

전파음영과 불완전 전력제어를 고려한 DS/CDMA 계층 셀룰라 시스템의 성능 분석

Performance Analysis of DS/CDMA Hierarchical Cellular System on Shadowing and Imperfect Power Control

윤 석 재 · 김 항 래 · 김 남

Seok-Jae Youn · Hang-Rae Kim · Nam Kim

요 약

본 논문에서는 역방향 링크상의 전파 음영 채널에서 불완전 전력제어 및 불완전 섹터화를 고려하여 DS/CDMA 계층 셀룰라 시스템의 용량을 분석한다. 실제 시스템에서는 이론과는 달리 완전한 전력제어가 되지 않기 때문에 불완전 전력제어, 불완전 섹터화 및 처리이득, 매크로셀의 사용자 수와 같은 파라미터를 고려하여 시스템의 용량 변화를 유도하였다. 해석한 결과, 전력제어 및 섹터화가 불완전 할수록, 매크로셀과 마이크로셀의 전력비가 커질수록, 처리이득이 작을수록, 마이크로셀의 사용자 수가 감소할수록 DS/CDMA 계층 셀룰라 시스템의 용량은 감소하였다. 또한, 계층셀 구조가 단일 매크로셀 구조에 비해 1.54배에서 3.89배로 사용자 용량을 증가시킬 수 있음을 보였다.

Abstract

In this paper, the capacity for the reverse link of the imperfect power controlled DS/CDMA hierarchical cellular system is analyzed considering imperfect sectorization in shadowing environment. Unlike the theoretical assumption, the power control of the DS/CDMA hierarchical cellular system is not perfect. Therefore, we consider various parameters such as the imperfect power control, the imperfect sectorization, the processing gain and the number of microcell interferers, which cause the capacity variation of the DS/CDMA hierarchical cellular system. It is shown that the capacity of DS/CDMA hierarchical cellular system is decreased according to the increase of the deviation of the imperfect power control, the overlapped angle, the power ratio between macrocell and microcell and to the decrease of processing gain, the number of microcell interfering users. Also, it is observed that the hierarchical cellular system can increase the user capacity from 1.54 to 3.89 times compared to the homogeneous macro-cellular system.

Key words : hierarchical cellular, power control, shadowing.

I. 서 론

최근 무선통신의 급속한 발전으로 이동통신 가입자가 현저하게 증가하고 있으며, 이를 수용할 수 있

는 DS/CDMA(Direct Sequence/Code Division Multiple Access) 통신 방식이 많은 주목을 받고 있다. DS/CDMA 통신 방식은 대용량, 고품질의 서비스, 통화 비밀 보호 등의 여러 장점으로 인해 개인 휴대

충북대학교 정보통신공학과(Department of Computer and Communication Engineering, Chungbuk National University)

컴퓨터정보통신 연구소

· 논문 번호 : 20010420-058

· 수정완료일자 : 2001년 11월 19일

통신(PCS; Personal Communication Service), WLL (Wireless Local Loop)과 WLAN(Wireless Local Area Network) 분야에서 활발히 연구 및 응용되고 있으며, IMT-2000(International Mobile Telecommunications-2000)에서도 응용될 것으로 예상된다.

현재 이동통신 사업자는 DS/CDMA 통신 방식을 이용한 매크로셀(macrocell) 구조로 서비스를 하고 있는 실정이며, 이러한 매크로셀 구조는 급격하게 증가하고 있는 사용자와 현재의 음성위주 서비스를 벗어난 고속 데이터 서비스 또는 멀티미디어 서비스를 수용하는 데는 한계가 있다. 따라서 국내에서 서비스중인 CDMA 셀룰라 이동통신 시스템은 급격하게 증가하는 사용자들을 수용하고 다양한 서비스를 하기 위해서 계층 셀 구조를 채택할 것으로 예상된다. 계층 셀은 크기에 따라 피코셀(picocell), 마이크로셀(microcell), 매크로셀과 위성에 의해 서비스되는 메가셀(megacell)로 구성된다. 또한, 차세대 이동통신 시스템인 IMT-2000 시스템에서도 계층 셀 구조를 채택하고 있다^[1]. 그러나 CDMA 통신 방식을 기본으로 하는 계층 셀 구조에 대한 연구가 충분하게 이루어지지 않고 있으며, 대부분의 연구는 매크로셀만으로 이루어진 시스템에 대하여 연구 결과를 제시하고 있다^{[2]-[5]}. 계층 셀 구조에 대한 연구 결과 중에서, [6]에서는 각 계층에 서로 다른 다중 접속 방식을 적용하여 셀 용량을 분석하고 있으며, [7]에서는 각 계층에서 주파수를 공유하는 CDMA 방식을 적용했을 때와 각 계층에 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식과 CDMA 방식을 혼합 적용했을 때, 계층간의 용량을 비교 분석하였으나 정확한 용량에 대한 언급이 없다.

계층 셀 구조에 CDMA 통신 방식을 적용하는 경우, 각 계층에서 주파수를 공유하는 방식과 분할 사

용 방식, 중간 형태인 부분 공유 방식이 있다. 또한, 처음부터 서비스 영역 전체를 완전한 계층 셀 구조로 서비스하기보다는 기존의 매크로셀에 마이크로셀 또는 피코셀이 부분적으로 추가될 것으로 예상된다. 따라서 기존의 CDMA 시스템과 호환성 측면을 고려할 때 가장 적합한 주파수 공유 방식을 사용하여 역방향 링크상에서 매크로셀내 하나의 마이크로셀이 중첩된 계층 셀 CDMA 시스템의 간섭 및 블로킹 확률(blocking probability)을 유도하여 용량을 분석하였다. II장에서는 DS/CDMA 계층 셀룰라 시스템의 분석 모델을 제시하고, III장에서는 간섭량 계산 및 간섭 보정 계수를 구하기 위해 기하학적인 방법을 설명하고 수식을 유도한다. IV장에서는 유도한 블로킹 확률을 이용하여 전력제어 오차(power control error), 마이크로셀의 사용자수, 중첩각(overlap angle), 매크로셀과 마이크로셀의 수신 전력비, 처리이득(PG; processing gain)과 블로킹 확률과의 관계를 알아본다. 마지막으로 V장에서는 결론과 향후 과제들에 대하여 기술한다.

