

주파수 선택적 페이딩 채널에서의 다중톤 DS-CDMA 시스템 성능분석

正會員 한 중 선*, 윤 원 식**

Performance Analysis of a Multitone DS-CDMA System in a Frequency Selective Fading Channel

Jong-Sun Han*, Won-Sik Yoon** *Regular Members*

※본 논문은 정보통신부 대학기초연구지원사업에 의하여 지원되었음

요 약

본 논문에서는 다중톤 변조 방식과 concatenated 직교 PN 확산 시퀀스를 사용하는 DS-CDMA 시스템을 결합한 새로운 통신 시스템의 성능을 분석하였다. 제안된 시스템은 고속 통신에 적합한 다중톤 변조 방식과 많은 사용자 용량을 수용하기 위해 concatenated 시퀀스를 사용한 DS-CDMA의 장점을 이용하여 성능을 향상시켰다. 불완전 섹터화와 voice activity를 고려하여 다중셀, 다중사용자, 다중경로 레일레이와 라이선 페이딩 채널에서 단일 상관 수신기와 최대비 합성 수신기에 대해서 성능분석을 하였다. 제안된 시스템은 PN 확산 시퀀스만을 사용한 다중톤 CDMA 시스템보다 향상된 평균 비트 오류율과 사용자 용량을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, we analyse the performance of a new communication system combining both multitone modulation and direct sequence code division multiple access(DS-CDMA) system with a concatenated orthogonal/pseudo-noise(PN) spreading sequence. The performance of the proposed system is improved using the advantages of both multitone modulation for high rate communication and DS-CDMA with a concatenated sequence for large user capacity. Considering imperfect sectorization and voice activity, the system performance is investigated for a single correlator and a maximal ratio combiner in a multicell, multiuser, and multipath slowly Rayleigh/Rician

*LG 정보통신 중앙연구소

**아주대학교 전기전자공학부

論文番號:97160-0509

接受日字:1997年 5月 9日

fading channels. The proposed system is shown to have the more improved average bit error rate(BER) and user capacity over the MT-CDMA system with a conventional PN spreading sequence.

I. 서 론

아날로그 방식의 FDMA(frequency division multiple access)와 디지털 방식의 TDMA(time division multiple access)에 비해 훨씬 우수한 사용자 용량을 가지고 있는 것으로 알려진 DS-CDMA 무선 접속 기술은 최대 2Mbps까지의 전송율을 요구하는 제 3세대 무선 이동통신인 미래 공중 육상 이동통신 시스템(future public land mobile telecommunication system)과 개인통신 서비스(personal communication service)등에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 고속 전송율을 요구하는 통신 시스템에 DS-CDMA를 적용할 경우 주파수 영역에서 신호를 확산시키므로 많은 대역폭을 필요로 하게 되고 전송율이 증가함에 따라 상호부호간 간섭(intersymbol interference)이 증가하게 되어 시스템 성능이 저하되게 된다. 이러한 DS-CDMA의 단점을 보완하기 위해서 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)으로도 알려진 다중톤(multitone) 변조방식을 DS-CDMA 시스템에 적용하는 방식에 대한 연구가 주목받고 있다[1]. 고속 통신을 위한 다중톤 변조방식은 데이터를 각기 다른 부채널(subchannel)로 병렬전송하여 심벌주기가 병렬 부채널 갯수 N_f 배만큼 증가되기 때문에 상호부호간 간섭에 견인한 특성을 가지게 된다. 각 부채널에는 직교 부반송파(orthogonal subcarrier)를 신음으로써 직교성을 유지하면서 주파수 영역에서 겹쳐질 수 있으므로 스펙트럼 효율이 향상되게 된다. 또한 FFT를 사용하여 다중톤 변조기 및 복조기를 구성할 수 있으므로 디지털 구현이 용이하다[2]-[4].

같은 주파수 채널을 모든 셀이 공유하는 셀룰라 DS-CDMA 시스템에서는 셀 내부와 외부 셀에서의 다중사용자 간섭(multiuser interference)이 시스템의 사용자 용량을 결정하는 중요한 요소가 된다. 순방향 링크(forward link)에서 직교 시퀀스와 long PN 시퀀스를 결합한 concatenated 직교 PN 확산 시퀀스를 사용할 경우, 직교 시퀀스를 사용하여 시간 동기가 맞추어진 셀 내에서의 다중사용자 간섭을 제거하고,

long PN 시퀀스를 사용하여 다중경로에 의한 비동기 간섭을 감소시키므로 시스템의 사용자 용량을 크게 향상시킬 수 있다[5].

본 논문에서 제안한 다중톤 DS-CDMA 시스템은 한 개의 반송파를 사용한 DS-CDMA에서의 칩 주기와 동일한 칩 주기를 병렬 부채널에서 유지할 경우 병렬 부채널에서의 확산 시퀀스 주기가 병렬 부채널 갯수 N_f 배만큼 증가하게 된다. 따라서 한 개의 반송파를 사용한 DS-CDMA와 거의 동일한 대역폭을 사용하면서도 더 많은 사용자를 수용할 수 있게 된다. 또한 병렬 부채널에서의 확산 시퀀스 주기를 한 개의 반송파를 사용한 DS-CDMA에서와 같이 유지할 경우, 즉 칩 주기를 N_f 배 만큼 증가시킬 경우 대역폭이 $1/N_f$ 만큼 감소하기 때문에 나머지 대역을 이용하여 주파수 diversity를 구현하여 시스템 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 다중셀(multicell), 다중경로(multipath), 다중사용자(multiuser)환경의 레일리 페이딩 채널(Rayleigh fading channel)과 라이선 페이딩 채널(Rician fading channel)에서 concatenated 확산 시퀀스를 사용하여 다중톤 변조방식과 DS-CDMA를 결합한 새로운 다중톤 CDMA 시스템의 성능을 nonconcatenated 시퀀스, 즉 long PN 시퀀스만을 이용한 다중톤 DS-CDMA 시스템과 비교 분석하였다. 시스템 성능은 단일 상관 수신기와 최대비 합성 수신기에서 불완전 섹터화(sectorization)와 voice activity를 고려한 평균 비트 오류율(average bit error rate)과 순방향 전력제어시의 outage 확률로서 나타내었다. 평균 비트 오류율은 무선 채널을 통과한 수신 신호의 간섭 전력을 수치적으로 구한 후, 가우션 근사방법을 이용하여 조건부 평균 SNR을 구함으로써 얻을 수 있다. 평균 간섭 전력이 아닌 순시 전력에 대해 분석하기 위해서 랜덤 데이터를 발생시켜 outage 확률로서 성능분석을 하였다.

II. 시스템 모델

다중사용자 간섭을 감소시키는 concatenated 시퀀스의 장점을 활용하기 위하여 순방향 링크에서의 다중톤 DS-CDMA 시스템에 대해서 고찰한다. 각 셀들은 방향성 안테나(directional antenna)를 사용하여 3개의 섹터(sector)로 나누어졌으며 이동체에서 다른 기지국으로부터 수신된 신호들은 동기화되지 않았다. 각 기지국을 구분하기 위해서 동일한 Walsh-Hadamard(WH) 코드 집합을 가진 long PN 시퀀스를 사용한다. 본 논문에서 intercell 간섭은 그림 1과 같이 중심셀과 인접한 18개 셀간의 간섭을 고려한다.

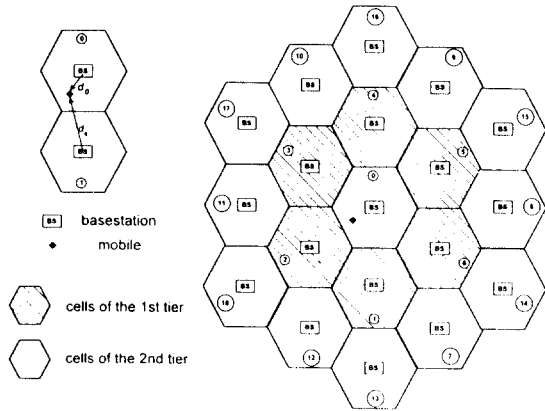


그림 1. 다중셀 환경
Fig 1. Multicell environment

2.1 송신기 모델

다중톤 송신기의 블록도는 그림 2와 같다. 전송율이 N_i/T 인 이진 데이터열은 심벌 주기가 T 인 N_i 개의 병렬 부채널로 나누어지고 p 번째 데이터심벌은 주파수가 f_p 인 부반송파를 변조한다. 부반송파 주파수 f_p 는 다음과 같다.

$$f_p = f_0 + p/T, 0 \leq p \leq N_i - 1 \tag{2.1}$$

여기서 f_0 는 가장 작은 부반송파 주파수이다.

