

시간선택적 페이딩 환경에서 멀티캐리어-CDMA 시스템의 서브캐리어간 간섭

김 명 진, 김 성 필, 하 경 민
한국의국어대학교 정보통신공학과
전화 : (0335) 330-4227 / 팩스 : (0335) 333-4256

Inter-carrier Interference of Multicarrier-CDMA System in Time Selective Fading Channel

Myoung Jin Kim, Sung Pil Kim, Kyung Min Ha
Department of Information and Communications Engineering
Hankuk University of Foreign Studies
E-mail : mjkim@san.hufs.ac.kr

Abstract

In MC-CDMA systems effects of delay spread of the channel are reduced with increased symbol duration by simultaneously transmitting data symbols on the parallel subcarriers. However, the increased symbol duration causes the system to be more vulnerable to time selective fading. In other words, although MC-CDMA systems are robust against frequency selective fading in a multipath environment, they are sensitive to Doppler spread and hence inter-carrier interference is increased. In this paper, we investigate the effects of time selective fading characteristics of the mobile channel from the viewpoint of desired signal power to inter-carrier interference power ratio at the combiner output of the MC-CDMA receiver.

I. 서론

MC-CDMA는 멀티캐리어 변조방식을 CDMA와 결합하여 다중접속 통신방식으로 적용한 방식으로서 송신하고자 하는 데이터열을 동시에 여러 개의 협대역 서브캐리어를 통하여 전송하는 디지털 변조방식이다.

직교 MC-CDMA 시스템에서는 서브캐리어간 직교성을 유지하기 위해 데이터 변조에 사각 펄스를 사용하는데 그 결과로 신호처리 필터는 상당한 크기(13dB)의 중첩된 부엽(sidelobe)을 갖는다. 사각 윈도우 주파수 응답의 큰 부엽으로 인하여 서브채널들의 스펙트럼은 인접한 서브채널과 심하게 중첩되며, 결과로 무선 채널 환경에서 상당한 서브캐리어간 간섭을 받게 된다. 이러한 서브캐리어간 간섭의 문제는 이동무선환경과 같은 시변 채널환경 하에서 더욱 심각하게 된다. 따라서 단말기가 이동하는 경우 도플러 확산의 영향을 더 받기 쉬워진다는 문제점이 생긴다.

본 논문에서는 MC-CDMA 시스템에서 단말기가 이동하는 경우 채널에 대한 시간선택적 페이딩의 효과를 분석한다. 구체적으로, MC-CDMA 수신기의 결합기 출력에서 원하는 신호의 전력대 서브캐리어간 간섭의 전력의 비를 유도하여 단말기의 이동속도에 따른 영향을 분석한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2절에서는 MC-CDMA 시스템의 송신기 및 수신기의 구조에 대하여 기술하고, 제3절에서는 이동무선채널의 특성 및 모델링에 관하여 설명한다. 제4절에서는 MC-CDMA 시스템에서 시간선택적 페이딩이 서브캐리어간 간섭에 미치는 효과를 분석한다. 제5절에서는 앞 절의 분석 결과를 예제 MC-CDMA 시스템에 적용하여 수신기 결합기 출력의 신호전력대 간섭전력의 비를 수치적으로 계산하여 그 결과를 검토해 본다.

II. MC-CDMA 시스템 모델

1. 송신기 모델

직교 MC-CDMA에서 각 데이터 심볼은 $\Delta f = 1/T_b$ 만큼 떨어진 N 개의 서브캐리어로 동시에 전송된다. 전송에 앞서 N 개의 병렬 가지에 있는 데이터 심볼은 동일한 길이를 갖는 확산코드 $\{c_k\}$ 로 곱해진다. (그림 1)에 MC-CDMA 시스템의 송신기 모델을 보인다.