II. 시스템 분석 모델

그림 2는 본 논문에서 고려한 셀 구조로 육각형(hexagon)의 매크로셀내에 원형(circle)의 마이크로셀을 중첩시켰다. 이동국의 분포는 균일 분포를 가정하였으며, 매크로셀 및 마이크로셀의 기지국은 셀 중앙의 동일한 위치에 있다고 가정하였다. CDMA 시스템의 트래픽 용량과 관련된 기본적 사항들은 섹터화(sectorization), 전력제어, 음성활동률(voice activity monitoring), 안테나 패턴 및 소프트/소프트 핸드오버(soft/softer handover) 등이 있으며^[8] 본 논문에서는 섹터화, 전력제어, 음성활동률을 고려하였다.

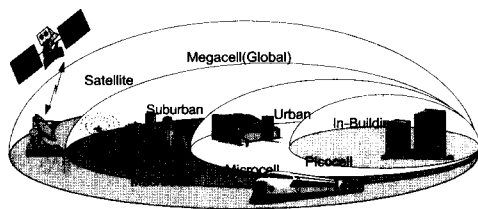


그림 1. 계층 셀 구조
Fig. 1. Hierarchical cellular structure.

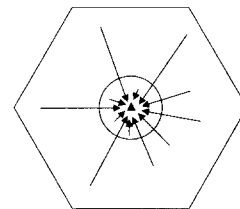


그림 2. 매크로셀내 마이크로셀이 중첩된 셀 구조
Fig. 2. An overlaid macrocell/microcell structure.

2-1 섹터화

기지국에서 수신되는 다중 사용자들의 간섭전력은 지향성 안테나(directional antenna)를 사용함으로써 감소시킬 수 있는데 일반적으로 CDMA 셀룰라 시스템에서는 3섹터화를 사용하기 위해 안테나의 지향성을 120°로 맞추지만, 안테나의 부엽(side lobe) 특성으로 인해 인접 섹터로부터 간섭을 받게 된다. ν 가 안테나의 부엽으로 인한 섹터의 증첩각, S 가 섹터 수라면 섹터화된 시스템의 간섭 전력과 섹터화하지 않은 간섭 전력비를 섹터화 계수로 다음과 같이 나타낼 수 있다^[3].

$$F_s \equiv \frac{P_{\text{sectorized}}}{P_{\text{non-sectorized}}} = \left(\frac{1}{S} + \frac{2\nu}{360} \right) \quad (1)$$

여기서, S 가 3이고 ν 가 0이면 완전한 3섹터화를 나타낸다.

2-2 전력제어

CDMA 시스템 용량 분석에 있어 대부분의 경우 완벽한 전력제어를 가정하고 있지만, 실제 무선 환경에서는 주위 환경에 따라 무선채널이 빠르고 다양하게 변화하기 때문에 개방루프 전력제어(open loop power control) 또는 폐쇄루프 전력제어(closed loop power control)를 하여도 완벽하게 전력제어하는 것은 불가능하다. 전력제어 시스템의 성능은 전력제어 알고리즘, 송신기의 동작영역(dynamic range), 이동국의 분포특성, 페이딩과 전파음영과 같은 전파특성에 따라 달라진다. 이러한 요소들은 기지국에서 수신되는 전력의 확률 밀도 함수(probability density function)에 영향을 주게 된다. 기지국의 전력제어를 받은 이동국의 송신전력은 다음과 같은 대수 정규분포(log normal distribution)로 기지국에 수신된다.

$$f(P_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma P_r}} e^{-\frac{(\ln(P_r) - m)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

여기서 σ 는 정규분포 함수의 표준편차이며, 완전 전력제어를 가정할 경우 σ 는 0 dB가 된다. 하지만

실제 수신전력의 표준편차를 측정된 결과 1~2 dB의 값을 갖는다^[3].

2-3 전파 모델

무선 통신 환경에서 전파 손실(propagation loss)은 경로 손실(path loss)과 전파음영(shadowing) 현상으로 인한 장구간 페이딩(long-term fading)과 다중 경로(multipath)로 인한 단구간 페이딩(short-term fading)으로 구성된다. 일반적으로 도심 환경에서 경로 손실은 기지국에 수신되는 신호 전력이 거리의 네제곱에 반비례하고, 전파음영은 산, 언덕과 같은 자연 장애물 또는 빌딩과 같은 인공 장애물에 의해 전파가 전파할 때 기지국에 수신된 신호 전력의 분포는 대수 정규분포를 갖는다.

평균 경로 손실에 대해서는 이중감쇠(double regression) 모델을 사용하며 분기점(break point)을 기준으로 경로 손실 계수가 다른 두 개의 영역으로 분리한다. 분기점은 기지국 안테나 높이와 이동국 안테나 높이, 파장(wavelength)에 의해 결정되며, 다음과 같이 분기점에 따른 경로 손실을 나타낼 수 있다^{[6],[9]}.

$$P_L(r) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 r^{-\beta} 10^{\zeta/10}, & r \leq BP \\ (h_{bs} h_{ms})^2 r^{-\beta} 10^{\zeta/10}, & r > BP \end{cases} \quad (3)$$

$$BP = 4\pi h_{bs} h_{ms} / \lambda \quad (4)$$

λ : 파장(3×10^8 /carrier frequency)

r : 기지국과 이동국 사이의 거리

h_{bs} : 기지국 안테나 높이

h_{ms} : 이동국 안테나 높이

β : 경로 손실 지수

ζ : 전파음영에 의한 dB 손실

BP : 분기점

식 (4)에서 $h = h_{bs} - h_{ms}$ 일 때 분기점의 지상거리는 $\sqrt{(BP)^2 - h^2}$ 로 나타낼 수 있으며, 경로 손실은 분기점을 기준으로 분기점내 영역은 거리의 제곱에 반비례하고, 분기점 이후 영역은 거리의 네제곱에 반비례한다. 일반적으로 $\beta = 2$ 와 $\beta = 4$ 가 적용된다.