부반송파들은 병렬 부채널의 데이터 전송율인 $1/T$ 간격으로 분리되어 있다. 부반송파들은 직교성을 유지하면서 주파수 영역에서 겹쳐지므로 스펙트럼 효율이 향상된다. 각각의 부반송파들을 더하여 얻어진

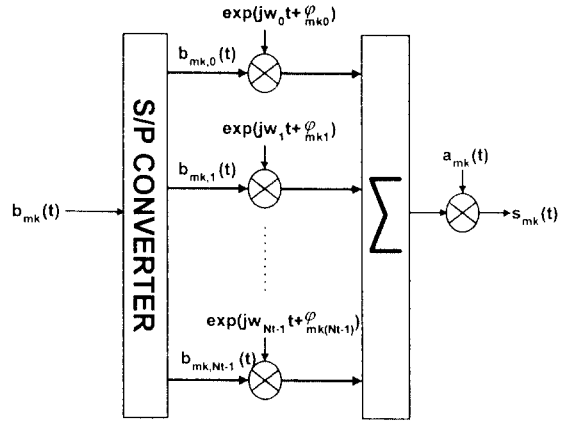


그림 2. 다중톤 DS-CDMA 송신기 블록도
Fig 2. Block diagram of a multitone DS-CDMA transmitter

다중톤 신호는 확산 시퀀스에 의하여 확산된다. 확산 시퀀스는 직교 시퀀스와 long PN 시퀀스를 연결시킨 concatenated 직교 PN 확산 시퀀스이다. Long PN 시퀀스는 다중경로에서 비동기 간섭에 의한 영향을 상쇄시키기 위하여 사용한다. Concatenated 확산 시퀀스 $a_{mk}(t)$ 은 다음과 같다.

$$a_{mk}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_{mk}^j P_{T_c}(t - jT_c) \tag{2.2}$$

$$= \sum_{j=-\infty}^{\infty} d_m^j w_{mk}^j P_{T_c}(t - jT_c)$$

여기에서 $a_{mk}^j \in \{-1, 1\}$ 은 m 번째 기지국의 k 번째 사용자를 위한 concatenated 확산 시퀀스이며, $d_m^j \in \{-1, 1\}$ 은 m 번째 기지국의 long PN 시퀀스, $w_{mk}^j \in \{-1, 1\}$ 은 m 번째 기지국의 k 번째 사용자를 위한 직교 WH 코드이다. WH 코드의 주기 N_c 는 한 개의 데이터 심벌주기와 같고, long PN 시퀀스의 주기 P_c 는 N_c 보다 훨씬 크다. P_{T_c} 는 칩 주기가 $T_c = T/N_c$ 인 직각 칩 펄스이다.

BPSK 변조를 한 다중톤 CDMA 시스템에서 m 번째 기지국의 k 번째 사용자가 전송하는 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$s_{mk}(t) = \sqrt{2P_{mk}} \sum_{p=0}^{N_i-1} \text{Re}\{b_{mk,p}(t) a_{mk}(t) \exp[j(2\pi f_p t + \phi_{mkp})]\}$$

여기서 P_{mk} 은 전송된 신호전력이고 φ_{mk} 은 m 번째 기지국, k 번째 사용자의 q 번째 k 번째 사용자 위상이다. 모든 기지국의 각 사용자가 전송하는 전력은 모두 같다고 가정하고 ($P_{mk} = P_{0k} = P$) 모든 이동체는 가장 강한 기지국 신호와 교신한다.

m 번째 기지국에서 전송하는 전체신호는 아래와 같다.

$$s_m(t) = \sum_{k=0}^{K_m} \chi_{mk} s_{mk}(t) \quad (2.4)$$

여기서 $K_m + 1$ 은 m 번째 기지국의 총 사용자수로서 모든 기지국의 사용자수는 같다고 가정한다. χ_{mk} 는 voice activity를 나타내는 랜덤변수로서 ε 의 확률로서 1이고 $1-\varepsilon$ 의 확률로서 0이다.

2.2 채널 모델

m 번째 기지국에 대한 라이선과 레일레이 다중경로 페이딩 채널의 복소수 기저대역 등가모델은 다음과 같다.

$$h_m(t) = \sum_{n=0}^{L_m} \alpha_{mn} \delta(t - \tau_{mn}) \quad (2.5)$$

여기서 L_m 은 영번째 경로를 제외하고 분해 가능한 다중경로의 갯수, δ 는 단위충격 함수, τ_{mn} 과 α_{mn} 은 각각 m 번째 기지국에 대한 n 번째 경로의 시간지연과 경로 복소수 이득계수(complex gain coefficient)이다. 경로 복소수 이득계수 α_{mn} 는 다음과 같다.

$$\alpha_{m0} = \beta_m + \gamma_{m0} A_{m0} \exp(j\theta_{m0}) \quad (2.6)$$

$$\alpha_{mn} = \gamma_{mn} A_{mn} \exp(j\theta_{mn}), \quad 1 \leq n \leq L_m \quad (2.7)$$

여기서 $\gamma_{mn} A_{mn}$ 과 θ_{mn} 은 각각 m 번째 기지국에 대한 n 번째 경로의 감쇄와 위상천이를 나타낸다. A_{mn} 은 레일레이 분포를 가진 랜덤변수이고, γ_{mn} 은 경로의 세기를 나타내는 상수이다. $E[A_{mn}^2] = 1$ 로 정규화시킨다. 레일레이 페이딩에서는 직경로 성분이 없으므로 $\beta_m = 0$ 이고 라이선 페이딩 채널에서는 영번째 경로에서 페이딩 성분이 없다고 가정하여 $\beta_m = 1$, $\gamma_{m0} = 0$ 으로 가정하였다. A_{mn} , θ_{mn} , τ_{mn} 은 상호 독립적인 랜덤 변수로, 한 심벌주기 동안 일정하다고 가정한다. θ_{mn} 은 $[0, 2\pi)$ 에 걸쳐 균일하게 분포되어 있다. 수신기가 영번째 경로와 완전하게 동기가 되었다고 가정하면

시간지연 τ_{00} 은 영, 다른 경로에서의 시간지연은 τ_{00} 에 대한 상대적인 시간지연으로 생각할 수 있다. 분해 가능한 모든 경로들은 T_c 와 같거나 그 이상의 시간차이로 분리되므로 시간지연 $\tau_{mn} = nT_c + \hat{\tau}_n$ ($1 \leq n \leq L_m$)로 나타낼 수 있다. 여기서 $\hat{\tau}_n$ 은 $[0, T_c)$ 사이에 균일하게 분포하는 i.i.d 랜덤 변수이다. 본 논문에서는 최대 지연확산이 각 병렬 부채널에서의 심벌주기 T 보다 충분히 작다고 가정하여 상호부호간 간섭은 무시하고 칩간 간섭을 고려하였다.

Lognormal shadowing과 경로손실에 의해 중심셀의 이동체가 수신한 m 번째 기지국으로부터 전송된 신호의 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P'_m \propto P_m \left(\frac{10^{\xi_m/10}}{d_m^r} \right) \quad (2.8)$$

여기서 ξ_m 은 평균이 영, 표준편차가 σ 인 가우션 랜덤 변수로서 각 기지국에 대하여 독립적이다. d_m 은 m 번째 기지국과 중심셀 이동체간의 거리를 나타내며, r 은 경로손실지수(path loss exponent)이다.

2.3 수신기 모델

채널을 통과한 m 번째 기지국에서 전송한 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m(t) = \sum_{k=0}^{K_m} \sum_{n=0}^{L_m} \chi_{mk} \text{Re} \{ \alpha_{mn} s'_{mk}(t - \tau_{mn}) \} \quad (2.9)$$

여기서 $s'_{mk}(t)$ 는 $s_{mk}(t)$ 의 복소수형이다. 이동체가 수신한 전체 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \sum_{m=0}^M \sqrt{\rho_m} Y_m(t - \zeta_m) + n(t) \quad (2.10)$$

여기서 ζ_m 은 영번째 기지국에 대한 m 번째 기지국의 상대적인 시간지연이고, $n(t)$ 는 양측 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 부가 백색 가우션 잡음이다. M 은 intercell 간섭을 고려한 인접셀의 갯수이다. $\sqrt{\rho_m}$ 은 shadowing과 경로손실을 고려한 계수로서, 영번째 기지국에 대하여 m 번째 기지국으로부터 수신된 신호전력의 상대적인 감쇄를 나타내며 다음과 같이 주어진다[5].

$$\rho_m = \left(\frac{d_0}{d_m} \right)^r 10^{(\xi_m - \xi_0)/10}, \quad (\rho_m \leq 1) \quad (2.11)$$

각 병렬채널에서의 수신 데이터는 $1/T$ 으로 판별된 후 직렬 데이터열로 변환된다.

