

논문 2010-47TC-8-1

# 비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템에서의 시간 오프셋 영향 분석

(Effect Analysis of Timing Offsets for Asynchronous MC-CDMA  
Uplink Systems)

고 균 병\*, 우 중 채\*\*

(Kyun-Byoung Ko and Choong-Chae Woo)

## 요 약

본 논문에서는 Cyclic prefix 형태의 보호구간을 갖는 비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템의 시간 오프셋의 영향을 주파수 선택적 다경로 페이딩 채널에 대하여 분석하였다. 분석을 위하여 시간 오프셋을 보호구간 및 최대 접속 지연 시간 (maximum access delay time)과 관련하여 모델링하였다. 수식적 분석을 통하여 시간 오프셋이 원하는 신호성분의 전력 누수와 자기 간섭성분을 발생시키는 것을 확인하였다. 이러한 시간 오프셋이 유효 SNR 및 평균 오류율에 미치는 영향을 분석하였다. 근사화를 통하여 평균 오류율 및 SNR 감쇄를 닫혀진 형태로 유도하였다. 분석결과와 정확성은 모의실험 결과와의 비교를 통해 다양한 시간 오프셋 및 SNR에 대해 검증하였다.

## Abstract

This paper models a symbol timing offset (STO) with respect to the guard period and the maximum access delay time for asynchronous multicarrier code division multiple access (MC-CDMA) uplink systems over frequency-selective multipath fading channels. Analytical derivation shows that STO causes desired signal power degradation and generates self-interferences. This effect of the STO on the average bit error rate (BER) and the effective signal-to-noise ratio (SNR) is evaluated. The approximated BER and the SNR loss caused by STO are then obtained as closed-form expressions. The tightness between the analytical result and the simulated one is verified for the different STOs and SNRs. Furthermore, the derived analytical results are verified via Monte Carlo simulations.

**Keywords :** asynchronous MC-CDMA, STO, guard period, maximum access delay time, SNR loss

## I. 서 론

광범위하게 진행되어온 MC-CDMA 시스템에 관한

\* 평생회원, 충주대학교 제어계측공학과  
(Control and Instrumentation Engineering at  
Chungju National University)

\*\* 정회원, 한서대학교 전자공학과  
(Electronics, Computer and Communication  
Engineering at Hanseo University)

※ 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로  
한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임  
(KRF-2008-331-D00358)

접수일자: 2010년5월13일, 수정완료일: 2010년8월13일

연구들 중에서 참고문헌 [1]에서는 Cyclic Prefix 형태의 보호구간을 갖는 경우에 대한 성능 분석 기법을 제안하였다. 또한 MC-CDMA 시스템의 주요 단점인 반송파 주파수 오프셋 및 시간 오프셋의 영향에 대한 연구들이 수행되어 왔다<sup>[2~7]</sup>. 하지만 기존의 연구들은 동기식 시스템에 대한 연구가 대부분이었으며 비동기식이라 하더라도 분석상의 편의를 위해 일정한 제약 조건하에서 성능 분석이 수행되어왔다<sup>[2~5]</sup>.

특히 시간 오프셋(STO: Symbol Timing Offset)의 경우 성능 저하 없이 보정이 가능하다고 알려져 있으나<sup>[6~7]</sup> 이는 다음의 두 가정을 필요로 한다. 하나는 시간

오프셋이 존재할 때 시간 오프셋에 의해 발생하는 위상 왜곡을 보정할 수 있는 완벽한 채널 추정을 가정하는 것이다<sup>[6~7]</sup>. 두 번째는 보호 구간이 충분히 길어 인접심벌 간섭성분(ISD)가 발생하지 않아야 한다는 것이다. 즉,  $T_G$ 가 보호구간이고  $T_{\max}$ 가 최대 접속 지연 시간이면  $0 < STO < (T_G - T_{\max})$ 을 만족해야 한다.

본 논문에서는 시간 오프셋에 대한 일반적인 분석 기법을 제안하고자 한다. 이를 위해 다음 사항을 강조하고자 한다. 비록 위의 첫 번째 가정이 만족된다 하더라도 즉,  $STO > (T_G - T_{\max})$  혹은  $STO < 0$ 일 때는 자기 간섭성분(self-interference)이 발생된다. 특히 보호구간 내의 시간 오프셋이라 하더라도 성능저하가 발생할 가능성이 있다는 사실이다. 본 논문에서는 시간 오프셋에 의한 영향을 분석하기 위하여 시간 오프셋의 상대적인 값을 다중경로 페이딩 채널에서  $T_G$  및  $T_{\max}$ 와 관련지어 고려하도록 한다. 기존의 연구들에서는  $T_G$  및  $T_{\max}$ 에 관련된 분석 기법을 제안하고 있지 못하며 대부분의 연구들이 동기식 하향 링크에 대해 수행되어왔다<sup>[4, 6~7]</sup>.

본 논문에서는 Cyclic Prefix 형태의 보호구간을 갖는 비동기 MC-CDMA 시스템에 대한 참고문헌 [1]의 성능 분석 기법을 확장하여 시간 오프셋에 의한 시스템 성능을 분석하도록 한다.