III. 계층 셀 구조의 간섭과 간섭 보정 계수

CDMA 셀룰라 시스템에서 기지국은 자신의 셀(home cell)에 속해 있는 이동국과 외부 셀(other cell)에 속해 있는 이동국으로부터 간섭을 받게 된다. 이러한 간섭을 구할 때, 계산의 편리를 위해 육각형 구조를 여러 방법으로 근사화하여 계산하지만, 본 논문에서는 매크로셀을 매크로셀과 동일한 면적을 갖는 반지름이 R_m 인 원으로 근사화하여 계산한다^[10].

단일 매크로셀 구조의 CDMA 셀룰라 시스템과는 달리 계층 셀 구조의 CDMA 셀룰라 시스템에서는 동일 셀 간섭(intracell interference) 및 외부 셀 간섭(intercell interference)을 구하기 위해서 동종 셀 간섭(homogeneous cell interference or intra-tier interference)과 이종 셀 간섭(heterogeneous cell interference or cross-tier interference)으로 구분하여 구하여야 한다.

3-1 동일 셀 간섭

동일 셀내에 매크로셀 이동국 N_m 개와 마이크로셀 이동국 N_μ 개가 동시에 통화하고 있다고 가정하면, 매크로셀의 $N_m + 1$ 번째 이동국을 기준으로 볼 때 N_m 개의 매크로셀 간섭 이동국과 N_μ 개의 마이크로셀 간섭 이동국이 있으며, 완전 전력제어를 가정할 경우 매크로셀내 N_m 개의 이동국과 마이크로셀내 N_μ 개의 이동국으로부터의 다중 접속 간섭전력 P_{intra}^m 은 다음과 같이 각각의 간섭전력 합으로 나타낼 수 있다.

$$P_{intra}^m = \sum_{m=1}^{N_m} P_m + \sum_{\mu=1}^{N_\mu} \delta P_\mu \quad (5)$$

여기서 P_m 은 매크로셀의 m 번째 이동국의 수신 전력, P_μ 는 마이크로셀의 μ 번째 이동국의 수신 전력을 나타내며 δ 는 매크로셀과 마이크로셀의 기지국 안테나 높이에 대한 제곱비로 안테나 이득을 1로 가정하였을 때, $\delta = (h_{bs}^m/h_{bs}^\mu)^2$ 이 된다^[11]. 그리고 매크로셀과 마이크로셀내의 이동국들이 독립적으로 전력 제어된다고 가정하면, 매크로셀내 N_m 개의 이

동국과 마이크로셀내 N_μ 개의 이동국으로부터 수신한 수신전력의 확률 밀도 함수는 각각 대수 정규분포를 갖게 된다. 만약, 수신 전력의 표준편차가 4 dB 이내일 경우 Fenton이 제시한 방법으로 계산할 수 있다. Fenton이 계산한 결과를 이용하면, 매크로셀내 N_m 개의 이동국과 마이크로셀내 N_μ 개의 이동국으로부터 수신된 간섭전력에 대한 확률 밀도 함수의 평균과 분산을 각각 m_m 과 σ_m , m_μ 와 σ_μ 라 하면, 기준 매크로셀 기지국에 수신되는 간섭 전력분포의 분산과 평균값은 다음과 같다^[12].

$$(\sigma_{tot}^m)^2 = \ln \left[1 - \frac{\sum_{m=1}^{N_m} e^{2m_m + \sigma_m^2} (1 - e^{-\sigma_m^2})}{\left\{ \sum_{m=1}^{N_m} e^{m_m + \sigma_m^2/2} + \sum_{\mu=1}^{N_\mu} e^{m_\mu + \ln(\delta) + \sigma_\mu^2/2} \right\}^2} + \frac{\sum_{\mu=1}^{N_\mu} e^{2m_\mu + \ln(\delta) + \sigma_\mu^2} (1 - e^{-\sigma_\mu^2})}{\left\{ \sum_{m=1}^{N_m} e^{m_m + \sigma_m^2/2} + \sum_{\mu=1}^{N_\mu} e^{m_\mu + \ln(\delta) + \sigma_\mu^2/2} \right\}^2} \right] \quad (6)$$

$$m_{tot}^m = \ln \left[\sum_{m=1}^{N_m} e^{m_m + \sigma_m^2/2 - (\sigma_m^m)^2} + \sum_{\mu=1}^{N_\mu} e^{m_\mu + \ln(\delta) + \sigma_\mu^2/2 - (\sigma_\mu^m)^2} \right] \quad (7)$$

완전 전력제어를 가정할 경우 σ_m , σ_μ 와 σ_{tot}^m 은 0 dB가 되며, 기준 매크로셀에 대한 동일셀 간섭전력에 대한 평균은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E[P_{intra}^m] = N_m E[P_m] + \delta N_\mu E[P_\mu] \quad (8)$$

여기서 $E[P_m]$ 과 $E[P_\mu]$ 는 P_m 과 P_μ 의 평균전력으로 e^{m_m} 과 e^{m_μ} 이다.