2.4 불완전 섹터화

방향성 안테나를 사용하여 셀을 섹터화시키면 섹터 갯수에 비례하여 간섭이 감소하므로 시스템의 사용자 용량을 향상시킬 수 있다. 그러나 방향성 안테나간의 overlap과 sidelobe에 의해서 셀내의 섹터간에 간섭이 발생하게 된다[6]. 그림 3(a)와 같이 안테나 방사패턴을 단순화된 모델로 나타내고 이러한 안테나 방사패턴에 의한 불완전한 섹터화를 그림 3(b)와 같이 섹터간의 overlap 각도 v 로 모델링하였다. 섹터화된 시스템과 섹터화되지 않은 시스템에서 수신된 간섭파위의 비 μ 는 아래와 같다.

$$\mu \cong \frac{\hat{P}_{\text{sectorized}}}{\hat{P}_{\text{non-sectorized}}} = \left(\frac{1}{D} + \frac{2v}{360} \right) \quad (2.12)$$

여기서 \hat{P} 는 간섭파위, D는 섹터 갯수를 나타낸다.

2.5 Outage 확률

Outage 확률 P_{out} 은 수신기에서의 순시 BER이 정

해진 통신 품질을 유지하는데 필요한 BER을 초과하는 시간비율이다[7].

$$P_{out} = \Pr(P_e > \hat{P}_e) < \Lambda \quad (2.13)$$

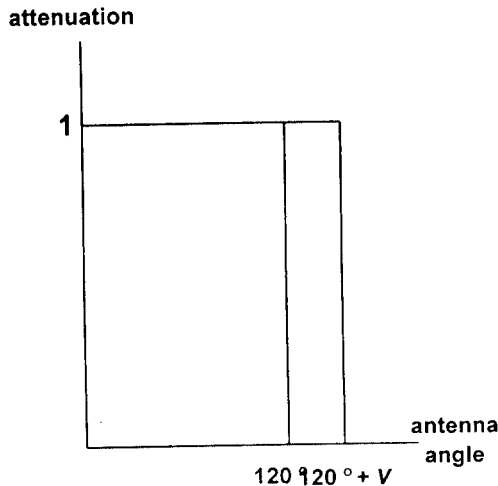
여기서 P_e 는 순시 BER이고, \hat{P}_e 는 통신 품질을 유지하기 위해 필요한 BER이다. Λ 는 정해진 통신 품질을 유지하기 위한 P_{out} 의 임계값을 나타낸다. 일반적으로 임계값은 0.01이며 outage가 시간의 99% 동안 발생하지 않는 것을 의미한다. $P_e = Q(\sqrt{\text{SNR}})$ 이므로 P_{out} 을 SNR로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{out} = \Pr(\text{SNR} < \widehat{\text{SNR}}) < \Lambda \quad (2.14)$$

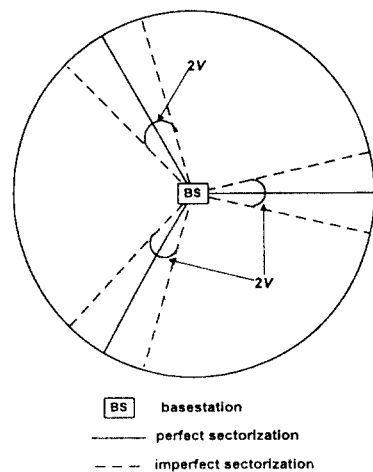
여기서 SNR은 순시값이고 $\widehat{\text{SNR}}$ 는 \hat{P}_e 를 만족하는 상수이다.

\hat{P}_e 를 만족하기 위한 중심셀의 k 번째 이동국이 수신한 SNR은 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$(\text{SNR})_{0k} = \frac{\Omega_{0k} \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)}{I'_{0k}} \geq \widehat{\text{SNR}} \quad (2.15)$$



(a) 안테나 방사패턴(radiation pattern) 모델



(b) 불완전 섹터화

그림 3. 불완전 섹터화 모델

Fig 3. Imperfect sectorization model

여기서 I'_{0k} 는 중심셀의 k 번째 이동국이 수신한 총 간섭전력이고, Ω_{0k} 는 중심셀의 k 번째 이동국에 할당된 전력 비율을 나타내며, $(B+1)$ 은 최대비 합성 수신기의 branch 갯수이다. 각 기지국이 이동국에 전송하는 총 전력 P_m 은 모두 같고 일정하게 유지된다고 가정하였다. N_s 는 각 셀터의 총 사용자수이므로 voice activity를 고려할 경우 Ω_{0k} 에 대해서 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\sum_{k=0}^{N_s-1} \chi_{0k} \Omega_{0k} \leq 1 \quad (2.16)$$

식 (2.16)을 식 (2.15)에 적용하면 아래와 같은 관계식이 성립한다.

$$\sum_{k=0}^{N_s-1} \chi_{0k} \Delta_{0k} \leq \frac{1}{\text{SNR}} \quad (2.17)$$

여기서 $\Delta_{0k} = I'_{0k} / (\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2)^2$ 이다.

식 (2.17)의 조건을 만족하지 못하면 시스템은 outage 상태가 되므로 outage 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \Pr \left[\sum_{k=0}^{N_s-1} \chi_{0k} \Delta_{0k} > \frac{1}{\text{SNR}} \right] \quad (2.18)$$

III. 단일 상관 수신기

시간지연 τ 를 갖는 주파수 p 및 시퀀스 k 와 주파수 q 및 시퀀스 i 에 대한 연속시간에서의 주기 상호상관함수(periodic cross-correlation function)는 다음과 같다.

$$R_{0k, 0i, pq}^x(\hat{k}_0, \tau) = \int_0^T a_{0k}(t + k_0 T_c - \tau) a_{0i}(t + k_0 T_c) f\left\{ \frac{2\pi(p-q)t}{T} \right\} dt \quad (3.1)$$

여기서 $f(\cdot)$ 는 x 가 c 일 때 $\cos(\cdot)$, s 일 때 $\sin(\cdot)$ 이다.

연속시간에서의 부분 상관함수(partial cross-correlation function)들은 다음과 같다.

$$R_{mk, 0i, pq}^x(\hat{k}_m, \hat{k}_0, \tau)$$

$$= \int_0^T a_{mk}(t + \hat{k}_m T_c - \tau) a_{0i}(t + \hat{k}_0 T_c) f\left\{ \frac{2\pi(p-q)t}{T} \right\} dt \quad (3.2)$$

$$R_{mk, 0i, pq}^x(\hat{k}_m, \hat{k}_0, \tau) = \int_0^T a_{mk}(t + \hat{k}_m T_c - \tau) a_{0i}(t + \hat{k}_0 T_c) f\left\{ \frac{2\pi(p-q)t}{T} \right\} dt \quad (3.3)$$

여기서 \hat{k}_m 과 \hat{k}_0 은 각각 m 번째와 영번째 기지국에 대한 long PN 시퀀스의 초기위상을 나타낸다.

중심셀에서 i 번째 이동체, q 번째 부반송파에서 단일 상관 수신기 출력의 영번째 심벌에 대한 판별값은 아래와 같다.

$$Z_{0i, q}^0 = \int_0^T r(t) \Psi_{0i, q}(t) dt = \sqrt{(P/2)} T \{ \alpha_{00} b_{0i, q}^0 + I_{u, sc} + I_{c, sc} + I_{mp, sc} + \sum_{m=1}^M F_{m, sc} \} + n_0 \quad (3.4)$$

여기서 $\Psi_{0i, q}(t) = a_{0i}(t) \cos(2\pi f_q t + \varphi_{0iq})$ 이고 $n_0 = \int_0^T n(t) \Psi_{0i, q}(t) dt$ 이다. M 은 intercell 간섭을 고려한 인접 셀의 갯수이다. 식 (3.4)에서 간섭 성분은 셀 내에서의 간섭과 셀 외부에서의 간섭 $F_{m, mp, sc}$ 으로 나누어지고 셀 내에서의 간섭은 시간 동기화된 간섭 $I_{u, sc}$, $I_{c, sc}$ 와 비동기 간섭 $I_{mp, sc}$ 으로 나누어졌다.

