

적응 배열 안테나를 고려한 cdma2000 셀룰러 시스템의 역방향 링크 성능 분석

The Reverse Link Performance Analysis of cdma2000 Cellular System considering Adaptive Array Antenna

박종용 · 김항래* · 한태영 · 김 남

Jong-Yong Park · Hang-Rae Kim* · Tae-Young Han · Nam Kim

요 약

본 논문은 기지국 배열 안테나를 이용하여 전파음영 환경 하에서 MCGM 알고리즘과 전력제어 오차에 따른 cdma2000 셀룰러 시스템의 역방향 링크에 대한 성능을 분석한다. 블로킹 확률을 배열 파라미터와 E_b/N_0 및 간섭 통계를 이용하여 유도하고 특정한 블로킹 확률에서의 시스템 용량을 계산한다. 1 %의 블로킹 확률, 전력제어 오차 2 dB, 배열 안테나 소자 수 $M=2, 4, 8, 12$ 에서 cdma2000 시스템과 IS-95 시스템의 사용자 수는 각각 21, 40, 75, 110명과 9, 17, 30, 44명으로 나타나, cdma2000 시스템이 IS-95 시스템에 비해 2.3~2.5배의 용량 증가를 보였다.

Abstract

In this paper, the reverse link performance of imperfect power controlled cdma2000 cellular system that using array at a base station is analyzed, when MCGM beamforming algorithm and power control error is considered in shadowing. The blocking probability of the cdma2000 cellular system based on array parameters, E_b/N_0 and interference statistics is calculated, and then the system capacity is calculated at a specific blocking probability. When the blocking probability is set 1 %, PCE(power control error) is 2 dB, $M=2, 4, 8, 10$, the capacity of cdma2000 is increased 2.3~2.5 times higher than IS-95.

Key words : Adaptive Array Antenna, cdma2000, Reverse Link, Capacity, Smart Antenna

I. 서 론

IMT-2000(International Mobile Telecommunications-2000) 서비스가 본격적으로 시작되면 전 세계적으로 급격한 사용자의 증가가 예상되고, 멀티미디어와 무선 인터넷 사용으로 인해 데이터 용량이 현저히 증가하게 된다. 따라서 제한된 주파수 영역을 가지는 무선 통신 시스템에서 사용자의 요구를 충족시키고 우수한 스펙트럼 효율을 제공하는 문제가

관심의 대상이 되고 있다^[1].

제3세대 이동통신서비스인 IMT-2000에서는 간섭신호 및 채널 특성에 의한 성능저하 현상에 대한 해결책으로 적응 배열 안테나(adaptive array antenna) 또는 스마트 안테나(smart antenna) 기술의 도입이 추진되고 있다. 적응 배열 안테나는 현재의 기지국 안테나처럼 전 방향으로 빔(beam)을 형성하는 대신 희망 사용자의 방향으로만 빔을 형성하고 간섭 신호방향으로는 영 점(null point)을 구동하여 간

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

*충북대학교 컴퓨터정보통신연구소(Research Institute for Computer & Information Communication, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20021018-136

· 수정완료일자 : 2003년 1월 17일

섭을 제거하는 방식으로 셀 내에서 활동하고 있는 모든 사용자에게 간섭 효과를 최소화함으로써 고품질의 무선 통신 서비스를 제공하고 시스템 채널 용량을 높여 희망 사용자에게 최적의 수신신호전력을 제공하는 시스템이라 할 수 있다^[2].

현재의 셀룰러 시스템에서, 모든 이동국은 역방향 링크에서 통화 채널을 유지하기 위한 최소 전력만을 송신하도록 해당 기지국에 의해 제어된다. 현재 사용되고 있는 전력제어 방식은 개방루프 전력제어(open loop power control)와 폐쇄루프 전력제어(closed loop power control)이다. 개방루프 전력제어는 이동국이 기지국의 신호 강도를 기준으로 행하는 단순한 전력제어이며, 폐쇄루프 전력제어는 기지국이 1.25 ms마다 이동국으로 전력제어 비트를 전송하여 세밀한 제어를 하는 방식이다. 그러나 불안정한 무선채널로 인해 완벽한 전력제어는 불가능하기 때문에 전력제어 오차(PCE : power control error)가 발생하게 되며 이동국으로부터 기지국으로 수신된 신호는 로그노말 분포(log-normal distribution)를 하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 전파음영 환경을 가정하여 MCGM(modified conjugate gradient method) 알고리즘을 사용한 기지국 배열 안테나와 전력제어 오차를 고려한 cdma2000 셀룰러 시스템의 역방향 링크에 대한 성능을 해석적으로 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 cdma 2000 역방향 링크, 배열 안테나 시스템 그리고 다중접속 간섭을 제거하기 위해 기지국 배열 안테나에 이용되는 빔 형성 알고리즘 중에서 MCGM 알고리즘에 대해 기술하고, III장에서는 배열 안테나 파라미터와 E_b/N_0 및 간섭 통계를 이용하여 cdma2000 셀룰러 시스템의 역방향 링크 성능을 분석하기 위한 블로킹 확률을 유도하며, IV장에서는 이론적 해석을 바탕으로 시스템 성능을 분석한다. 끝으로, V장에서는 결론과 향후 과제에 대해 기술한다.