3-2 외부 셀 간섭

외부 셀 간섭은 동종 셀 간섭인 매크로셀에서 매크로셀로 주는 간섭 I_{mm} (macrocell to macrocell), 마이크로셀에서 마이크로셀로 주는 간섭 $I_{\mu\mu}$ (microcell to microcell)와 이종 셀 간섭인 매크로셀에서 마이크로셀로 주는 간섭 $I_{m\mu}$ (macrocell to microcell), 마이크로셀에서 매크로셀로 주는 간섭 $I_{\mu m}$ (microcell to macrocell)로 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 매크로셀을 기준으로 하여 성능 분석을 하기 때문에 I_{mm}

과 $I_{\mu m}$ 만을 고려할 것이다. 또한, 외부 셀의 기지국 으로부터 r_m 만큼 떨어져 있고 기준셀의 기지국과의 거리가 r_0 인 이동국으로부터 받는 간섭을 구하는 식 은 [2]의 방법으로 다음과 같이 일반화시킬 수 있다.

$$I_m = P(r_0)P(r_m)^{-1}E[P_m] \quad (9)$$

3-2-1 동종 셀 간섭

동종 셀 간섭인 매크로셀에서 매크로셀로 주는 간섭 I_{mm} 은 그림 3과 같이 도시할 수 있다. 그림 3에 서 보는 바와 같이 외부의 매크로셀에 있는 이동국 으로부터 수신된 간섭을 모델링한 것으로, 기지국간 거리가 D_{BS} 인 셀에 있는 이동국들로부터 기준 셀의 기지국에 수신되는 간섭 전력을 나타낸다.

외부 셀의 이동국으로부터 기준 셀의 기지국에 수신되는 $I_{mm}(r_0, r_m)/P_m$ 의 평균을 구하기 위해 이동 국이 분기점내(M1)에 있을 경우, 식 (3)을 적용하여 $I_{mm}(r_0, r_m)/P_m$ 의 평균을 구하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{E[I_{mm}]}{E[P_m]} \right]_{M1} \\ &= \int_0^{BP} \int_0^{2\pi} a \left(\frac{h_{bs}^m h_{ms}}{\lambda/4\pi} \right)^2 \frac{r_m^3}{r_0^4} \\ & \cdot E[\Phi(\xi_0 - \xi_m, r_0/r_m)] 10^{(\xi_0 - \xi_m)/10} \rho_m d\theta dr_m \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 h_{bs}^m 은 매크로셀 기지국 안테나 높이, a 는 음성 활동률, $\rho_m = (N_m/\pi R_m^2)$ 은 매크로셀의

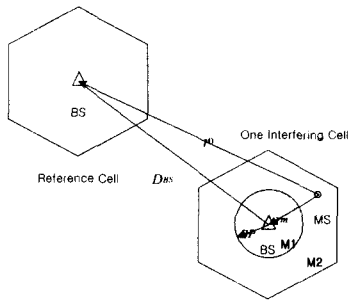


그림 3. 외부 셀 간섭중 외부 매크로셀내 이동국이 기준 매크로셀 기지국에 주는 동종 셀 간섭
Fig. 3. Homogeneous cell interference I_{mm} from a mobile in an other macrocell.

사용자 밀도를 나타내며, r_0 는 기지국간 거리 D_{BS} 를 이용하여 $\sqrt{r_m^2 + D_{BS}^2 + 2D_{BS}r_m \cos \theta}$ 로 계산할 수 있다. 또한, $\Phi(\xi_0 - \xi_m, r_0/r_m)$ 는 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\Phi(\xi_0 - \xi_m, r_0/r_m) = \begin{cases} 1, & \frac{I(r_0, r_m)}{S} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$\chi = \xi_0 - \xi_m$, $10^{\chi/10} = e^{\chi \ln 10/10}$ 으로 치환하면 M1에 대한 $I_{mm}(r_0, r_m)/P_m$ 의 평균은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있으며, χ 는 평균이 0이고 분산이 $2\sigma^2$ 인 가우시안 랜덤 변수이다^[2].

$$\begin{aligned} & \left[\frac{E[I_{mm}]}{E[P_m]} \right]_{M1} \\ &= 2a \left(\frac{h_{bs}^m h_{ms}}{\lambda/4\pi} \right)^2 \int_0^{BP} \int_0^\pi \frac{r_m^3}{r_0^4} e^{\sigma^2 (\ln 10/10)^2} \\ & \cdot [1 - Q(\omega_1/\sqrt{2\sigma^2} - \sqrt{2\sigma^2} \ln 10/10)] \rho_m d\theta dr_m \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Q(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2/2} dy \quad (13) \\ \omega_1 &= 20 \log \{ (\lambda/4\pi) / (h_{bs}^m h_{ms}) \} + 20 \log (r_0^2/r_m) \end{aligned} \quad (14)$$

로 정의된다.

이동국이 분기점 밖(M2)에 위치하고 있을 경우 도, 위의 절차에 따라 동일한 방법으로 구할 수 있 다. 따라서, M2 지역에 위치하는 이동국들에 대한 $I_{mm}(r_0, r_m)/P_m$ 의 평균은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{E[I_{mm}]}{E[P_m]} \right]_{M2} \\ &= 2a \int_{BP}^{RU} \int_0^\pi \frac{r_m^5}{r_0^4} e^{\sigma^2 (\ln 10/10)^2} \\ & \cdot [1 - Q(\omega_2/\sqrt{2\sigma^2} - \sqrt{2\sigma^2} \ln 10/10)] \rho_m d\theta dr_m \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 ω_2 는 다음과 같다.

$$\omega_2 = 40 \log (r_0/r_m) \quad (16)$$

따라서, 외부 매크로셀에 있는 이동국이 기준 매크

크로셀에 미치는 $I_{mm}(r_0, r_m)/P_m$ 의 평균은 다음과 같이 M1과 M2지역에 대한 각각의 $I_{mm}(r_0, r_m)/P_m$ 의 평균을 더해 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{E[I_{mm}]}{E[P_m]} \right]_{M1+M2} \\ &= 2\alpha \left(\frac{h_{bs}^m h_{ms}^m}{\lambda/4\pi} \right)^2 \int_0^{BP} \int_0^\pi \frac{r_m^3}{r_0^4} e^{\sigma^2(\ln 10/10)^2} \\ & \cdot [1 - Q(\omega_1/\sqrt{2\sigma^2} - \sqrt{2\sigma^2} \ln 10/10)] \rho_m d\theta dr_m \\ &+ 2\alpha \int_{BP}^{R_m} \int_0^\pi \frac{r_m^5}{r_0^4} e^{\sigma^2(\ln 10/10)^2} \\ & \cdot [1 - Q(\omega_2/\sqrt{2\sigma^2} - \sqrt{2\sigma^2} \ln 10/10)] \rho_m d\theta dr_m \end{aligned} \quad (17)$$

