

불완전한 전력 제어 셀룰라 DS/CDMA 시스템의 용량 분석

正會員 김 준 철*, 박 진 수*, 광 경 섭**

Capacity of DS/CDMA System with Imperfect Power-control

Jun Chul Kim*, Jin Soo Park*, Kyung Sup Kwak** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 불완전한 전력제어가 디지털 셀룰라 직접 확산/코드 분할 다중 접속(DS/CDMA)시스템의 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 성능 분석을 위하여 고려되는 시스템을 주어진 기준 통화 품질을 만족하면서 동시에 통화할 수 있는 최대 사용자 용량을 이용하였다. 또한 제안된 전력 제어 불완정성 모델을 이용하여 전력 제어 오류가 사용자 용량에 미치는 영향을 제시하였다.

이동 통신 채널 모델로서는 도심지역 마이크로 셀에 적합한 주파수 선택적 라이시안 페이닝 채널 모델을 가정하고 고려되는 DS/CDMA 시스템은 BPSK 변·복조, 길쌈부호와 역부호화 방법으로는 연판정 비터비 알고리즘을 사용하였다.

본 논문을 통하여 최대 사용자 용량은 전력 제어 오류(dB 단위의 표준편차)가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있었고 2.5dB 이상의 오류가 발생하면 이상적인 전력 제어 시스템 보다도 성능이 50%이하로 열화됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we studied the effects of the power control imperfection on the system performances of a micro-cellular DS/CDMA system. The maximum user capacity, defined as the maximum number of users can be serviced simultaneously, meeting a given voice quality, is first considered. Then the performance degradation due to the control error is analyzed.

The frequency selective Rician channel model is used to characterize a microcellular mobile communication environment. The DS/CDMA system under consideration uses BPSK modulation and convolutional coding/Viterbi decoding with soft decision for forward error correction.

It is shown that the user capacity falls linearly down with the increase of the power control error(in terms of the

* 한국통신연구개발본부 무선통신연구소

** 인하대학교 전자공학과

論文番號: 95397-1117

接受日字: 1995年 11月 17日

standard deviation in dB) and the interference from users outside the third tier cells have a minor effect on the performance. And the performance of DS/CDMA with the imperfect power control model is made to be less than 50% of that with perfect power control model.

I. 서 론

대역 확산 기술인 직접 확산/부호 분할 다중 접속(direct sequence/code division multiple access; DS/CDMA)방식을 사용하는 디지털 셀룰라 시스템은 기존의 아날로그 셀룰라 시스템이나 시분할 다중접속(TDMA)방식을 채용한 셀룰라 시스템보다 높은 시스템 용량을 가지는 것으로 알려져 있다[1, 2]. DS/CDMA 셀룰라 시스템의 시스템용량에 대한 연구로는 플랫폼 레일라 채널에서 DS/CDMA 시스템의 용량에 대한 연구[3], 주파수 선택적 라시안 페이딩 채널에서의 용량 연구[4]등이 있다. 라시안 채널은 가시선이 존재하는 채널모델로 건물밀도가 낮은 교외 지역동의 모델로 사용되어왔지만 현재의 마이크로셀/피코셀과 같이 셀반경이 자아집에 따라 도심지역에서도 가시선 영역의 많아짐에 따라 마이크로셀 도심지역모델로 적합한 모델이라고 할 수 있다[7]. 셀룰라 DS/CDMA 시스템에서는 다른 사용자들에 의한 동일 채널 간섭을 최소화하기 위해 전력제어를 사용한다. 전력제어란 이동국이 기지국과의 거리에 관계없이 일정한 전력으로 기지국에서 수신되게 하기 위해 송신 전력을 조절하는 것을 말한다[2]. 위에서 언급된 DS/CDMA 시스템 용량에 관한 연구는 이러한 전력제어를 완전하다고 가정하였다. 또한 불완전한 전력제어의 영향을 고려한 연구에서는 채널환경을 고려하지 않거나 단순한 가우시안 채널만을 고려하기도 하였다[13, 14].

본 논문에서는 실제 이동 통신 시스템에서 다중 경로 페이딩등 채널의 급속한 변화에 의해 기인하는 불완전한 전력 제어 과정을 모델링[5]하고 전력제어의 불완전한 정도와 시스템 성능(최대 사용자 용량)사이의 관계를 제시한다.

모든 이동국이 물리적으로 같은 주파수 대역을 사용하는 DS/CDMA 시스템에서는 시스템내 다른 사용자의 신호들이 기준 사용자에 대하여 간섭을 일으킨다. 이러한 사용자들의 간섭에 의해 제한되는 시스

템에서 기준 통화 품질을 만족시키면서 동시 통화할 수 있는 사용자수를 최대 시스템 사용자 용량이라 한다. 이는 음성 활성 감지(Voice Activity Detection) 방식을 통해 통화중 음성이 발생할 때만 송신을 함으로써 간섭을 줄일 수 있다. 또한 앞서 설명한 전력 제어를 사용하여 최소 요구 전력으로 수신되어 불필요한 간섭을 감소시킴으로써 용량을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서 고려한 DS/CDMA 시스템은 BPSK 변·복조를 사용하고, 오류 정정 부호로서는 현재 DS/CDMA를 이용한 디지털 셀룰라 시스템에서 사용되고 있는 길썩부호/연판정 비터비 역부호화 알고리즘을 가정하였다. 본 연구에서는 상향링크 즉 이동국으로부터 기지국 방향의 시스템 성능을 고려하였다.

2장에서는 먼저 전력제어가 완전하다는 가정하에 셀룰라 DS/CDMA 시스템과 채널모델로부터 신호대 잡음비와 그에 따른 비트 오류 확률을 고찰하였다. 또한 오류 정정 부호, 전송손실 지수 등에 따른 시스템 용량이 제시되었다. 3장에서는 상향 링크 시스템에서의 불완전한 전력 제어 모델을 제시하고 그에 따른 시스템 용량을 구하였다. 4장에서는 수치해석 결과와 분석을 하였다.