II. 시스템 분석 모델

2-1 cdma2000 역방향 링크

그림 1은 cdma2000 역방향 링크의 구조를 나타낸다^[3]. cdma2000은 역방향 링크에서 전송 데이터율, 음성 채널코딩, 채널 전송구조에 따라 RC(radio configura-

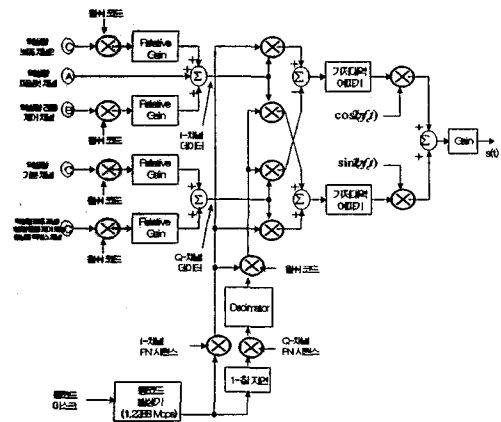


그림 1. cdma2000 역방향 링크 구조
Fig. 1. Structure of cdma2000 Reverse Link.

tion) 1에서 RC 6으로 세분화된다. 역방향 링크의 RC 1과 RC 2의 경우 IS-95와의 호환성을 유지하기 위한 것이며, RC 3과 4의 경우 cdma2000 1X를, RC 5와 6의 경우 cdma2000 3X에 해당하는 규격이다. 본 논문에서는 cdma2000 1X 역방향 링크 RC 3에 대해 성능 분석을 하였다. cdma2000 역방향 채널은 기존 IS-95의 액세스 채널(access channel), 트래픽 채널(traffic channel)에 향상된 액세스 채널(enhanced access channel)과 역방향 공통 제어 채널(reverse common control channel), 역방향 보조 코드 채널(reverse supplemental code channel) 그리고 역방향 보조 채널(reverse supplemental channel)이 추가되었다. 새로이 추가된 채널에 대해서는 역방향 채널에 파일럿 채널을 함께 전송하여 코히어런트 검파(coherent detection)를 통해 기지국의 포착(acquisition) 확률을 증가시켰다.

본 논문에서는 계산의 편의를 위하여 cdma2000 물리 계층에서 파일럿 채널과 트래픽 채널만을 고려하였다. 셀 내에 K 명의 사용자가 분포한다고 가정하면, k 번째 신호원으로부터 전송된 신호가 M 개의 안테나 소자 중 기준 안테나 소자에 수신된 신호는 다음과 같다^[4].

$$s_k = (s_k^{(I)} + js_k^{(Q)})PN_k^{(L)} \quad (1)$$

여기서 $s_k^{(I)} = (s_p w_p)PN^{(I)} - (s_s w_s)PN^{(Q)}$, $s_k^{(Q)} = (s_p w_p)PN^{(Q)} + (s_s w_s)PN^{(I)}$ 이고, s_p 와 s_s 는 각각 파

일릿 시퀀스(pilot sequences)와 보조 시퀀스(supplemental sequences)를 나타낸다. 또한 w_p 와 w_s 는 각각 파일럿 채널과 보조 채널의 직교 Walsh 코드 시퀀스이다. $PN^{(I)}$ 는 I-채널 PN-시퀀스, $PN^{(Q)}$ 는 Q-채널 PN-시퀀스, 그리고 $PN_k^{(L)}$ 은 롱(long) PN-시퀀스이다.

2-2 전력제어

CDMA 시스템 성능 분석에 있어 대부분의 경우 완벽한 전력제어를 가정하고 있지만, 실제 무선 환경에서는 주위 환경에 따라 무선 채널이 빠르고 다양하게 변화하기 때문에 완벽한 전력제어를 하는 것은 불가능하다. 전력제어 시스템의 성능은 전력제어 알고리즘, 송신기의 동작 영역(dynamic range), 이동국의 분포특성, 다중경로 페이딩 그리고 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 로그노말 분포로 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, 이를 전력제어 오차라 한다. 완전 전력제어를 가정할 경우 σ 는 0 dB가 된다. 하지만 실제 수신전력의 표준편차를 측정할 결과 1~3 dB의 값을 갖는다^[5].

2-3 배열 안테나 시스템

그림 2는 셀 내에 K명의 사용자가 분포하고 M개의 안테나 소자(element)가 등간격으로 배열된 기지국 안테나 수신기의 구조를 나타낸 것이다. 사용된 안테나 소자들은 모두 등방성 안테나이며 안테나 소자들의 간격 d 는 반파장($= \lambda/2$)이다. 각각의 배열 안테나에 수신된 신호는 가중 계수 결합기(weight combiner)를 거치면서 복소 가중 계수 $W_m(m=1, 2, \dots, M)$ 가 곱해지게 된다. 평면파가 θ 의 각도로 입사하게 되면 m 번째 안테나에 입사되는 평면파는 $m+1$ 번째 안테나에 입사되는 평면파보다 입사 거리가 길어지므로 늦게 도달하게 된다. 따라서 1번째 안테나와 m 번째 안테나간의 위상차는 $(m-1)\pi \sin$

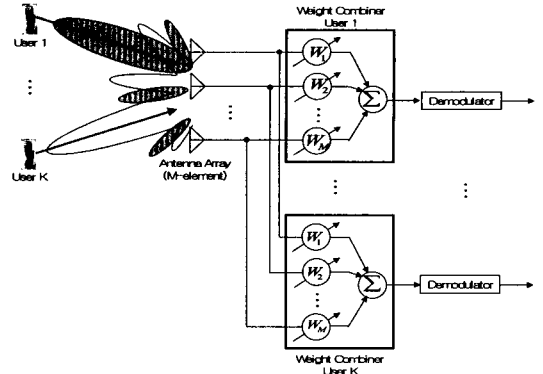


그림 2. 배열 안테나의 수신기 구조
Fig. 2. Receiver structure of array antenna.

θ 가 된다.