## II. 비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템

### 1. 비동기 MC-CDMA 시스템

MC-CDMA 시스템의 송신기는 각 사용자에게 할당된 확산 코드를 사용하여 전송 심벌을 주파수 축에서 확산시키고, IDFT장치를 이용하여 신호를 시간 축으로 변환한 후 보호구간을 Cyclic Prefix 형태로 삽입하여 전송하게 된다. 따라서  $m$ 번째 사용자의 전송 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$s_m(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} b_m^{[k]} c_{m,n} p(t - kT_S) e^{j2\pi f_n t} \quad (1)$$

여기서  $f_n = n/T$ 이고  $b_m^{[k]} = \pm 1$ 는  $m$ 번째 사용자의  $k$ 번째 BPSK 심벌,  $|c_{m,n}| = 1$ 는  $m$ 번째 사용자의  $n$ 번째 부반송파에 해당하는 확산 코드,  $p(t)$ 는 구간  $[-T_G, T]$ 에서 값을 갖고  $\int_{-\infty}^{\infty} p^2[t - nT_S] dt = 1$ 을 만족하는 사각 펄스 신호다.  $T$ 는 비트 간격을,  $T_G (= GT_c, T_c = T/N)$ 는 보호구

간을,  $T_S (= T + T_G)$ 는 보호구간을 포함하는 MC-CDMA 심벌 간격을 각각 나타낸다. 그리고 Cyclic Prefix 형태의 보호구간을 나타내기 위하여  $g(t)$ 를 다음과 같이 정의한다<sup>[1]</sup>.

$$g(t) = \begin{cases} (t+T) - kT_S, & kT_S - T_G \leq t < kT_S \\ t - kT_S, & kT_S \leq t < kT_S + T \end{cases}$$

다중경로 레일리 페이딩 채널의 채널 응답은 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$h_m(\tau; t) = \sum_{l=0}^{L-1} g_{m,l}(t) \delta(\tau - \tau_l) \quad (2)$$

여기서  $t, \tau, L$  및  $\tau_l$ 은 시간, 경로 지연, 다중경로 수 및  $l$ 번째 경로성분의 지연 시간을 각각 나타낸다. 0번째 심벌 간격 동안의 천천히 변하는  $l$ 번째 경로의 채널 이득은  $g_{m,l}(t)|_{T_G \leq t < T} = g_{m,l} = \alpha_{m,l} e^{j\theta_{m,l}}$ 으로 표현할 수 있으며 여러 심벌 시간동안에 변하지 않는다고 가정한다. 크기  $\alpha_{m,l}$ 은 레일리 분포를 갖고 위상  $\theta_{m,l}$ 은  $[0, 2\pi)$  동안에 균일하게 분포하며 각 경로와 사용자들 간에 독립적인 랜덤 변수로 가정한다. 그리고 상기 식을 DFT할 때  $m$ 번째 사용자의  $n$ 번째 부반송파의 채널 응답은 다음과 같다.

$$H_{m,n} = \sum_{l=0}^{L-1} H_{m,n,l} = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_{m,l} e^{j\theta_{m,l}} e^{-j2\pi f_n \tau_l}$$

여기서  $\tau_l = lT_c$ 이고  $H_{m,n,l} = \alpha_{m,l} e^{j\theta_{m,l}} e^{-j2\pi n l/N}$ 이다. 위 식은  $n$ 번째 부반송파의 채널 응답이  $L$ 개의 경로 성분들로 이뤄짐을 의미한다. 본 논문에서는  $\gamma_{m,l} = \alpha_{m,l}^2$ ,  $\overline{\gamma_{m,l}} = E[\alpha_{m,l}^2]$  및  $\overline{\gamma_m} = E\left[\sum_{l=0}^{L-1} \gamma_{m,l}\right] = \sum_{l=0}^{L-1} \overline{\gamma_{m,l}} = 1$ 을 가정하며, 경로들 간의 지수함수적 감소 인자(Exponential Decay Factor)는  $1/L$ 로 가정한다.

사용자가  $M$ 명인 단일 셀 환경에서, 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \int_0^{T_{\max}} h_m(\tau; t) s_m(t - t_m - \tau) d\tau + n(t) \quad (3)$$

$$= \sum_{m=0}^{M-1} \left[ \sum_{l=0}^{L-1} g_{m,l}(t) s_m(t - t_m - \tau_l) \right] + n(t)$$

여기서  $t_m$ 는  $m$ 번째 사용자의 비동기 전송 지연을 나타내고,  $n(t)$ 는 평균이 0이고 전력 밀도 스펙트럼이  $N_0$ 인 가산성 백색 잡음이다.

2. 시간 오프셋을 고려한 채널 추정값

원하는 사용자를 0번째 사용자라고 할 때, 시간 오프셋을 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta_{0,0} = t_0 - t'_0, \Delta_{0,0} \in [-T/2, T/2] \quad (4)$$

본 논문에서는 채널 상태가 여러 심벌 구간 동안에 변화하지 않고  $\Delta_{0,0}$  또한 변화하지 않는 상수로 가정한다. 시간 오프셋이 존재할 경우 시간 오프셋에 의한 위상 왜곡을 포함한 완벽한 채널 추정값은  $\hat{H}_{0,i} = H_{0,i} e^{-j2\pi f_i \Delta_{0,0}}$ 이다[6~7].