중심셀에서 시간 동기화된 경로($n=0$)에서의 다중 사용자 간섭 $I_{u, sc}$ 와 다중톤 간섭 $I_{c, sc}$ 를 연속시간에서의 상호상관함수로 나타내면 다음과 같다.

$$I_{c, sc} = \frac{1}{T} \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{K_s} \chi_{0k} |\alpha_{00}| b_{0k, q}^0 R_{0k, 0i, qq}^c(k'_0, 0) \cos(\varphi_{0kq} - \varphi_{0iq}) \quad (3.5)$$

$$I_{c, sc} = \frac{1}{T} \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{K_s} \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq i}}^{N_s-1} \chi_{0k} |\alpha_{00}| b_{0k, p}^0 \{ \cos(\varphi_{0kp} - \varphi_{0iq}) R_{0k, 0i, pq}^c(k'_0, 0) - \sin(\varphi_{0kp} - \varphi_{0iq}) R_{0k, 0i, pq}^s(k'_0, 0) \} \quad (3.6)$$

중심셀 내에서의 다중경로에 의한 비동기 간섭 $I_{mp, sc}$ 은 다음과 같다.

$$I_{mp, sc} = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{K_s} \sum_{p=0}^{N_s-1} \sum_{n=1}^{L_s} \chi_{0k} |\alpha_{0n}| \cdot \{ \cos(\Phi_{0n} + \varphi_{0kp} - \varphi_{0iq}) [b_{0kp}^{-1} R_{0k, 0i, pq}^c(k'_0, k'_0, \tau_{0n}) + b_{0k, p}^0 \hat{R}_{0k, 0i, pq}^c(k'_0, k'_0, \tau_{0n})] \} \quad (3.7)$$

$$-\sin(\Phi_{0n} + \varphi_{0kp} - \varphi_{0iq}) [b_{0kp}^{-1} R_{0k, 0i, pq}^s(k'_0, k'_0, \tau_{0n}) + b_{0k, p}^0 \hat{R}_{0k, 0i, pq}^s(k'_0, k'_0, \tau_{0n})]$$

인접한 한 개의 기지국에 의한 Inter-cell 간섭 $F_{m, mrc}$ 은 다음과 같다.

$$F_{m, sc} = \frac{\sqrt{\rho_m}}{T} \sum_{k=0}^{K_m} \sum_{p=0}^{N_i-1} \sum_{n=0}^{L_m} \chi_{mk} |\alpha_{mn}| \cdot \{ \cos(\Phi_{mn} + \varphi_{mkp} - \varphi_{0iq}) [b_{mkp}^{-1} R_{mk, 0i, pq}^s(k'_m, k'_0, \tau_{mn}) + b_{mk, p}^0 \hat{R}_{mk, 0i, pq}^s(k'_m, k'_0, \tau_{mn})]$$

$$-\sin(\Phi_{mn} + \varphi_{mkp} - \varphi_{0iq}) [b_{mkp}^{-1} R_{mk, 0i, pq}^s(k'_m, k'_0, \tau_{mn}) + b_{mk, p}^0 \hat{R}_{mk, 0i, pq}^s(k'_m, k'_0, \tau_{mn})]$$

여기서 $\Phi_{mn} = \theta_{mn} - \omega_p(\tau_{mn} + \zeta_m)$ 이다.

식 (3.5)-(3.8)의 간섭 성분은 상호 독립적인 랜덤변수의 합이므로 중앙극한정리를 적용하면 각 간섭성분을 평균이 영인 가우시안 랜덤변수로 가정할 수 있다. 따라서 간섭성분의 분산을 구함으로써 간섭전력을 구할 수 있게 된다[8], [9].

3.1 라이선 페이딩 채널

Concatenated 시퀀스에서 $R_{0k, 0i, qq}^s(k'_0, 0) = 0$ 이고 따라서 $\text{Var}(I_{u, sc}) = 0$ 이다. Nonconcatenated 시퀀스에서 $\text{Var}(I_{u, sc}) = \varepsilon K_0 / (2N_c)$ 이다.

식 (3.5)-(3.8)의 분산은 concatenated 시퀀스와 nonconcatenated 시퀀스에 대해 공통이며 다음과 같이 주어진다.

$$\text{Var}(I_{c, sc}) = \varepsilon \sum_{\substack{p=0 \\ \neq q}}^{N_i-1} \frac{K_0 N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \left[1 - \cos \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \quad (3.9)$$

$$\text{Var}(I_{mp, sc}) = \varepsilon (K_0 + 1) \sum_{n=1}^{L_0} \gamma_{0n}^2 \left\{ \frac{1}{3N_c} + \sum_{\substack{p=0 \\ \neq q}}^{N_i-1} \frac{N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \left[1 - \frac{N_c}{2\pi(p-q)} \sin \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \right\} \quad (3.10)$$

$$\text{Var}(F_{m, sc}) = \varepsilon E[\rho_m] (K_m + 1) \sum_{n=1}^{L_m} \gamma_{mn}^2 \left\{ \frac{1}{3N_c} + \sum_{\substack{p=0 \\ \neq q}}^{N_i-1} \frac{N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \left[1 - \frac{N_c}{2\pi(p-q)} \sin \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \right\} \quad (3.11)$$

부가 백색 가우시안 잡음에 대한 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}(n_0) = N_0 T / 4 \quad (3.12)$$

신호전력은 $PT^2 \beta_0^2 / 2$ 이다. Concatenated 시퀀스에 대한 신호 대 잡음비(SNR)은 아래와 같다.

$$\text{SNR}_{sc, 1} = \left\{ \frac{N_0}{2E_s} + \mu [\text{Var}(I_{c, sc}) + \text{Var}(I_{mp, sc}) + \sum_{m=1}^M \text{Var}(F_{m, sc})] \right\}^{-1} \quad (3.13)$$

여기서 E_s 는 데이터 심벌 당 에너지이다. Nonconcatenated 시퀀스에 대한 SNR은 아래와 같다.

$$\text{SNR}_{sc, 2} = \left\{ \frac{N_0}{2E_s} + \mu [\text{Var}(I_{u, sc}) + \text{Var}(I_{c, sc}) + \text{Var}(I_{mp, sc}) + \sum_{m=1}^M \text{Var}(F_{m, sc})] \right\}^{-1} \quad (3.14)$$

비트 오류율(BER)은 $P_e = Q(\sqrt{\text{SNR}_{sc, i}})$ 이고 여기서 $i=1$ 은 concatenated 시퀀스에 대한 수식이고 $i=2$ 는 nonconcatenated 시퀀스에 대한 수식이다.

3.2 레일레이 페이딩 채널

Concatenated 시퀀스에 대한 다중사용자 간섭은 영이고, nonconcatenated 시퀀스에 대한 다중사용자 간섭의 분산 $\text{Var}(I_u) = K_0 \gamma_{00}^2 A_{00}^2 / (2N_c)$ 이다. $\text{Var}(I_{mp, sc})$ 는 라이선 페이딩 채널에서와 같고, $\text{Var}(I_{c, sc})$ 는 식 (3.9)에 $\gamma_{00}^2 A_{00}^2$ 을 곱하고 $\text{Var}(F_{m, sc})$ 는 식 (3.11)에 $\gamma_{m0}^2 A_{m0}^2$ 을 곱하면 레일레이 페이딩 채널에서의 분산이 된다. 신호전력은 $PT^2 \gamma_{00}^2 A_{00}^2 / 2$ 이다. 평균 BER은 레일레이 페이딩 채널에서의 조건부 SNR을 랜덤변수인 $x = |\alpha_{m0}|^2$ 의 확률밀도함수에 대해서 평균을 취함으로써 구할 수 있다. 평균 BER은 다음과 같다.

$$P_e = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{\text{SNR}_{sc, i}(x)}) f_X(x) dx \quad (3.15)$$

여기서 $f_X(x)$ 는 자유도 2의 chi 제곱 분포를 갖는 x 의 확률밀도함수이다. $i=1$ 은 concatenated 시퀀스에 대한 수식이고 $i=2$ 는 nonconcatenated 시퀀스에 대한 수식이다.

IV. 최대비 합성 수신기

최대비 합성 수신기는 $B+1(\leq L_0)$ 개의 가지로부터 시간지연 차이가 T_c 이상이며 동일한 정보를 가진 신호를 수신하여 켈레 경로 복소수 이득계수 α_{mi}^* 을 곱한다. α_{mi}^* 을 곱함으로써 각 경로에서의 위상편이를 보상하고 포락선 변화에 따르는 가중화를 하여 합성기 출력에서의 SNR을 향상시킨다. 본 논문에서는 α_{mn}^* 과 시간지연 τ_{0l} 은 정확히 추정된 것으로 가정한다.

중심셀에서 i 번째 이동체, q 번째 부반송파에서 최대비 합성 수신기 출력의 영번째 심벌에 대한 판별값은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} Z_{0i,q}^0 &= \sum_{l=0}^B \int_{\tau_w}^{T+\tau_w} \text{Re}\{\alpha_{0l}^* r'(t)\} \Psi_{0i,q}(t-\tau_{0l}) dt \\ &= \sqrt{(P/2)} T \left\{ \sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 b_{0k,q}^0 + I_{u,mrc} + I_{c,mrc} \right. \\ &\quad \left. + I_{mp,mrc} + \sum_{m=1}^M F_{m,mrc} \right\} + n_0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

여기서 $\Psi_{0i,q}(t) = a_{0i}(t) \cos(2\pi f_q t + \varphi_{0iq})$ 이고, M 은 intercell 간섭을 고려한 인접셀의 갯수이며, $n_0 = \sum_{l=0}^B \int_{\tau_w}^{T+\tau_w} n(t) \Psi_{0i,q}(t-\tau_{0l}) dt$ 이다. $r'(t)$ 는 $r(t)$ 의 복소수형이다.

