

레이레이 페이딩환경에서의 다원접속 간섭제거기술을  
이용한 다중반송파 동기 DS/CDMA 방식에 관한 연구  
A Study on Multi-Carrier Synchronous DS/CDMA  
with Multiple Access Interference Cancellation  
in Rayleigh Fading Channel

이 우 재 · 한 영 열  
(한양대학교 전자통신공학과)

WooJae Lee · YoungYearl Han  
( Dept. of Electronic Communication Engineering, Hanyang University)

Abstract

In this paper, we apply a digital modulation scheme called Multi-Carrier CDMA (MC-CDMA) to the technique for cochannel interference cancellation using reference correlator, previously proposed. The cancellatoin method will be effective for reducing the interference components which are other users' signal components in a common channel, but fading effect of channel remains as the degrading factor of channel condition. For compensating it, MC-CDMA scheme is introduced to combat agianst the multipath fading. We analyze above system and derive the average probability of error in AWGN and Rayleigh fading environment.

1. 서 론

본 논문은 제안된 논문[1]에 다중반송파 CDMA기법을 첨가하여 성능을 개선시킨다. 제안된 논문에서는 부호할당기법 (code phase assignment)을 이용한 동기 DS/CDMA 방식에서 타사용자에 의해 발생하는 간섭을 제거하는 기술이 제안되었다. 실내 무선통신환경이나, 휴대통신환경에서는 채널특성이 상당히 느리게 변화한다. 채널조건이 빠르게 변화하지 않기 때문에 모든 사용자의 비트동기를 맞추는것이 가능하고, 따라서 동기 DS/CDMA를 가정할 수 있다. 간섭제거는 기존의 상관수신기에 부가한 기준상관수신기

에 의해 이루어진다. 그러나 상기의 기술은 다중경로 페이딩에 대한 강력한 특성을 가지고 있지 못하다. 다중경로 페이딩을 극복하기 위하여 본 논문에서는 다중반송파 CDMA 방식을 이용한다. 다중반송파 CDMA 방식에서는 각 데이터 심볼이 PN코드에 의해 확산된 후 M개의 부(副)반송파로 동시에 변조된다. 신호들은 PN코드에 의해 확산된 후 다수의 부반송파로 서로 중복되지 않게 변조되기 때문에 신호의 대역폭은 크게 넓어진다. 다수의 사용자에게 의해 동일한 부반송파군(群)이 이용되지만 각 사용자는 각기 다른 확산부호에 의해 구분되어진다. 서로 다른 대역을 차지하는 변조된 부반송파들은 서로 다른 수준의 페이딩을 겪게 되고, 결과적으로 주파수 다이버시티를 이루게 된다.

다중반송파 CDMA 신호는 M개의 부반송파 성분들로 이루어져 있기 때문에 수신단에서 이들 성분들을 합성할 필요가 있다. 이미 제안된 여러 합성방법들중에서 동일이득합성(Equal Gain Combining), 최대비합성(Maximum Ratio Combining), 그리고 순서통계량(Order Statistics)을 이용한 합성을 고려한다. 순서통계량법은 M개의 수신가지들 중에서 수신전력이 가장 큰  $\mu$  개가 순서적으로 취하여져 MRC와 같은 방식으로 합성된다. 각 방법에 대한 성능을 도심 무선통신환경의 수학적 모델링으로 타당한 레일리 페이딩 환경에서의 평균오류확률식으로 분석한다.

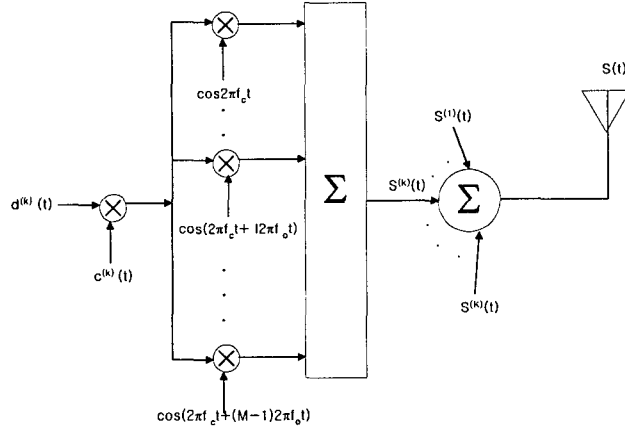
## II. 시스템 설명

### 1. 변 조

BPSK 변조방식을 고려한다. K명의 사용자중 k번째 사용자의 l번째 부반송파 성분의 신호는,

$$s_l^{(k)}(t) = A d^{(k)}(t) c^{(k)}(t) \cos(2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_o t), \quad 1 \leq k \leq K, \quad 0 \leq l \leq M-1 \quad (1)$$

이다.  $d^{(k)}(t)$ 와  $c^{(k)}(t)$ 는 각각 k번째 사용자의 정보부호열과 확산부호열이다.  $f_o$ 는 부반송파의 간격으로 각 부반송파들은 서로 충분히 떨어져 있어 인접대역과의 간섭이 발생하지 않는다. 각 부반송파 가지의 신호들은 더해져서 k번째 사용자의 송신신호  $s^{(k)}(t)$ 를 이룬다.