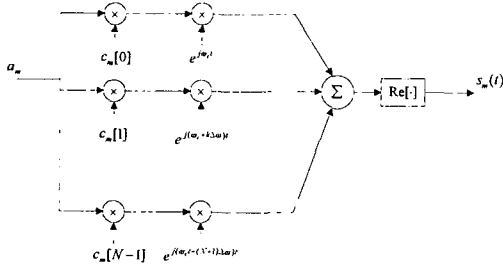


그림 1. MC-CDMA 시스템의 송신기 모델
Fig. 1 Transmitter Model of MC-CDMA System

여기서 a_m 은 m 번째 사용자의 입력 데이터 심볼 구간 ($0 \leq t \leq T_b$)에서의 데이터 심볼을 나타내며, $\Delta\omega = 1/T_b$ 이다. 전송신호 $s_m(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_m(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} c_m[k] a_m e^{j(\omega_c + k\Delta\omega)t} \right\} \quad (1)$$

여기서 $c_m[k]$ 는 m 번째 사용자에게 할당된 확산수열의 k 번째 서브채널에 곱해지는 코드비트를 의미하며 다음과 같다고 가정한다.

$$c_m[k] = p[k] W_m[k] \quad (2)$$

여기서 $p[k]$ 는 여러 사용자가 사용하는 랜덤수열이며, $W_m[k]$ 은 m 번째 사용자에게 할당된 직교코드집합의 원소이다. 그러면 확산코드열은 다음을 만족한다.

$$E\{c_m[k] c_m[k+i]\} = 0 \text{ for } i \neq 0, \forall m, m' \quad (3)$$

2. 수신기 모델

MC-CDMA 시스템의 수신기는 N 개의 상관기 출력을 역확산하여 결합한 후 비트 판정을 한다. 멀티패스 신호의 상관기 출력 결과를 결합하는 DS-SS 레이크 수신기가 시간영역 수신기임에 비해, MC-CDMA 수신기는 주파수영역 레이크 수신기이다. 주파수 선택적 채널에서 각각의 캐리어들은 각기 다른 감쇄와 위상 천이를 겪게 된다. 동일이득결합기(EGC)나 최대비결합기(MRC)와 같은 전통적인 다이버시티 결합방식을 주파수영역에서 사용할 수 있다. 직교 MC-CDMA 시

스템에서 서브캐리어의 직교성은 적당한 서브캐리어 간격을 선택함으로써 얻을 수 있으며, 사용자간 직교성은 직교확산 코드에 의해 얻어진다. 멀티패스 페이딩 채널에서는 사용자간 직교성이 손상된다.

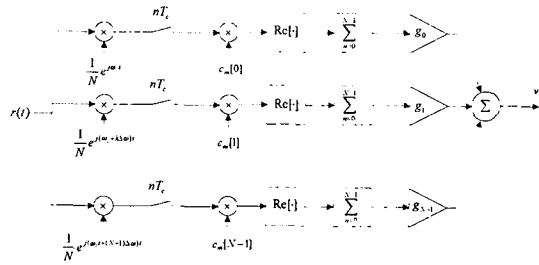


그림 2. MC-CDMA 시스템의 수신기 모델
Fig. 2 Receiver Model of MC-CDMA System

(그림 2)는 사용자 m 에 대한 MC-CDMA 수신기를 샘플된 형태로 실현한 예를 보인다. 여기서 $c_m[k]$ 는 사용자 m 의 확산수열이며, k 번째 수신기 상관기 출력은 g_k 의 이득을 가지고 결합된다. 판정을 위한 결정변수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v = \sum_{k=0}^{N-1} g_k \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ \frac{1}{N} c_m[k] r(nT_c) e^{-j(\omega_c + k\Delta\omega)nT_c} \right\} \quad (4)$$

여기서 $r(t)$ 는 수신된 신호이다. $T_c = T_b/N$ 이며, $\Delta\omega = 2\pi/T_b$ 이므로 v 는 다음과 같이 된다.

$$v = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} g_k c_m[k] \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ r(nT_c) e^{-j\omega_c nT_c} e^{-j\frac{2\pi}{N} kn} \right\} \quad (5)$$

III. 시간선택적 페이딩 채널모델

무선채널의 특징은 다중경로를 통하여 수신되는 신호의 페이딩 현상이라 할 수 있다. 다중경로 채널의 특성을 결정하는 파라미터로서 지연확산과 코히런스 대역폭을 들 수 있다[1]. 또 하나의 문제가 되는 채널 현상으로 도플러 확산을 들 수 있다. 도플러 확산은 캐리어 주파수의 편이 정도를 나타내는데, 채널의 특성이 변화하는 속도를 나타내는 지표로서 해석할 수 있다. 도플러 확산이 작으면 코히런스 시간은 커지게 되고 채널은 천천히 변화하게 된다. 단말기가 이동하거나 주변환경이 변화하는 경우, 여러 경로로 수신되는 신호는 경로시간차가 없더라도 서로 다른 크기와 위상을 가져서 결과적으로 채널 효과는 시간에 따라 랜덤하게 변화하는 시간선택적 페이딩으로서 나타난다. 본 논문에서는 WSS-UCS(Wide-sense Stationary Uncorrelated Scattering) 채널 모델을 사용하여[2] MC-CDMA 시스템의 특성을 분석하였다. 채널의 시변