3. 시간 오프셋을 고려한 정합여파기 출력

시간 오프셋이 존재하는 경우에 대해 완벽한 채널 추정을 가정할 때, 0번째 사용자의 0번째 심벌에 대한 정합여파기 출력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{0,X} &= \int_{t'_0}^{t_0+T} \frac{r(t)}{\sqrt{\gamma_0} NT} \sum_{i=0}^{N-1} \hat{h}_{0,i}^* c_{0,i}^* e^{-j2\pi f_i (t-t'_0)} dt \\ &= DU_{0,X} + MAI_0 + \eta_0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $X \in \{I, II, III, II-2, III-2\}$ 는 시간 오프셋  $\Delta_{0,0}$ 의 영역을 나타낸다.  $DU_{0,X}$ 는 원하는 사용자의 신호 성분,  $MAI_0$ 는 다중사용자 간섭성분,  $\eta_0$ 는 평균은 0이고 분산이  $N_0/NT$ 인 잡음 성분을 각각 나타낸다.

4. 원하는 사용자 신호 성분의 표현

상기 식에서 변수 치환을 통해  $\int_{t'_0}^{t_0+T}$ 를  $\int_{-\Delta_{0,0}}^{-\Delta_{0,0}+T}$ 로 바꿀 수 있다. 이는 여파기 출력  $V_{0,X}$  혹은  $DU_{0,X}$ 가  $\Delta_{0,0}$ 의 값에 따라 상이하게 표현됨을 의미한다. 원하는 사용자의 신호 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$DU_{0,X} = D_{0,X} + ICI_{0,X} + ISI_{0,X} \quad (6)$$

여기서  $D_{0,X}$ ,  $ICI_{0,X}$  및  $ISI_{0,X}$ 는 원하는 신호 성분, 인접반송파 간섭성분(ICI: Inter Carrier Interference) 및 인접심벌에 의한 간섭성분(ISI: Inter Symbol Interference)을 각각 의미한다. 본 절에서는 시간 오프셋  $\Delta_{0,0}$ 가 속하는 영역에 따른 신호 성분의 표현을 다루고자 한다.

영역 I ( $R_I^{STO}$ :  $0 \leq \Delta_{0,0} < T_G - T_{max}$ ): 그림 1(I)는 영역 I의 경우를 나타내고 있다. 식 (5)의 적분구간에는 모든 경로에 대해  $b_0^{[0]}$ 만이 포함되어 있기 때문에 ISI 성분이 발생되지 않는다. 또한 부반송파간 직교성이 유지되어 ICI 성분도 발생되지 않는다. 따라서 다음을 얻

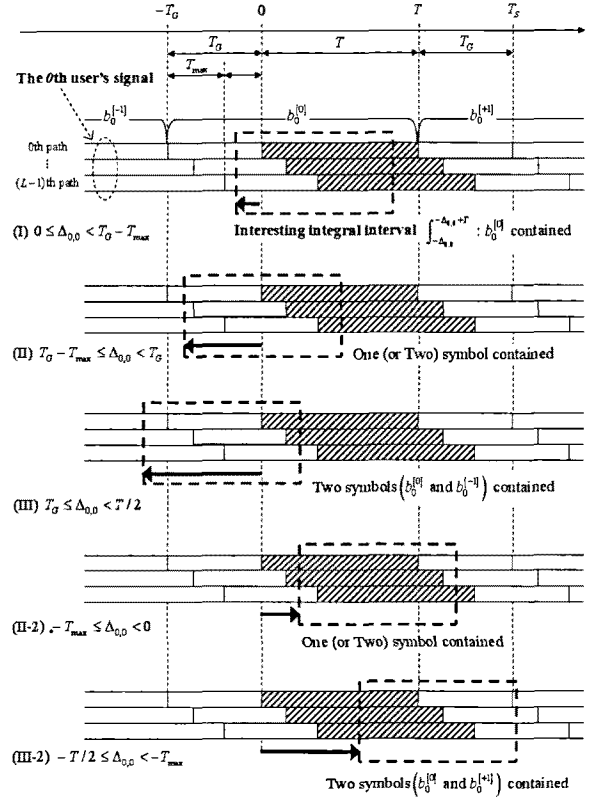


그림 1. 시간 오프셋의 영역에 따른 원하는 사용자의 신호 성분의 표현  
Fig. 1. With respect to the region  $\Delta_{0,0}$ , Desired user's signal presentation.

을 수 있다.

$$DU_{0,I} = \frac{b_0^{[0]}}{\sqrt{\gamma_0} N} \sum_{n=0}^{N-1} |H_{0,n}|^2$$

또한  $D_{0,I} = b_0^{[0]} \sqrt{\gamma_0}$  이고  $ICI_{0,I} = ISI_{0,I} = 0$ 이다.