II. DS/CDMA 시스템 및 페이딩 채널

2.1 단일셀 시스템

본 논문에서는 모든 사용자가 동기식 이진 위상 변조(coherent BPSK)와 직접 부호에 의한 확산 방식을 사용하는 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 성능을 분석하였다. 현재 사용되고 있는 DS/CDMA 시스템 설계에서와 같이 이동국에서 기지국으로의 링크(상향 링크) 주파수 대역과 기지국에서 이동국으로의 링크(하향링크) 주파수 대역이 서로 분리되어 있다고 가정한다. 즉, 시스템내의 모든 기지국들은 하나의 주파수 대역을 재사용하고 또한 모든 이동국들은 다른 분리된 주파수 대역을 재사용한다고 가정한다. 또한 모든 이동국과 기지국은 전 방향성 안테나를 사용한다

고 가정한다. 이러한 두 가정은 시스템내의 하나의 기지국은 모든 이동국들로부터 오는 간섭신호를 받지만 다른 기지국들로부터는 간섭신호를 받지 않는다는 것을 의미한다.

본 논문에서 고려되는 주파수 선택적 라이시안 페이딩 채널과 상향 링크 DS/CDMA 송·수신기의 간단화한 모델을 그림 1에 나타내었다. 셀내 K명의 사용자중 임의의 m번째 사용자의 이진 데이터 $d_m(t)$ 는 $PN_m(t)$ 에 의해 대역 확산되고 RF 반송파에 의해 송신된다. 송신신호는 페이딩 채널을 통하여 라이시안 채널의 특성에 따라 가시 성분 A_{om} 과 산란 성분 A_m 으로 나누어져 기지국에 수신된다. 수신기에서 다른 K-1명의 동일 채널 사용자와 함께 수신된 신호를 기저 대역으로 변환하고 m번째 사용자의 신호를 추출하기 위해 $PN_m(t)$ 를 이용하여 원하는 신호만을 역확산시킨다. 최종적으로 적분-덤프 필터(integrate and dump filter) 출력 $g(T)$ 를 얻어 수신된 데이터를 결정한다.

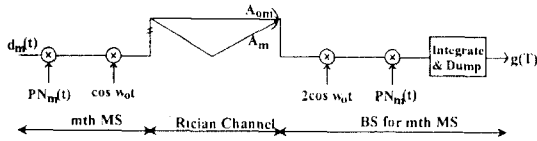


그림 1. DS/CDMA 시스템 송·수신기 및 라이시안 채널
Fig. 1 Transmitter and Receiver of the DS/CDMA and Rician Mobile Channel.

해석적 모델을 위하여 먼저 그림 단일 셀 시스템을 고려한다. 즉, 하나의 기지국과 K명의 사용자만이 존재하고 주위에 동일 채널 간섭을 일으키는 다른 기지국과 사용자가 없다고 가정한다. 이때 기지국에서 수신되는 신호는 다음 식과 같다.

$$r(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=1}^K A_{ok} d_k(t - \tau_k) PN_k(t - \tau_k) \cos(\omega_0 t + \theta_k) + \int_{-\infty}^{\infty} h_{sk}(\tau) \sum_{k=1}^K A_k d_k(t - \tau_k - \tau) \cdot PN_k(t - \tau_k - \tau) \cos(\omega_0 t + \theta_k) d\tau \right\} + n_w(t) \quad (1)$$

위 식에서 $\text{Re}\{\cdot\}$ 는 복소수의 실수 부분을 나타내는 연산자이다. $d_k(t)$ 와 $PN_k(t)$ 는 k번째 사용자의 이진 데이터와 확산 부호를 나타내고 τ_k 와 θ_k 는 지연과 위상으로 상호 독립이며, 각각 $[0, T]$ 와 $[0, 2\pi]$ 에서 균일

분포를 가지는 불규칙 변수로 가정한다. $\{A_{ok}\}$ 와 $\{A_k\}$ 는 각각 k번째 사용자에 의한 수신신호에서 가시(또는 강한 반사파) 성분과 산란 성분을 가리킨다. $h_{sk}(\tau)$ 는 저역 통과 채널 임펄스 함수(lowpass equivalent channel impulse)를 나타내는 복소 가우시안 불규칙 과정(complex gaussian random process)[5]이고 $n_w(t)$ 는 $N_0/2$ 의 전력 밀도를 가지는 부가 백색 가우시안 잡음이다.

수신기에서 적분-덤프 필터 출력 $g(T)$ 는

$$g(T) = \int_0^T r(t) \cos \omega_0 t PN_m(t) dt \quad (2)$$

가 되며 위 식은 가시 성분, 산란 성분, 잡음 성분의 3가지 성분으로 구성되며 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$g(T) = S(T) + S_F(T) + N(T) \quad (3)$$

위 식에서 각 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(T) = \int_0^T \left\{ \sum_{k=1}^K A_{ok} d_k(t - \tau_k) PN_k(t - \tau_k) \cos(\omega_0 t + \theta_k) \right\} PN_m(t) 2 \cos \omega_0 t dt \quad (4)$$

$$S_F(T) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^T \sum_{k=1}^K A_k \text{Re} [h_{sk}(\tau) e^{j\theta_k}] d_k(t - \tau_k - \tau) PN_k(t - \tau_k - \tau) PN_m(t) dt d\tau \quad (5)$$

$$N(T) = \int_0^T n_w(t) PN_m(t) 2 \cos \omega_0 t dt \quad (6)$$

불규칙 변수 $g(T)$ 로부터 비트 오류 확률을 구하기 위하여 m번째 사용자에 대한 평균 신호대 간섭비(signal-to-interference ratio; SIR)를 다음 식(7)과 같이 정의한다.

