

전력 제어 및 협대역 간섭 제거 필터를 고려한 셀룰라 CDMA 시스템의 성능 분석

正會員 이 정 구*, 이 동 도*, 강 병 권**, 황 금 찬*

Performance Analysis of Cellular CDMA System with Power Control and Narrowband Interference Suppression Filter

Jeong-Goo Lee*, Dong-Do Lee*, Byeong-Gwon Kang**,
Keum-Chan Whang* *Regular Members*

요 약

스펙트럼 효율을 높이기 위해 기존의 마이크로파 협대역 시스템 위에 동일한 대역을 사용하는 셀룰라 CDMA 시스템을 오버레이시킨 환경에서, CDMA 시스템의 성능을 분석하였다. 협대역 시스템으로부터의 간섭을 제거하기 위해 최소 평균 자승 알고리즘을 적용한 선형 추정 필터를 사용하였다. 다중 경로 리시안 페이딩 채널로 특징 지워지는 개인 휴대 통신 채널에서의 성능을 분석함에 있어서, 원근단 문제를 해결하기 위한 전력 제어 기법 및 통화 인계, 다중 경로 다이버시티 등을 고려하였다. 또한 인터리빙과 채널 부호화 기법을 사용하여 CDMA 시스템의 오류 성능을 분석하였다.

ABSTRACT

Performance of the cellular CDMA overlay system is analyzed which shares the same band with existing microwave narrowband system to enhance the spectral efficiency. To suppress the interference from narrowband system, we used a linear prediction filter that adopts the adaptive least mean square algorithm. Analyzing the performance in the Personal Communication Services channel, characterized as a multipath Rician fading channel, we considered the power control to solve the near-far problem, hand-off and multipath diversity. We also considered interleaving and channel coding to improve BER performance of the CDMA system.

*연세대학교 전기공학과

**전자통신연구소

論文番號:96368-1127

接受日字:1996年 11月 27日

I. 서 론

최근 디지털 셀룰라 이동통신 시스템과 개인 휴대 통신 등에서 코드분할 다중접속방식(CDMA: Code Division Multiple Access)이 응용되면서, 이에 대한 관심이 매우 높아지고 있다[1]-[3]. 그 이유는 대역 확산 시그널링 기법은 특성상 다중 경로 페이딩으로 알려진 이동 통신 채널에 강하고, 다중 접속 능력이 뛰어나 시스템 용량이 큰 장점이 있기 때문이다. 또한 신호 전력을 광대역에 걸쳐 확산시키기 때문에 다른 협대역 시스템의 수신기에 미치는 영향이 매우 적으므로 CDMA 시스템을 기존의 마이크로파 협대역 시스템 위에 오버레이(Overlay) 시키는 것이 가능하다. 게다가 직접 시퀀스(DS: Direct-Sequence) CDMA 신호의 광대역 저전력 의사 잡음 특성을 이용한다면, 원하는 신호가 다소 왜곡된다 해도 협대역 간섭 신호 제거를 위한 새로운 신호 처리 기법을 사용할 수 있다.

협대역 간섭 신호 제거를 위한 신호 처리 기법으로 최소 평균 제곱(LMS: Least Mean Square) 알고리즘을 적용한 양측 간섭 제거 필터를 사용할 수 있으며, 이러한 필터는 탭 지연선을 가진 선형 추정 필터(Linear Prediction Filter)로서 확산 부호가 본래 가지고 있는 간섭 제거 기능을 상당 부분 보완해 주는 것으로 알려져 있다[4]-[7]. 그러나 기존의 이러한 연구에서는 CDMA 사용자간의 간섭을 줄이기 위한 전력 제어의 영향은 고려되지 않았다.

본 논문에서는 CDMA 시스템과 간섭으로 작용하는 협대역 시스템이 오버레이된 마이크로셀 환경에서 CDMA 사용자간의 간섭을 전력 제어 기법을 이용하여 줄이는 동시에, 간섭 제거 필터를 이용하여 협대역 간섭 신호를 제거함으로써 신호대 잡음비(SNR)를 높였을 때의 성능 개선을 살펴 보는데 그 목적을 두고 있다. 다중 셀 환경에서 CDMA 사용자간의 간섭량을 구할 때, 셀 내의 다른 사용자들의 접속으로 인한 다중 접속 간섭량과 인접한 다른 셀 내의 사용자들로부터의 간섭량을 고려하였다. 인접한 다른 셀로부터의 간섭량을 계산할 때 기지국 간에 이루어지는 통화 인계(hand-off) 및 간섭량을 감소 시키기 위한 전력 제어를 고려하였고, 실제 이동통신 환경에서 완벽한 전력 제어가 불가능하므로 전력 제어 오차(Power Control Error: PCE)를 고려하였다. 인터리빙

(interleaving)과 부호화 기법(Channel Coding) 및 다중 경로 다이버시티 결합을 사용함으로써 오류 확률을 개선하였다.

II. 시스템 및 채널 모델

BPSK 변조 방식을 이용한 DS CDMA 시스템의 송신단 모델은 채널 부호기, 인터리버 그리고 직접 부호 확산기 등으로 구성된다. DS CDMA 시스템의 k번째 사용자의 전송 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_k(t) = \text{Re} \left\{ \sqrt{2P_k} b_k(t) c_k(t) \exp[j(2\pi f_0 t + \theta_k)] \right\} \quad (1)$$

여기서, $\text{Re}\{\cdot\}$ 는 실수부를, f_0 는 반송파의 주파수를, P_k 와 θ_k 는 각각 k번째 사용자의 송신 전력과 초기 위상을 의미한다. 심볼 $b_k(t)$ 는 인터리빙 및 부호화된 k번째 사용자의 비트이다; 부호화된 심볼의 비트 지속 시간이 T_b 이면 비트율은 $R_b = 1/T_b$ 이 된다. 정보 비트의 비트율 R_i 와 정보 비트의 지속 시간 T_i 가 정해지면 $R_i = 1/T_i = (v/w)T_b$ 및 $T_i = T_b/(v/w)$ 의 관계가 성립하며 이때 v/w 는 부호화율을 나타낸다. $b_k(t)$ 의 n번째 비트는 +1 또는 -1의 값을 갖으며 $b_k^{(n)}$ 로 표현된다. 의사 잡음(PN) 시퀀스의 정현파형 $c_k(t)$ 는 $1/T_c$ 의 칩 발생율을 갖는다. 각각의 부호화된 비트마다 N칩의 PN 시퀀스가 존재한다고 가정한다($T_b = NT_c$). 그러므로 CDMA 신호의 대역폭(B_c)은 근사적으로 다음과 같이 결정된다. 여기서 양측 대역폭을 가정한다.