임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h(t, \tau) = \sum_i \alpha_i(t) \delta(\tau - \tau_i) \quad (6)$$

여기서 $\alpha_i(t)$ 은 복소 가우시안 프로세스로서 l 번째 다중경로 성분의 시변 경로이득이며, τ_i 은 l 번째 다중경로 성분의 지연이다. 식(6)을 지연변수 τ 에 대하여 Fourier 변환을 취하면 다음과 같은 채널의 시변 주파수 응답을 얻는다.

$$H(t, f) = \sum_i \alpha_i(t) e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (7)$$

Clarke의 2차원 isotropic scattering 모델[3]을 사용하여 경로이득 $\alpha_i(t)$ 과 $\alpha_q(t)$ 간의 상호상관함수를 구하면 다음과 같다.

$$R_{\alpha_i}(t) = E\{\alpha_i(t) \alpha_q^*(t)\} = \sigma_i^2 J_0(2\pi f_m \tau) \delta(l, q) \quad (8)$$

여기서 α_i^2 은 l 번째 경로의 전력이며, J_0 는 0차의 1종 Bessel 함수이다. 또한 $f_m = v/\lambda$ 는 최대 도플러 주파수 편이를 나타내며, $\delta(l, q)$ 는 Kronecker 델타함수이다.

IV. 시간선택적 페이딩 환경에서 MC-CDMA시스템의 서브캐리어간 간섭

MC-CDMA 시스템에서 m 번째 사용자의 출력신호는 식(1)과 같으며, $t = nT_c$ 로 샘플된 형태로 나타내면

$$s_m(nT_c) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} c_m[k] a_m e^{j(\omega_c + k\Delta\omega)nT_c} \right\} \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

과 같다. 캐리어 개수 N 이 충분히 크다고 가정하면 각 서브채널은 주파수 비선택적 페이딩을 겪게 된다. 사용자수가 M 명이고 각 사용자 신호가 동기되어 있다고 가정할 때 수신신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} H(t, k\Delta\omega) c_m[k] a_m e^{j(\omega_c + k\Delta\omega)t} + \tilde{w}(t) \right\} \quad (10)$$

여기서 $\tilde{w}(t)$ 는 평균이 0인 복소 가우시안 백색잡음이다. 수신신호를 $t = nT_c$ 로 샘플하여 표현하면

$$r(nT_c) = \text{Re} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} H(n, k) c_m[k] a_m e^{j\omega_c nT_c} e^{j\frac{2\pi}{N}kn} + \tilde{w}(nT_c) \right\} \quad (11)$$

여기서

$$H(n, k) = H(nT_c, k\Delta\omega) = \sum_i \alpha_i(nT_c) e^{-j\tau_i k\Delta\omega} \quad (12)$$

이다. 사용자 1의 수신기의 i 번째 가지 상관기의 출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y[i] = \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} H(n, k) c_m[k] a_m e^{-j\frac{2\pi}{N}(k-i)n} \right\} + \eta[i] \quad (13)$$

여기서

$$\eta[i] = \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ \frac{1}{N} \tilde{w}(n) e^{-j(\omega_c + i\Delta\omega)nT_c} \right\} \quad (14)$$

로 i 번째 가지에 포함된 잡음성분이다. 결합기를 거친 비트판정을 위한 결정변수 v 는 다음과 같이 표현된다.

$$v = \sum_{i=0}^{N-1} g_i c_i[i] \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} H(n, k) c_m[k] a_m e^{j\frac{2\pi}{N}(k-i)n} \right\} + \eta \quad (15)$$

$$\eta = \sum_{i=0}^{N-1} g_i c_i[i] \eta[i] \quad (16)$$

서브캐리어간 간섭의 표현을 간단히 하기 위하여 다음과 같은 함수를 정의하자.

$$\Lambda(i, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H(n, k) e^{j\frac{2\pi}{N}(k-i)n} \quad (17)$$