중심셀에서 합성기의 각 가지에 대하여 시간 동기화된 경로 ($n=l$)에서의 다중사용자 간섭 $I_{u,mrc}$ 와 다중톤 간섭 $I_{c,mrc}$ 는 다음과 같다.

$$I_{u,mrc} = \frac{1}{T} \sum_{l=0}^B \sum_{k=0}^{K_0} \chi_{0k} |\alpha_{0l}|^2 b_{0k,q}^0 R_{0k,0i,\rho q}^c(k'_0, 0) \cos(\varphi_{0kq} - \varphi_{0iq}) \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} I_{u,mrc} &= \frac{1}{T} \sum_{l=0}^B \sum_{\substack{k=0 \\ \neq i}}^{K_0} \sum_{\substack{\rho=0 \\ \neq q}}^{N_i-1} \chi_{0k} |\alpha_{0l}|^2 b_{0k,\rho}^0 \\ &\quad \cdot \{ \cos(\varphi_{0k\rho} - \varphi_{0iq}) R_{0k,0i,\rho q}^c(k'_0, 0) \\ &\quad - \sin(\varphi_{0k\rho} - \varphi_{0iq}) R_{0k,0i,\rho q}^s(k'_0, 0) \} \end{aligned} \quad (4.3)$$

중심셀에서 다중경로에 의한 비동기 간섭 $I_{mp,mrc}$ 는 다음과 같다.

$$I_{mp,mrc} = \frac{1}{T} \sum_{l=0}^B \sum_{k=0}^{K_0} \sum_{\rho=0}^{N_i-1} \sum_{\substack{n=0 \\ \neq l}}^{L_0} \chi_{0k} |\alpha_{0l}| |\alpha_{0n}|$$

$$\begin{aligned} &\cdot \{ \cos(\Phi_{0nl} + \varphi_{0k\rho} - \varphi_{0iq}) \int_{\tau_w}^{T+\tau_w} b_{0k,\rho}(t-\tau_{0n}) \\ &a_{0k}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0l}) \cos(\omega_p - \omega_q) dt \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} &- \sin(\Phi_{0nl} + \varphi_{0k\rho} - \varphi_{0iq}) \int_{\tau_w}^{T+\tau_w} b_{0k,\rho}(t-\tau_{0n}) \\ &a_{0k}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0l}) \sin(\omega_p - \omega_q) dt \} \end{aligned}$$

식 (4.4)에서 적분기호 안에 있는 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{\tau_w}^{T+\tau_w} b_{0k,\rho}(t-\tau_{0n}) \cdot a_{0k}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0l}) \cos(\omega_p - \omega_q) dt \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} \tau_{0n} > \tau_{0l}, b_{0k,q}^{-1} R_{0k,0i,\rho q}^c(k'_0, k'_0, \tau_{0n} - \tau_{0l}) \\ + b_{0k,q}^0 \hat{R}_{0k,0i,\rho q}^c(k'_0, k'_0, T - \tau_{0n} - \tau_{0l}) \\ \tau_{0n} < \tau_{0l}, b_{0k,q}^0 R_{0k,0i,\rho q}^c(k'_0, k'_0, T - \tau_{0n} + \tau_{0l}) \\ + b_{0k,q}^{-1} \hat{R}_{0k,0i,\rho q}^c(k'_0, k'_0, T - \tau_{0n} + \tau_{0l}) \end{cases}$$

시간지연의 차이가 T_c 이상일 경우의 분산은 같으므로 식 (4.5)는 $\tau_{0n} > \tau_{0l}$ 과 $\tau_{0n} < \tau_{0l}$ 에 관계없이 분산값은 같다. $I_{mp,mrc}$ 는 같은 사용자($k=i$), 같은 부반송파($p=q$)에 대해서 상관성이 존재한다. 식 (4.5)를 $k=i, p=q$ 경우에 대해서 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{mp,mrc}^{(k=i, p=q)} &= \frac{\chi_{0i}}{T} \sum_{l=0}^B \sum_{\substack{n=0 \\ \neq l}}^{L_0} |\alpha_{0l}| |\alpha_{0n}| \cos(\Phi_{0nl}) \\ &\int_{\tau_w}^{T+\tau_w} b_{0i,q}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0l}) dt \\ &= \frac{\chi_{0i}}{T} \left\{ \sum_{l=0}^B \sum_{\substack{n=0 \\ \neq l}}^B V_s + \sum_{l=0}^B \sum_{n=B+1}^{L_0} V_s \right\} \\ &= \frac{\chi_{0i}}{T} \{ I_{mp,mrc}^{(1)} + I_{mp,mrc}^{(2)} \} \end{aligned} \quad (4.6)$$

여기서 $\Phi_{0nl} = \theta_{0n} - \theta_{0l} - \omega_q(\tau_{0n} - \tau_{0l})$ 이며 $V_s = |\alpha_{0l}| |\alpha_{0n}| \cos(\Phi_{0nl}) \int_{\tau_w}^{T+\tau_w} b_{0i,q}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0l}) dt$ 이다. $I_{mp,mrc}^{(1)}$ 과 $I_{mp,mrc}^{(2)}$ 은 상호간에 통계적으로 독립적인 위상을 포함하고 있기 때문에 상관성이 없으며 $I_{mp,mrc}^{(2)}$ 도 역시 각 항의 위상이 통계적으로 독립이므로 상관성이 없다. 그러나 $I_{mp,mrc}^{(1)}$ 은 극성이 반대이면서 같은 값을 가지는 위상($\Phi_{0nl} = -\Phi_{0ln}$)을 포함하기 때문에 각 항간에 상관성이 존재한다.

식 $I_{mp, mrc}^{(1)}$ 을 $\tau_{0n} > \tau_{0l}$ 일 경우와 $\tau_{0n} < \tau_{0l}$ 일 경우로 나누기 위해서 $\sum_{l=0}^B \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq l}}^B f(l, n) = \sum_{l=0}^{B-1} \sum_{n=l+1}^L \{f(l, n) + f(n, l)\}$ 관계식을 이용하여 전개하면 다음과 같다.

$$I_{mp, mrc}^{(1)} = \sum_{l=0}^B \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq l}}^B |\alpha_{0l}| |\alpha_{0n}| \cos(\Phi_{0nl}) \cdot \int_{\tau_{0l}}^{T+\tau_{0l}} b_{0i,q}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0n}) a_{0i}(t-\tau_{0l}) dt$$

$$= \sum_{l=0}^{B-1} \sum_{n=l+1}^L |\alpha_{0l}| |\alpha_{0n}| \cos(\Phi_{0nl}) \cdot \left\{ \int_0^T b_{0i,q}(t-\tau_{0n}+\tau_{0l}) a_{0i}(t-\tau_{0n}+\tau_{0l}) a_{0i}(t) dt + \int_0^T b_{0i,q}(t+\tau_{0n}-\tau_{0l}) a_{0i}(t+\tau_{0n}-\tau_{0l}) a_{0i}(t) dt \right\} \quad (4.7)$$

식 (4.7)을 연속 시간에서의 부분 자기상관함수로 나타내면 다음과 같다.

$$I_{mp, mrc}^{(1)} = \sum_{l=0}^{B-1} \sum_{n=l+1}^L |\alpha_{0l}| |\alpha_{0n}| \cos(\Phi_{0nl}) \cdot \{ (b_{0i,q}^{-1} + b_{0i,q}^{+1}) R_{0i,0i,qq}^c(k_0, k_0, \tau_{0n} - \tau_{0l}) + 2b_{0i,q}^0 \hat{R}_{0i,0i,qq}^c(k_0, k_0, \tau_{0n} - \tau_{0l}) \} \quad (4.8)$$

식 (4.8)에서 $b_{0i,q}^0$ 에 대해서 상관성이 존재함을 알 수 있다. 식 (4.8)은 다음과 같은 부분 자기상관함수의 성질을 이용하여 전개한 식이다.

$$\begin{cases} R_{0i,0i,qq}^c(k'_0, k'_0, T-\tau_{0n}+\tau_{0l}) = \hat{R}_{0i,0i,qq}^c(k'_0, k'_0, \tau_{0n}-\tau_{0l}) \\ R_{0i,0i,qq}^c(k'_0, k'_0, T-\tau_{0n}+\tau_{0l}) = R_{0i,0i,qq}^c(k'_0, k'_0, \tau_{0n}-\tau_{0l}) \end{cases} \quad (4.9)$$

인접한 한 개의 기지국에 의한 intercell 간섭 $F_{m, mrc}$ 은 다음과 같다.