3-2-2 이종 셀 간섭

이종 셀 간섭인 마이크로셀에서 매크로셀로 주는 간섭 $I_{\mu m}$ 은 외부의 마이크로셀내에 위치한 이동국이 기준 매크로셀의 기지국에 미치는 간섭으로 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. $I_{mm}(r_0, r_m)/P_m$ 을 구할 때와 동일한 절차로 $I_{\mu m}(r_i, r_\mu)/P_\mu$ 의 평균을 구할 수 있으며, 기지국간 거리는 매크로셀과 마이크로셀의 기지국 안테나가 동일한 위치에 있다고 가정했으므로 매크로셀의 기지국간 거리와 동일하지만, 안테나 높이가 다르기 때문에 $I_{\mu m}(r_i, r_\mu)/P_\mu$ 은 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{E[I_{\mu m}]}{E[P_\mu]} \right]_{\mu 1 + \mu 2} \\ &= 2\alpha \left(\frac{h_{bs}^m h_{ms}^m}{\lambda/4\pi} \right)^2 \int_0^{BP} \int_0^\pi \frac{r_\mu^3}{r_i^4} e^{\sigma^2(\ln 10/10)^2} \\ & \cdot [1 - Q(\omega_3/\sqrt{2\sigma^2} - \sqrt{2\sigma^2} \ln 10/10)] \rho_\mu d\theta dr_\mu \\ &+ 2\alpha \left(\frac{h_{bs}^m}{h_{bs}^\mu} \right)^2 \int_{BP}^{R_\mu} \int_0^\pi \frac{r_\mu^5}{r_i^4} e^{\sigma^2(\ln 10/10)^2} \\ & \cdot [1 - Q(\omega_4/\sqrt{2\sigma^2} - \sqrt{2\sigma^2} \ln 10/10)] \rho_\mu d\theta dr_\mu \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)에서 h_{bs}^m 는 마이크로셀 기지국 안테나 높이, $\rho_\mu = (N_\mu/\pi R_\mu^2)$ 은 마이크로셀의 사용자 밀도를 나타내며, r_i 는 기지국간 거리 D_{BS} 를 이용하여 $\sqrt{r_\mu^2 + D_{BS}^2 + 2D_{BS}r_\mu \cos \theta}$ 로 계산할 수 있다. 또한, $\omega_3 = 20 \log \{ (\lambda/4\pi) / (h_{bs}^m h_{ms}^m) \} + 20 \log (r_i^2/r_\mu)$, $\omega_4 =$

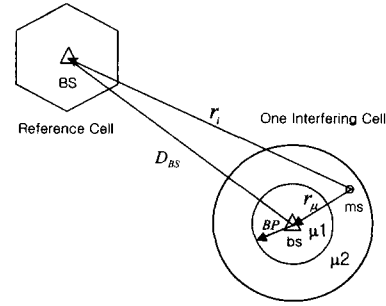


그림 4. 외부 셀 간섭중 외부 마이크로셀내 이동국이 기준 매크로셀 기지국에 주는 이종 셀 간섭
Fig. 4. Heterogeneous cell interference $I_{\mu m}$ from a mobile in an other microcell.

$20 \log (h_{bs}^\mu/h_{bs}^m) + 40 \log (r_i/r_\mu)$ 가 된다.

3-3 간섭 보정 계수(Interference correction factor)

계층 셀룰라 구조에서도 단일셀 구조에서 처럼 간섭 보정 계수 F_m 은 동일 셀 간섭과 외부 셀 간섭의 비로 정의되며, 완전 전력 제어를 가정하고 각각의 매크로셀과 마이크로셀내에 N_m, N_μ 개의 이동국이 있을 때 F_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다^{[3],[5]}.

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{I_m}{N_m E[P_m] + \delta N_\mu E[P_\mu]} \\ &= \frac{I_m/E[P_m]}{N_m + \delta N_\mu C} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $I_m = \sum E[I_{mm}] + \sum E[I_{\mu m}]$ 이며, C 는 마이크로셀 기지국에서 요구되는 수신전력과 매크로셀 기지국에서 요구되는 수신전력의 비를 나타낸다. 즉, $C = E[P_\mu]/E[P_m]$ 로 나타낼 수 있으며, 일반적으로 매크로셀내의 이동국은 송신전력이 0.6 ~ 10 W의 범위를 갖는 반면, 마이크로셀내의 이동국은 20 mV이내의 송신전력을 갖는다^[13].

IV. 성능 분석

DS/CDMA 계층 셀룰라 시스템의 용량은 단일셀 구조와 같이 확산 스펙트럼 처리이득 PG , 비트 에너지 대 간섭 밀도비 E_b/I_0 , 음성활동률 α , 섹터화 계수 F_s 등에 좌우되며, 추가적으로 이종 셀내의 이

동국 수에 영향을 받는다^[14]. 하나의 이동국으로부터 기지국에 수신된 신호전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = RE_b \quad (20)$$

여기서 R 은 비트율(bit rate), E_b 는 비트 에너지이며, 신호대 전체 간섭 전력비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_m}{I_{tot}} = \frac{RE_b}{W_{ss}I_0} = \frac{P_m}{P_{intra}^m + I_m F_s} \quad (21)$$

여기서 I_{tot} 는 전체 간섭, W_{ss} 는 대역폭을 나타내며, 신호대 전체 간섭 전력비가 주어졌을 때, $N_m + 1$ 번째 이동국의 통화가 블록킹될 확률은 신호대 전체 간섭 전력비가 임계(threshold)값을 초과할 확률로 정의된다. 따라서, $N_m + 1$ 번째 이동국이 블록킹될 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[5].