$$B_c = 2/T_c = 2N(T_b v/w)^{-1} \quad (2)$$

이동 통신 채널은 이산 다중 경로 페이딩 채널로 모델링 될 수 있다. 측정된 전파 전파 특성에 의하면 마이크로셀 환경을 다중 경로 리시안 페이딩 채널로 규정하고 있으며, 이러한 환경하에서 수신 신호는 몇몇의 직진파 성분과 몇몇의 레일리 페이딩 성분으로 구성된다[2]. 기준 수신기(첫번째 셀의 기지국 수신기)와 k번째 사용자 사이의 다중 경로 리시안 페이딩 채널은 다음과 같은 복소 지역 통과 임펄스 응답으로 모델링 된다.

$$h_k(t) = \frac{1}{(d_{1,k})^{\gamma/2} 10^{\zeta_{1,k}/20}} \sum_{l=1}^L [\rho_{l,k} \exp(j\eta_{l,k}) + \beta_{l,k} \exp(j\mu_{l,k})] \delta(t - \tau_{l,k}) \quad (3)$$

여기서 $d_{1,k}$ ($d_{1,k} \neq 0$)는 k 번째 사용자와 첫번째 셀의 기지국 사이의 거리를 나타내며, γ 는 전파 경로 감쇄 지수이다. $10^{\zeta_{1,k}/10}$ ($=y$)는 k 번째 사용자와 첫번째 셀의 기지국 사이의 왜도율을 나타내며, 다음과 같은 대수 정규 분포로서 모델링 한다.

$$p_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}y\sigma} \exp\left[-\frac{(\ln y - m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

여기서 $\zeta_{i,k}$ 는 정규 분포의 랜덤 변수이다. 왜도율에 의한 채널의 변화 정도는 $\zeta_{i,k}$ 의 표준 편차인 σ 로 나타낼 수 있다[8]. 식(3)에서 $\rho_{l,k}$ ($0 \leq \rho_{l,k} \leq 1$)과 $\eta_{l,k}$ 는 k 번째 사용자 전송 신호의 l 번째 경로의 직진파 성분의 이득과 위상이다. 이들은 최소한 한 비트 지속 시간 동안 거의 상수이다. k 번째 사용자 전송 신호의 l 번째 경로의 페이딩 성분의 랜덤 이득 $\beta_{l,k}$ 과 랜덤 위상 $\mu_{l,k}$ 은 각각, $E\{\beta_{l,k}^2\} = 2\sigma_{l,k}^2$ 인 레일리 분포와 $[0, 2\pi]$ 에서의 일량 분포를 갖는다. 경로 지연 시간 $\tau_{l,k}$ 은 $[0, T_b]$ 에서 일량 분포를 갖는다고 가정한다. 본 연구에서 $\tau_{l,k}$ 에는 사용자간의 비동기에 의해 발생하는 상대적인 지연 시간을 포함하는 것으로 가정한다. 각각의 사용자들은 모두 L 개의 다중 경로를 갖는다고 가정한다. 다른 경로 및 다른 사용자의 이득, 지연 시간, 위상 등은 모두 통계적으로 독립적이다. 레일리 페이딩 성분의 전력에 대한 직진파 성분의 전력의 비율 $H_{l,k}$ 로 정의하자. 즉,

$$H_{l,k} \equiv \rho_{l,k}^2 / E\{\beta_{l,k}^2\} = \rho_{l,k}^2 / (2\sigma_{l,k}^2) \quad (5)$$

채널에 존재하는 간섭 신호는 페이딩을 겪지 않는 협대역 BPSK 신호라 가정하며 다음과 같다.

$$J(t) = \text{Re}\left\{\sqrt{2J}d(t) \exp\left[j\left[2\pi(f_0 + \Delta)t + \theta\right]\right]\right\} \quad (6)$$

여기서 Δ 는 CDMA 신호의 반송파 주파수(f_0)로부터 간섭 신호의 반송파가 얼마나 떨어져 있는가를 나타낸다. 파라미터 J 와 θ 는 각각 수신된 간섭 신호의 전력과

위상을 의미한다. 정보 시퀀스 $d(t)$ 는 T_j 의 비트 지속 시간을 갖는다. 그러므로 간섭 신호의 대역폭은 근사적으로 $B_j = 2/T_j$ 가 된다($B_j < B_s$ 라 가정한다). CDMA 신호의 대역폭에 대한 간섭 신호 대역폭의 비(p)와 CDMA 신호 대역폭의 절반에 대한 간섭 신호 반송파의 오프셋 비(q)는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$p = B_j / B_s = T_c / T_j \quad (7)$$

$$q = \Delta / (B_s / 2) = \Delta T_c \quad (8)$$

각 이동국에서 비동기적으로 송신한 신호들은 채널을 통과하여 서로 독립적인 채널 파라미터의 영향을 받아 수신단에 입력되며, 그 수신된 신호 $r(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \text{Re}\left\{\sum_{k=1}^{CK} \sqrt{2P\lambda_k} \sqrt{\varepsilon(\gamma, c_k, k)} \sum_{l=1}^L [\rho_{l,k} \exp(j\phi_{l,k}) + \beta_{l,k} \exp(j\psi_{l,k})] \cdot b_k(t - \tau_{l,k}) c_k(t - \tau_{l,k}) \exp(j2\pi f_0 t)\right\} + J(t) + n(t) \quad (9)$$

$$P = P_k / \left\{ \left(d_{c_k, k} \right)^{\gamma} \cdot 10^{\zeta_{c_k, k}/10} \right\} = \text{constant} \quad (10)$$

$$\varepsilon(\gamma, c_k, k) \equiv \left(\frac{d_{c_k, k}}{d_{1,k}} \right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{10^{\zeta_{c_k, k}/10}}{10^{\zeta_{1,k}/10}} \right) \quad (11)$$

여기서, C 는 각각 K 명의 사용자를 포함하는 전체 셀의 수를 의미하고, c_k 는 k 번째 사용자와 통화 링크를 형성하는 c_k 번째 셀을 나타낸다. 첫번째 셀($c_k=1$)이 기준 셀이 된다. P 는 전력 제어되어 수신된 전력의 평균을 의미하고, λ_k 는 전력 제어 오차를 나타낸다. $d_{c_k, k}$ 는 k 번째 이동국과 그의 기지국(c_k 번째) 사이의 거리이고 $d_{c_k, k} \neq 0$ 이다. $n(t)$ 는 $N_0/2$ 의 양측 전력 스펙트럼 밀도를 가진 AWGN이고, $\phi_{l,k} = \theta_k + \eta_{l,k} - 2\pi f_0 \tau_{l,k}$, $\psi_{l,k} = \theta_k + \mu_{l,k} - 2\pi f_0 \tau_{l,k}$ 이다.