$$F_{m, mrc} = \frac{\sqrt{\beta_m}}{T} \sum_{l=0}^B \sum_{k=0}^{K_m} \sum_{p=0}^{N_c-1} \sum_{n=0}^{L_m} \chi_{mk} |\alpha_{0l}| |\alpha_{mn}| \cdot \{ \cos(\Phi_{mnl} + \varphi_{mkp} - \varphi_{0lq}) [b_{mk,p}^{-1} R_{mk,0i,pq}^c(k'_m, k'_0, \tau_{mn} + \zeta_m - \tau_{0l}) + b_{mk,p}^0 \hat{R}_{mk,0i,pq}^c(k'_m, k'_0, \tau_{mn} + \zeta_m - \tau_{0l})] - \sin(\Phi_{mnl} + \varphi_{mkp} - \varphi_{0lq}) [b_{mk,p}^{-1} R_{mk,0i,pq}^s(k'_m, k'_0, \tau_{mn} + \zeta_m - \tau_{0l}) + b_{mk,p}^0 \hat{R}_{mk,0i,pq}^s(k'_m, k'_0, \tau_{mn} + \zeta_m - \tau_{0l})] \} \quad (4.10)$$

여기서 $\Phi_{mnl} = \theta_{mn} - \theta_{0l} - \omega_p(\tau_{mn} + \zeta_m) + \omega_q \tau_{0l}$ 이다. $\tau_{mn} + \zeta_m > \tau_{0l}$ 이므로 식 (4.10)의 각 항간에는 상관성이 존재하지 않는다.

4.1 레일레이 페이딩 채널

Concatenated 시퀀스에 대해서 셀 내에서의 다중사용자 간섭 $I_{u, mrc}$ 의 분산은 영이고 nonconcatenated 시퀀스에 대한 다중사용자 간섭 $I_{c, mrc}$ 의 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}(I_{u, mrc}) = \frac{\epsilon K_0}{2N_c} \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 \quad (4.11)$$

식 (4.3), (4.4), (4.10)의 분산은 concatenated 시퀀스와 nonconcatenated 시퀀스에 대해 공통이다. 다중톤 간섭 $I_{u, mrc}$ 의 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}(I_{c, mrc}) = \epsilon \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq q}}^{N_c-1} \frac{K_0 N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \left[1 - \cos \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \quad (4.12)$$

다중경로에 의한 비동기 간섭 $I_{mp, mrc}$ 의 분산은 각각 다음과 같다.

$$\text{Var}(I_{mp, mrc}) = \epsilon(C_{ra} + C) (K_0 + 1) \left\{ \frac{1}{3N_c} + \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq q}}^{N_c-1} \frac{N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \cdot \left[1 - \frac{N_c}{2\pi(p-q)} \sin \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \right\} + \frac{\epsilon C_{ra}}{6N_c} \quad (4.13)$$

식 (4.13)의 마지막 항은 식 (4.8)에서 상관성이 있는 항에 의한 추가분산이다. 위 식에서 $C_{ra} = \sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2$

$\sum_{n=0, n \neq l}^B |\alpha_{0n}|^2$, $C = \sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \sum_{n=B+1}^{L_0} \gamma_n^2$ 이며 C_{ra} 는 $\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^4 \approx \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 / (B+1)$ 근사식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ra} \approx \frac{B}{(B+1)} \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 \quad (4.14)$$

Intercell 간섭 $F_{m, mrc}$ 의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(F_{m, mrc}) &= \varepsilon E[\rho_m] (K_m + 1) \sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \left(\sum_{n=0}^B |\alpha_{mn}|^2 + \sum_{n=B+1}^{L_m} \gamma_{mn}^2 \right) \\ &\cdot \left\{ \frac{1}{3N_c} + \sum_{\substack{p=0 \\ \neq q}}^{N_c-1} \frac{N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \right. \\ &\cdot \left. \left[1 - \frac{N_c}{2\pi(p-q)^2} \sin \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4.15)$$

부가 백색 가우션 잡음에 대한 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}(n_0) = \frac{N_0 T}{4} \sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \quad (4.16)$$

신호전력은 $PT^2 \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right) / 2$ 이다. 그러므로 concatenated 시퀀스에 대한 조건부 SNR은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{mrc, 1} &= \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 \cdot \left\{ \frac{N_0}{2E_s} \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right) + \mu |\text{Var}(I_{c, mrc}) \right. \\ &+ \left. \text{Var}(I_{mp, mrc}) + \sum_{m=1}^M \text{Var}(F_{m, mrc}) \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (4.17)$$

여기서 E_s 는 데이터 심벌 당 평균에너지이다. Nonconcatenated 시퀀스에 대한 조건부 SNR은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{SNR}_{mrc, 2} &= \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 \cdot \left\{ \frac{N_0}{2E_s} \left(\sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right) + \mu |\text{Var}(I_{c, mrc}) \right. \\ &+ \left. \text{Var}(I_{u, mrc}) + \text{Var}(I_{mp, mrc}) + \sum_{m=1}^M \text{Var}(F_{m, mrc}) \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Concatenated 시퀀스와 nonconcatenated 시퀀스에 대한 평균 비트 오류율은 조건부 SNR인 식 (4.17), (4.18)을 랜덤변수 $x = \sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2$ 의 확률밀도함수에 대하여 평균을 취함으로써 구할 수 있다. 경로전력이 $\gamma_{0l}^2 = \gamma^2$ 일 경우의 x 에 대한 확률밀도함수는 다음과 같다[10].

$$f_x(x) = \frac{x^B \exp(-x/\gamma^2)}{B! (\gamma^2)^{B+1}} \quad (4.19)$$

경로전력 γ_{0l}^2 이 경로에 따라서 다를 경우의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f_x(x) = \sum_{l=0}^B \frac{\pi_{0l}}{\gamma_{0l}^2} \exp(-x/\gamma_{0l}^2) \quad (4.20)$$

여기서 π_{0l} 은 다음과 같다.

$$\pi_{0l} = \prod_{i=0, i \neq l}^B \frac{\gamma_{0l}^2}{\gamma_{0l}^2 - \gamma_{0i}^2} \quad (4.21)$$

평균 BER은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_e = \int_0^\infty Q(\sqrt{\text{SNR}_{mrc, i}(x)}) f_x(x) dx \quad (4.22)$$

여기서 $i=1$ 은 concatenated 시퀀스에 대한 수식이고 $i=2$ 는 nonconcatenated 시퀀스에 대한 수식이다.

4.2 라이선 페이딩 채널

영변제 경로에서 직경로 성분만을 고려하여 γ_{m0} 은 영으로 하였다. Concatenated 시퀀스에 대한 다중사용자 간섭은 영이고, nonconcatenated 시퀀스에 대한 다중사용자 간섭의 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}(I_{mp, mrc}) = \frac{\varepsilon K_0}{N_c} \left(1 + \sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 \quad (4.23)$$

다중톤 간섭 $I_{u, mrc}$ 와 다중경로에 의한 간섭 $I_{mp, mrc}$ 에 대한 분산은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(I_{c, mrc}) &= \\ \varepsilon \left(1 + \sum_{l=0}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 \sum_{\substack{p=0 \\ \neq q}}^{N_c-1} \frac{K_0 N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \left[1 - \cos \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(I_{u, mrc}) &= \\ \varepsilon (C_{ri} + C) (K_0 + 1) \left\{ \frac{1}{3N_c} + \sum_{\substack{p=0 \\ \neq q}}^{N_c-1} \frac{N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \right. \\ &\cdot \left. \left[1 - \frac{N_c}{2\pi(p-q)^2} \sin \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \right\} + \frac{\varepsilon C_{ri}}{6N_c} \end{aligned} \quad (4.25)$$

식 (4.25)의 마지막 항은 식 (4.8)에서 상관성이 있는 항에 의한 추가 분산이다. 여기서 C_{ri} 는 다음과 같다.

$$C_{ri} \approx \left(1 + \sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2 - \frac{\left(\sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)^2}{B} - 1 \quad (4.26)$$

Intercell 간섭 $F_{m, mrc}$ 의 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}(F_{m, mrc}) = \varepsilon E[\rho_m] (K_m + 1) \left(1 + \sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2 \right)$$

$$\left(1 + \sum_{n=1}^B |\alpha_{mn}|^2 + \sum_{n=B+1}^{L_m} \gamma_{mn}^2\right) \cdot \left\{ \frac{1}{3N_c} + \sum_{\substack{p=0 \\ p \neq q}}^{N_c-1} \frac{N_c}{4\pi^2(p-q)^2} \right\} \left[1 - \frac{N_c}{2\pi(p-q)} \sin \frac{2\pi(p-q)}{N_c} \right] \quad (4.27)$$

부가 백색 가우션 잡음에 대한 분산은 다음과 같다.

$$\text{Var}(n_0) = \frac{N_0 T}{4} \left(1 + \sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2\right) \quad (4.28)$$

신호전력은 $PT^2(1 + \sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2)/2$ 이다. 따라서 concatenated 시퀀스에 대한 조건부 SNR은 아래와 같다.

$$\text{SNR}_{mrc,1} = \left(1 + \sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2\right)^2 \cdot \left\{ \frac{N_0}{2E_s} \left(1 + \sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2\right) + \mu [\text{Var}(I_{c,mrc}) + \text{Var}(I_{mp,mrc}) + \sum_{m=1}^M \text{Var}(F_{m,mrc})] \right\}^{-1} \quad (4.29)$$

Nonconcatenated 시퀀스에 대한 조건부 SNR은 아래와 같다.

$$\text{SNR}_{mrc,2} = \left(1 + \sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2\right)^2 \cdot \left\{ \frac{N_0}{2E_s} \left(1 + \sum_{l=1}^B |\alpha_{0l}|^2\right) + \mu [\text{Var}(I_{c,mrc}) + \text{Var}(I_{u,mrc}) + \text{Var}(I_{mp,mrc}) + \sum_{m=1}^M \text{Var}(F_{m,mrc})] \right\}^{-1} \quad (4.30)$$

평균 BER은 레일레이 페이딩 채널에서와 같은 방법으로 구한다.