<그림 1> 다중부반송파를 이용한 송신기 모델

$$\begin{aligned}
 s^{(k)}(t) &= \sum_{l=0}^{M-1} s_l^{(k)}(t) \\
 &= \sum_{l=0}^{M-1} A d^{(k)}(t) c^{(k)}(t) \cos(2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_o t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

또한, 각 사용자의 신호들은 더해져서  $s(t)$ 를 구성한다.

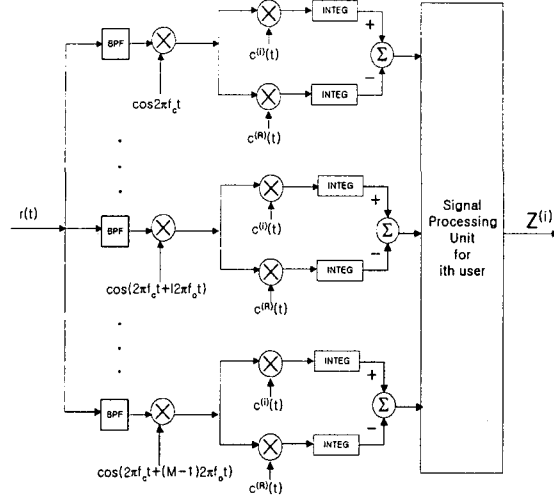
$$s(t) = \sum_{k=1}^K s^{(k)}(t) \tag{3}$$

## 2. 채널

채널은 느린 주파수 선택적 레일레이 페이딩 채널로 가정한다. 각 대역의 신호들은 비선택적으로 페이딩을 겪고, 또한 상호 독립적이다. 1번째 대역의 임펄스응답이  $\alpha_1 e^{j\beta_1}$ 로 주어질 때  $\alpha_i$  과  $\beta_i$ 은 각각 상호 독립적이고 동일한 레일레이 확률변수와 상호 독립적이고 동일한, 구간  $(0, 2\pi)$ 의 균일 확률변수이다.

## 3. 복 조

그림2는 i번째 사용자의 수신기이다. 채널을 전파한 후의 수신 신호는



<그림 2>  $i$ 번째 사용자의 수신기 모델

$$\begin{aligned}
 r(t) &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{M-1} a_l A d^{(k)}(t - \tau_l) c^{(k)}(t - \tau_l) \cdot \cos[2\pi f_c(t - \tau_l) + l \cdot 2\pi f_o(t - \tau_l)] + n(t) \\
 &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^{M-1} \text{Re}\{a_l e^{j\beta_l}\} A d^{(k)}(t) c^{(k)}(t) \cdot \cos[2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_o t] + n(t)
 \end{aligned} \quad (4)$$

이고, 여기서  $n(t)$ 는 평균이 0이고 양측 전력밀도가  $N_0/2$ 인 AWGN이고,  $\tau_l$ 은  $[0, T_b]$ 사이의 임의의 값을 가지는 전파지연이다.

각 부반송파 가지의 수신기는 두개의 상관수신기로 구성되었다. 상측 수신기는 지정 사용자의 신호를 그 사용자의 확산부호로서 복조하기 위해 사용되어진다. 하측 수신기는 송신단에서 사용되지 않은 부호  $c^{(R)}(t)$ 를 역확산 부호로 사용하여 간섭성분을 제거하기 위해 부가된다. 모든 부반송파 가지에서 위의 과정을 수행하며  $i$ 번째 사용자의 1번째 가지의 상측 수신기의 출력  $Z_{i,U}^{(i)}$ 와 하측 수신기의 출력  $Z_{i,L}^{(i)}$ 를 생성한다.