그림 1(a) 및 1(b)는 CDMA 시스템의 수신기를 나타낸 것이다. 수신기에는 간섭 제거 필터, 대역 통과 정합 필터뱅크, 병렬 PSK 복조기뱅크, 그리고 다이버시티 회로 등을 포함한다. 그림 1(b)는 PSK 복조기뱅크와 다이버시티 회로를 상세히 표시한 것이다. 해

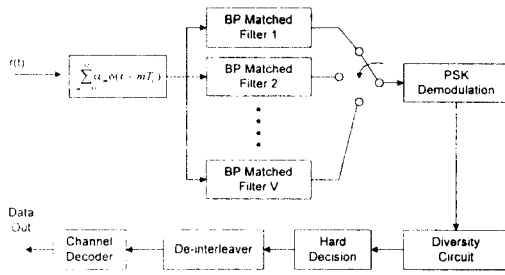


그림 1. (a) 오버레이된 CDMA 시스템의 수신기 모델
Fig. 1 (a) Receiver model of a CDMA overlay system

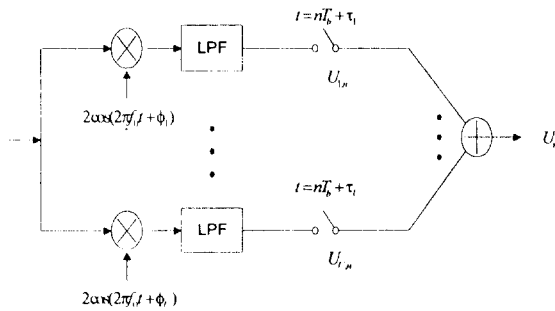


그림 1. (b) PSK 복조기 및 다이버시티 회로의 상세한 모델
Fig. 1 (b) Detailed model of the PSK demodulators and the diversity circuit

석의 편의를 위해, 간섭 제거 필터 앞 단의 대역 통과 필터링은 무시한다. 간섭 제거 필터로는 각각에 M개의 탭을 가진 양측 위너 필터(double-sided Wiener filter)를 채택하였으며, 그 임펄스 응답은 $\sum_{m=-M}^M \alpha_m \delta(t - mT_c)$ 이다. 여기서 $\alpha_0 = 1$ 이고, $\alpha_m = \alpha_{-m}$ 이다. 따라서 간섭 제거 필터의 출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_f(t) = \sum_{m=-M}^M \alpha_m r(t - mT_c) \quad (12)$$

여기서, $f_0 T_c$ 는 정수가 되도록 설정한다.

신호 $r_f(t)$ 는 정합 필터 뱅크로 들어간다. 각 정합 필터의 임펄스 응답은 $c_k(t) P_{T_r}(t - vT_b)$ 에 정합되어 있다. 여기서 $v = 1 \dots V$ 로서 정합 필터의 갯수를 의미한다. 최악의 경우 V는 랜덤 시퀀스의 길이 대 처리이득의 비를 의미하며, 프로그래머블 정합 필터를 사용하므로써 그 갯수를 줄일 수 있다. 첫번째 셀의 첫번째

사용자를 기준 사용자로 가정하였고, 이 경우 사용자를 표시하는 첨자를 생략하여 설명해 나가겠다. 각각의 비트 지속 시간 동안 정확히 정합된 정합 필터의 출력은 폭이 $2T_c$ 로 좁은 $2M + 1$ 개의 삼각 펄스들을 포함하고, 간섭 제거 필터의 중앙 탭에 의해 $2M + 1$ 개의 피이크 중에서 가장 가운데 피이크가 가장 큰 값을 가지며, 그 외곽의 피이크들은 다른 탭들에 의해 발생되며 그 값도 비교적 작다. 우리는 여기서 $|t_i - t_l| \geq (2M + 1)T_c, l = 1, \dots, L, l \neq i$ 임을 가정한다. 그이유는, 만약 $|t_i - t_l| < (2M + 1)T_c$ 이라면 다른 경로로 인한 필터 출력이 서로 중첩되어 다중 경로들을 분해할 수 없을 수도 있기 때문이다. 그리고 다이버시티 결합을 할 때 수신기는 기준 사용자의 분해 가능한 각 경로들의 가장 큰 피이크만을 이용한다고 가정한다.

역방향 채널에서 발생하는 원근단 문제를 해결하기 위해 전력 제어 기법을 사용하는데, 본 논문에서는 경로 감쇄를 보상하기 위한 평균 전력 제어(Average Power Control)를 고려하였으며, 실제 이동통신 환경에서 수신 전력을 일정한 값으로 유지할 수 없으므로 전력 제어 오차에 의한 영향도 고려하였다. 이러한 전력 제어 오차로 인한 수신 전력의 분포는 표준 편차가 1-3[dB]인 대수 정규 분포를 보인다[9]. 전력 제어 오차를 수학적으로 표현하기 위해 각 이동국으로부터의 수신 전력을 $P\lambda_k$ 로 나타냈으며, 이때 P는 평균 수신 전력을 의미하고, $\lambda_k (= 10^{x/10})$ 는 식(4)와 같은 대수 정규 분포의 확률 밀도 함수를 갖는 것으로 한다[10]. 또한 K-1 개의 이동국에 의한 다중 접속 간섭을 표현하기 위해 대수 정규 분포를 갖는 변수들의 합 λ_x 에 대한 확률 밀도 함수를 구할 필요가 있는데, x의 표준 편차가 0-4[dB]인 범위에서 잘 들어 맞는 Fenton의 근사화를 이용하면, 대수 정규 분포를 갖는 랜덤 변수들의 합도 대수 정규 분포임을 알 수 있다[11].

$$\lambda_x = \sum_{k=2}^K \lambda_k \quad (13)$$

협대역 간섭 신호 제거를 위한 양측 탭 지연선을 갖는 트랜스버설 필터를 그림 2에 나타내었다. 협대역 간섭 신호는 전체 수신 신호 $r(t)$ 로부터 추정될 수 있으며, 이때 α_m 이 선형 추정을 위한 탭의 계수이다 [4]-[7]. 이 계수는 전체 수신 신호와 추정값 사이의 평