영역 II ( $R_{II}^{STO}$ :  $T_G - T_{max} \leq \Delta_{0,0} < T_G$ ): 영역 II는 다음의 부분 영역으로 나뉘질 수 있다.

$$T_G - qT_c \leq \Delta_{0,0} < T_G - (q-1)T_c, \quad q=1, \dots, L-1$$

그림 1(II)와 같이 영역 II의 q번째 부분 영역에서는 q개의 경로 성분은  $b_0^{[0]}$ 와 관련되어 있으며  $(L-q)$ 개의 경로 성분은  $b_0^{[-1]}$  및  $b_0^{[0]}$ 와 관련되어 있음을 알 수 있다. 따라서 식 (6)의 각 성분들은 다음과 같이 유도된다.

$$D_{0,II(q)} = \frac{b_0^{[0]}}{\sqrt{\gamma_0}} \left( \sum_{l=0}^{q-1} \gamma_{0,l} + \sum_{l=q}^{L-1} \gamma_{0,l} \frac{T_S - \Delta_{0,0} - \tau_l}{T} \right)$$

$$ICI_{0,II(q)} = \frac{b_0^{[0]}}{\sqrt{\gamma_0} N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0, i \neq n}^{N-1} \frac{\widetilde{H}_{II(q)} \widehat{H}_{0,i}^* c_{0,n} c_{0,i}^*}{j2\pi(n-i)}$$

$$ISI_{0,II(q)} = \frac{b_0^{[-1]}}{\sqrt{\gamma_0} N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0, i \neq n}^{N-1} \frac{-\widetilde{H}_{II(q)} e^{j2\pi f_n T_C} \widehat{H}_{0,i}^* c_{0,n} c_{0,i}^*}{j2\pi(n-i)}$$

$$\widetilde{H}_{II(q)} = \sum_{l=q}^{L-1} H_{0,n,l} (e^{-j2\pi(f_n - f_l)\Delta_{0,0}} - e^{j2\pi(f_n - f_l)(-T_C + \tau)}) e^{-j2\pi f_l \Delta_{0,0}}$$

$D_{0,II(q)}$ 는 완벽한  $q$ 개의 경로 성분을 포함하며 부분적인  $(L-q)$ 개의 경로 성분을 포함하고 있다. 따라서 부분적인 성분 만큼의 신호 감쇄가 발생하고, 보호구간 내의 STO이지만 반송파간의 직교성 파괴로 인하여 다른 반송파에 의한 간섭성분이 발생함을 알 수 있다.

영역 III ( $R_{III}^{STO} : T_C \leq \Delta_{0,0} < T/2$ ): 그림 1(III)로부터 영역 III에서는 항상 두 정보열  $b_0^{[-1]}$ 과  $b_0^{[0]}$ 가 적분구간에 포함되어 있다. 원하는 신호 성분  $D_{0,III} = D_{0,II(q=0)}$ 는 모든 경로들에 대해 부분적인 합으로 표현된다. 또한 영역 II의 식들에서  $q=0$ 을 대입하여 영역 III에서의 표현을  $ICI_{0,III} = ICI_{0,II(q=0)}$  및  $ISI_{0,III} = ISI_{0,II(q=0)}$ 로 얻을 수 있다. 단  $\sum_{l=0}^{-1}$ 로 표현되는 항들은 무시한다.

영역 II-2 ( $R_{II-2}^{STO} : -T_{\max} \leq \Delta_{0,0} < 0$ ): 영역 II에서의 경우와 유사하게 영역 II-2는  $-qT_C \leq \Delta_{0,0} < 0$ 의 부분 영역으로 나뉘지며,  $q \in \{1, 2, \dots, L-1\}$  번째 부분 영역에 대하여 다음을 얻을 수 있다.

$$D_{0,II-2(q)} = \frac{b_0^{[0]}}{\sqrt{\gamma_0}} \left( \sum_{l=0}^{q-1} \gamma_{0,l} \frac{T + \Delta_{0,0} + \tau_l}{T} + \sum_{l=q}^{L-1} \gamma_{0,l} \right)$$

$$ICI_{0,II-2(q)} = \frac{b_0^{[0]}}{\sqrt{\gamma_0} N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0, i \neq n}^{N-1} \frac{\widetilde{H}_{II-2(q)} \widehat{H}_{0,i}^* c_{0,n} c_{0,i}^*}{j2\pi(n-i)}$$

$$ISI_{0,II-2(q)} = \frac{b_0^{[-1]}}{\sqrt{\gamma_0} N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0, i \neq n}^{N-1} \frac{-\widetilde{H}_{II-2(q)} e^{-j2\pi f_n T_C \Delta_{0,0}} \widehat{H}_{0,i}^* c_{0,n} c_{0,i}^*}{j2\pi(n-i)}$$

$$\widetilde{H}_{II-2(q)} = \sum_{l=0}^q H_{0,n,l} (e^{j2\pi(f_n - f_l)\tau} - e^{-j2\pi(f_n - f_l)\Delta_{0,0}}) e^{-j2\pi f_l \Delta_{0,0}}$$

영역 III-2 ( $R_{III-2}^{STO} : -T/2 \leq \Delta_{0,0} < -T_{\max}$ ): 그림 1(III-2)로부터 이 영역에서는 항상 두 정보열  $b_0^{[0]}$ 와

$b_0^{[-1]}$ 이 적분구간에 포함되어 있음을 알 수 있다. 또한 영역 III-2에서의 표현은 영역 II-2의 식들에서  $q=L$ 을 대입하여  $D_{0,III-2} = D_{0,II-2(q=L)}$ ,  $ICI_{0,III-2} = ICI_{0,II-2(q=L)}$  및  $ISI_{0,III-2} = ISI_{0,II-2(q=L)}$ 로 얻을 수 있다. 단  $\sum_{l=L}^{L-1}$ 로 표현되는 항들은 무시한다.