V. 수치해석

다중셀, 다중경로, 다중사용자 환경에서의 레일레이 페이딩 채널과 라이선 페이딩 채널에서 concatenated 확산 시퀀스를 사용하여 다중톤 변조방식과 DS-CDMA를 결합한 다중톤 CDMA 시스템의 성능을 nonconcatenated 시퀀스를 이용한 다중톤 DS-CDMA 시스템에 대해서 수치해석을 하였다. 인접한 18개 셀로부터의 intercell 간섭을 고려하였고, 각 셀들은 방향성 안테나를 사용하여 3개의 섹터로 나누어졌으며 모든 셀의 사용자수는 같고 이동국은 셀 내에 균일하게 분포하며 다른 기지국으로부터 전송된 신호는 같

은 채널 페리미터를 갖는다고 가정하였다. 다중경로의 경로 갯수는 3개이며 최대비 합성 수신기는 3개의 가지를 가진다. 레일레이 페이딩 채널모델에서 각 경로에서의 경로 전력은 영변제 경로에 대한 상대적인 경로 전력인 (0, -6, -8 dB)이다 [11]. 라이선 페이딩 모델에서는 직경로 성분만을 가진 영변제 경로와 레일레이 페이딩을 거친 영변제 경로를 제외한 다른 경로들의 전력비를 7dB로 가정하였다 [12]. Lognormal shadowing에서 ξ_m 의 표준편차 σ 는 8, 경로손실지수 r 은 4이고 voice activity 계수는 3/8이다. WH 코드의 주기 N_c 는 256, 병렬 부채널 갯수 N_f 는 4이다.

그림 4는 평균 BER을 백색 잡음에 대한 평균 심벌 에너지 비율에 대해서 나타낸 것이다. Concatenated 확산 시퀀스를 사용한 다중톤 CDMA 시스템이 레일레이, 라이선 페이딩 채널 모두에서 nonconcatenated 확산 시퀀스만을 사용한 시스템보다 향상된 성능을 보였고, 특히 concatenated 확산 시퀀스를 사용하여 강한 직경로에서의 다중사용자 간섭을 제거한 라이선 페이딩 채널이 레일레이 페이딩 채널보다 더욱 향상된 성능을 보이고 있다. 그림 5는 셀 당 사용자수에 대한 평균 BER을 나타낸 것이다. Concatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템이 라이선 페이딩 채널에서 우수한 성능을 보이고 있으나 사용자수가 증가함에 따라서 강한 직경로 간섭성분이 증가하여 BER이 증가됨을 알 수 있다. 그림 6은 불완전 섹터화에 의한

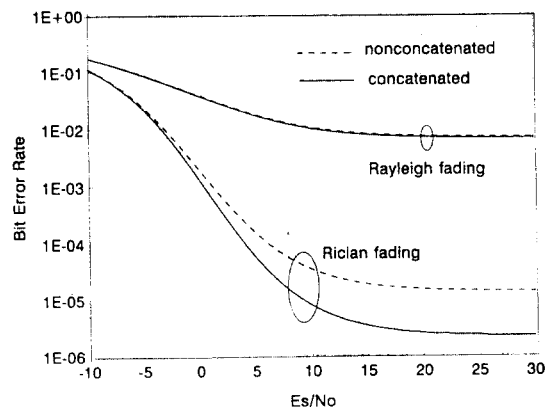


그림 4. 단일 상관 수신기에서 E_s/N_0 에 대한 평균 BER ($M=18, K_m+1=40, v=0^\circ$)

Fig 4. Average BER versus E_s/N_0 for single correlator

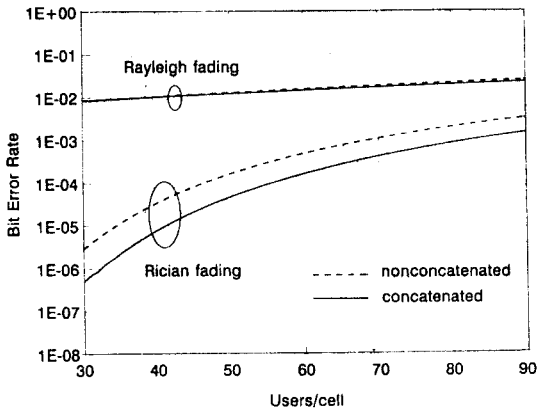


그림 5. 단일 상관 수신기에서 셀 당 사용자수에 대한 평균 BER
($M = 18, E_s/N_0 = 10 \text{ dB}, \nu = 0^\circ$)

Fig 5. Average BER versus users per cell for single correlator

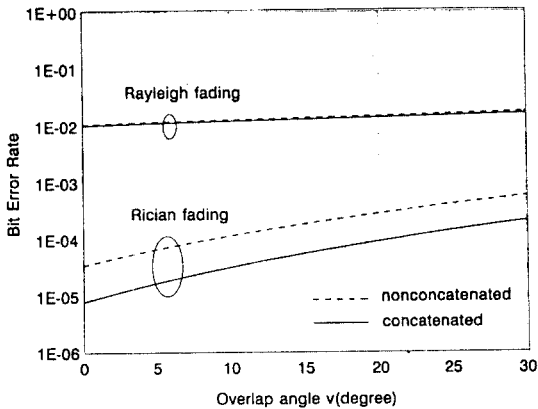


그림 6. 단일 상관 수신기에서 overlap 각도에 대한 평균 BER
($M = 18, K_m + 1 = 40, E_s/N_0 = 10 \text{ dB}$)

Fig 6. Average BER versus overlap angle for single correlator

섹터간 overlap 각도에 대해서 평균 BER을 나타낸 것이다. Overlap 각도가 증가함에 따라서 평균 BER이 지수적으로 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 평균 BER을 백색 잡음에 대한 평균 심벌 에너지 비율에 대해서 나타낸 것이다. 단일 상관 수신기를 사용한 수신기에서와 같이 concatenated 확산

시퀀스를 사용한 다중톤 CDMA 시스템이 레일레이, 라이선 페이딩 채널 모두에서 nonconcatenated 확산 시퀀스만을 사용한 시스템보다 향상된 성능을 보였다. 레일레이 페이딩 채널에서는 평균 BER이 단일 상관 수신기만을 사용한 경우보다 크게 향상이 되었으며 concatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템의 경우 E_s/N_0 가 증가함에 따라 라이선 페이딩 채널에서 nonconcatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템보다 낮은 평균 BER을 보이고 있다. 그림 8은 셀 당 사용자수에 대한 평균 BER을 나타낸 것이다. 사용자가 증가함에 따라서 레일레이 페이딩 채널에서 concatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템의 평균 BER과 라이선 페이딩 채널에서 nonconcatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템의 평균 BER이 거의 같아짐을 알 수 있다. 그림 9는 불완전 섹터화에 의한 섹터간 overlap 각도에 대해서 평균 BER을 나타낸 것이다. 안테나 빔의 overlap에 의한 불완전 섹터화가 시스템 성능을 저하시킴을 알 수 있다.