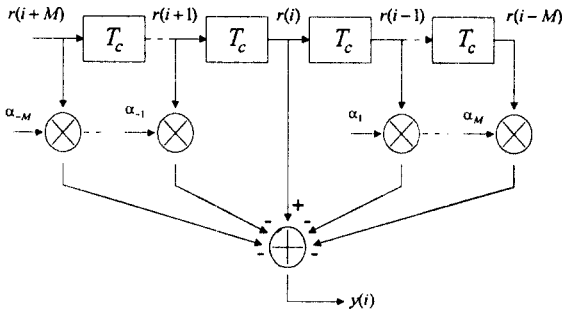


그림 2. 양측 탭 지연선을 갖는 트랜스버설 필터
Fig. 2 A transversal filter with double-sided tapped delay line

균 자승 오차를 최소화함으로써 구할 수 있다. 이런 과정을 거쳐 결국 식(14)의 선형 방정식을 얻을 수 있는데 이를 Wiener-Hopf 방정식이라 하며, 이로부터 간섭 제거 필터의 탭 계수 $\{\alpha_m\}$ 를 결정할 수 있다.

$$\sum_{m=-M}^M \alpha_m R_r[(i-m)T_c] = R_r(iT_c), \quad i = -M, \dots, M, i \neq 0 \quad (14)$$

이때 $R_r(iT_c)$ 는 $E\{r(mT_c)r(i+mT_c)\}$ 로서 수신된 신호의 자기 상관 함수이다.

III. 성능 분석

본 장에서는 II장의 모델링을 바탕으로, 마이크로 셀 환경에서 협대역 간섭이 존재하는 셀룰라 CDMA 시스템의 비트 오류 확률을 구하고자 한다. i 번째 복조기의 n 번째 비트 판정을 위한 변수 $U_{i,n}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$U_{i,n} = \int_{t_{i,n}^*}^{(n+1)T_b+t_i} r_f(t)2c_i(t-\tau_i)\cos(2\pi f_0 t + \phi_i) dt \quad (15)$$

고주파 성분은 복조기의 혼합기 다음에 놓이는 저역 통과 필터에 의해 제거되므로 식(15)는 다음과 같이 된다.

$$U_{i,n} = S_{i,n} + D_{i,n} + F_{i,n} + \sum_{l=1}^L I_l + \sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^L I_{l,k} + \sum_{k=K+1}^{CK} \sum_{l=1}^L W_{l,k} + N_{i,n} + J_{i,n} \quad (16)$$

첫번째 항은 기준 사용자의 i 번째 경로의 직진과 성분으로서, 간섭 제거 필터의 중앙 탭에서 출력된 원하는 신호 성분이며, $S_{i,n} = \sqrt{2P\lambda_i} T_b b_n \rho$ 으로 표현된다. 이때 모든 사용자 및 모든 경로에 대해 $\rho_i, k = \rho$ 라고 가정한다. 나머지 항들의 경우, b_n 및 $c_i(t)$ 그리고 전력 제어 오차에 대한 조건부 분산을 구할 것이다. $D_{i,n}$ 은 기준 사용자의 i 번째 경로의 페이딩 성분으로서, 간섭 제거 필터의 중앙 탭에서 출력된 간섭 성분이며 조건부 평균이 0, 조건부 분산이 $I_{diff} \equiv 2P\lambda_i T_b^2 \sigma^2$ 인 정규 분포를 갖는 랜덤 변수이다. 모든 사용자 및 모든 경로에 대해 $\sigma_i^2, k \equiv E\{\beta_{i,k}^2\}/2 = \sigma^2$ 라 가정하였다. $F_{i,n}$ 은 기준 사용자의 i 번째 경로가 간섭 제거 필터로 입력 될 때, 중앙 탭을 제외한 나머지 탭들로 인해 발생한 간섭 성분이며 이 항 역시 조건부 평균이 0이고 조건부 분산이 $I_{si} \equiv 2P\lambda_i(\rho^2 + \sigma^2) \left(\frac{T_b^2}{N}\right) \sum_{m=-M}^M \alpha_m^2$ 인 정규 분포의 랜덤 변수이다. $I_{l,k}$ 는 첫번째 셀의 k 번째 사용자의 l 번째 경로(즉, $c_k = 1, k = 2, \dots, K$)에 의한 다중 접속 간섭 성분으로서 다음과 같은 조건부 분산을 갖는다.

$$\text{Var}[I_{l,k}] \approx P\lambda_k(\rho^2 + 2\sigma^2) \left[2 \sum_{m=-M}^M \alpha_m^2 + \sum_{m=-M}^M \alpha_m \alpha_{m+1} \right] \frac{T_b^2}{3N} = \sigma_0^2 \lambda_k \quad (17)$$

여기서, $|m| > M$ 일 때 $\alpha_m = 0$ 이다. 그러므로 다중 접속

에 의한 총 조건부 간섭량은 $I_{mai} = \text{Var} \left[\sum_{k=2}^K \sum_{l=1}^L I_{l,k} \right] =$

$L\sigma_0^2 \lambda_i$ 이 된다. 이때 λ_i 는 식(13)에 의해 결정된다. I_l 는 기준 사용자의 l 번째 경로에 의한 다중 경로 간섭 성분이며 조건부 분산은 $\sigma_0^2 \lambda_l$ 와 근사적으로 같다[3]. 따라서 다중 경로에 의한 총 조건부 간섭량은 $I_{mpi} = \text{Var} \left[\sum_{l=1}^L I_l \right] = (L-1)\sigma_0^2 \lambda_i$ 이다. $W_{l,k}$ 는 c_k 번째 인접 셀의

기지국과 통화 링크를 형성하고 있는 k 번째 사용자의 l 번째 경로($k = K+1, \dots, CK, c_k \neq 1$)에 의한 간섭 성분이며, $W_{l,k} = \sqrt{\epsilon(\gamma, c_k, k)} I_{l,k}$ 의 관계가 있다. 인접 셀 내의 사용자에 의한 간섭을 구할 때 이용할 간섭 지수 $f_{\alpha i}$ 는 다음의 두 식에 의해 결정된다(그림 3). 이때 k_u 는 단위 면적당 이동국의 수로서 $k_u = 2K/3\sqrt{3}$ 이 된다.