수신기의 결합기 출력 v 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v = \sum_{i=0}^{N-1} g_i c_i[i] \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} \Lambda(i, k) c_m[k] a_m \right\} + \eta \quad (18)$$

이 논문에서는 단일 사용자 환경에서 시간선택적 페이딩에 의한 서브캐리어간 간섭을 분석하며, $M = 1$ 로 가정하고 잡음의 영향은 고려하지 않았다. 이 경우 결합기 출력은 다음과 같이 된다.

$$v = \sum_{i=0}^{N-1} g_i c_i[i] \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \Lambda(i, k) c[k] a \right\} \quad (19)$$

결합기 출력 v 에 포함되어 있는 원하는 신호성분은

$$v_s = a \sum_{i=0}^{N-1} g_i c^2[i] \text{Re} \left\{ \Lambda(i, i) \right\} = a \sum_{i=0}^{N-1} g_i \Lambda(i, i) \quad (20)$$

가 된다. 결합기 출력신호의 전력 중에서 원하는 신호 전력대 캐리어간 간섭전력의 크기를 비교해 보기로 하자. 결합기 출력신호의 전력은 다음과 같이 된다.

$$E\{v^2\} = E \left\{ \left[a \sum_{i=0}^{N-1} g_i \Lambda(i, i) + a \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k \neq i} g_i c[i] \sum_{k \neq i} \Lambda(i, k) c[k] \right]^2 \right\} \quad (21)$$

입력심볼의 전력을 $E\{a^2\} = \sigma_a^2$ 이라 하고 채널 페이딩이 송신심볼과 독립적이라 가정하자. $E\{v^2\}$ 에 포함되어 있는 원하는 신호성분의 전력을 S 라 하면

$$S = E \left\{ \left[a \sum_{i=0}^{N-1} g_i \Lambda(i, i) \right]^2 \right\} = \sigma_a^2 \sum_{i=0}^{N-1} g_i E \left\{ \Lambda(i, i)^2 \right\} \quad (22)$$

와 같이 된다. 다음에 서브캐리어간 간섭전력을 I 라 하면, $E\{c[k]c[k+i]\} = 0$ for $i \neq 0$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \sigma_a^2 \sum_{i \neq i'} \sum_{k \neq k'} \sum_{k' \neq k} g_i g_{i'} E \{ c[i] c[k] c[i'] c[k'] \} E \{ \Lambda(i, k) \Lambda^*(i', k') \} \quad (23)$$

그런데

$$E\{c[i]c[k]c[i']c[k']\} = \delta(k, k') \delta(i, i') \quad (24)$$

이므로 캐리어간 간섭의 전력은 다음과 같이 된다.

$$I = \sigma_a^2 \sum_{i=0}^{N-1} g_i \sum_{k \neq i} E \left\{ \Lambda(i, k)^2 \right\} \quad (25)$$

한편, 식(17)의 정의로부터

$$E\{\Lambda(i, k)^2\} = \frac{1}{N^2} E\left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} H(n, k) H^*(n', k) e^{j\frac{2\pi}{N}(k-i)(n-n')} \right\} \quad (26)$$

이 되며, 여기서

$$E\{H(n, k) H^*(n', k)\} = \sum_l \sum_q E\left\{ \alpha_l(nT_c) \alpha_q^*(n'T_c) e^{-j(\tau_l - \tau_q)k\Delta\omega} \right\} \quad (27)$$

과 같이 되는데, WSS-UCS 채널을 가정하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E\{H(n, k) H^*(n', k)\} = \sum_l \alpha_l^2 J_0(2\pi f_m(n-n')T_c) \quad (28)$$

따라서 식(26)은

$$E\{\Lambda(i, k)^2\} = \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_l R_\alpha((n-n')T_c) e^{j\frac{2\pi}{N}(k-i)(n-n')} \quad (29)$$

과 같이 표현된다. 위의 결과로부터 결합기 출력신호 내의 서브캐리어간 간섭의 전력과 원하는 신호의 전력을 구하면 식(30)과 식(31)과 같이 된다.

$$I = \sigma_i^2 \sum_{i=0}^{N-1} g_i \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{N-1} \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_l R_\alpha((n-n')T_c) e^{j\frac{2\pi}{N}(k-i)(n-n')} \quad (30)$$

$$S = \sigma_i^2 \sum_{i=0}^{N-1} g_i \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} \sum_l R_\alpha((n-n')T_c) \quad (31)$$