$$SIR_m = \frac{E^2[g(T)]}{\text{Var}[g(T)]} \quad (7)$$

위 식에서 $E[\cdot]$ 와 $\text{Var}[\cdot]$ 은 각각 평균과 분산을 나타낸다. SIR_m 을 구하기 위한 자세한 유도 과정은 이전의 연구 결과[4]를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E[g(T)] &= E[S(T) + S_F(T) + N(T)] \\ &= E[S(T)] \\ &= A_o d_{m,0} T \end{aligned} \quad (8)$$

$$E[S^2(T)] \cong A_o^2 T^2 + \frac{A_o^2 T^2}{3N} (K-1) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E[S_F^2(T)] &= 2A_m^2 [K_1 + d_{m,0}(d_{m,-1} + d_{m,1})K_2] \\ &\quad + \frac{2A_m^2 T^2}{3N} (K-1) \end{aligned} \quad (10)$$

$$E[N^2(T)] = N_0 T \quad (11)$$

전력제어가 이상적으로 동작하는 시스템에 대해 각각 기지국에서의 수신신호의 성분 A_{ok} , A_k 가 일정하다고 가정하면 A_{ok} , A_k 는 A_o 와 A 와 같이 상수가 된다. 또한 N 은 확산 대역폭대 신호 대역폭의 비로 확산 처리 이득(Processing gain)이라고 정의한다[1]. 그리고 $d_{m,-1}$, $d_{m,0}$, $d_{m,1}$ 는 m 번째 사용자의 연속되는 3개의 데이터 비트값이고 최대 진폭이 데이터 심볼길이보다 작다고 가정한다. K_1 , K_2 는 PN부호의 자기 상관(autocorrelation) 특성에 따라 상수로 정할 수 있다[4]. 위 식(2)-(11)으로부터 m 번째 사용자의 평균 SIR을 구하면 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} SIR_m &\cong \frac{A_{om}^2 T^2}{\frac{A_o^2 T^2}{3N} (K-1) + 2A_m^2 [K_1 + d_{m,0}(d_{m,-1} \\ &\quad + d_{m,1})K_2] + \frac{2A_m^2 T^2}{3N} (K-1) + N_0 T} \end{aligned} \quad (12)$$

위 식에서 신호의 비트 에너지를 $E_b = A_{om}^2 T/2$, 수신 신호 중에서 산란 성분대 직진 성분의 전력비 γ 를 식 (13)와 같이 정의하고, 또한 수신 신호의 직진 성분간의 비는 전력제어가 완전하다면 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = A_m^2 / A_{om}^2 = A^2 / A_{om}^2 \quad (13)$$

$$A_o^2 / A_{om}^2 = 1 \quad (14)$$

식(12)에서 분모를 분자로 나누고 위의 정의들을 이용해 정리하면 K 명의 사용자가 존재하는 단일셀 시스템에서의 SIR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} SIR_m &\cong \left\{ \frac{(K-1)}{3N} + \frac{2\gamma}{T^2} [K_1 + d_{m,0}(d_{m,-1} + d_{m,1})K_2] \right. \\ &\quad \left. + \frac{2\gamma(K-1)}{3N} + \frac{N_0}{2E_b} \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (15)$$

가우스 근사를 사용하여 비트 오류 확률(bit error probability; BER)을 다음과 같이 구한다.

$$P_b = Q(\sqrt{SIR_m}) \quad (16)$$

위 식에서 $Q(\cdot)$ 은 가우스 적분 함수[4]이고 평균 BER은 세개의 데이터 비트 $d_{m,-1}$, $d_{m,0}$, $d_{m,1}$ 에 의존하는 조건 확률이 되므로, 이 세개의 비트에 대한 평균값으로서 평균 BER을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_b &= E[P(e|d_{m,-1}, d_{m,0}, d_{m,1})] \\ &= \frac{1}{8} \{ P(e|1, 1, 1) + P(e|1, 1, -1) + P(e|1, -1, 1) \\ &\quad + P(e|1, -1, -1) + P(e|-1, 1, 1) \\ &\quad + P(e|-1, 1, -1) + P(e|-1, -1, 1) \\ &\quad + P(e|-1, -1, -1) \} \end{aligned} \quad (17)$$

지금까지 구한 BER은 전력 제어가 이상적으로 조절되고 주위에 간섭이 없는 단일셀 시스템에서의 비트 오류 확률이 된다. 다음 절에서는 실제적인 셀룰라 시스템에서 발생하는 주위의 인접 셀로부터의 간섭을 모델링하고 또한 주위의 간섭 셀 수에 따른 간섭이 시스템 성능에 미치는 영향을 고려한다.

2.2 다중 셀 시스템의 간섭

앞 절의 단일셀 모델에서는 중심 셀 주위에 같은 대역을 사용하는 간섭셀이 없다고 가정하고 셀내 $K-1$ 명의 간섭 사용자에 의한 간섭만을 고려하여 SIR을 구하였다(식 (12), (15)).

그러나 실제적인 다중 셀(multi cell) 구조의 셀룰라 환경에서 각 기지국은 해당 셀내의 이동국에 의한 동일 채널 간섭 이외에 인접하는 셀내의 이동국에 의해서도 간섭을 받게 된다(그림 2).

