

# 전파음영 환경에서 적응 어레이 안테나를 적용한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 성능 분석

김형채, 김항래, 김남  
충북대학교 정보통신공학과

## The Performance Analysis of a DS/CDMA Cellular System using an Adaptive Array Antenna in Shadowing

Hyoung Chae Kim, Hang Rae Kim, Nam Kim  
Dept. of Computer & Communication Eng., Chungbuk National Univ.  
e-mail: kimhc@osp.chungbuk.ac.kr,

### Abstract

In this paper, the reverse link performance of an imperfect power controlled DS/CDMA cellular system that uses a base station array antenna which can effectively remove the multiple access interference is analyzed considering both beam forming algorithm and power control error in shadowing. The blocking probability of the DS/CDMA cellular system based on array parameters,  $E_b/N_o$  and statistics of interference is derived, and then the system capacity corresponding to a certain blocking probability is calculated. On the assumption that the blocking probability is set 1 %, the system capacity using MCGM algorithm with 12 antenna arrays is increased about 59 % than that using 8 antenna arrays when power control error is 2.5 dB.

### I. 서 론

향후 서비스 예정인 IMT-2000(international mobile telecommunications-2000) 시스템에서는 음성 및 데이터 서비스의 질이나 속도, 용량면에서 현재의 DS/CDMA(direct sequence code division multiple access) 시스템보다 우수한 성능을 제공하여야 한다. 따라서, 제한된 주파수 영역을 가지는 무선 통신 시스템에서 보다 우수한 스펙트럼 효율을 제공하는 문제가 관심의 대상이 되고 있다.

DS/CDMA 시스템에서 시스템의 용량을 증대시키고 통화 품질을 향상시키기 위해서는 다중경로 페이딩(Multipath fading)에 의한 자기 간섭신호(ICI ; interchip interference)와 다중사용자 신호에 의한 간섭

신호(MAI ; multiple access interference)를 제거시켜 주어야 한다. 일반적으로, ICI를 줄이기 위해서는 RAKE 수신기를 사용하고 있고 MAI를 줄이기 위해서는 다중사용자 검파(multiuser detection)와 적응 어레이 안테나(adaptive array antenna)에 대한 방법들이 제안되고 있으며 이에 대한 연구가 진행되고 있다[1][2].

현재 DS/CDMA 셀룰라 시스템에서, 모든 이동국은 역방향 링크에서 통화 채널을 유지하기 위한 최소 전력만을 송신하도록 해당 기지국에 의해 제어된다. 그러나, 불안정한 무선채널로 인해 완벽한 전력 제어는 불가능하기 때문에 전력 제어 오차(PCE ; power control error)가 발생하게 되며 이동국으로부터 기지국으로 수신된 신호 전력은 로그노말(log-normal) 분포를 하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 전파음영 환경을 가정하여 적응 어레이 안테나와 전력 제어 오차를 고려한 DS/CDMA 셀룰라 시스템의 역방향 링크에 대한 성능을 해석적으로 분석한다.

### II. MCGM 알고리즘(Modified Conjugate Gradient Method Algorithm)

MCGM 알고리즘은 희망 사용자의 신호 출력이 간섭 사용자의 신호 출력보다 월등히 크다고 가정할 때, 수신된 신호들의 자기 상관 행렬(auto correlation matrix)의 최대 고유치(maximum eigenvalue)에 해당하는 고유벡터(eigenvector)들은 희망 사용자의 방향 벡터와 거의 일치하게 되며 이를 안테나 각 소자들에 대한 가중 계수 벡터로서 이용하고 추정된 가중계수를 이용하여 희망 사용자의 방향으로 주빔(main beam)을 구동하는 방식이다[1].

서로 다른  $K$ 개의 신호가 반파장의 간격을 두고 선형적으로 나열되어 있는  $M$ 개의 어레이 안테나에 수신되는 구조를 그림 1에 나타내었다.

