDMA," *IEEE Commun. Magazine*, pp. 126-133, December, 1997.

[4] S. Hara, T. Lee and R. Prasad, "BER Comparison of DS-CDMA and MC-CDMA for Frequency Selective Fading Channels," *Proc. of 7th Tyrrhenian International Workshop on Digital Commun.*, Sept. 1995.

[5] R. Parasad and S. Hara, "An Overview of Multi-carrier CDMA," *IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings*, Vo. 1, pp. 107-114, Sept. 1996.

[6] N. Yee, J. P. Linnartz and G. Fettweis, "Multi-Carrier CDMA in Indoor Wireless Radio Networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E77-B, pp. 900-904, July 1994.

[7] J.G. Andrews and T.H.Y. Meng, "Performance of Multicarrier CDMA with Successive Interference Cancellation in a Multipath Fading Channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol 52, pp. 811-822, May 2004.

[8] H.K. Park, E.B. Kim, Y.W. Lee and K.H. Tchah, "Multi-carrier CDMA System with Parallel Interference Cancellation for Multipath Fading Channels," *The 9th International Symposium on PIMRC*, vol 2, pp. 513-517, Sept. 1998.

[9] Z. Li and M. Latva-aho, "Multicarrier CDMA System with Parallel Interference Cancellation in Multipath Fading Channels," *ICC 2002*, vol 1, pp. 227-231, April 2002.

[10] Jiho Jang and Kwang Bok Lee, "Effects of frequency offset on MC/CDMA system performance," *IEEE Communications Letters*, Vol. 3, pp. 196-198, July 1999.

[11] 한승희, 이재홍, "이중전송률 DS-CDMA 시스템을 위한 개선된 그룹별 연속간섭제거 수신기," *2002년도 한국통신학회 하계종합학술대회*, pp. 433-436, 2002년 7월.

[12] Hoon Huh, Youngkwon Cho and Jaehong Lee, "Performance enhancement of a multicarrier DS/CDMA system through interference cancellation," *IEEE WCNC*, vol. 3, pp. 1576-1580, Sept. 1999.

[13] Gao Xue and Li Chengshu, "Performance of Partial Interference Cancellation in DS-CDMA System with Delay Estimation Errors," *PIMRC 2000*, Vol. 2, pp.1518-1521, Aug. 2000.

김 남 선(Nam-sun Kim)

정희원



1991년 8월 한양대학교 전자통신공학과 공학석사
 1995년 8월 한양대학교 전자통신공학과 공학박사
 1996년 3월~현재 대전대학교 통신공학과 부교수
 <관심분야> 멀티미디어 이동통신, 무선 통신시스템