### 5. 다중사용자 간섭 성분의 표현

식 (5)의  $MAI_0$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$MAI_0 = \sum_{m=1}^{M-1} \int_{-(t_m - t_0)}^{-(t_m - t_0) + T} \left[ \sum_{l=0}^{L-1} g_{m,l}(t) \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} b_m^{[k]} c_{m,n} p(t - kT_S - \tau_l) e^{j2\pi f_n g(t - \tau_l)} \right] \times \frac{1}{\sqrt{\gamma_0} NT} \sum_{i=0}^{N-1} \widehat{H}_{0,i}^* c_{0,i} e^{-j2\pi f_i (t + (t_m - t_0))} dt \quad (7)$$

참고 문헌 [1]의 비동기 MC-CDMA 분석 기법에서는 0 번째 사용자에게 대한  $m$  번째 사용자의 상대적인 시간 차이를  $\Delta_{m,0} = (t_m - t_0) - A_{m,0} T_S$ 로 정의한다. 여기서  $A_{m,0} = \lfloor (t_m - t_0) / T_S \rfloor$  이고  $\lfloor x \rfloor$ 는  $x$ 를 넘지 않는 최대의 정수를 나타낸다. 위식에서  $t_0$ 를  $t_0'$ 로 치환하면  $\Delta'_{m,0} = (t_m - t_0') - A'_{m,0} T_S$  및  $A'_{m,0} = \lfloor (t_m - t_0') / T_S \rfloor$  이다. 또한  $\Delta_{0,0}$ 를 통하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\Delta_{m,0} + \Delta_{0,0} = (t_m - t_0') - A_{m,0} T_S = \Delta'_{m,0} + \lfloor (\Delta_{m,0} + \Delta_{0,0}) / T_S \rfloor T_S$$

여기서 다음의 사실을 상기할 필요가 있다.  $\Delta_{m,0}$ 는 사용자들 간에 독립적이고  $[0, T_S)$ 에서 균일하게 분포하는 랜덤 변수로 가정한다[1]. 그리고  $\Delta_{0,0}$ 는  $[-T/2, T/2)$ 사이의 상수이다. 그러므로  $\Delta'_{m,0}$  또한 사용자들 간에 독립적이고  $[0, T_S)$ 에서 균일하게 분포하는 랜덤 변수로 가정할 수 있다. 결론적으로 참고문헌 [1]과 동일하게 식 (7)의 MAI를 표현할 수 있다.

## III. 시간 오프셋의 영향에 따른 성능 분석

본 논문에서는 받혀진 형태의 평균 오류율 유도를 위하여 기존 분석 기법들과는 다르게 자기 간섭성분과에 대한 부가적인 가우시안 근사화와 원하는 신호 성분에 대한 근사화 기법을 적용한다.

### 1. 간섭 성분 분석

본 논문에서는 CDMA 시스템의 성능분석에서 일반적으로 사용하는 가우시안 근사화를 적용하기 위하여 사용자들의 확산코드가 랜덤하다고 가정한다. 또한 랜덤 변수  $\{\theta_{m,l}\}, \{\gamma_{m,l}\}, \{c_{m,n}\}, \{b_m^{[k]}\}$  및  $\{\Delta_{m,0}\}$ 들이 각기 다른  $m, l, n$  및  $k$ 에 대해 독립적으로 분포한다고 가정할 수 있다. 따라서 정합 여과기 출력 값  $V_{0,x}$  및  $DU_{0,x}$ 의 각 항들은 서로 비상관되어 있으며 간섭성분들 각각의 평균은 0이다. 그러므로 성능 분석을 위해서는 각 항들의 분산만을 구하면 된다.

본 논문에서는 닫혀진 형태의 평균 오류율 유도를 위하여 DS-CDMA 상향 링크 시스템에서 그 정확성이 검증된 자기 간섭성분에 대한 부가적인 가우시안 근사화<sup>[9]</sup>를 적용하도록 한다. 따라서  $\Delta_{0,0}$ 의 영역에 따른 자기 간섭성분들의 분산은 다음과 같이 유도된다.

$$Var[ICL_{0,II(q)}] = Var[ISL_{0,II(q)}] = \frac{\sum_{l=q}^{L-1} \overline{\gamma_{0,l} f_1(l,l)} + \frac{1}{\gamma_0} \sum_{l=q}^{L-1} \sum_{p=q, p \neq l}^{L-1} \overline{\gamma_{0,l} \gamma_{0,p} f_1(l,p)}}{N^2 \pi^2 (n-i)^2}$$

$$Var[ICL_{0,III}] = Var[ISL_{0,III}] = Var[ICL_{0,II(q=0)}]$$

$$Var[ICL_{0,II-2(q)}] = Var[ISL_{0,II-2(q)}] = \frac{\sum_{l=0}^{q-1} \overline{\gamma_{0,l} f_2(l,l)} + \frac{1}{\gamma_0} \sum_{l=0}^{q-1} \sum_{p=q, p \neq l}^{q-1} \overline{\gamma_{0,l} \gamma_{0,p} f_2(l,p)}}{N^2 \pi^2 (n-i)^2}$$

$$Var[ICL_{0,III-2}] = Var[ISL_{0,III-2}] = Var[ICL_{0,II-2(q=L)}]$$

여기서  $f_1(l,p)$ 와  $f_2(l,p)$ 는 다음과 같다.