$$\begin{aligned}
 Z_{i,U}^{(i)} &= \int_0^{T_b} \left\{ \sum_{k=1}^K a_l A d^{(k)}(t) c^{(k)}(t) \cos(2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_o t) + n(t) \right\} \cdot c^{(i)}(t) \cos(2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_o t) dt \\
 &= a_l \frac{A T_b}{2} d^{(i)} + a_l \sum_{k=1, k \neq i}^K \int_0^{T_b} A d^{(k)}(t) c^{(k)}(t) \cdot c^{(i)}(t) \cos^2(2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_o t) dt + \eta_{i,U}
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\eta_{i,U} = \int_0^{T_b} n(t) c^{(i)}(t) \cos(2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_o t) dt \quad (6)$$

$$E(\eta_{i,U})=0, \quad \text{Var}(\eta_{i,U})=N_o T_b/4 \quad (7)$$

이다. 모든 사용자의 정확한 동기를 가정하였으므로 임의의 위상  $e^{j\beta}$  과 전파지연  $\tau$  의 효과는 정확하게 보상되어 질 수 있다. 하측 수신기의 출력은

$$Z_{i,L}^{(i)} = a_i \sum_{k=1}^K \int_0^{T_b} A d^{(k)}(t) c^{(k)}(t) c^{(R)}(t) \cdot \cos^2(2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_0 t) dt + \eta_{i,L} \quad (8)$$

여기서,

$$\eta_{i,L} = \int_0^{T_b} n(t) c^{(R)}(t) \cos(2\pi f_c t + l \cdot 2\pi f_0 t) dt, \quad (9)$$

$$E(\eta_{i,L})=0, \quad \text{Var}(\eta_{i,L})=N_o T_b/4, \quad (10)$$

그리고,

$$\int_0^{T_b} c^{(k)}(t) c^{(i)}(t) dt = -\frac{1}{N}, \quad \text{for } i \neq k \quad (11)$$

이다. 구한 값의 차가  $Z_i^{(i)}$  을 형성하는데,  $i$  번째 사용자의  $l$  번째 부반송파까지의 상관출력은 다음과 같이 계산되어진다.

$$Z_i^{(i)} = Z_{i,U}^{(i)} - Z_{i,L}^{(i)} = a_i \cdot \frac{A T_b}{2} \left(1 + \frac{1}{N}\right) \cdot d^{(i)} + \eta_i \quad (12)$$

여기서,

$$\eta_i = \eta_{i,U} - \eta_{i,L},$$

$$E(\eta_i)=0, \quad \text{Var}(\eta_i)=N_o T_b/2. \quad (13)$$

이다. 신호처리단에서는 각 가지의 출력  $Z_i^{(i)}$  에  $l$  번째 가지의 이득수정치  $g_l$  가 곱해진 후 합성되어진다.  $i$  번째 사용자의 결정변수  $Z^{(i)}$  는

$$Z^{(i)} = \sum_{l=0}^{M-1} g_l \cdot Z_i^{(i)} \quad (14)$$

이다. 여기서, EGC(동일이득합성)일때  $g_l=1$  이고, MRC(최대비합성)와 순서통계량일때  $g_l = a_l$  이다.

### III. 성능 분석

## 1. 동일이득합성 (EGC)

동일이득합성법으로 각 가지의 출력들은 다음과 같이 합성되어 결정변수  $Z^{(i)}$ 는

$$\begin{aligned} Z^{(i)} &= \sum_{l=0}^{M-1} Z_l^{(i)} \\ &= \sum_{l=0}^{M-1} \left[ a_l \cdot \frac{AT_b}{2} \left(1 + \frac{1}{N}\right) \cdot d^{(i)} + \eta_l \right] \\ &= \frac{AT_b}{2} \left(1 + \frac{1}{N}\right) \cdot d^{(i)} \cdot \sum_{l=0}^{M-1} a_l + \sum_{l=0}^{M-1} \eta_l \end{aligned} \quad (15)$$

이 되고,

$$P(e) = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{MN_0} \left(\sum_{l=0}^{M-1} a_l\right)^2 \left(1 + \frac{1}{N}\right)}\right) \quad (16)$$

이다. 여기서,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$  이고,

$E_b = A^2 T_b / 2$  이다. 레일레이 페이딩 조건에서 평균오류확률을 유도하려면  $\left(\sum_{l=0}^{M-1} a_l\right)^2$ 의 결합확률밀도함수를 유도하여야 한다. 그러나 이것의 결합확률밀도함수를 구한다는 것은 매우 어렵다고 알려져 있기 때문에 다음의 관계식을 이용하여 평균오류확률의 상한치를 구하여 본다[2].

$$\left(\sum_{l=0}^{M-1} a_l\right)^2 \geq \sum_{l=0}^{M-1} a_l^2 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P(e) &\leq Q(\sqrt{2\gamma_b}) \\ &= P'(e) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서,

$$\gamma_b = \frac{E_b}{2MN_0} \left(\sum_{l=0}^{M-1} a_l^2\right) \left(1 + \frac{1}{N}\right)^2 \quad (19)$$

이다.

$$f(\gamma_b) = \frac{1}{(M-1)! \gamma_c^M} \gamma_b^{M-1} e^{-\frac{\gamma_b}{\gamma_c}}, \quad \gamma_b \geq 0 \quad (20)$$

여기서,

$$\overline{\gamma_c} = \frac{E_b}{2MN_0} \left(1 + \frac{1}{N}\right)^2 E[\alpha_i^2] \quad (21)$$

이다. 평균 상한치를 구하면

$$\begin{aligned} \overline{P}(e) &= \int_0^\infty Q(\sqrt{2\gamma_b}) f(\gamma_b) d\gamma_b \\ &= \left[\frac{1}{2}(1-\nu)\right]^M \sum_{k=0}^{M-1} \binom{M-1+k}{k} \left[\frac{1}{2}(1+\nu)\right]^k \end{aligned} \quad (22)$$

여기서,  $\nu = \sqrt{\frac{\gamma_c}{1+\gamma_c}}$  이다.