$$I_{S_b} = E \left\{ \iint_{S_b} \varepsilon(\gamma, c_k, k) \lambda_k k_u dA(x, y) \right\}$$

$$= E \left\{ \iint_{S_b} \left[\frac{d_{c_k, k}^{\gamma}(x, y) \cdot 10^{c_{s_k, k}/10}}{d_{l, k}^{\gamma}(x, y) \cdot 10^{c_{l, k}/10}} \right] \lambda_k k_u dA(x, y) \right\} \quad (18)$$

$$f_{ocf} = \frac{I_{S_b} + I_{S_o}}{K} \quad (19)$$

결국 인접 셀 내의 다른 사용자들에 의한 총 조건부 간섭을 구하면 $I_{ocf} = Var \left[\sum_{k=k+1}^{CK} \sum_{l=1}^L W_{l, k} \right] = f_{ocf} KL \sigma_o^2$ 이 된다. N_i, n 는 열적 잡음으로 인한 성분이며, 그 조건 부분산이 $N_{therm} \equiv N_0 T_b \sum_{m=-M}^M \alpha_m^2$ 이다. J_i, n 는 협대역 BPSK 간섭 신호로 인한 간섭 성분이며 조건부 분산은 다음과 같다.

$$I_{nb_i} = T_b^2 (J/N) \sum_{m_1=-M}^M \sum_{m_2=-M}^M \alpha_{m_1} \alpha_{m_2} \sigma_i^2(m_1, m_2) \quad (20)$$

여기서 $\alpha_i^2(m_1, m_2)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_i^2(m_1, m_2) = \int_{-1}^1 R_{\tau_i} \left[(x - m_1 + m_2) T_c \right] \cdot R_{\tau_i} \left[x T_c \right] \cdot \cos \left[2\pi q(x - m_1 + m_2) \right] \cdot \left(1 - \frac{|x|}{N} \right) dx \quad (21)$$

$R_{\tau}(\cdot)$ 는 $d(t)$ 의 자기 상관 함수이며, $R_{\tau_i}(\cdot)$ 는 $c_i(t)$ 의 자기 상관 함수이다.

협대역 간섭 신호를 제거하기 위한 필터의 탭 계수는 식(14) 즉 Wiener-Hopf 방정식을 이용하여 구할 수 있다. 계수를 구할 때 필요한 것은 바로 수신된 신호의 자기 상관 함수이며, $P\rho^2$ 으로 정규화한 자기 상관 함수 $\hat{R}_{\tau}(\tau)$ 를 식(22)에 구하였다. $\hat{R}_{\tau}(\tau)$ 를 식(14)에 대입하여 방정식을 풀면 탭 계수 $\{\alpha_m\}$ 를 결정할 수 있다.

$$\hat{R}_{\tau}(lT_c) = \begin{cases} (1+1/H)(1+f_{ocf})KL + 2(N/H)(E_b/N_0)^{-1} + J/S, & l=0 \\ (J/S)(1-|p|)\cos(2\pi lq), & |l| \leq [1/p] \\ 0, & |l| > [1/p] \end{cases} \quad (22)$$

여기서, $E_b = 2PT_b \sigma^2$ 는 레일리 페이딩 성분의 부호화된 비트 당 평균 에너지이고, $J/S = J/(P\rho^2)$ 는 협대역 간섭 신호 전력과 CDMA 신호 직진파 성분 전력의 비이며, $H = \rho^2/(2\sigma^2)$ 이다. p 와 q 는 식(7)와 식(8)에 각각 정의되어 있다.

평균 오류 확률을 구하기 위한 최종 판정 변수는 식(23)으로 표현되며, 결과적으로 기준 사용자의 데이터가 +1과 -1의 값을 취할 확률이 동일하다고 가정한다면, 조건부 오류 확률을 의미하는 식(24)을 얻을 수 있다.

$$U_n = \sum_{i=1}^U U_{i,n} \quad (23)$$

$$P(c_i(t), \lambda_1, \lambda_i) = Q \left(\sqrt{\frac{S_T^2}{\sigma_{J_i}^2 + \sigma_T^2}} \right) \quad (24)$$

여기서,

$$Q(x) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp \left(-\frac{y^2}{2} \right) dy \quad (25)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^U S_{i,n} \quad (26)$$

$$\sigma_T^2 = U \left\{ I_{diff} + I_{si} + I_{mpi} + I_{mai} + I_{ocf} + N_{therm} \right\} \quad (27)$$

$$\sigma_{J_i}^2 = U \cdot I_{nb_i} \quad (28)$$

식(24)가 $c_i(t), \lambda_1$ 그리고 λ_i 에 대한 조건부 확률을 나타내므로, 평균 비트 오류를 구하기 위해서는 각 랜덤 변수에 대해 평균을 취해야만 한다. 그런데 식(27) 및 식(20)으로부터 σ_o^2 와 σ_i^2 이 $c_i(t)$ 의 함수가 아님을 알 수 있다. 따라서 조건부 비트 오류율은 단지 전력 제어 오차 λ_1 및 λ_i 에만 의존하게 되며, 식(29)가 평균 비트 오류율을 나타내고 있다.

$$P_e = E \left\{ P(c_i(t), \lambda_1, \lambda_i) \right\} = E \left\{ P(\lambda_1, \lambda_i) \right\} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} P(\lambda_1, \lambda_i) p(\lambda_1) p(\lambda_i) d\lambda_1 d\lambda_i \quad (29)$$

성능 개선을 위해 채널 부호화(Channel Coding) 기법을 사용하였는데, 간단한 블록 부호(Block Code) 중 BCH (15, 7) 부호를 고려하였다. 완벽한 인터리빙을 가정했을 때(즉, 간섭 제거 필터와 페이딩 채널 사

이에서 기인될 수 있는 상관 관계를 무시할 때), 경성 판정 복호 이후의 최종 오류 확률은 다음과 같다[12].

$$P_b \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i \binom{n}{i} (P_c)^i (1 - P_c)^{n-i} \quad (30)$$

여기서 n 은 코드워드를 형성하는 비트 수이고, i 는 부호가 정정할 수 있는 오류 비트의 수이다.