$$f_1(l,p) = \cos \left[ \pi(n-i) \frac{(\tau_l - \tau_p)}{T} \right] \sin \left[ \pi(n-i) \frac{\tau_l - T_G + \Delta_{0,0}}{T} \right] \times \sin \left[ \pi(n-i) \frac{\tau_p - T_G + \Delta_{0,0}}{T} \right]$$

$$f_2(l,p) = \cos \left[ \pi(n-i) \frac{(\tau_l - \tau_p)}{T} \right] \sin \left[ \pi(n-i) \frac{\tau_l + \Delta_{0,0}}{T} \right] \times \sin \left[ \pi(n-i) \frac{\tau_p + \Delta_{0,0}}{T} \right]$$

그리고  $MAI_0$ 의 분산은 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

$$Var[MAI_0] = \frac{(M-1)(3T_S - T)}{3NT_S} \gamma_m + \frac{(M-1)T}{N^2 T_S} \gamma_m \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0, i \neq n}^{N-1} \frac{1}{\pi^2 (n-i)^2}$$

## 2. 평균 오류율 분석

$D_{0,x}$ 에 대한 근사화는 다음과 같다.

$$D_{0,x} \approx b_0^{[0]} \sqrt{\sum_{l=0}^{L-1} \Gamma_X(l) \gamma_{0,l}} = b_0^{[0]} \sqrt{\gamma_{0,x}} = D_{0,x}^{App} \quad (8)$$

여기서  $\gamma_{0,x} = \sum_{l=0}^{L-1} \gamma_{0,x,l} = \sum_{l=0}^{L-1} \Gamma_X(l) \gamma_{0,l}$ 이고  $\Gamma_X(l)$ 은 시간 옵셋이  $X$ 번째 영역에 속한다고 할 때  $l$ 번째 경로의 근사화 계수로 영역별 값은 다음과 같다.

$$\Gamma_I(l) = 1, l = 0, \dots, q-1$$

$$\Gamma_{II(q)}(l) = \begin{cases} 1, & l = 0, \dots, q-1 \\ \frac{T + 2T_G - 2\Delta_{0,0} - 2\tau_l}{T}, & l = q, \dots, L-1 \end{cases}$$

$$\Gamma_{III}(l) = \frac{(T_S - \Delta_{0,0})(T_S - \Delta_{0,0} - 2\tau_l)}{T^2}, l = 0, \dots, L-1$$

$$\Gamma_{II-2(q)}(l) = \begin{cases} \frac{T + 2\Delta_{0,0} + 2\tau_l}{T}, & l = 0, \dots, q-1 \\ 1, & l = q, \dots, L-1 \end{cases}$$

$$\Gamma_{III-2}(l) = \frac{(T + \Delta_{0,0})(T + \Delta_{0,0} + 2\tau_l)}{T^2}, l = 0, \dots, L-1$$

비균일 MIP(Multipath Intensity Profile)에 대해  $\gamma_{0,x}$ 의 확률밀도 함수는 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$p(\gamma_{0,x}) = \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\pi_{x,l}}{\gamma_{0,x,l}} \exp\left(-\frac{\gamma_{0,x}}{\gamma_{0,x,l}}\right)$$

여기서  $\pi_{x,l} = \prod_{i=0, i \neq l}^{L-1} \frac{\overline{\gamma_{0,x,l}}}{\gamma_{0,x,l} - \gamma_{0,x,i}}$ 이고  $\overline{\gamma_{0,x,l}} = \Gamma_X(l) \overline{\gamma_{0,l}}$ 이다.

따라서 근사화된 조건부 오류율은 다음과 같다.

$$P_{0,x}^{App}[e | \gamma_{0,x}] = Q\left(\sqrt{\frac{|Re\{D_{0,x}^{App}\}|^2}{Var[V_{0,x}]/2}}\right) = Q(\sqrt{2 SINR_{0,x} \gamma_{0,x}}) \quad (9)$$

여기서  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ 이고  $Var[V_{0,x}] = Var[ICL_{0,x}] + Var[ISL_{0,x}] + Var[MAI_0] + Var[\eta_0]$ 이다. 또한  $SINR_{0,x} = 1/Var[V_{0,x}]$ 이다.

최종적인 평균 오류율의 근사값은  $P_{0,x}^{App}[e | \gamma_{0,x}]$ 을  $\gamma_{0,x}$ 에 대해 평균을 취하여 다음과 같이 유도 된다<sup>[8]</sup>.

$$\begin{aligned}
 P_{0,X}^{App}[e] &= \int_0^{\infty} p(\gamma_{0,X}) P_{0,X}^{App}[e|\gamma_{0,X}] d\gamma_{0,X} \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{l=0}^{L-1} \pi_{X,l} \left[ 1 - \sqrt{\frac{SNR_{0,X}^{App} \gamma_{0,X,l}}{1 + SNR_{0,X}^{App} \gamma_{0,X,l}}} \right]
 \end{aligned} \quad (10)$$