$$\begin{aligned} P_{block} &= \Pr\left(\frac{P_m}{P_{intra}^m} \leq \gamma_{min}(1 + F_m)F_s\right) \\ &= 1 - \Pr\left(\frac{P_m}{P_{intra}^m} > \gamma_{min}(1 + F_m)F_s\right) \\ &= Q\left(\frac{\ln[1/\gamma_{min}(1 + F_m)F_s] + m_m - m_{tot}^m}{\sqrt{\sigma_m^2 + (\sigma_{tot}^m)^2}}\right) \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)에서 신호대 간섭비의 임계값인 γ_{min} 은 다음과 같다.

$$\gamma_{min} = \frac{R}{W_{ss}} \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{min} = \frac{1}{PG} \left(\frac{E_b}{I_0}\right)_{min} \quad (23)$$

여기서 $(E_b/I_0)_{min}$ 은 5(7dB)를 적용하며, PG 는 데이터율에 따라 적용한다.

매크로셀내 사용자 수가 N_m 명이고 마이크로셀내 사용자 수가 N_μ 명이라고 가정했을 때, $N_m + 1$ 번째 이동국에 대하여 음성활동률을 고려한 블록킹 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있으며^[2], m 과 μ 는 이항 분포(binomial distribution)를 갖는 확률 변수이다.

$$\begin{aligned} P_{block}^a &= \sum_{m=1}^{N_m} P_{block}(m) \binom{N_m}{m} \alpha^m (1-\alpha)^{N_m-m} \\ &\cdot \sum_{\mu=1}^{N_\mu} \binom{N_\mu}{\mu} \alpha^\mu (1-\alpha)^{N_\mu-\mu} \end{aligned} \quad (24)$$

전파음영과 다중 접속 간섭은 CDMA셀룰라 시

표 1. 적용된 파라미터들

Table 1. Applied parameters.

파라미터	매크로셀	마이크로셀
이동국 안테나 높이	1.5 m	1.5 m
기지국 안테나 높이	60 m	9 m
경로손실 지수	4, 2	4, 2
전파음영	8 dB	4 dB
셀 반경	10 Km	2 Km
칩율(chip rate)	1.2288 Mcps	
캐리어 주파수	900 MHz	
데이터율	9.6, 14.4 kbps	
불완전 전력제어	1, 2, 2.5, 3, 4 dB	
수신 전력비	1/200, 1/500	
섹터화(중첩각)	1/3(0°, 5°, 10°, 15°, 30°)	
음성 활동률	3/8	

스템이나 개인휴대 통신시스템의 성능을 제한하는 가장 큰 요인들이며 이러한 성능 감소 요인들의 영향을 줄이기 위해 전력제어, 섹터화 등의 방법들이 사용되고 있으나 전파음영과 다중 접속 간섭의 영향은 여전히 존재한다^[15]. 표 1의 파라미터를 적용하여 본 논문에서 고려한 DS/CDMA 계층 셀룰라 시스템의 성능을 분석하였다.

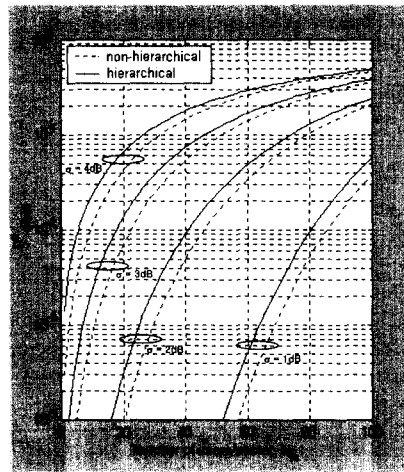


그림 5. 셀 구조와 불완전 전력제어에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수($F_s = 1/3, N_\mu = 30, C = 1$)

Fig. 5. Blocking probability versus number of macrocell users for different values of σ_m, σ_μ and cellular structure($F_s = 1/3, N_\mu = 30, C = 1$).

그림 5에서는 불완전 전력제어에 따른 단일 매크로셀 구조와 계층 셀 구조의 블록킹 확률과 사용자 수의 관계를 나타낸 것이다. 완전한 3섹터화를 가정하고, 계층 셀 구조의 수신 전력비 C 는 1/500, N_μ 는 30명을 적용하였다. σ_m 과 σ_μ 가 1 dB라고 가정했을 때, 단일 매크로셀 구조와 마이크로셀의 사용자 수를 포함한 계층 셀 구조의 사용자 수는 각각 85명과 110명으로 나타났다. σ_m 과 σ_μ 에 대하여 2, 3, 4 dB를 순차적으로 적용하였을 때, 단일 매크로셀 구조와 계층 셀 구조의 사용자 수는 각각 46명과 71명, 22명과 47명, 9명과 35명으로 나타났으며, 사용자 수가 1.54배에서 3.89배 정도 증가함을 알 수 있으며, 전력제어가 불완전할수록 다중 접속 간섭의 증가로 인하여 사용자 수가 급격하게 감소함을 알 수 있다.

그림 6은 완전한 3 섹터화를 가정하고, 수신 전력비 C 가 1/200, σ_m 과 σ_μ 가 2.5 dB인 경우, 마이크로셀의 사용자 수 N_μ 의 변화에 따른 블록킹 확률과 매크로셀 사용자 수 N_m 의 관계를 나타낸 것이다. 마이크로셀 사용자 수 N_μ 가 0, 30, 60, 90인 경우에 매크로셀의 사용자 수 N_m 은 32, 20, 7, 1명으로 마이크

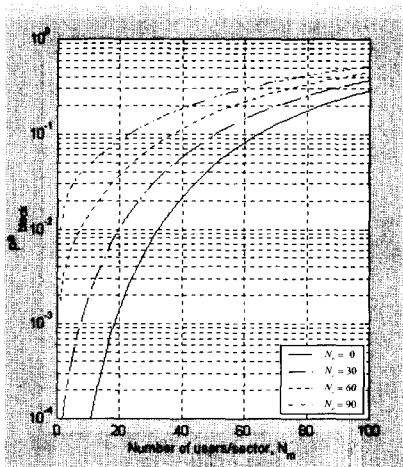


그림 6. 마이크로셀 사용자수에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수 ($F_s=1/3$, $\sigma_m = \sigma_\mu=2.5$ dB, $C = 1/200$).