배열 안테나의 출력을 배열 인자 F 에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$F(\theta) = W_1 + W_2 e^{j\pi \sin \theta} + W_3 e^{j2\pi \sin \theta} \dots \\ = \sum_{m=1}^M W_m e^{j(m-1)\pi \sin \theta} \quad (3)$$

식 (3)을 벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$F(\theta) = \mathbf{W}^T \mathbf{a} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{W} 는 각 배열 안테나에 가해지는 가중 계수 벡터이다.

$$\mathbf{W} = [W_1 \ W_2 \ \dots \ W_M]^T \quad (5)$$

\mathbf{a} 는 배열 응답 벡터로 각 안테나 소자에 수신된 신호의 입사각 정보를 가지고 있으며 M개의 배열 안테나에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{a} = [1 \ e^{j\pi \sin \theta} \ e^{j2\pi \sin \theta} \ \dots \ e^{j(M-1)\pi \sin \theta}]^T, \\ a(\theta_k) = e^{j(M-1)\pi \sin \theta_k} \quad (6)$$

식 (3)의 배열 인자는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 α 는 m 번째 안테나와 $m-1$ 번째 안테나사이의 위상차를 나타낸다.

$$F(\theta) = \sum_{m=1}^M W_m e^{jm(\pi \sin \theta + \alpha)} \quad (7)$$

$\alpha = \pi \sin \theta_0$ 라 가정하면, $F(\theta)$ 의 응답은 θ_0 에서 최대가 될 것이다. 즉, 안테나의 빔은 θ_0 의 방향으로 최대의 이득을 가지는 빔을 형성하게 된다.

이와 같이 적응 배열 안테나는 희망 사용자의 방

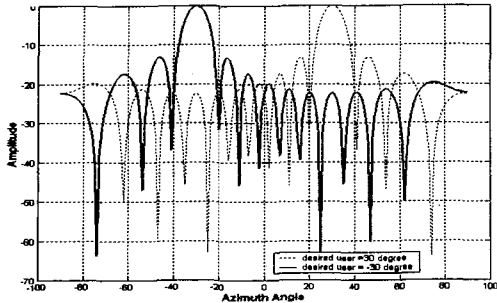


그림 3. 12개의 소자를 갖는 배열 안테나의 빔 패턴
Fig. 3. Beam pattern of 12-element array antenna.

향으로만 전력을 집중하여 최대의 이득을 가지는 빔을 형성하고 간섭 사용자의 방향으로는 영 점을 구동하여 빔을 형성하지 않음으로써 서비스 영역을 증가시키고 인접 사용자들로부터의 간섭을 줄여 통화 품질과 시스템 용량을 향상시킬 수 있다. 그림 3은 12개의 안테나 소자를 갖는 선형 배열 안테나의 빔 패턴을 나타낸 것이다.

2.4 빔 형성 알고리즘(beamforming algorithm)

그림 4는 등간격으로 배열된 M 개의 안테나에 K 개의 서로 다른 신호가 입사한다고 가정한다. 이 때 입사신호의 파장이 λ , 안테나 사이의 간격이 $\lambda/2$, 그리고 k 번째 신호의 입사각을 θ_k 라고 가정하면 $m(1, 2, \dots, M)$ 번째 배열 안테나 소자에 입사되는 신호는 기준 안테나 소자에 입사되는 신호와 $(m-1)\pi \sin \theta_k$ 만큼의 위상차가 발생하게 되고, 기저대역(base band)에서 다음과 쓸 수 있다.

$$X_m(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) e^{j(m-1)\pi \sin \theta_k} + n_m(t) \quad (8)$$

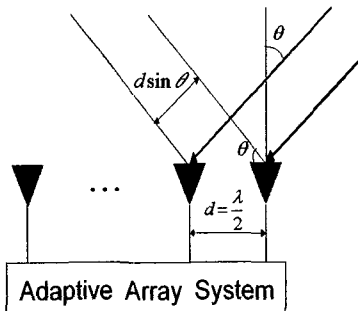


그림 4. 배열 안테나의 수신 구조
Fig. 4. Receiving structure of array antenna.

식 (8)에서 $s_k(t)$ 는 k 번째 신호원으로부터 전송된 신호가 기준 안테나에서 수신된 값으로 식 (1)과 같으며, $n_m(t)$ 는 열 잡음으로 평균이 0인 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 갖는다.

본 논문에서 고려한 MCGM 알고리즘은 희망 사용자의 출력 신호가 간섭 사용자의 출력 신호보다 월등히 크다고 가정할때, 수신된 신호들의 자기상관 행렬(autocorrelation matrix)의 최대 고유치(maximum eigenvalues)에 해당하는 고유벡터(eigenvector)들은 희망 사용자의 방향 벡터와 일치하게 되며, 이를 안테나 각 소자들에 대한 가중계수 벡터로서 이용하고 추정된 가중계수를 이용하여 희망 사용자의 방향으로 주 빔(main beam)을 형성하는 방식이다. 즉, 수신 신호의 자기 상관 행렬의 최대 고유치와 고유벡터를 구함으로써 가중계수 벡터를 갱신할 수 있다⁶⁾.

배열 안테나를 사용할 경우, 셀 내에 균일하게 분포된 K 명의 사용자로부터 전송되는 신호 중에서 희망 사용자에 대한 신호는 수신하고 간섭 신호는 감소시키기 위하여 공간적 여파(spatial filtering)를 통해 간섭 신호의 수신 전력을 최소화하고 수신된 신호의 배열 응답 벡터를 추정하여 추정된 응답 벡터를 배열 안테나의 출력 신호에 곱하게 된다. 즉, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = \sum_{m=1}^M W_m^H \cdot X_m \quad (9)$$

위 식에서, H 는 허미션 전치(Hermitian transpose)를 나타내며 X_m 은 m 번째 배열 안테나에 수신된 신호 벡터이다. 가중계수 W 는 매 스텝마다 MCGM 알고리즘에 의해 새롭게 갱신되며 각 스텝에서 반드시 1로 정규화 한 후, 그 다음 가중계수 계산에 사용된다.