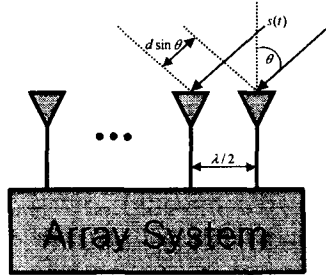


그림 1. 어레이 안테나의 수신 구조

$k$ 번째 사용자의 신호가 입사되는 각도를  $\theta_k$ 라고 가정하면  $m (1, 2, \dots, M)$ 번째 어레이 안테나에 입력되는 신호는 기준 안테나 신호와  $(m-1)\pi \sin \theta_k$  만큼의 위상차가 발생하게 된다. 따라서  $m$ 번째 어레이 안테나에 수신되는 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

식 (1)에서,  $s_k(t)$ 는  $k$ 번째 신호원으로부터 전송된 신호가 기준 안테나에서 수신된 값이고  $n_m(t)$ 는  $m$ 번째 안테나에 더해지는 잡음을 나타내며 적용 어레이 안테나에 사용된 소자들은 전 방향에 대해서 동일한 이득을 주는 등방성 안테나인 것으로 가정하였다.

수신된 신호들에 대한 자기 상관 행렬의 최대 고유치에 해당하는 고유벡터로 어레이 응답 벡터를 정의하면 어레이 안테나 출력 신호에 가해지는 어레이 응답 벡터는 다음과 같다[1].

$$a(\theta_k) = [1 \ e^{-j\pi \sin \theta_k} \ \dots \ e^{-j\pi(M-1)\sin \theta_k}]^T \quad (2)$$

여기서  $T$ 는 전치(transpose)를 나타내며  $M$ 은 어레이 안테나 수이다.

AWGM 환경에서, 어레이 출력  $y$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y = w^H s_1 a(\theta_1) + \sum_{k=2}^K w^H s_k a(\theta_k) + w^H n = s_1 + \frac{1}{M} \sum_{k=2}^K s_k a(\theta_1) a(\theta_k) + \frac{1}{M} a(\theta_1) n \quad (3)$$

식 (3)에서, 가중계수  $w$ 를 근사화된 복소 가중치 값  $a(\theta_1)/M$ 으로 대체하였고  $s$ 는 데이터 심볼이며  $n$ 은 복소 잡음 벡터이다. 첫 번째 항은 희망 신호에 대한 것이며 두 번째 항은 셀 내에서 희망 사용자를 제외한 다중 접속 사용자에 대한 것이다. 식 (3)으로부터, 1번째 희망 사용자의 신호와 잡음에 대한 어레이 안테나의 출력  $SNR_o^{(1)}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다[1].

$$SNR_o^{(1)} = \frac{E[|s_1|^2]}{E\left[\left|\frac{1}{M} a^H(\theta_1) n\right|^2\right]} = M \frac{E[|s_1|^2]}{\sigma_n^2} = M \cdot SNR_i^{(1)} \quad (4)$$

여기서  $SNR_i^{(1)}$ 은 어레이 안테나에 입력되는 1번째 사용자의 신호 대 잡음 전력비이고  $M$ 은 어레이 안테나 수이다. 식 (4)에서 출력  $SNR_o^{(1)}$ 은 어레이 안테나 수 ( $M$ )만큼 증가한다는 것을 알 수 있다. 식 (3)으로부터, 1번째 희망 사용자의 신호와 간섭 신호에 대한 어레이의 출력 신호 대 간섭 전력비  $SIR_o^{(1)}$ 는 다음과 같다 [1].

$$SIR_o^{(1)} = \frac{E[|s_1|^2]}{\sum_{k=2}^K \left[ \frac{1}{M^2} |a^H(\theta_1) a(\theta_k)|^2 E[|s_k|^2] \right]} = \frac{E[|s_1|^2]}{\sum_{k=2}^K G_k(\theta_1, \theta_k) E[|s_k|^2]} = \frac{1}{G_A^{(b)}(\theta_1)} \cdot SIR_i^{(1)} \quad (5)$$

식 (5)에서,  $G_k(\theta_1, \theta_k)$ 는 다중접속 사용자에 대한 어레이 안테나 이득이고  $G_A^{(b)}(\theta_1)$ 는 다중접속 사용자에 대한 평균 어레이 안테나 이득이며 각각 다음과 같다.