## 2. 최대비합성 (MRC)

$$\begin{aligned} Z^{(i)} &= \sum_{l=0}^{M-1} a_l \cdot Z_l^{(i)} \\ &= \frac{AT_b}{2} \left(1 + \frac{1}{N}\right) \cdot d^{(i)} \cdot \sum_{l=0}^{M-1} \alpha_l^2 + \sum_{l=0}^{M-1} a_l \cdot \eta_l \end{aligned} \quad (23)$$

따라서,

$$\overline{P}(e) = \left[\frac{1}{2}(1-\nu)\right]^M \sum_{k=0}^{M-1} \binom{M-1+k}{k} \left[\frac{1}{2}(1+\nu)\right]^k \quad (24)$$

이다. 여기서,

$$\overline{\gamma_c} = \frac{E_b}{2N_0} \left(1 + \frac{1}{N}\right)^2 E[\alpha_i^2] \quad (25)$$

이다.

## 3. 순서통계량 (Order Statistics)

순서통계량의 확률밀도함수는 참고문헌에 유도되어 있다[3]. 평균오류확률은

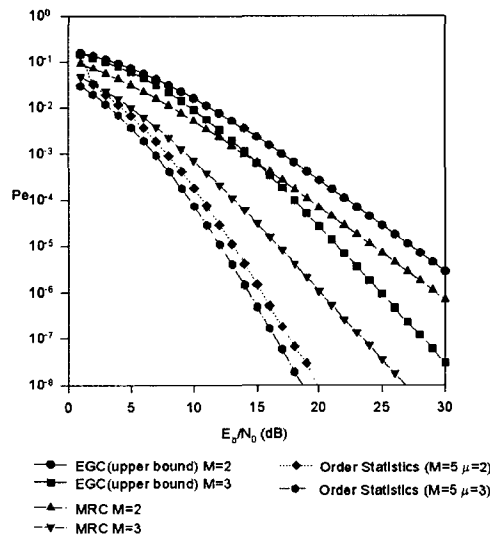
$$\begin{aligned} \bar{P}(e) &= \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2\gamma_b})f(\gamma_b)d\gamma_b & (26) \\ &= \frac{1}{2} \binom{M}{\mu} \sum_{k=1}^{M-\mu} \binom{M-\mu}{k} (-1)^k \left(-\frac{\mu}{k}\right)^{\mu-1} \sum_{n=\mu}^{\infty} \binom{-k}{\mu}^n \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\gamma_c}{\gamma_c+1}} \sum_{m=0}^n \binom{2m}{m} \frac{1}{[4(\gamma_c+1)]^m}\right] \end{aligned}$$

이다. 여기서,  $1 < \mu < M$ 이다.

#### IV. 결 론

<그림 3>에서는 처리이득(N)을 18dB로 하여 사용된 3가지 방법의 성능을 비교하였다. 그림에서 가지의 수가 증가할 수록 성능이 향상됨을 볼 수 있으나 소요대역폭도 증가하게 된다. 그러나 페이딩환경에서, 특히 주파수 선택적 환경조건에서, 다중반송파의 적용은 성능향상에 강력한 효과를 가짐을 알 수 있다.

5개의 가지중 2개의 가지를 취하는 순서통계방법의 성능이 가장 좋음을 알 수 있고, MRC의 성능이 EGC보다 우수함을 알 수 있다.



<그림 3> 각 합성방법의 평균오류확률



## 참 고 문 헌

- [1] 김남선, 한영열, “기준상관수신기를 이용한 동기 QPSK DS/CDMA시스템의 다원접속간섭 제거”, 한국통신학회 하계종합학술발표대회, pp.159-162, 1994.
- [2] Shiro Kondo, Laurence B. Milstein, “Multicarrier CDMA System with Cochannel Interference Cancellation”, VTC '94, pp.1640-1644, 1994.
- [3] 박지훈, “순서통계량을 이용한 RA-레이크 수신기의 성능분석”, 한양대학교 석사학위논문, 1995.
- [4] John G. Proakis, Digital Communications 3rd Ed., McGraw-Hill, 1995.