AWGN 환경에서, 배열 안테나 출력 y 는 식 (9)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} y &= \sum_{k=1}^K w_m^H s_k a(\theta_k) + w_m^H n_m \\ &= s_1 + \frac{1}{M} \sum_{k=2}^K s_k a(\theta_1) a(\theta_k) + \frac{1}{M} a(\theta_1) n \quad (10) \end{aligned}$$

위 식에서 가중 계수 w 를 근사화된 복소 가중치 값 $a(\theta_1)/M$ 으로 대체하였다. 첫 번째 항은 희망 신호에 대한 것이며 두 번째 항은 셀 내에서 희망 사용자를 제외한 다중접속 사용자에 대한 것이다. 식

(10)으로부터 1번째 희망 사용자의 신호와 잡음에 대한 배열 안테나의 출력 $SNR_o^{(1)}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다^[6].

$$\begin{aligned} SNR_o^{(1)} &= \frac{E[|s_1|^2]}{E\left[\left|\frac{1}{M} a(\theta_1) n\right|^2\right]} \\ &= M \frac{E[|s_1|^2]}{\sigma_n^2} \\ &= M \cdot SNR_i^{(1)} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $SNR_i^{(1)}$ 는 배열 안테나에 입력되는 1번째 사용자의 신호 대 잡음 전력비이다. 식 (11)에서 출력 $SNR_o^{(1)}$ 은 배열 안테나 수(M)만큼 증가한다는 것을 알 수 있다. 식 (10)과 식 (11)로부터 1번째 희망 사용자의 신호와 간섭 신호에 대한 배열 안테나 출력 신호 대 간섭 전력비 $SIR_o^{(1)}$ 는 다음과 같다^[7].

$$\begin{aligned} SIR_o^{(1)} &= \frac{E[|s_1|^2]}{\sum_{k=2}^K \left[\frac{1}{M^2} |a(\theta_1) a(\theta_k)|^2 E[|s_k|^2] \right]} \\ &= \frac{E[|s_1|^2]}{\sum_{k=2}^K G_k(\theta_1, \theta_k) E[|s_k|^2]} = \frac{1}{G_A^{(k)}(\theta_1)} \cdot SIR_i^{(1)} \end{aligned} \quad (12)$$

위 식에서 $G_k(\theta_1, \theta_k)$ 는 다중접속 사용자에게 대한 배열 안테나 이득이고, $G_A^{(k)}(\theta_1)$ 는 다중접속 사용자에게 대한 평균 배열 안테나 이득이며 각각 다음과 같다.

$$G_k(\theta_1, \theta_k) = \frac{1}{M^2} |a(\theta_1) a(\theta_k)|^2 \quad (13)$$

$$G_A^{(k)}(\theta_1) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} G_k(\theta_1, \theta_k) d\theta_k \quad (14)$$

식 (13)에서 $G_k(\theta_1, \theta_k)$ 는 $\theta_1 = \theta_k$ 인 경우 이외에는 항상 1보다 작으며 $a(\theta_1)$ 과 $a(\theta_k)$ 가 서로 직교한다면 배열 안테나 출력에서 간섭 신호들은 완전히 제거될 수 있다. 식 (14)는 $G_A^{(k)}(\theta_1) = E[G_k(\theta_1, \theta_k)]$ 에 대한 표현이며 M 과 θ_1 에 대한 함수이다. 따라서 $G_A^{(k)}(\theta_1)$ 는 임의의 M 과 θ_1 에 따라 정량적으로 계산될 수 있으며, 본 논문에서는 $\theta_1 = 0^\circ$, $M = 2, 4, 8, 12$ 에 대하여 배열 안테나에 입력되는 평균 간섭 전력을 계산하였다.

III. cdma2000 시스템의 다중접속 간섭과 블로킹 확률

사용자 1을 희망 사용자라고 가정하면, 비트 에너지 대 잡음 스펙트럼 밀도 비(E_b/N_o)는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[7].

$$\left(\frac{E_b}{N_o} \right) = \frac{G_p SNR_o^{(1)}}{3G_p^2 \sum_{k=2}^K SNR_o^{(k)} \cdot r_{k,i} + 1} \quad (15)$$

여기서 $SNR_o^{(k)}$ 는 k 번째 입력 신호에 대한 배열 출력 SNR 이고 $r_{k,i}$ 는 i 번째와 k 번째 의사 잡음 수열간의 상호 상관 함수로부터 유도된 값이며 G_p 는 처리 이득(processing gain)이다. $r_{k,i}$ 값을 유도하기 위해서 상호 상관 함수(cross correlation function)와 상호 상관 파라미터(cross correlation parameter)를 다음의 식 (16), 식 (17)과 같이 정의하면^[8],

$$C_{k,i}(l) = \begin{cases} \sum_{r=0}^{L-l-1} a_r^{(k)} [a_{r+l}^{(i)}], & 0 \leq l \leq L-1 \\ \sum_{r=0}^{L-l-1} a_r^{(k)} [a_r^{(i)}], & 1-L \leq l < 0 \\ 0, & |l| \geq L \end{cases} \quad (16)$$

$$\mu_{k,i} = \sum_{l=-L}^{L-1} C_{k,i}(l) C_{k,i}(l+L) \quad (17)$$

i 번째 확산 수열과 k 번째 확산 수열간의 상호 상관값 $r_{k,i}$ 는 식 (16)과 (17)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{k,i} = 2\mu_{k,i}(0) + \mu_{k,i}(1) \quad (18)$$

식 (18)을 식 (15)에 대입하여 정리하면 (E_b/N_o) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{N_o} \right) = \frac{G_p SNR_o^{(1)}}{3 \sum_{k=2}^K SNR_o^{(k)} + 1} \quad (19)$$

식 (19)에서 분자는 셀 내의 희망 사용자에게 대한 것이고 분모는 희망 사용자를 제외한 다중접속 사용자에게 대한 것이다.