이러한 다중 셀 환경에서는 인접 셀내의 사용자(X1, X2)는 각각의 해당 기지국에 의해 전력 제어를 받기 때문에 중심 셀의 기지국에 도달하는 간섭량은 중심 셀과의 거리, 자기 기지국과의 거리, 채널의 거리에 따른 전파 경로 손실 지수(propagation path loss ex-

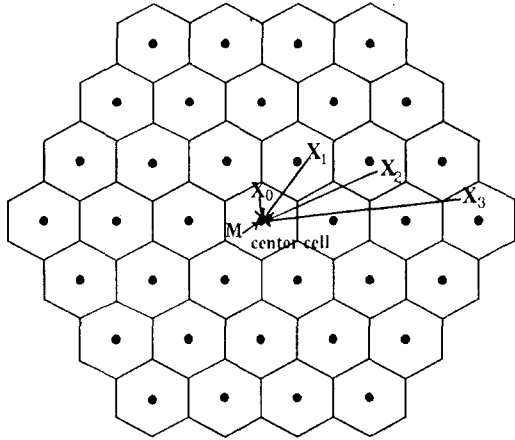


그림 2. 다중 셀 시스템
Fig. 2 Multi-tier cellular System.

ponent)가 값에 의존하게 된다.

이웃하는 셀로부터 중심셀로의 간섭량을 해석적으로 구하기 위해 기지국간 거리가 D 인 중심셀과 간섭셀을 고려한다(그림 3). 해석적 모델을 위해 그림 2의 육각형 셀과 같은 면적의 원형 셀을 가정한다.

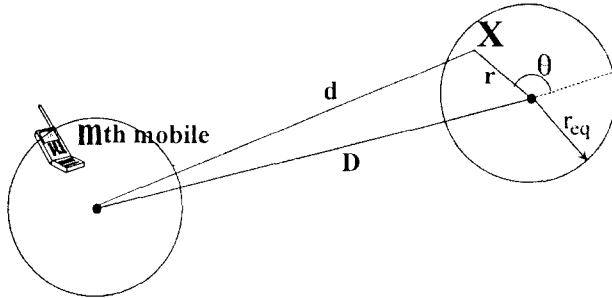


그림 3. 인접 셀 간섭 모델
Fig. 3 Interference from a neighboring cell.

위 그림에서 d 는 간섭 셀내 이동국(X)으로부터 중심셀 기지국까지의 거리이고, r 은 이동국 자신과 해당 기지국간 거리이며, D 는 중심 셀과 간섭 셀의 거리이다. 앞 절에서 구한 단일 셀 시스템의 SIR(식 (12))에 인접 셀로부터의 간섭을 성분을 포함 시켜 다중셀 시스템에서의 SIR을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SIR = \frac{S}{I_{single} + I_{multi} + I_{thermal}} \cong \frac{S}{I_{single} + I_{multi}} \quad (18)$$

위 식에서 $S, I_{single}, I_{multi}, I_{thermal}$ 은 각각 신호 성분, 단일 셀 시스템에서 중심 셀내 다른 사용자로부터의 간섭, 다중셀 시스템에서 인접 셀내 다른 사용자로부터의 간섭, 열잡음에 의한 간섭을 나타낸다. 또한 셀내 이용자수가 $K \gg 1$ 임을 가정하면, $S, I_{single} + I_{multi} \gg I_{thermal}$ 이 되고 열잡음에 의한 간섭 $I_{thermal}$ 을 무시할 수 있다.

다중 셀에서의 간섭 전력 대 단일 셀 간섭 전력비를 MSIR(multi cell to single cell interference ratio)를 정의하고 간섭 성분을 분석하면 다음 식과 같이 r, d 와 경로 손실 지수 α 만의 함수로 나타낼 수 있다[3, 4].

$$MSIR = \frac{I_{multi}}{I_{single}} = \left(\frac{r}{d}\right)^\alpha \quad (19)$$

중심셀과 간섭셀내 사용자의 분포가 면적에 대해 균일한 분포를 가진다고 가정하고 셀내 사용자의 위치를 극좌표 (r, θ) 두 개의 불규칙 변수로써 나타낸다. 셀 중심을 원중심으로 하는 원이 커질수록(r 이 커질수록) 반지름 r ($r < r_{eq}$)을 가지는 원 내의 사용자수는 더 많아짐을 의미한다. 즉, 반지름 r 내의 누적 사용자수는 면적(πr^2)이 커짐에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 누적 분포(cumulative distribution function)의 미분 값으로 주어지는 확률 분포(probability distribution function; PDF)는 r 에 대한 일차함수로 가정할 수 있다. 결과적으로 r, θ 의 확률 분포 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PDF(r) = c \cdot r, \quad 0 \leq r \leq r_{eq} \quad (20)$$

$$PDF(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (21)$$

위 식에서 상수 c 는 $\int_0^{r_{eq}} c \cdot r dr = 1$ 를 만족하는 상수이다. D 만큼 떨어진 셀내 이동국들에 대한 간섭을 고려하면 d 와 $MSIR(D)$ 은 다음과 같다.

$$MSIR(D) = \left(\frac{r}{d}\right)^\alpha = \left\{ \frac{r}{\sqrt{(D + r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta)^2}} \right\}^\alpha \quad (22)$$

위 식에서 α 는 신호 경로 손실의 값으로 보통 2~4

의 값을 가지고 D는 첫 번째 층(tier)에 속한 6개 셀에 대해서는 $2r_{eq}$, 두 번째 층 12개 셀에 대해서는 $4r_{eq}$ 가 된다. 식 (22)의 불규칙변수, r, θ 에 대한 기대값을 다음과 같이 구한다

$$\overline{MSIR}(D) = E(MSIR(D)) = \int_0^{r_m} \int_0^{2\pi} MSIR(D) \cdot PDF(\theta) \cdot PDF(r) d\theta dr \quad (23)$$

위 식에서 $E(\cdot)$ 은 기대값(Expectation of Random Variable) 연산자 이다. 중심셀을 둘러싸는 세 개의 층내의 모든 셀로부터 발생하는 간섭에 대한 총 $MSIR$, 즉 $MSIR_t$ 을 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$MSIR_t(3 tiers) = 6 \times \overline{MSIR}(2r_{eq}) + 12 \times \overline{MSIR}(4r_{eq}) + 18 \times \overline{MSIR}(6r_{eq}) \quad (24)$$

다음 표 1은 위 식 (23), (24)를 이용하여 다중 간섭 셀 환경에서의 $MSIR_t$ 를 구하였다.