### 3. 시간 오프셋에 의한 유효 SNR 손실

앞서 언급한 바와 같이 시간 오프셋은 원하는 신호성분의 감쇄와 반송파간 직교성 파괴로 발생하는 ICI 및 ISI 성분으로 인한 성능 저하를 유발한다. 이러한 두 가지 영향을 고려해 본 논문에서는 신호대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio) 손실을 정의하고 그 영향을 비교 분석한다. 평균 SNR을  $\overline{SNR}_0 = \frac{NT}{N_0} E[\gamma_0]$ 로 정의할 때 유효 평균 SNR은 다음과 같이 근사화된 형태로 표현이 가능하다.

$$\overline{SNR}_0^{Eff} = \frac{|D_{0,X}|^2_{\{\gamma_{0,l} = \gamma_{0,l}\}_{l=0}^{L-1}}}{\text{Var}[ICI_{0,X}] + \text{Var}[ISI_{0,X}] + \text{Var}[\eta_0]} \quad (11)$$

$$SNR_{Loss}(dB) = \overline{SNR}_0(dB) - \overline{SNR}_0^{Eff}(dB) \quad (12)$$

위의 식들을 통하여 시간 오프셋이 영역 I에 속할 경우  $\overline{SNR}_0^{Eff} = \overline{SNR}_0$ 과  $SNR_{Loss}(dB) = 0$ 임을 알 수 있다. 즉 상기 식은 시간 오프셋이 존재할 경우 원하는 신호성분의 감쇄와 ICI 및 ISI 성분에 의한 SNR 손실을 의미한다.

## IV. 성능 분석 결과

본 장에서는 보호구간을 갖는 비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템의 성능에 대한 시간 오프셋의 영향을 주파수 선택적 다중경로 레일리 페이딩 채널에서 확인하고 성능분석 결과를 모의실험과 비교 분석한다. MC-DMA 시스템의 변수로  $N=64$ ,  $M=10$ ,  $L=4$  및  $T_G=7T_c$ 를 가정하였다. 또한  $NSTO = \Delta_{0,0}/T$ 는 정규화된 시간 오프셋을 의미한다.

그림 2는 다양한 시간 오프셋에 대해 SNR의 변화에 따른 SNR 감쇄를 비교한다. 그림을 통하여 본 논문에서 유도한 근사화된 성능 분석 결과가 다양한 SNR 및 시간 오프셋에 대해 모의실험 결과와 유사함을 알 수 있다. 또한 낮은 SNR의 경우에는 시간 오프셋에 따른 SNR 감쇄가 천천히 증가되지만 높은 SNR의 경우 시간 오프셋에 따른 SNR 감쇄가 급격히 증가된다. 이는 높은 SNR

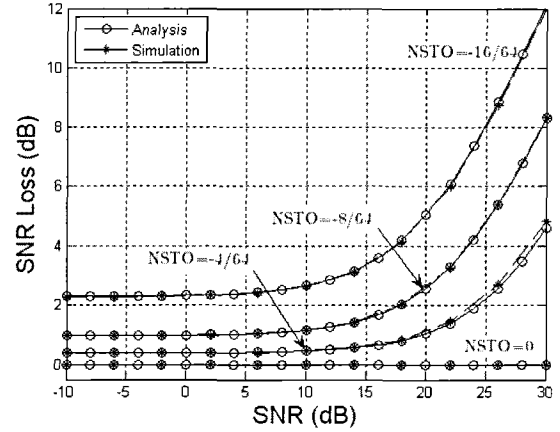


그림 2. 다양한 시간 오프셋에 대한 SNR 변화에 따른 SNR 감쇄

Fig. 2. SNR loss with respect to SNR for the different NSTO.

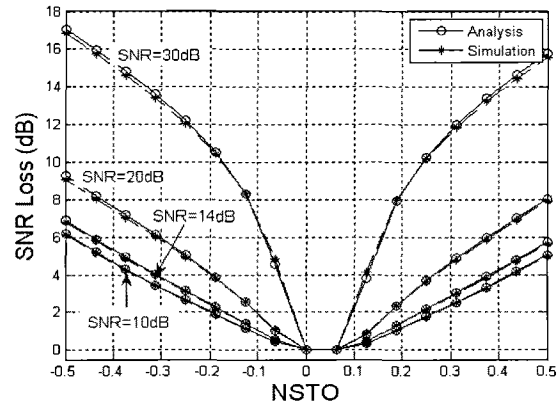


그림 3. 다양한 SNR에 대한 시간 오프셋 변화에 따른 SNR 감쇄

Fig. 3. SNR loss with respect to NSTO for the different SNR.

의 경우 시간 오프셋에 의해 발생하는 간섭 성분의 영향이 더욱 커지게 되기 때문이다.

그림 3은 정규화된 시간 오프셋의 변화에 따른 SNR 감쇄를 나타낸다. 앞서 수식 분석을 통하여 확인한바와 같이 시간 오프셋이 영역 I에 속할 경우 성능 저하가 없음을 알 수 있다. 또한 10% 및 20%의 정규화 시간 오프셋에 대해 SNR=10dB기준으로 0.9dB 및 2.0dB의 SNR 감쇄를 확인하였다. 그리고 시간 오프셋의 영역에 따라 성능은 대칭적인 경향(다중경로 성분의 지수함수적 감소인자로 인하여 완벽한 대칭은 아님)을 나타낸다.