IV. 결과 및 고찰

본 장에서는 협대역 간섭 신호가 존재하는 환경에서 셀룰라 CDMA 시스템의 비트 오류 확률에 대한 여러 가지 결과 및 분석을 수행한다. 특별한 언급이 없는 한, 다음과 같이 파라미터 값을 설정하였다: CDMA 신호 대역폭에 대한 간섭 신호 대역폭의 비 $p=10\%$, CDMA 신호 대역폭의 절반에 대한 간섭 신호 반송파 주파수의 오프셋 비 $q=10\%$, 채널 부호로는 BCH (15, 7) 부호, 경로 감쇄 지수 $\gamma=3$, 셀 당 사용자 수 $K=20$ 명, 분해 가능한 다중 경로 수 $L=3$, 다이버시티 차수 $U=2$, 페이딩 성분 전력에 대한 직진파 성분 전력의 비 $H=7[\text{dB}]$, CDMA 신호 직진파 성분 전력에 대한 간섭 신호 전력의 비 $J/S=25[\text{dB}]$, 확산 이득 N

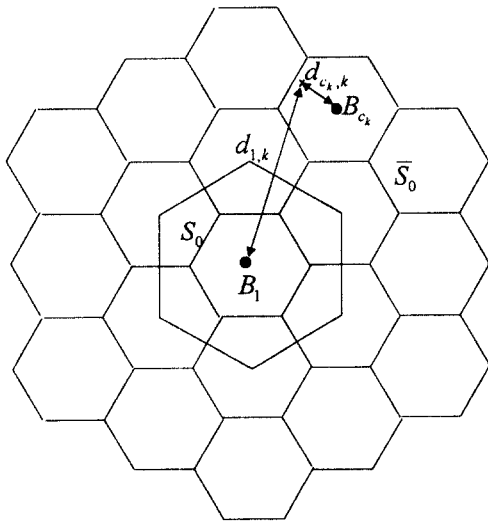


그림 3. 간섭량 계산을 위한 육각형 모양의 셀구조($N_c=3$ 인 경우)

Fig. 3 Hexagonal cell geometrics for interference calculation ($N_c=3$)

$=255$, 전력 제어 오차 $PCE=1[\text{dB}]$, 대수 정규 세도잉의 표준 편차는 $\text{std}=4[\text{dB}]$. 인접 셀 내의 이동국에 의한 간섭을 구할 때 셀의 갯수는 3 layer까지 고려하였고, 연성 통화 인계를 위한 기지국 수는 $N_c=3$ 으로 하였다. E_i/N_0 는 부호화 하지 않은 시스템의 잡음 전력 밀도에 대한 비트 당 에너지의 비를 의미한다.

그림 4는 열적 잡음(AWGN)이 무시된 상황 즉, $E_i/N_0 \rightarrow \infty$ 일 때, 간섭 제거 필터의 단측 탭의 갯수 M 의 변화에 따른 비트 오류율에 나타내고 있다. 그림에서 보이듯이 필터를 달았을 경우, 달지 않았을 경우에 비해 성능이 현저하게 개선됨을 알 수 있다. 그러나 $M \geq 1$ 인 경우 탭의 갯수를 증가시키더라도 성능에는 큰 변화가 없는데, 이는 비교적 작은 p, q 값에 대해 간섭 신호의 자기 상관 함수 값이 $\tau=0$ 일때와 $\tau=\pm$

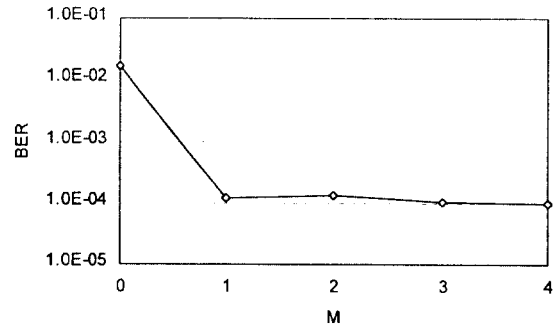


그림 4. 필터의 단측 탭 갯수 M 에 따른 비트 오류율($E_i/N_0 \rightarrow \infty$)
Fig. 4 BER as a function of number of taps on each side($E_i/N_0 \rightarrow \infty$)

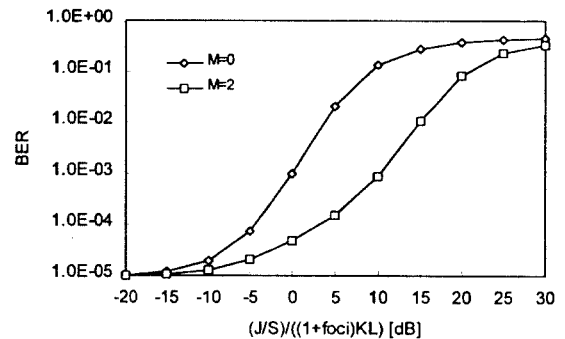


그림 5. $(J/S)/((1+f_{oci})KL)$ 에 따른 비트 오류율($E_i/N_0 \rightarrow \infty$)
Fig. 5 BER as a function of $(J/S)/((1+f_{oci})KL)$ ($E_i/N_0 \rightarrow \infty$)

T_c 일때 거의 같기 때문에, 단축 탭을 1개(총 3개)만 달아도 간섭 신호를 거의 완벽하게 추정하여 제거할 수 있으므로 2개 이상 탭을 증가시키더라도 그 개선 정도에 뚜렷한 변화가 없는 것이다.

그림 5는 $(J/S)/\{(1+f_{oc})KL\}$ 의 변화에 따른 성능을 나타내고 있다. 협대역 간섭의 CDMA 다중 접속 및 인접 셀 간섭에 대한 대략적인 비를 $(J/S)/\{(1+f_{oc})KL\}$ 로 표현하였다. 필터를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우 모두 J/S 가 증가함에 따라 성능이 나빠졌다. J/S 가 매우 작은 경우는 협대역 간섭이 CDMA 시스템에 별로 영향을 미치지 못하기 때문에 필터를 사용할 필요가 없고, J/S 가 비교적 큰 경우 협대역 간섭이 CDMA 간섭 만큼 영향을 미치므로 필터를 사

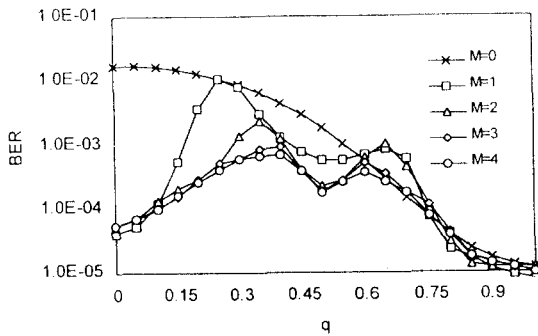


그림 6. 협대역 신호의 반송파 주파수 오프셋 비 q에 따른 비트 오류율($E_i/N_0 \rightarrow \infty$)

Fig. 6 BER as a function of the carrier frequency offset ratio $q(E_i/N_0 \rightarrow \infty)$