다음으로 전력제어 오차를 고려하면, k 번째 사용자의 입력 $SNR_i^{(k)}$ 에 대한 배열 출력 $SNR_o^{(k)}$ 는 평균 배열 이득($G_A^{(k)}$)에 대한 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SNR_o^{(k)} = 10^{x/10} G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} \quad (20)$$

위 식에서 $10^{x/10}$ 은 전력 제어 오차이다. 배열 이

득은 신호의 입력 모델과 안테나의 배열 구조 및 사용된 알고리즘에 따른 함수이다. 배열 이득과 전력 제어 오차가 상호 독립적이고 사용자의 신호 전력이 로그노말 분포를 한다고 가정하면 식 (19)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \frac{G_P G_A^{(1)} SNR_i^{(1)} 10^{x_i/10}}{\frac{2}{3}(K-1)G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} 10^{x_k/10} + 1} \quad (21)$$

여기서 $G_A^{(1)}$ 은 희망 사용자에게 대한 배열 이득이고 $G_A^{(k)}$ 는 간섭 사용자에게 대한 평균 배열 이득이다. 간섭 신호의 방향으로 배열 이득이 일정하다면 식 (21)에서의 다중접속 간섭은 다음과 같이 근사화 할 수 있다^[9].

$$I_{MA} = \sum_{k=2}^K 10^{x_k/10} + F \sum_{k=1}^K 10^{y_k/10} + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} \quad (22)$$

위 식의 첫 번째 항은 단일 셀의 다중접속 간섭에 대한 것이고 두 번째 항은 외부 셀의 다중접속 간섭에 대한 것이며, F 는 다중 셀 간섭 계수이다.

단일 셀 간섭과 다중 셀 간섭을 각각 로그노말 분포로 가정하면, 다중접속 간섭 I_{MA} 는 로그노말 확률 변수들의 합이므로 I_{MA} 의 1차 모멘트와 2차 모멘트는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E[I_{MA}] &= (K-1) \exp(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2) \\ &+ F \cdot K \cdot \exp(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2) + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} \\ E[I_{MA}^2] &= E\left[\left(\sum_{k=2}^K \exp(\beta x_k) + F \sum_{k=1}^K \exp(\beta y_k) + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}}\right)^2\right] \\ &= (K-1) \exp(2\beta m_x + 2 \beta^2 \sigma_x^2) + (K-1)(K-2) \exp(2\beta m_x + \beta^2 \sigma_x^2) \\ &+ F^2(K \cdot \exp(2\beta m_y + 2 \beta^2 \sigma_y^2) + K(K-1) \exp(2\beta m_y + \beta^2 \sigma_y^2)) \\ &+ 2F \cdot K(K-1) \exp(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2) \exp(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2) \\ &+ \left(\frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}}\right)^2 + \frac{3}{G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} (K-1) \exp(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2) \\ &+ \frac{3F}{(G_A^{(k)})^2 SNR_i^{(k)}} K \cdot \exp(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2) \quad (23) \end{aligned}$$

여기서 $\beta = \ln(10)/10$ 이고 확률 변수 x 와 y 는 각각 $N(0, \sigma_x^2)$ 과 $N(0, \sigma_y^2)$ 인 분포로 가정하면, 확률 변수 x 와 y 의 합인 새로운 확률 변수 z 의 평균과 분산은 다음과 같이 표현할 수 있다^[9].

$$m_z = 2 \ln(E[I_{MA}]) - \frac{1}{2} \ln(E[I_{MA}^2])$$

$$\sigma_z^2 = \ln(E[I_{MA}^2]) - 2 \ln(E[I_{MA}]) \quad (24)$$

그러므로, 다중접속 간섭 I_{MA} 에 대하여 (E_b/N_o) 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_o}\right) &= \frac{G_P G_A^{(1)} SNR_i^{(k)} 10^{x_i/10}}{\frac{2}{3} G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} I_{MA}} \\ &= \frac{3}{2} G_P \frac{G_A^{(1)}}{G_A^{(k)}} 10^{\frac{x_i - 10 \log_{10}(\exp(1))z}{10}} \quad (25) \end{aligned}$$

블록킹은 요구되는 E_b/N_o 가 임계값보다 작을 때 발생하며, 블록킹 확률에 대한 표현식은 사용자 수 및 배열 안테나 수에 대한 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_B \left(\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{ab} < \xi_{ab} \right) \\ = Q \left(\frac{10 \log \left(\frac{3}{2} G_P \frac{G_A^{(1)}}{G_A^{(k)}} \right) - 10 \log(\exp(1))m_z - \xi_{ab}}{\sqrt{\sigma_z^2 + 100 \log^2(\exp(1))\sigma_z^2}} \right) \quad (26) \end{aligned}$$

여기서 ξ_{ab} 는 임계값이고 $Q(x) = \int_x^\infty 1/\sqrt{2\pi} e^{-t^2/2} dt$ 이다.

IV. 기지국 배열 안테나를 적용한 cdma2000 셀룰러 시스템의 성능 분석

전파음영과 다중접속 간섭은 CDMA 셀룰러 시스템이나 개인통신 시스템(PCS)의 성능을 제한하는 가장 큰 요인들이며 이러한 성능 감소 요인들의 영향을 줄이기 위해 전력 제어, 선택화 등의 방법들이 사용되고 있으나 전파 음영과 다중접속 간섭의 영향은 여전히 존재한다. 3세대 이동통신서비스가 본격적으로 시작되면 데이터 용량과 사용자의 현저한 증가로 인해 성능 감소 요인들의 영향이 더욱 증가할 것이다. 다음의 결과들은 cdma2000 셀룰러 시스템에 다중접속 간섭을 효과적으로 줄일 수 있는 적용 배열 안테나를 적용하였을 경우, 전력 제어 오차와 다중접속 간섭을 고려한 시스템 용량을 나타내고 있다. 분석에 사용된 파라미터들은 다음과 같다. 입력 SNR=20 dB, 전력 제어 오차 PCE=1, 2, 3 dB, 배열 안테나 수는 2, 4, 8, 12개, 기지국 배열 안테나에 사용한 알고리즘은 MCGM 알고리즘이다.