표 1. 불규칙 변수 $MSIR_t$ 의 기대값
Table 1. Expectation values of $MSIR_t$

tiers\α	2	3	4
1 (6 cells)	1.10312	0.603473	0.37656
2 (12 cells)	1.57551	0.708228	0.40112
3 (18 cells)	1.88244	0.752038	0.40763
4 (24 cells)	2.11063	0.776172	0.41027

다중 셀 환경에서의 비트 오류 확률은 표 1을 이용하여 다음과 같이 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$P_b = Q(\sqrt{SIR}) = Q\left(\sqrt{\frac{S}{I_{single}(1 + MSIR_0)}}\right) \quad (25)$$

2.3 오류 정정 부호

이동 통신의 무선 채널과 같이 심한 페이딩 환경에서는 강력한 오류 정정 부호의 사용이 불가피하다. 본 연구에서는 부호율 1/3의 길쌈부호를 사용하였다. 길쌈 부호를 사용했을 때 부호화된 비트 오류 확률의 상한 값은 다음과 같이 주어진다[8, 9].

$$P_b(\text{coded}) \leq \sum_{d=d_{min}}^{\infty} B_d \cdot P_d \quad (26)$$

위 식에서 d_{free} 는 최소 자유 거리(minimum free distance), P_d 는 최초 오류 확률(the first event error probability), B_d 는 특정 코드에 의존하는 가중치 값[8, 9]을 나타낸다. 연판정 비터비 역부호화 알고리즘을 사용할 경우, 위 식에서의 최초 오류 확률 P_d 는 같이 다음 식[7]으로 근사된다.

$$P_d = D_0^d \quad (27)$$

위 식에서 $D_0 = 2\sqrt{P_b(1-P_b)}$ 이다. 또한 $P_b = e^{-R \cdot SIR}$ 이 되고 R 은 부호율이고 SIR 은 식(24)와 같다. 본 연구에서는 $R=1/3$ 와 제약 길이는 8, 부호 발생기의 형태는 (367, 331, 225)_{octal}가 사용되었다고 가정한다.

III. 전력 제어 불완전성 모델

DS/CDMA 셀룰라 시스템에서는 원근 효과(near-far effect)에 대처하기 위해 여러 이동국들의 송신 전력이 수신단에서 거리에 관계없이 일정한 전력으로 수신되게 하기 위해서 송신 신호의 전력을 조절하는 전력 제어(power control)를 수행한다. 전력 제어는 크게 개방 루프(open loop) 전력 제어와 폐쇄 루프(closed loop) 전력 제어로 구분하는데, 본 연구에서는 상향 링크에 대한 전력 제어로서 개방 루프 전력 제어를 가정한다. 개방 루프 전력 제어는 이동국이 독자적으로 기지국으로부터 수신되는 신호 전력을 추정하고, 추정된 값으로부터 역으로 송신전력을 추출하는 전력제어 방식이다[10]. 즉, 이동국의 위치가 기지국과 가까우면 기지국 신호의 경로손실이 작으므로 이동국 신호의 수신 전력의 세기는 크게 될 것이다. 따라서 이동국의 전력을 작게 송신해야만 기지국에 최소 요구 전력으로 도달할 것이다. 전력제어가 완벽히 수행되었다는 것의 수식적 의미는 앞 절에서 유도된 평균 SIR 에서 $\{A_{ok}\}, \{A_k\}$ 가 상수 값을 가진다는 것을 말한다.

전력 제어 시스템의 성능은 전력 제어 알고리즘, 적응 제어의 속도, 송신기의 출력 범위, 가입자 분포, 그늘 현상(shadowing effect), 다중경로 페이딩등 여러 요인에 영향을 받게 된다. 이러한 상호 독립적이면서 다양한 요인들이 수신 신호의 확률 분포와 시스템 성능에 영향(열화)을 가져오게 된다. 본 연구에서는 이

러한 전력 제어 오류를 모델링하기 위해 각 사용자의 수신 신호의 전력 크기 $\{A_{ok}\}, \{A_k\}$ 를 평균으로 하고 전력 제어 오류의 표준 편차(standard deviation) σ_{PCE} 를 가지는 가우시안 불규칙 변수(Gaussian random variable)로써 사용하였다. 전력 제어 오류 모델로서 가우시안 불규칙 변수를 가정한 근거를 다음과 같이 정리하였다.

1. 수신 신호의 전력 제어 불완전성은 시스템의 상호 독립적이면서 무수히 많은 요인에 의해 발생한다(central limit theorem)[11].
2. 해석적 수식을 유도하는데 적합하다.
3. 실제 수신 신호 전력의 분포와도 일치한다[12].

먼저 동일 셀내의 이동국에 의한 신호중 가시선 성분 $\{A_{oi}\}$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$A_{om} = A_{om} \quad (28)$$

$$A_{oi} = \lambda_i \cdot A_o, \quad i=1, \dots, m-1, m+1, \dots, K \quad (29)$$

여기서 충분히 많은 사용자를 가정하고 해석의 편의를 위해 고려되는 m번째 사용자의 가시성분, 식(28)과 같이 전력제어 오류가 없다고 가정한다. 또한 $\lambda_i = 10^{\xi_i/10}$ 이고 ξ_i 는 평균 v 과 표준 편차 σ_{PCE} 를 가지는 가우시안 불규칙 변수이고 A_o 는 이동국 신호가 기지국에서 수신되었을 때의 최소 요구 전력이다. 위 식에서 λ_i 의 1, 2차 모멘트는 다음과 같이 유도할 수 있다[12].

$$E(\lambda_i) = E(10^{\xi_i/10}) = \exp\{(\beta\sigma_{PCE})^2/2\} \cdot \exp(\beta v) \quad (30)$$

$$E(\lambda_i^2) = \exp\{2(\beta\sigma_{PCE})^2\} \cdot \exp(2\beta v) \quad (31)$$

위 식에서 $\beta = \ln 10/10$ 이다. 동일 셀내의 이동국에 의한 신호중 산란 성분 $\{A_k\}$ 또한 위와 같은 방법으로 정해진다. 다음 표 2는 전력 제어 오류에 따른 간섭량의 증가를 나타낸다.