$$G_k(\theta_1, \theta_k) = \frac{1}{M^2} |a^H(\theta_1) a(\theta_k)|^2 \quad (6)$$

$$G_A^{(b)}(\theta_1) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} G_k(\theta_1, \theta_k) d\theta_k \quad (7)$$

식 (6)에서,  $G_k(\theta_1, \theta_k)$ 은  $\theta_1 = \theta_k$ 을 제외하고는 항상 1보다 작으며  $a(\theta_1)$ 과  $a(\theta_k)$ 가 서로 직교성(orthogonal)을 가진다면 어레이 안테나 출력에서 간섭 신호들은 완전히 제거될 수 있다.

### III. DS/CDMA 시스템의 블로킹 확률

셀내에  $K$ 명의 사용자가 존재하고, 각 사용자의 신호 출력이 독립적으로 로그노말 분포를 한다고 가정하면  $m$ 번째 어레이 안테나의 복소 기저대역 출력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Y(t) = A \sum_{k=1}^K 10^{\frac{\alpha_k}{10}} c_k(t - \tau_k) b_k(t - \tau_k) U_k + \sum_{\substack{\text{Other cells} \\ k=2}}^{\text{cells}} \sum_{k=1}^K A_{r,k} 10^{\frac{\alpha_{r,k}}{10}} \left( \frac{10^{\frac{\alpha_{r,k}}{10}}}{r_{r,k}^{\alpha_{r,k}}} \right) c_{r,k}(t - \tau_{r,k}) b_{r,k}(t - \tau_{r,k}) U_{r,k} + n(t) \quad (8)$$

위 식에서, 첫 번째 항은 단일셀의 다중접속 사용자를 나타내고 두 번째 항은 다중셀의 다중접속 간섭 사용자를 나타내며 마지막 항은 잡음을 나타낸다.  $\tau_x$ 는 비트 상에 균일하게 분포된 랜덤 시간 지연이며  $b_x$ 와  $c_x$ 는 각각 데이터 심볼과 의사 잡음 수열이다.  $U_x$ 는 신호의 위상에 대한 정보를 나타내는 벡터이고  $A$ 는 신호의 입력 진폭이다.  $n(t)$ 는 부가성 백색 가우시안 잡음의 출력 벡터( $N(0, \sigma_n^2)$ ) 이고  $10^{\alpha_x/10}$ 는 사용자의 전력 제

어 오차를 나타내며  $x_x$ 는  $N(0, \sigma_{pce, dB}^2)$ 이다.  $10^{x_x/10}$ 은 표준 편차가 8 dB인 로그노말 분포를 하는 전파음영( $N(0, 64)$ )이고  $1/r_{k,i}^A$ 는 단일셀 기지국과  $k$ 번째 간섭 사용자 사이의 거리에 따른 전파 손실이며 전파음영과 전력 제어 오차는 경로에 따라 독립적인 것으로 가정하였다.

본 논문에서는 다중셀 간섭을 고려하기 위해, 전력 제어 오차가 0 dB 일 때 간섭 계수가 0.57인 경우를 가정하였으며([3]), 어레이 출력은 가우시안으로 근사화하였다. 사용자 1을 희망 사용자라고 가정하면 비트 에너지 대 잡음 스펙트럼 밀도 비 ( $E_b/N_o$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \frac{L_c \cdot SNR_o^{(1)}}{\frac{1}{3L_c^2} \sum_{k=2}^K SNR_o^{(k)} \cdot r_{k,i} + 1} \quad (9)$$

여기서  $SNR_o^{(k)}$ 는  $k$ 번째 입력 신호에 대한 어레이 출력  $SNR$ 이고  $r_{k,i}$ 는  $i$ 번째와  $k$ 번째 의사 잡음 수열간의 상호 상관 함수로부터 유도된 값이며  $(E_b/N_o) \approx (T_b/T_c)SNR = L_c \cdot SNR$ 이다. 또한  $T_b, T_c$ 는 전송 데이터 주기와 칩 주기를 나타내는 것으로 처리 이득 ( $PG$ ; processing gain)은  $PG = T_b/T_c$ 로 나타낼 수 있으며  $L_c$ 는 의사 잡음 수열의 길이이다.