그림 5와 6은 단일 셀 다중접속 간섭과 다중 셀 다

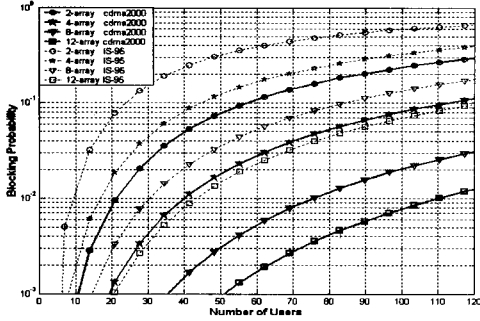


그림 5. 배열 안테나 수에 따른 cdma2000과 IS-95의 블록킹 확률 대 사용자수(cdma2000 SNR =20 dB, IS-95 SNR=15 dB, PCE=2 dB)

Fig. 5. The number of users according to the blocking probability and number of array antennas at multi-cell in cdma2000 and IS-95(cdma 2000 SNR=20 dB, IS-95 SNR =15 dB, PCE=2 dB).

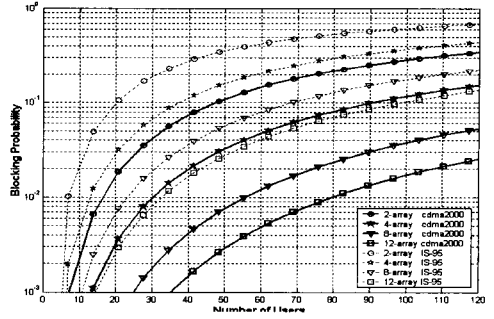


그림 6. 배열 안테나 수에 따른 cdma2000과 IS-95의 블록킹 확률 대 사용자수(cdma 2000 SNR =20 dB, IS-95 SNR=15 dB, PCE=3 dB)

Fig. 6. The number of users according to the blocking probability and number of array antennas in cdma2000 and IS-95(cdma 2000 SNR=20 dB, IS-95 SNR=15 dB, PCE =3 dB).

중점속 간섭을 모두 고려하여 배열 안테나 수에 따른 cdma2000 셀룰러 시스템과 IS-95 셀룰러 시스템의 블록킹 확률 대 사용자 수를 나타낸 것이다. 적용된 전력제어 오차는 그림 5와 그림 6의 경우 각각 2 dB와 3 dB이다. 이때, 1%의 블록킹 확률을 가정하면, 전력제어 오차 2 dB, 배열 안테나 수 $M=2, 4, 8, 12$ 에서 cdma2000 시스템의 사용자 수는 21, 40, 75, 110명으로 나타났고, IS-95 시스템은 9, 17, 30, 44명으로 나타났다. 또한 전력제어 오차 3 dB에서, cdma2000 시스템과 IS-95 시스템의 사용자 수는 16, 30, 55, 80명과 7, 13, 24, 33명으로 각각 나타났다. 그리고 cdma2000 시스템에서 전력제어 오차가 2 dB에서 3 dB로 증가하면, 시스템 용량이 1.3배 감소함을 확인할 수 있다. 그림 5와 6으로부터 배열 안테나 수가 증가함에 따라 시스템 용량도 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, IS-95 시스템에 비해 cdma2000 시스템의 용량이 2.3~2.5배 증가함을 알 수 있다. 또한 시스템 용량은 다중 셀 다중점속 간섭 의해 감소됨을 알 수 있으며 이러한 다중점속 간섭을 좀 더 효율적으로 감소시킬 수 있다면 시스템 용량을 더욱 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 cdma2000 셀룰러 시스템에서 완전 전력제어된 경우와 불완전 전력제어된 경우의 블록킹 확률 대 요구되는 배열 안테나 수를 나타낸다. 셀 내에 80명의 사용자가 분포한다고 가정하면, 전력

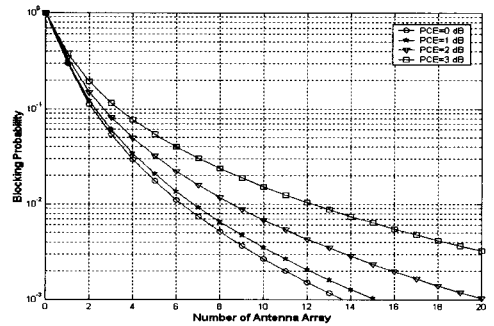


그림 7. 전력제어 오차에 따른 블록킹 확률 대 요구되는 배열 안테나 수(SNR=20 dB, 사용자수=80명)

Fig. 7. Blocking probability versus required number of antenna array according to the PCE (SNR=20 dB, users=80).

제어 오차가 0 dB로 완전 전력제어가 된 경우, 80명의 사용자를 수용하기 위해서는 최소 7개의 배열 안테나가 요구되며 전력제어 오차가 1 dB로 불완전 전력제어 된 경우에도 최소 7개의 배열 안테나가 요구된다. 또한 전력제어 오차가 2 dB와 3 dB에서 요구되는 배열 안테나 수는 각각 최소 9개와 12개로 나타났다. 현재의 셀룰러 시스템에서는 완벽한 전력제어는 불가능하기 때문에 전력제어 오차를 감소시킴으로써 요구되는 배열 안테나 수를 최소화하고 이를 통해 가장 경제적이고 효율적인 배열 안테나 시스템을 구성할 수 있다.