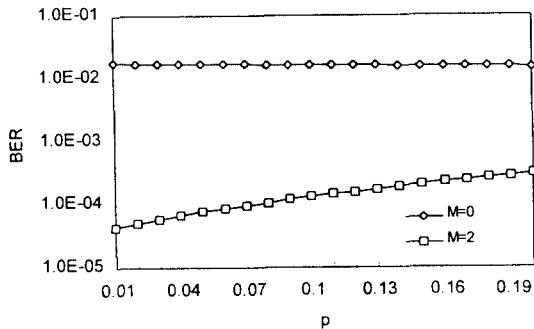


그림 7. 대역폭 비 p에 따른 비트 오류율($E_i/N_0 \rightarrow \infty$)

Fig. 7 BER as a function of the bandwidth ratio $p(E_i/N_0 \rightarrow \infty)$

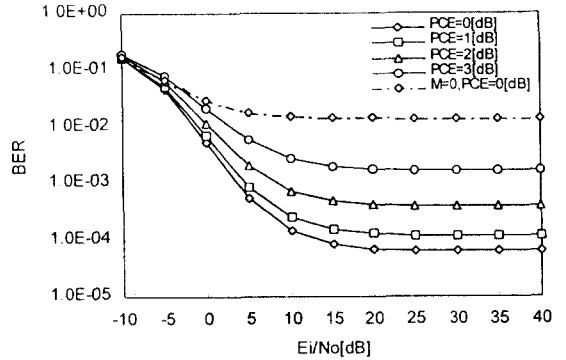


그림 8. 전력 제어 오차에 따른 비트 오류율(M=1)

Fig. 8 BER as a function of power control error(M=1)

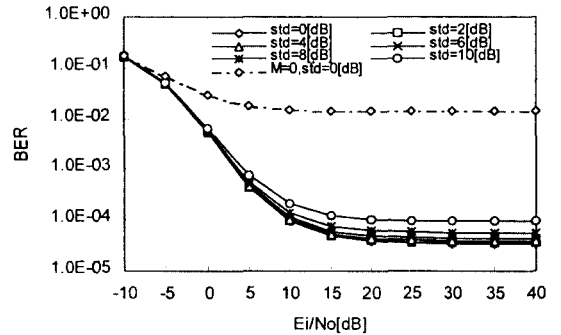


그림 9. 대수 정규 쉐도잉의 표준 편차에 따른 비트 오류율(M=1, $\gamma=4$)

Fig. 9 BER as a function of log-normal shadowing standard deviation(M=1, $\gamma=4$)

용해야만 성능을 개선할 수 있다.

그림 6은 협대역 신호 반송파 주파수 오프셋의 CDMA 대역폭의 절반에 대한 비 q에 따른 비트 오류율을 나타내고 있다. q가 매우 작을 때(대략, $q \leq 0.1$)는 $M \geq 1$ 인 경우 성능이 모두 비슷한데, 그 이유는 그림 4에 대한 설명에 나와 있다. 그러나 q가 증가함에 따라 탭의 갯수 M이 증가할수록 성능이 더 좋아지고, 특히 M 값이 클수록 q의 변화에 덜 영향을 받는다. 그리고, $q = 0.25$ 일 때 $M=1$ 인 경우 필터를 달지 않은 경우와 같은 성능을 보이고 있는데, 그 이유는 α_{-1}, α_1 의 값이 0이 되어($\hat{R}_c(T_c), \hat{R}_c(-T_c)$ 값이 0이 되기 때문이다), 단축 탭 1개($M=1$)로는 간섭 신호를 추정해 낼 수 없기 때문이다.

그림 7은 협대역 신호 대역폭의 CDMA 대역폭에 대한 비 p 에 따른 오율을 나타낸다. 기대된대로, 필터를 단 경우 성능이 좋고, 대역폭 비 p 가 증가할수록 성능 개선 효과가 둔화되고 있다.

그림 8은 전력 제어 오차에 따른 비트 오율을 나타내고 그림 9는 대수 정규 선택도형 표준 편차에 따른 비트 오율을 나타낸다. 그림 8에서도 보이듯이 간섭 제거 필터를 단 시스템의 경우 전력 제어 오차가 다소 크더라도, 필터 없이 완벽한 전력 제어를 하는 시스템보다 성능이 우수하였다. 그림 9도 필터 사용으로 인한 성능 개선을 잘 나타내고 있다. 그림 8과 그림 9을 비교할 때, 전력 제어 오차가 커짐에 따라 성능에 큰 변화가 있는 것에 반해 대수 정규 선택도형 변화에 따른 성능에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 즉 전력

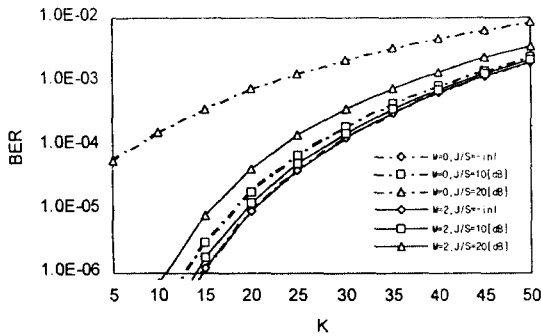


그림 10. 셀 당 사용자 수 K 에 따른 비트 오율($E_b/N_0 \rightarrow \infty$)
Fig. 10 BER as a function of number of users per cell K ($E_b/N_0 \rightarrow \infty$)

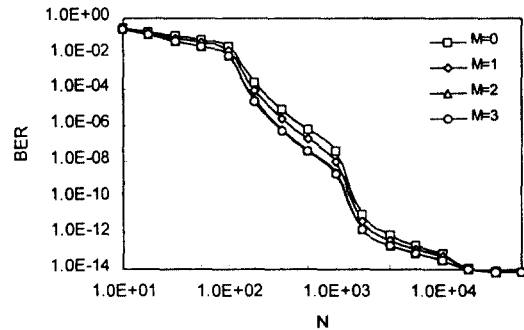


그림 11. 확산 이득 K 에 따른 비트 오율($q=0.2, J/S=20[db], E_b/N_0 \rightarrow \infty$)
Fig. 11 BER as a function of processing gain N ($q=0.2, J/S=20[db], E_b/N_0 \rightarrow \infty$)

제어 오차가 CDMA 시스템에 미치는 영향이 선택도형보다 크다. 선택도형의 경우 인접 셀 내의 이동국에 의한 간섭에만 영향을 미치지만 전력 제어 오차의 경우 인접 셀로부터의 영향 뿐만 아니라 기준 셀 내에서도 원하는 신호 성분 및 다중 접속 간섭 성분 등에 까지 영향을 미치기 때문일 것이다.