그림 10은 순방향 전력제어시에 라이선 페이딩 채널에서 concatenated 확산 시퀀스와 nonconcatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템에 대해서 outage 확률로서 각 섹터에서의 사용자 용량을 분석한 결과이다. BER은 10^{-3} (음성 통신)이고 채널 코딩을 사용하지 않을 경우의 필요한 SNR은 9.8dB이며 인접한 18개

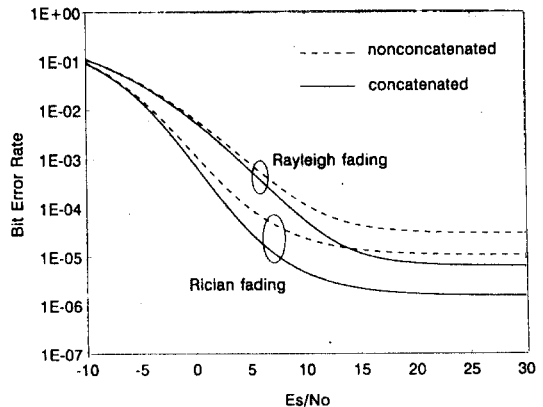


그림 7. 최대비 합성 수신기에서 E_s/N_0 에 대한 평균 BER
($M = 18, K_m + 1 = 40, \nu = 0^\circ$)

Fig 7. Average BER versus E_s/N_0 for maximal ratio combining receiver

셀로부터의 intercell 간섭을 고려하였다. 이동국은 섹터에 균일하게 분포된 것을 가정하였다. Lognormal shadowing, 경로 복소수 이득계수 α_{ms} , voice activity, 섹터에서의 이동국 위치에 대한 랜덤 데이터를 발생시켜 성능분석을 하였다. Outage 확률의 임계값 λ 를 0.01로 하였을 경우 concatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템은 90명, nonconcatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템은 84명으로 셀 당 사용자 용량이 증가하였다.

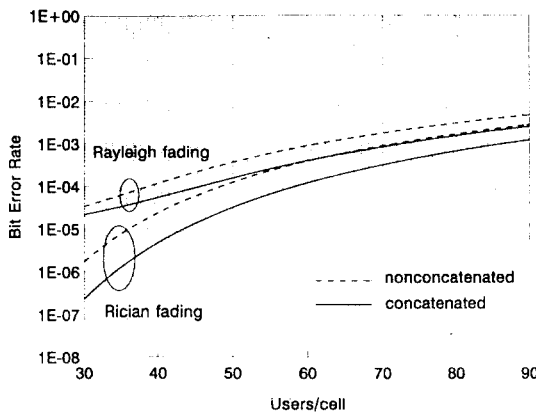


그림 8. 최대비 합성 수신기에서 셀 당 사용자수에 대한 평균 BER ($M = 18, E_s/N_0 = 10$ dB, $v = 0^\circ$)

Fig 8. Average BER versus users per cell for maximal ratio combining receiver

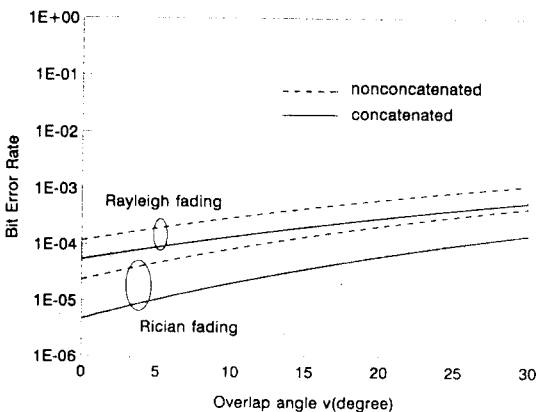


그림 9. 최대비 합성 수신기에서 overlap 각도에 대한 평균 BER ($M = 18, K_m + 1 = 40, E_s/N_0 = 10$ dB)

Fig 9. Average BER versus overlap angle for maximal ratio combining receiver

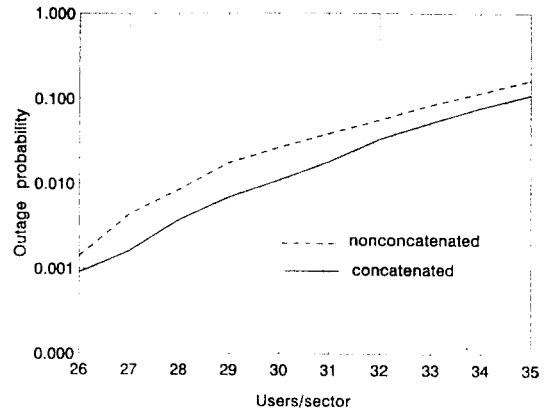


그림 10. 라이선 페이딩 채널에서의 최대비 합성 수신기에서 섹터 당 사용자수에 대한 outage 확률(Rician fading channel, $M = 18, v = 0^\circ$)

Fig 10. Outage probability versus users per sector for maximal ratio combining receiver in Rician fading channel

VI. 결론

본 논문에서는 고속 통신을 위하여 concatenated 직교 PN 확산 시퀀스를 사용한 DS-CDMA 시스템과 다중톤(multitone) 변조방식을 결합한 새로운 다중톤 DS-CDMA 시스템을 제안하였으며 이의 성능을 순방향 링크(forward link)에서 분석하였다.

본 논문에서 제안한 새로운 다중톤 DS-CDMA 시스템은 concatenated 확산 시퀀스를 사용하여 셀 내에서 시간 동기화된 다중사용자 간섭을 감소시킨 DS-CDMA의 장점과 상호부호간 간섭에 견인하고 스펙트럼 효율이 우수하여 고속 통신 시스템에 사용되고 있는 다중톤 변조방식의 장점을 결합하여 시스템 성능을 향상시켰다. 성능분석은 다중셀, 다중경로, 다중 사용자 환경의 레일레이 페이딩 채널과 라이선 페이딩 채널에서 concatenated 확산 시퀀스를 사용하여 다중톤 변조방식과 DS-CDMA를 결합한 다중톤 CDMA 시스템과 nonconcatenated 시퀀스, 즉 long PN 시퀀스만을 이용한 다중톤 DS-CDMA 시스템에 대해서 평균 BER과 outage 확률로서 수행하였다. 제안된 시스템은 nonconcatenated 확산 시퀀스를 이용한 다중톤 CDMA 시스템보다 향상된 평균 BER과 사용자

용량을 가졌으며 특히 마이크로 셀룰라와 피코 셀룰라 환경에서의 채널모델인 라이선 페이딩 채널에서 훨씬 향상된 성능을 보였다. 순방향 전력제어시에 실제적인 성능분석을 하기 위해서, 즉 평균 간섭 전력이 아닌 순시 전력에 대해 분석하기 위해서 outage 확률로서 성능분석을 하였다. Concatenated 확산 시퀀스를 사용한 시스템이 nonconcatenated 확산 시퀀스보다 더 많은 사용자 용량을 나타내고 있으며 전력제어를 한 시스템의 사용자 용량이 증가함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. L. Vandendorpe, "Multitone spread spectrum multiple access communications system in a multipath Rician fading channel," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, no. 2, pp. 327-337, May 1995.
2. J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 5-14, May 1990.
3. S. Cacopardi, F. Frescura, and G. Reali, "Performance comparison of orthogonal multicarrier DS-CDMA systems in frequency selective slow fading channels," in *Proc. PIMRC*, Sep., 1995, pp. 66-70.
4. H. Nikookar and R. Prasad, "OFDM performance evaluation over measured indoor radio propagation channels," in *Proc. IEEE VTC*, Nov. 1995, pp. 968-972.
5. M. -H. Fong, V. K. Bhargava, and Q. Wang, "Concatenated orthogonal/PN spreading sequences and their application to cellular DS-CDMA with integrated traffic," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 14, no. 3, pp. 547-558, April 1996.
6. M. G. Jansen and R. Prasad, "Capacity, throughput, and delay analysis of cellular DS-CDMA system with imperfect power control and imperfect sectorization," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 67-75, Feb. 1995.
7. J. D. Gibson, *The Mobile Communications handbook*, CRC, 1996.
8. E. A. Geraniotis and M. B. Pursley, "Performance

of coherent direct-sequence spread-spectrum communications over specular multipath fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 6, pp. 502-508, June 1985.

9. M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication part I: system analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 25, no. 8, pp. 795-799, Aug. 1977.
10. J. G. Proakis, *Digital Communications*. New York: McGraw-Hill, 1983.
11. G. Wu, A. Jalali, and P. Mermelstein, "On channel models for microcellular CDMA systems," in *Proc. IEEE VTC*, June 1994, pp. 205-209.
12. R. Prasad, H. S. Misser, and A. Kegel, "Performance analysis of direct sequence spread spectrum multiple access communication in an indoor Rician fading channel with DPSK modulation," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 1366-1367, Sept. 1990.

한 중 선(Jong-Sun Han)

정회원

1995년 2월: 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1997년 2월: 아주대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
 1997년 3월~현재: LG정보통신 연구소
 ※주관심분야: 확산대역통신, IMT-2000 시스템



윤 원 식(Won-Sik Yoon) 정회원

1984년 2월: 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)

1986년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)

1991년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)

1986년 1월~1991년 4월: 금성전기 연구소 선임연구원
 1991년 5월~1994년 8월: LG정밀 연구소 책임연구원
 1995년 9월~1996년 8월: University of Victoria, Post-Doc.

1994년 9월~현재: 아주대학교 전자공학부 조교수
 ※주관심분야: 이동통신, 확산대역통신, 통신신호처리