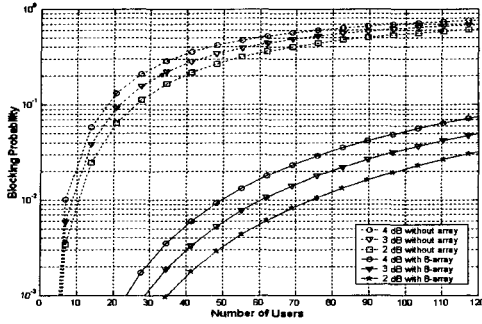


그림 8. 요구되는 E_b/N_o 와 배열 안테나 적용에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수(SNR=20 dB, PCE =2 dB)

Fig. 8. Blocking probability versus number of users according to the required E_b/N_o and using array antenna (SNR=20 dB, PCE=2 dB).

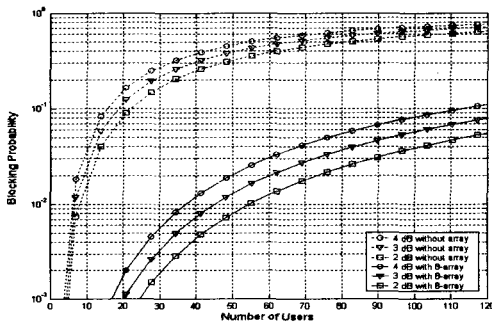


그림 9. 요구되는 E_b/N_o 와 배열 안테나 적용에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수(SNR=20 dB, PCE =3 dB)

Fig. 9. Blocking probability versus number of users according to the required E_b/N_o and using array antenna (SNR=20 dB, PCE=3 dB).

그림 8과 9는 전력제어 오차 2 dB와 3 dB에서 배열 안테나를 적용하지 않은 cdma2000 시스템과 8개의 배열 안테나를 적용한 cdma2000 시스템의 요구되는 E_b/N_o 에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수를 나타낸다. 8개의 배열 안테나를 적용한 cdma2000 시스템에서 전력제어 오차 2 dB, 블록킹 확률 1%를 가정하고 요구되는 $E_b/N_o=4, 3, 2$ dB로 변환 때, 사용자 수는 각각 50, 60, 75명으로 나타났고 전력제어 오차 3 dB에서는 각각 37, 45, 55명으로 나타났다. 배열 안테나를 적용하지 않은 시스템에서는 전력제어 오차 2 dB, 3 dB, 두 경우 모두에서 11명 이

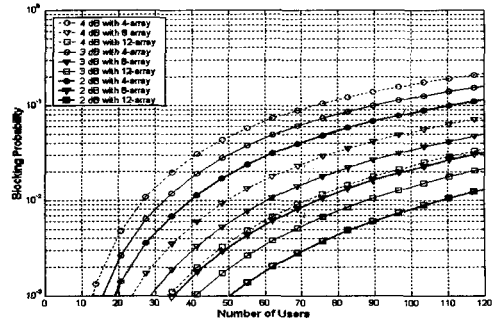


그림 10. 요구되는 E_b/N_o 와 배열 안테나 수에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수(SNR=20 dB, PCE =2 dB)

Fig. 10. Blocking probability versus number of users according to the required E_b/N_o and number of array (SNR=20 dB, PCE=2 dB).

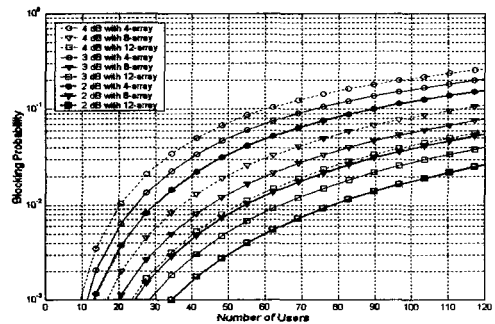


그림 11. 요구되는 E_b/N_o 와 배열 안테나 수에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수(SNR=20 dB, PCE =3 dB)

Fig. 11. Blocking probability versus number of users according to the required E_b/N_o and number of array (SNR=20 dB, PCE=3 dB).

하의 사용자 수를 보였다. 그림 8과 9로부터 적응 배열 안테나를 cdma2000 셀룰러 시스템의 기지국에 적용할 경우, 큰 폭의 시스템 용량 증가를 확인할 수 있고, 또한 요구되는 E_b/N_o 가 감소할수록 시스템 용량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

그림 10과 11은 요구되는 E_b/N_o 와 배열 안테나 수에 따른 cdma2000 시스템의 블록킹 확률 대 사용자 수를 나타낸다. 요구되는 $E_b/N_o=2$ dB, 전력제어 오차 2 dB, 블록킹 확률 1%에서 12개의 배열 안테나를 적용한 경우, 사용자 수는 108명으로 가장 많은 시스템 용량을 보였고, 같은 조건에서 전력제어

오차를 3 dB로 증가시킬 경우, 사용자 수는 78명으로 30명의 시스템 용량 감소를 보였다. 각각의 요구되는 E_b/N_0 에서 배열 안테나 수를 4, 8, 12개로 변화시킬 경우, 사용자 수의 증가는 약 1.8배와 약 1.4배로 나타났다. 그리고 동일한 배열 안테나 수를 가정하고 요구되는 E_b/N_0 를 4, 3, 2 dB로 감소시키면 사용자 수의 증가는 1.2~1.6배로 나타났다. 또한 동일한 배열 안테나 수와 요구되는 E_b/N_0 를 가정하고 전력제어 오차를 2 dB에서 3 dB로 증가시키면, 1.3~1.7배의 사용자 수 증가를 확인할 수 있다. 그림 10과 11의 결과를 표 1에 정리하였다.