그림 10은 다양한 J/S 값에 대해, 셀 당 사용자 수 K 에 따른 비트 오율을 나타낸다. 간섭 제거 필터를 단 시스템이 달지 않은 시스템보다 더 많은 사용자 수 용할 수 있고, 특히 J/S 가 비교적 작은 경우, 대략 $J/S \leq 10[db]$ 일 때는 협대역 신호의 간섭보다 오히려 CDMA 사용자들에 의한 다중 접속 및 인접 셀 간섭이 시스템에 더 큰 영향을 끼치게 되어 필터가 필요 없게 된다.

그림 11은 확산 이득 N 의 변화에 따른 비트 오율을 나타낸다. 필터를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우 모두 확산 이득이 증가할수록 성능이 개선되었다. 또한 확산 이득 N 이 대략 100~2000 사이의 값일 때에는 필터를 사용함으로써 얻을 수 있는 성능 개선 효과가 매우 컸다.

V. 결 론

스펙트럼 효율을 높이기 위해 기존의 마이크로파 협대역 시스템 위에 동일한 대역을 사용하는 셀룰라 CDMA 시스템을 오버레이시킨 환경에서, CDMA 시스템의 성능을 분석하였다. 본 논문에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 전력비 J/S 가 작은 경우(대략 $J/S \leq 10[db]$)에는 CDMA 시스템이 겪는 간섭 중 대부분을 다중 접속 및 인접 셀에 의한 간섭이 차지하기 때문에 간섭 제거 필터가 불필요 하지만, 10[db] 보다 큰 경우에는 간섭 제거 필터를 사용하는 것이 성능 개선을 위해 필요하다.

2. 협대역 간섭 신호의 반송파가 CDMA 반송파에 근접해 있을수록 CDMA 시스템은 더 많은 간섭을 겪게 되며, 이때 간섭 신호가 매우 가깝게 위치해 있다면(대략 $q \leq 10\%$) 간섭 제거 필터를 사용할 경우 총 3개의 탭만으로도 음성 전송에 필요한 오율인 10^{-3} 이하로 오율을 낮출 수 있다. 그러나 반송파간의 주

파수 오프셋(q)이 커질수록 더 많은 탭을 사용함으로써 더 큰 성능 개선을 얻을 수 있다.

3. 협대역 신호의 전력이 비교적 큰 경우(대략 $J/S > 10[dB]$)에 필터를 사용하게 되면 더욱 현저한 수용용량의 증가를 얻을 수 있다.

4. 전력 제어 오차가 다소 크더라도 간섭 제거 필터를 사용한 시스템이 필터 없이 완벽한 전력 제어를 수행하는 시스템보다 성능이 우수하였다. 그리고 전력 제어 오차의 증가로 인한 성능의 열화 정도가 대수 정규 웨도잉 표준 편차의 증가로 인한 것보다 더욱 심하였다.

5. 확산 이득(N)이 대략 100~2000 사이의 값일때 필터를 사용함으로써 얻을 수 있는 성능 개선 효과가 더욱 뚜렷하였다.

참 고 문 헌

1. R.L. Pickholtz, L.B. Milstein, and D.L. Schilling, "Spread Spectrum for Mobile Communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-40, no. 2, pp. 313-322, May 1991.
2. R.J.C. Bultitude and G.K. Bedal, "Propagation Characteristics on Microcellular Urban Mobile Radio Channels at 910 MHz," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-7, no. 1, pp. 31-39, Jan. 1989.
3. J. Wang, M. Moeneclaey and L.B. Milstein, "DS-CDMA with Predetection Diversity for Indoor Radio Communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-42, no. 2/3/4, pp. 1929-1938, Feb./Mar./Apr. 1994.
4. L.B. Milstein, "Interference Rejection Techniques in Spread Spectrum Communications," *Proc. of the IEEE*, pp. 657-671, June 1988.
5. L. Li and L.B. Milstein, "Rejection of narrow-band interference in PN spread spectrum using transversal filters," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-30, no. 5, pp. 925-928, May 1982.
6. J. Wang and L.B. Milstein, "CDMA Overlay Situations for Microcellular Mobile Communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-43, no. 2/

3/4, pp. 603-614, Feb./Mar./Apr. 1995.

7. E. Masry and L.B. Milstein, "Performance of DS spread spectrum receiver employing interference suppression filters under a worst-case jamming condition," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-34, no. 1, pp. 13-21 Jan. 1986.
8. K.S. Gilhousen, I.M. Jacobs, R. Padovani, A.J. Viterbi, L.A. Weaver, and C.E. Wheatley III, "On the Capacity of a Cellular CDMA System," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. VT-40, no. 2, pp. 303-312, May 1991.
9. A.J. Viterbi, A.M. Viterbi, and E. Zehavi, "Performance of Power-Controlled Wideband Terrestrial Digital Communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-41, no. 4, pp. 559-569, Apr. 1993.
10. A. Chockalingam and L.B. Milstein, "Capacity of DS-CDMA Networks on Frequency Selective Fading Channels with Open-Loop Power Control," *Proc. IEEE ICC '95*, pp. 703-707, 1995.
11. L.F. Fenton, "The sum of log-normal probability distribution in scattered transmission systems," *IRE trans.*, vol. C5-8, pp. 57-67, Mar. 1960.
12. E.R. Berlekamp, "The technology of error-correcting codes," *Proc. of IEEE.*, vol. 68, pp. 564-593, May. 1980.



이 정 구(Jeong-Goo Lee) 정회원
 1972년 12월 28일생
 1995년 2월: 연세대학교 공과대학
 전기공학과 졸업(공학사)
 1997년 2월: 연세대학교 대학원 전
 기공학과 졸업(공학석사)

1997년 3월~현재: 삼성전자 정보통신본부 무선개발팀
 연구원

※주관심분야: 대역확산통신, 이동통신, 무선 data

이 동 도(Dong-Do Lee): 22권 1호 참조



강 병 권(Byeong-Gwon Kang) 정회원

1963년 11월 18일생

1982년 3월~1986년 2월: 연세대
학교 전기공학과 졸업(공학사)

1986년 3월~1988년 2월: 연세대
학교 대학원 전기공
학과 졸업(공학석사)

1988년 3월~1993년 2월: 연세대학교 대학원 전기공학
과 졸업(공학박사)

1993년 3월~현재: 한국전자통신연구원 이동통신기술
연구단 무선제어연구실 선임연구원

※주관심분야: 이동통신, 스펙트럼 확산 통신, 무선
통신 시스템

황 금 찬(Keum-Chan Whang): 22권 2호 참조