식(30)과 (31)로부터 결합기 출력의 원하는 신호전력대 캐리어간 간섭전력의 비는 다음과 같이 표현된다.

$$SIR = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} J_0(2\pi f_m(n-n')T_c)}{\sum_{i=0}^{N-1} g_i \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{n'=0}^{N-1} J_0(2\pi f_m(n-n')T_c) e^{j\frac{2\pi}{N}(k-i)(n-n')}} \quad (32)$$

V. 수치적 결과

앞에서는 시간선택적 페이딩이 MC-CDMA 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수신기의 결합기 출력의 원하는 신호전력대 서브캐리어간 간섭 전력의 비를 식(32)와 같이 유도하였다. 수치적 결과를 확인하기 위하여 고려한 MC-CDMA 시스템은 서브캐리어 개수가 128개 이고, 캐리어의 오프셋은 없다고 가정한다. 또한 수신기의 결합기는 동일이득 결합기의 구조를 가정하였다. (그림 3)에 시간선택적 페이딩에 따른 결합기 출력의 SIR을 보인다. 여기서 채널의 시변성 정도를 나타내는 지수로 T_s/T_c 를 사용하였는데, T_s 는 데이터 심볼의 길이를 나타내고 $T_c=1/f_m$ 는 채널의 코히런스 시간을 나타낸다. 그 결과를 보면 T_s/T_c 의 증가에 따라 SIR이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 단말기의 이동성에 따라 채널의 코히런스 시간이 작아지면 서브캐리어간 간섭이 증가한다는 것을 의미하며, 또한 병렬로 데이터를 전송하여 유효 심볼 길이를 증가시키면 주파수선택적 페이딩에는 강인해지지만 시간선택적 페이딩에는 취약해진다는 것을 의미한다.

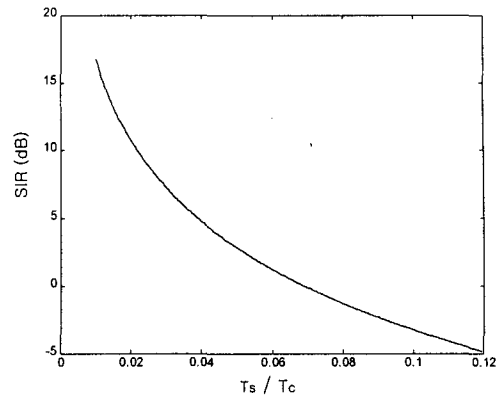


그림 3. 시간선택적 페이딩이 MC-CDMA 시스템에 미치는 영향 (동일이득 결합기, $N=128$)

Fig. 3 Effect of Time Selective Fading on MC-CDMA System

VI. 결론

MC-CDMA시스템은 데이터열을 병렬 서브캐리어로 전송하므로 DS-CDMA에 비하여 심볼 길이가 길어서 지연확산의 영향을 작게 받지만 시간선택적 페이딩의 영향을 더 많이 받는다. 즉, 주파수선택적 페이딩에 대하여는 강인하지만 단말기가 이동하는 경우 도플러 확산의 영향을 더 쉽게 받는다. 본 논문에서는 MC-CDMA에서 단말기의 이동 또는 심볼 길이가 증가하여 채널의 코히런스 시간보다 커지는 경우 채널의 시간선택적 페이딩의 효과를 수신기의 결합기 출력에서 원하는 신호전력대 서브캐리어간 간섭전력의 비 관점에서 분석하였다. 시간선택적 페이딩은 서브캐리어간 간섭을 증가시키는 것을 확인하였다. 따라서 MC-CDMA 시스템의 설계에서, 예를 들어 캐리어의 개수 선정에서, 주파수선택적 페이딩의 영향을 고려함과 동시에 시간선택적 페이딩의 영향을 고려해야 한다.

참고문헌

- [1] J. Proakis, *Digital Communications*, New York: McGraw-Hill, 1983.
- [2] G. L. Stuber, *Principles of Mobile Communications*, Reading, MA: Kluwer Academic, 1996.
- [3] R. H. Clarke, A statistical theory of mobile radio reception, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 47, pp. 957-1000, Jul. 1968.