Fig. 6. Blocking probability versus number of macrocell users for different values of N_μ ($F_s=1/3$, $\sigma_m = \sigma_\mu=2.5$ dB, $C=1/200$).

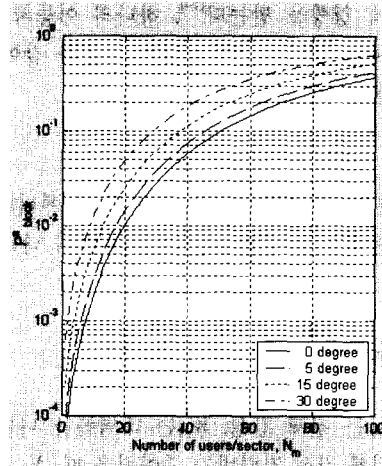


그림 7. 불완전 섹터화에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수 ($F_s=1/3$, $N_\mu=30$, $\sigma_m = \sigma_\mu=2.5$ dB, $C=1/200$).

Fig. 7. Blocking probability versus number of macrocell users for different values of ν ($F_s=1/3$, $N_\mu=30$, $\sigma_m = \sigma_\mu=2.5$ dB, $C=1/200$).

로셀 사용자 수가 증가함에 따라 매크로셀 사용자 수가 감소함을 알 수 있다. 즉, 마이크로셀 사용자 수가 증가함에 따라 다중 접속 간섭의 증가로 매크로셀 사용자 수는 감소하지만, 마이크로셀의 기지국에서 요구되는 전력이 낮기 때문에 전체 시스템의 용량은 증가됨을 알 수 있다.

그림 7에서는 σ_m 과 σ_μ 가 2.5 dB, 수신 전력비 C 가 1/200인 경우, 마이크로셀 사용자 수 N_μ 가 30명이라고 가정하였을 때, 3 섹터화를 적용시 중첩각에 따른 블록킹 확률과 매크로셀 사용자 수의 관계를 나타낸 것이다. 식 (1)의 ν 가 0, 5, 15, 30도 일 때, 매크로셀 사용자 수는 20, 17, 13, 9명으로 중첩각이 증가할수록 시스템 용량이 감소함을 알 수 있다. 다시 말해서, 섹터화가 불완전할수록 중첩각이 증가하여 다중 접속 간섭이 증가하기 때문에 시스템 용량의 감소로 매크로셀 사용자 수가 감소함을 알 수 있다.

그림 8은 매크로셀 기지국과 마이크로셀 기지국에서 수신되는 전력비 C 에 따른 블록킹 확률과 매크로셀 사용자 수의 관계를 나타낸 것이다. σ_m 과 σ_μ 는 2.5 dB, N_μ 는 30명을 가정하였으며, 완전한 3

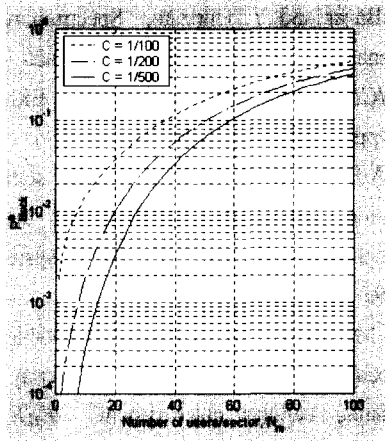


그림 8. 수신 전력비에 따른 블로킹 확률 대 사용자 수 ($F_s=1/3$, $N_\mu=30$, $\sigma_m=\sigma_\mu=2.5$ dB)

Fig. 8. Blocking probability versus number of macrocell users for ratio of received power C ($F_s=1/3$, $N_\mu=30$, $\sigma_m=\sigma_\mu=2.5$ dB).

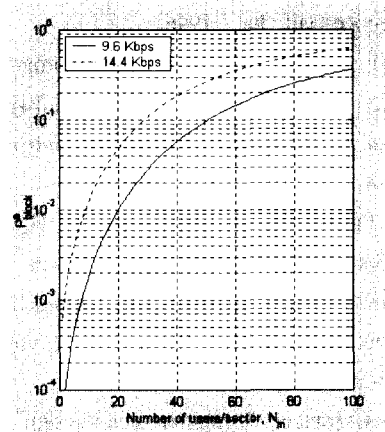


그림 9. 데이터 전송속도에 따른 블로킹 확률 대 사용자 수 ($F_s=1/3$, $N_\mu=30$, $\sigma_m=\sigma_\mu=2.5$ dB, $C=1/200$)

Fig. 9. Blocking probability versus number of macrocell users for data rate ($F_s=1/3$, $N_\mu=30$, $\sigma_m=\sigma_\mu=2.5$ dB, $C=1/200$).

섹터화를 고려하였다. C 가 1/100, 1/200, 1/500일 경우에 마이크로셀의 사용자 수를 제외한 매크로셀의 사용자 수는 7, 20, 27명이며, 각 셀의 기지국에서 수신되는 전력비가 감소함에 따라 마이크로셀과 매크로셀로부터 받는 다중 접속 간섭 전력이 감소하기 때문에 시스템 용량이 증가함을 알 수 있다.

그림 9는 σ_m 과 σ_μ 는 2.5 dB, 수신 전력비 C 는 1/200을 적용하고 마이크로셀 사용자 수 N_μ 가 30명이라고 가정하였을 때, 완전한 3 섹터화 적용시 데이터율에 따른 블로킹 확률과 매크로셀 사용자 수의 관계를 나타낸 것이다. 데이터율이 증가함에 따라 처리이득의 감소로 데이터 전송속도가 9.6, 14.4 kbps일 때, 매크로셀 사용자 수는 각각 20, 9명으로 감소함을 알 수 있다.