표 2. 전력 제어 오류에 따른 간섭량의 증가
Table 2. Interference level due to the power control error

σ_{PCE}	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB
$E(\lambda_i^2)$	1.112	1.528	2.58	5.4

예를 들면, $\sigma_{PCE} = 2$ dB에서 약 52%의 간섭량의 증가를 나타낸다. 표 1과 표 2를 이용하여 불완전한 전력 제어 시스템에서의 다중 셀 SIR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SIR = \frac{S}{E(\lambda_i^2) \cdot I_{single} \cdot (1 + MSIR_i)} \quad (31)$$

위 식을 수치 해석하여 불완전한 전력 제어가 시스템 사용자 용량에 미치는 영향을 다음 장에서 분석한다.

IV. 수치 해석 결과

앞장에서 언급된 DS/CDMA 시스템, 즉, 주파수 선택적 라이시안 페이딩 채널상에서 동작하는 DS/CDMA 셀룰라 시스템에 제안된 전력 제어 여러 모델을 사용하여 시스템 용량을 분석하였다.

시스템 파라미터로는 확산 신호 대역폭대 데이터 신호 대역폭으로 정의되는 확산 처리 이득(processing gain)을 현재의 1.25MHz DS/CDMA 시스템을 고려 하여(데이터율 9.6kbps) 130을 사용하고, 음성 활성도(voice activity)는 보통 0.35~0.4 정도로 알려져 있지만[7] 본 논문에서는 이동 통신 환경의 취약성을 고려 하여 0.5로 하였다.

그림 4는 고려되는 다중셀 수의 영향을 셀당 사용자 수 K의 증가에 따른 BER로 나타내었다(K-BER 곡선). 요구되는 음성 품질을 오류 정정 후 10^{-3} 으로 가정하면 단일셀 시스템과 첫 번째 층(6개 셀), 두 번째 층(12개 셀), 세 번째 층(18개 셀)까지 고려한 다중셀 환경에서의 사용자 용량은 270, 186, 180, 180임을 알 수 있다. 두 번째 층과 세 번째 층의 곡선이 거의 일치하여 세 번째 층 이상의 셀로부터의 간섭은 거의 시스템 성능에 영향을 못 미치는을 알 수 있다.

Milstein[3]의 플랫폼 레일리 채널(처음 세 번째 층의 셀로부터의 간섭을 고려)의 K-BER 곡선은 주파수 선택적 라이시안 모델의 단일셀 성능과 비슷하게 나타났다. 이는 간섭 신호의 산란 성분만 수신단에 도달하는 레일리 채널에 비해 간섭 성분의 직진 성분까지 도달하는 라이시안 채널상의 간섭량이 더 많기 때문이다. RAKE 수신기[9]를 사용하여 가시 성분과 산란 성분의 다이버시티 복조를 함으로써 성능 향상을 기대할 수 있다.

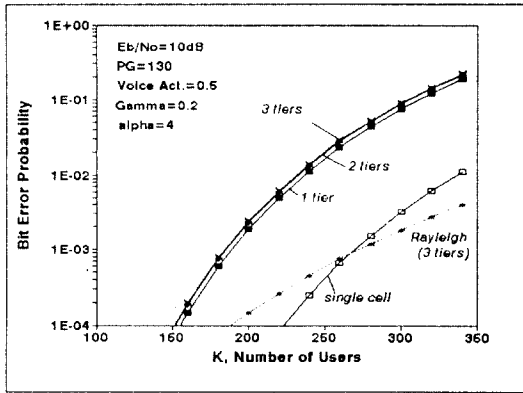
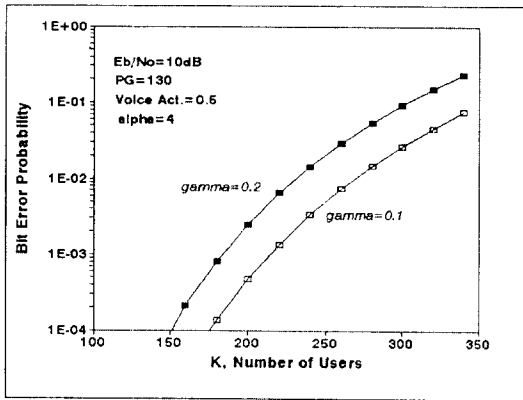
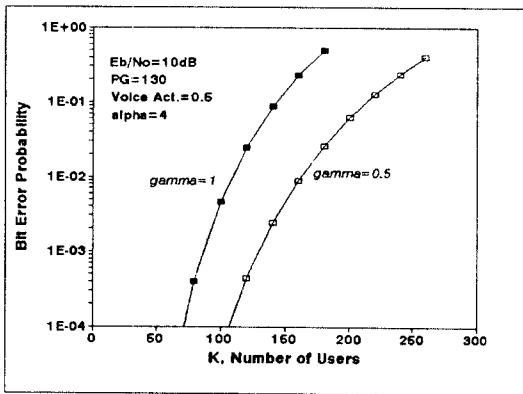


그림 4. 간섭 셀층 수에 따른 K-BER 곡선
Fig. 4 K-BER plots for the interfering cell tiers.



(a) $\gamma=0.1, 0.2$



(b) $\gamma=0.5, 1$

그림 5. 산란 성분대 가시 성분 전력비 γ 값에 따른 K-BER 곡선
Fig. 5 K-BER plots for the scattering component to specular component power ratio γ .