V. 결론

적응 배열 안테나를 위한 알고리즘의 하나인 MCGM 알고리즘을 적용한 cdma2000 셀룰러 시스템의 전력제어 오차, 블록킹 확률 그리고 E_b/N_0 에 따른 성능을 분석하였다. 셀 내에 K명의 사용자가 분포하고 각 사용자의 신호 출력이 독립적으로 로그노말 분포한다고 가정하였으며, 다중 셀 간섭을 고려하기 위하여 단일 셀과 다중 셀 다중접속 간섭을 각각 로그노말 분포로 가정하고 새로운 확률 변수의 합인 z로 유도하여 평균과 분산을 계산하였다. 계산된 다중접속 간섭량, 비트 에너지 대 잡음 스펙트럼 밀도 비(E_b/N_0) 그리고 배열 안테나 파라미터를 사용하여 블록킹 확률에 대한 표현식을 유도하였으며 전력제어 오차와 다중접속 간섭을 모두 고려한 시스템의 성능을 분석하였다.

1개의 전방향성 안테나를 사용하는 경우보다는 적응 배열 안테나 8개를 사용하였을 경우, 전력제어 오차가 2 dB일 때, 요구되는 E_b/N_0 의 변화에 따라 6.7~8.3배의 시스템 용량 증가를 확인하였고, 전력제어 오차 3 dB에서는 5.6~6.8배의 시스템 용량 증가를 확인할 수 있었다. 따라서 cdma2000 셀룰러

시스템에 적응 배열 안테나를 적용할 경우, 큰 폭의 시스템 용량 증가의 효과를 볼 수 있고, 전력제어 오차에 따른 시스템 용량의 변화가 크다는 것을 알 수 있었다.

배열 안테나를 2개를 사용한 경우보다 12개를 사용한 경우, 전력제어 오차 2 dB에서 5.6배, 전력제어 오차 3 dB에서 5배의 시스템 용량 증가를 보여 시스템 용량은 사용된 배열 안테나 수에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 적응 배열 안테나를 IS-95 시스템과 cdma2000 시스템에 적용하여 시스템 용량을 비교하면, 전력제어 오차 2 dB와 3 dB에서 cdma2000 시스템이 2.3~2.5배 더 많은 용량 증가를 보여, 시스템 용량 측면에서 IS-95 시스템 보다 우수한 성능을 보였다. 또한 cdma2000 시스템의 용량은 요구되는 E_b/N_0 의 변화에 따라 1.2~1.6배의 증가를 보였고, 전력제어 오차에 따라서는 1.3~1.7배의 증가를 보였으며, 배열 안테나 수에 따라서는 1.4~1.8배의 증가를 보였다.

향후, 다중경로 채널 환경 하에서 기지국 배열 안테나를 적용한 IMT-2000 비동기 방식인 W-CDMA 시스템의 성능을 분석할 예정이며 본 연구 결과를 기지국 배열 안테나를 적용한 cdma2000 셀룰러 시스템 설치 시, 전파 음영과 다중접속 간섭을 고려한 시스템 용량 계산에 이론적인 근거로 사용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] F. Adachi, M. Sawahashi and H. Suda, "Wide-band DS-CDMA door next generation mobile communications systems", *IEEE Communications Magazine*, pp. 56-69, Sep. 1998.
- [2] J. C. Liberti, T. S. Rappaport, *Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third generation CDMA applications*, Prentice Hall, 1999.

표 1. 요구되는 E_b/N_0 와 배열 안테나 수에 따른 사용자 수

Table 1. The number of users according to the required E_b/N_0 and number of array.

$(E_b/N_0)_{required}$	PCE=2 dB Blocking Probability=1 %									PCE=3 dB Blocking Probability=1 %								
	4 dB			3 dB			2 dB			4 dB			3 dB			2 dB		
	number of array	4	8	12	4	8	12	4	8	12	4	8	12	4	8	12	4	8
number of users	27	50	71	42	60	88	52	74	108	20	37	50	25	45	64	30	55	78

- [3] 3GPP2, "Physical Layer standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems", Release A, May 29, 2002.
- [4] A. Tarighat, B. Daneshrad, "Performance analysis of different algorithms cdma2000 antenna array system and a new multi user beamforming (MUB) algorithm", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 409-411, 2000.
- [5] M. G. Jansen, R. Prasad, "Capacity, throughput, and delay analysis of a cellular DS-CDMA system with imperfect power control and imperfect sectorization", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 67-75, Feb. 1995.
- [6] S. Choi, D. Yun, "Design of an adaptive antenna array for tracking the source of maximum power and its applications to CDMA mobile communication", *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 45, no. 9, pp. 1393-1404, Sep. 1997.
- [7] J. E. Miller, S. L. Miller, "DS-CDMA reverse link performance with a smart antenna array, fading and imperfect power control", *IEEE 47th Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 622-626, May 1997.
- [8] M. B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread spectrum multiple access communication-part I: system analysis", *IEEE Trans. on Communications*, vol. COM-25, no. 8, pp. 795-799, Aug. 1977.
- [9] C. L. Ho, "Calculating the mean and variance of power sums with two log-normal components", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 4, pp. 756-762, Nov. 1995.

박 중 용



1998년: 충북대학교 과학교육과 물리전공 (이학사)
 2000년~2003년: 충북대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 디지털 이동통신, 스마트 안테나 시스템

한 태 영



1981년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년: 금성 반도체(주)
 1988년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년: 한국이동통신(주)
 1999년: 주성대학 조교수

2002년~현재: 충북대학교 정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 이동통신, 적응제어

김 향 래



1995년: 청주대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년: 청주대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년~1997년: 한국전자통신연구원 위촉연구원
 1999년~2003년: 충북대학교 정보

통신공학과 (공학박사)

1999년 3월~현재: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소
 [주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선시스템

김 남



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

방문교수

2002년~2001년: 미 California Technology Institute(Caltech) 방문교수

1989년~현재: 충북대학교 정보통신공학과 교수
 [주 관심분야] 디지털 이동통신, 무선시스템, 전자파 해석, EMI/EMC, Diffractive Optics, WDM Optical Filter & DEMUX Optical Memory, Holography Application