V. 결 론

차세대 이동통신에서 수용될 DS/CDMA 계층 셀룰라 시스템에 불완전 전력제어와 마이크로셀의 사용자 수, 불완전 섹터화, 수신 전력비, 처리이득을 고려하여 시스템 성능을 분석하였다. 매크로셀과 마이크로셀내에 사용자가 각각 N_m 명과 N_μ 명이 존재하고 각 셀에 있는 사용자의 신호 출력이 독립적으로 대수 정규분포를 한다고 가정하였으며, 다중셀 간섭을 고려하기 위해 다중셀 다중 접속 간섭을 각각 대수정규 분포로 가정하고 새로운 랜덤변수의 평균과 분산을 계산하였다. 계산된 다중 접속 간섭량, E_b/I_0 , 간섭 보정 계수를 사용하여 블로킹 확률을 유도하였으며 전력 제어 오차와 다중 접속 간섭을 모두 고려하여 시스템의 성능을 분석하였다. 1% 블로킹 확률을 가정하면, 마이크로셀과 매크로셀의 사용자에 대한 전력 제어 오차가 모두 1 dB이고, 완전한 3 섹터화 및 수신 전력비를 1/500인 경우에 시스템 용량은 110명, 마이크로셀과 매크로셀의 사용자에 대한 전력 제어 오차가 각각 4 dB인 경우에 35명으로 68.1% 이상 감소하였으며, 전력 제어 오차에 따라 시스템의 용량의 변화가 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 섹터화에 따른 중첩각이 증가하면 시스템 용량은 감소하며, 매크로셀 사용자에 대한 전력 제어 오차가 2.5 dB인 경우에 마이크로셀 사용자가 증가함에 따라 매크로셀의 사용자수는 감소한다는 사실을 알 수 있었다. 매크로셀과 마이크로셀의 수신 전력비를 작게 함으로써 시스템 용량이 증가하며, 처리 이득이 작을수록 시스템 용량이 감소함을 알 수 있었다. 또한, 단일 매크로셀 구조와 계층

셀 구조의 용량을 계산하여 비교한 결과, 계층 셀 구조가 단일 매크로셀 구조에 비해 1.54배에서 3.89배의 셀 용량 증대 효과를 가져왔다.

본 연구결과는 차세대 이동통신의 셀 설계시 전파음영과 불완전 전력제어를 고려한 가입자 용량 산출에 이론적인 근거로 사용할 수 있다. 향후에는 다중경로 채널 환경 하에서 주파수 분할/부분공유 DS/CDMA 계층 셀룰라 시스템의 성능을 분석할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] <http://www.itu.int/imt/>
- [2] K. S. Gilhousen, et al., "On the capacity of a cellular CDMA system", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 40, no. 2, pp. 303-312, May 1991.
- [3] M. G. Jansen and R. Prasad, "Capacity, throughput, and delay analysis of a cellular DS-CDMA system with imperfect power control and imperfect sectorization", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 44, no. 1, pp. 67-75, Feb. 1995.
- [4] M. Viterbi and A. J. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 892-900, Aug. 1993.
- [5] J. S. Lee and L. E. Miller, "On the Erlang capacity of CDMA cellular system", in *GLOBECOM'95 Conf.*, pp. 1877-1883, Singapore, pp. 13-17, Nov. 1995.
- [6] C. L. I, L. J. Greenstein and R. D. Gitlin, "A microcell/macrocell cellular architecture for low- and high-mobility wireless users", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 885-890, Aug. 1993.
- [7] I. Bazar and Y. Onozato, "Spectrum resources management on two-tier cellular networks", *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E81-A, no. 7, pp. 1330-1338, July 1998.
- [8] TIA/EIA, IS-95 Standard Mobile station-base station compatibility standard for dual-mode wideband spread spectrum cellular system, Feb. 1993.
- [9] D. M. Grieco, "The capacity achievable with a broadband CDMA microcell underlay to an existing cellular macrosystem", *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 4, pp. 744-750, May 1994.
- [10] J. Wang and L. B. Milstein, "Approximate interference of a microcellular spread spectrum system", *IEE Electron. Lett.*, vol. 32, no. 20, pp. 1782-1783, Sep. 1995.
- [11] T. S. Rappaport, *Wireless Communications*, Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [12] L. F. Fenton, "The sum of log-normal probability distributions in scatter transmission systems", *IRE Trans. on Commun. Systems*, vol. C5-8, pp. 57-67, Mar. 1960.
- [13] R. Prasad, H. S. Misser and P. H. Sinaga, "Improved performance assessment for a CDMA system in macro- and micro-cellular environments", *IEEE Veh. Tech. Conf.*, vol. 1, pp. 545-549, 1994.
- [14] X. Lagrange, "Multitier cell design", *IEEE Commun. Mag.*, pp. 60-65, Aug. 1997.
- [15] R. Prasad, W. Mohr and W. Konhauser, *Third generation mobile communication systems*, Artech House Publisher, 2000.

윤 석 재



1995년: 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)
2001년: 충북대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2000년~2001년: ChipPAC Korea 기술팀
2001년~현재: 현대 디스플레이 테

크놀로지 개발팀
[주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선시스템

김 항 래



1995년: 청주대학교 전자공학과 (공학사)
1997년: 청주대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년~현재: 충북대학교 정보통신공학과 박사 수료
[주 관심분야] 디지털 이동통신, 무

선시스템

김 남



1981년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1983년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1988년: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1992년~1993년: 미 Stanford 대학

교 방문교수
2000년~2001년: 미 California Technology Institute (Caltech) 방문교수
1989년~현재: 충북대학교 정보통신공학과 교수
[주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선시스템, Diffractive Optics, WDM Optical Filter & Demux, Optical Memory, Holography Application, 전자파 해석 EMI/EMC