그림 5는 산란 성분대 직진 성분비 γ 에 따른 K-BER 곡선이다. 산란 성분비가 클수록 간섭량이 증가하므로 시스템 용량이 감소하게 된다. 그림 6은 채널의 경로 손실 지수 α 에 따른 K-BER 곡선으로 $\alpha=2, 3, 4, 5$ 에 대해 기준 음성 품질을 만족시키면서 통화할 수 있는 최대 사용자수는 각각 70, 140, 180, 210으로 경로 손실 지수 값에 매우 민감함을 알 수 있다. 그림 7은 길쌈 부호화/연관정 비터비 역부호화 오류 정정기법을 사용하지 않았을 경우의 성능을 비교하였다. 그림에서와 같이 기준 음성 품질을 만족시키기 위해서는 오류 정정 부호의 사용이 불가피함을 알 수 있다.

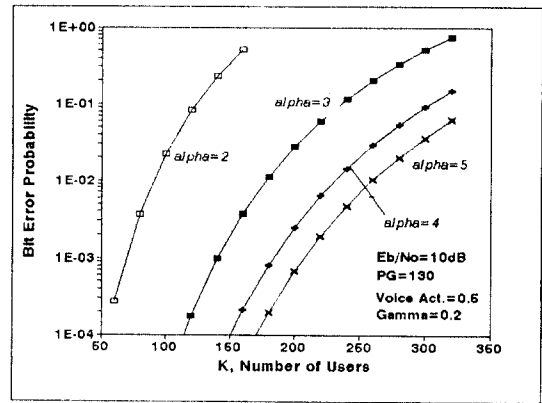


그림 6. 전파 경로 손실 지수 α 값에 따른 K-BER 곡선
Fig. 6 K-BER plots for the pathloss exponents α .

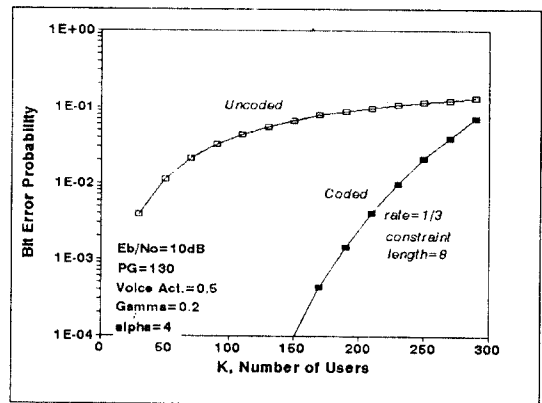
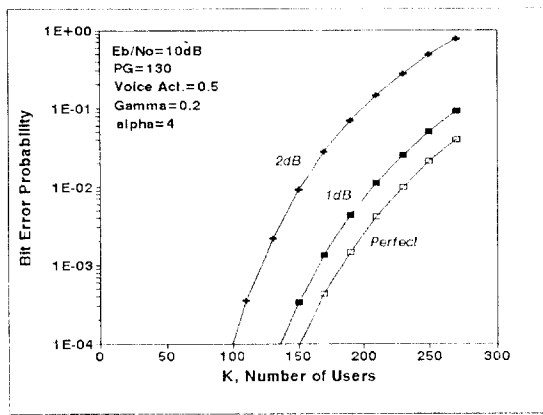
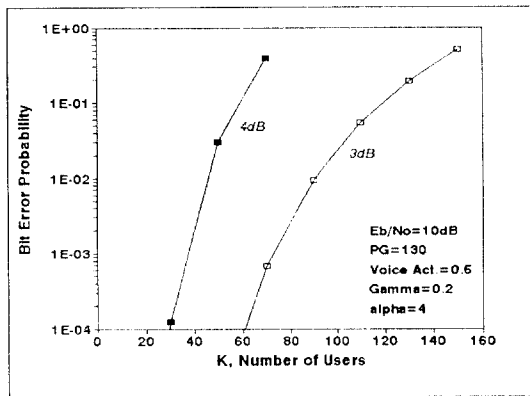


그림 7. 오류 정정 부호 사용에 따른 K-BER 곡선
Fig. 7 K-BER relation when the forward error correction is used.

그림 8은 전력 제어 오류에 따른 시스템 용량을 보여 주기 위해 전력 제어가 이상적인 시스템과 전력 제어 오류를 가지는 시스템에서 표준 편차 $\sigma_{PCE} = 1, 2, 3, 4$ dB에 대한 K-BER 곡선을 나타내었다. 전력 제어가 이상적인 시스템의 최대 용량이 180명이지만, 전력 제어 오류가 1, 2, 3, 4 dB인 시스템에서는 용량이 각각 165, 120, 75, 38명으로 전력 제어 성능에 매우 민감함을 알 수 있다. 이 결과를 전력 제어가 완벽한 경우의 용량에 대한 상대적 감소를 나타내면 그림 9와 같다. 그림에서와 같이 DS/CDMA이 전력 제어가 불안정해 2dB 정도의 오류가 발생하게 되면 시스템 사용자 용량은 약 60% 정도로 감소하게 된다.



(a) Perfect case, $\sigma_{PCE} = 1, 2$



(b) $\sigma_{PCE} = 3, 4$.

그림 8. 전력 제어 오류 σ_{PCE} 에 따른 K-BER 곡선
Fig. 8 K-BER plots for the power control error σ_{PCE} .