그림4는 시간 오프셋의 변화에 따른 평균오류율을 나타낸다. 다양한 SNR 및 시간 오프셋에 대해 성능 분석 결과가 모의실험과 유사함을 확인할 수 있다. 다만 SNR이 높은 경우 시간 오프셋에 의한 두 가지 영향에 따

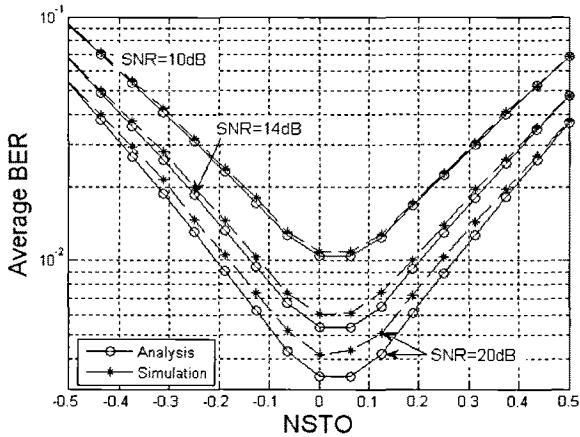


그림 4. 다양한 SNR에 대한 시간 오프셋 변화에 따른 평균 오류율

Fig. 4. Average BER with respect to NSTO for the different SNR.

라 성능차가 다르게 발생함을 알 수 있다. 우선 높은 SNR에서 시간 오프셋이 작은 경우는 자기 간섭 성분에 의한 영향이 상대적으로 작은 반면에 원하는 신호 성분에 대한 근사화 영향이 상대적으로 크게 작용한다. 따라서 성능차가 크게 발생한다. 반면에 시간 오프셋이 큰 경우는 원하는 신호 성분에 대한 근사화 영향보다 발생하는 자기 간섭성분의 영향이 상대적으로 크게 되어 성능차이 적게 발생함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 비동기 MC-CDMA 상향 링크 시스템에 대한 시간 오프셋의 영향을 주파수 선택적 다중 경로 페이딩 채널에 대해 분석하였다. 우선 시간 오프셋의 존재가 원하는 신호 성분의 전력 누수를 야기할 뿐만 아니라 부반송파간 직교성을 파괴시킴을 수식적으로 분석하고, 이로 인해 ICI 및 ISI의 자기 간섭성분이 발생함을 확인하였다. 또한 이러한 영향을 SNR 감쇄 및 평균오류율로 유도하고 그 정확성을 모의실험을 통해 검증하였다.

#### 참 고 문 헌

[1] 고균병, 홍대식 “비동기 MC-CDMA 시스템에 대한 보호구간의 영향 분석,” 한국통신학회 논문지, 제33권, 11호, pp. 851-859, 2008년 11월.  
 [2] S. Hara and R. Prasad, “Overview of multicarrier CDMA,” *IEEE Comm. Mag.*, vol.

35, no. 12, pp. 126-133, Dec. 1997.  
 [3] Feng-Tsun Chien, Chien-Hwa Hwang, and C.-C. Jay Kuo, “Performance analysis of multicarrier CDMA systems with frequency offsets and random spreading under optimum combining,” *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 54, no. 4, pp. 737-747, April 2006.  
 [4] Rui Dinis and Paulo Silva, “Analytical evaluation of nonlinear effects in MC-CDMA signals,” *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 5, no. 8, pp. 2277-2288, Aug. 2006.  
 [5] B. Smida, S. Affes, K. Jamaoui, and P. Mermelstein, “A Multicarrier-CDMA Space-Time Receiver With Full-Interference-Suppression Capabilities,” *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, vol. 57, no. 1, pp. 363-379, Jan. 2008.  
 [6] Heidi Steendam and Marc E. Moeneclaey, “The effect of synchronisation errors on MC-CDMA performance,” in *Proc. IEEE ICC'99*, vol. 3, pp. 1510-1514, 1999.  
 [7] 박명희, 홍대식 “사용자간 상대적인 시간오차에 의한 OFDMA 역방향 시스템의 성능 분석,” 전자공학회 논문지, 제42권, TC 편 2호, pp. 17-22, 2005년 02월.  
 [8] John G. Proakis, *Digital Communication*. McGraw Hill, 1995.  
 [9] Dongju Kim, Myounghee Park, Jeongho Park, Kyunbyoung Ko, “Investigation of the AGA Effect on Performance analysis of an MPIC,” *IEICE Trans. on Comm.*, vol. E92-B, no. 02, pp. 658-661, Feb. 2009.

## — 저 자 소 개 —



고 균 병(평생회원)

1997년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.

1999년 연세대학교 전기전자공학 석사 졸업.

2004년 연세대학교 전기전자공학 박사 졸업.

2004년 3월~2007년 2월 삼성전자 통신연구소

2007년 3월~현재 국립충주대학교 제어계측 공학과

<주관심분야 : 이동통신, MIMO, 적응신호처리>



우 중 재(정회원)

2000년 순천대학교 전자공학과 학사 졸업.

2002년 연세대학교 전기전자공학 석사 졸업.

2007년 연세대학교 전기전자공학 박사 졸업.

2007년 9월~2009년 2월 삼성전자 통신연구소

2009년 3월~현재 한서대학교 전자컴퓨터통신 학과

<주관심분야 : 이동통신, 신호처리>