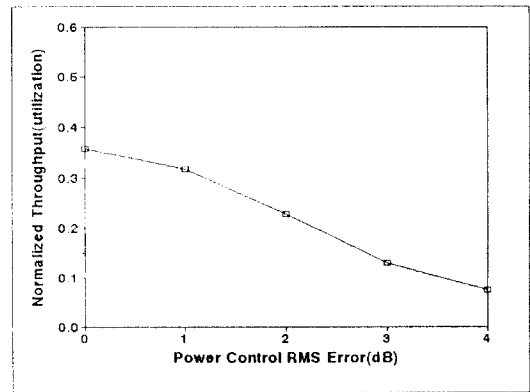


그림 9. 전력 제어 오류와 최대 사용자 용량과의 관계
Fig. 9 Relationship between the maximum capacity and power control error.

V. 결 론

본 논문에서는 마이크로 셀룰라 시스템에서 동작하는 DS/CDMA 시스템의 성능을 최대 사용자 용량의 관점에서 분석하였다. 실제 시스템에서 불가피하게 발생하는 불완전한 전력 제어 현상을 모델링하여 전력 제어 오류가 시스템 성능 파라미터에 미치는 영향을 연구하였다.

논문에서 얻어지는 결과를 통해 마이크로 셀룰라 시스템에서 DS/CDMA의 시스템 용량은 전력 제어 오류에 매우 민감하고 약 2.5 dB이하로 오류가 조절되지 않는다면 완전한 전력 제어 시스템 성능의 50% 이하가 저하된다.

본 연구 결과는 도심 지역에서 DS/CDMA 시스템 설계자들에게 전력 제어의 구현에 따른 비용과 요구되는 시스템 용량에 대한 트레이드-오프(trade-off)의 참고 자료로 사용될 수 있다.

향후 연구 과제로는 DS/CDMA 시스템에서 간섭을 줄이기 위해 사용되는 방향성 안테나의 불안정성과 강로 다이버시티를 이용하는 RAKE 수신기가 성능에 미치는 영향을 분석하여 보다 정확한 성능을 예측할 수 있는 분석이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Raymond L. Pickholtz et al, "Theory of Spread-

Spectrum Communications-A Tutorial," *IEEE Trans. Comm.*, vol. COM-30, NO. pp. 855~883. 5, May 1982.

2. Klein S. Gilhousen et al, "On the Capacity of a Cellular CDMA System," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, VOL., 40, NO. 2, pp. 303~312, May 1991.
3. Laurence B. Milstein et al, "Performance Evaluation for Cellular CDMA," *IEEE J. Select. Area. Comm.*, vol. 10 no. 4., pp. 680~689, May 1992.
4. Kyung Sup Kwak and Gyoo Guen Kim, "Performance Evaluation for Cellular DS/CDMA System over Frequency-Selective Fading Channel," *IEICE Trans. on Fundamentals*, vol. E78-A, No. 7, pp. 785~794, July 1995.
5. Jun Chul Kim and Kyung Sup Kwak, "Capacity of Imperfectly Power-controlled DS/CDMA System over Frequency-selective Rician Fading Channel," *Proc. JTC-CSCC'95*, Kumamoto, Japan, July 18-20, pp. 293~296, 1995.
6. Laurence B. Milstein et al, "Performance of a Spread Spectrum Communication System Operating Over a Frequency-Selective Fading Channel in the Presence of Tone Interference," *IEEE Trans. Comm.*, VOL., COM-30, NO. 1, pp. 240~247, Jan. 1982.
7. William C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*, 2nd Edition, Wiley, 1993.
8. Rodger E. Ziemer and Roger L. Peterson, *Digital Communication and Spread Spectrum Systems*, MacMillan, 1985.
9. J. G. Proakis, *Digital Communications*, Chapter 5, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1989.
10. TIA/EIA/IS-95, *Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System*, Telecommunication Industry Association, July 1993.
11. Alberto Leon-Garcia, *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1994.
12. Audrey M. Viterbi and Andrew J. Viterbi, "Erlang Capacity of a Power Controlled CDMA

System," *IEEE J. Select. Area. Comm.*, vol. 11, No. 6, pp. 892~900, Aug. 1993.

13. Michel G. Jansen and Ramjee Prasad, "Capacity, Throughput and Delay Analysis of a Cellular DS CDMA System With Imperfect Power Control and Imperfect Sectorization", *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, VOL., 44, NO. 1, pp. 67~75, Feb. 1995.
14. Paul Newson and Mark R. Heath, "The Capacity of a Spread Spectrum CDMA System for Cellular Mobile Radio with Consideration of System Imperfections", *IEEE J. Select. Area. Comm.*, vol. 12, No. 4, pp. 673~684, May. 1994.



김 준 철(Jun Chul Kim) 정회원
 1971년 5월 30일생
 1994년 2월: 인하대학교 공과대학
 전자공학과 졸업
 1996년 2월: 인하대학교 대학원 전
 자공학과 졸업
 1996년 2월~현재: 한국통신 연구
 개발본부 무선통신

연구소 전임연구원

※주관심분야: 무선망설계, CDMA Network, 전파전
 파모델, WLL 등



박 진 수(Jin Soo Park) 정회원
 1967년 9월 28일생
 1990년 2월: 경북대학교 공과대학
 전자공학과 졸업
 1992년 2월: 경북대학교 대학원 전
 자공학과 졸업
 1992년 3월~현재: 한국통신 연구
 개발본부 근무 전임

연구원

※주관심분야: 무선망설계, 전파전파모델, WLL 등



곽 경 섭(Kyung-Sup Kwak) 정회원

1977년: 인하대학교 전기공학(학사)

1981년: Univ. of So. California 대학원, EE(석사)

1988년: Univ. of California 대학원, 통신이론 및 시스템(박사)

1983년~1988년: Univ. of California, San Diego, 연구조교

1988년~1989년: 미국 Hughes Network Systems, 연구원

1989년~1990년: 미국 IBM, Network Analysis Center, 연구원

1990년 3월~현재: 인하대학교 전자공학과, 부교수

1995년~현재: 한국통신학회, 상임이사

※주관심분야: 위성 및 이동통신, 데이터 통신 네트워크, 무선 ATM 접속기술 등.