식 (14)에 사용된  $r_{k,i}$ 값을 유도하기 위해서, 상호 상관 함수와 상호 상관 파라미터를 다음의 식 (10)과 식 (11)과 같이 정의하면([5]),

$$C_{k,i}(l) = \begin{cases} \sum_{r=0}^{L-1-l} a_r^{(k)} [a_{r+l}^{(i)}], & 0 \leq l \leq L-1 \\ \sum_{r=0}^{L-1-l} a_r^{(k)} [a_r^{(i)}], & 1-L \leq l < 0 \\ 0, & |l| \geq L \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{k,i}(n) = \sum_{l=-L}^{L-1} C_{k,i}(l) C_{k,i}(l+L) \quad (11)$$

$i$  번째 확산 수열과  $k$ 번째 확산 수열간의 상호 상관값  $r_{k,i}$ 는 식 (10)과 (11)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다[5].

$$r_{k,i} = 2\mu_{k,i}(0) + \mu_{k,i}(1) \quad (12)$$

식 (12)를 식 (9)에 대입하여 정리하면  $(E_b/N_o)$  다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \frac{L_c SNR_o^{(1)}}{\frac{2}{3} \sum_{k=2}^K SNR_o^{(k)} + 1} \quad (13)$$

식 (13)에서, 분모는 셀 내에서 희망 사용자에 대한 것이고 분자는 희망 사용자를 제외한 다중접속 사용자에 대한 것이다.  $k$ 번째 사용자의 어레이 출력  $SNR_o^{(k)}$ 는 평균 어레이 이득 ( $G_A^{(k)}$ )에 대한 식으로 다음과 같이 표

현할 수 있다.

$$SNR_o^{(k)} = 10^{x_x/10} G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} \quad (14)$$

어레이 이득과 전력 제어 오차가 상호 독립적이고 사용자의 신호 전력이 로그노말 분포를 한다고 가정하면 식 (13)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{E_b}{N_o}\right) = \frac{L_c G_A^{(1)} SNR_i^{(1)} 10^{x_x/10}}{\frac{2}{3}(K-1)SNR_i^{(k)} G_A^{(k)} 10^{x_x/10} + 1} \quad (15)$$

여기서  $G_A^{(1)}$ 은 희망 사용자에 대한 어레이 이득이고  $G_A^{(k)}$ 는 간섭 사용자에 대한 평균 어레이 이득이며  $10^{x_x/10}$ 은 전력 제어 오차이다. 간섭 신호의 방향으로 어레이 이득이 일정하다면 식 (15)에서의 다중접속 간섭은 다음과 같이 근사화 할 수 있다[6].

$$\frac{2}{3} G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} [I_{MA}] = \sum_{k=2}^K 10^{\frac{x_x}{10}} + F \sum_{k=1}^K 10^{\frac{x_x}{10}} + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} \quad (16)$$

식 (16)의 첫 번째 항은 단일셀의 다중접속 간섭에 대한 것이고 두 번째 항은 외부 셀의 다중접속 간섭에 대한 것이고  $2/3$ 은 의사 잡음 수열간의 상호 상관 함수로부터 유도된 값이다.  $F$ 는 다중셀 간섭 계수이며 다중접속 간섭을 근사화 함에 있어서 다중셀 간섭을 식 (16)과 같이 단일셀 간섭으로 정규화 하였다.

단일셀 간섭과 다중셀 간섭을 각각 로그노말 분포로 가정하면, 다중접속 간섭  $I_{MA}$ 는 로그노말 랜덤 변수들의 합이므로  $I_{MA}$ 의 1차 모멘트와 2차 모멘트는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E[I_{MA}] &= (K-1) \exp(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2) \\ &\quad + F \cdot K \cdot \exp(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2) + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} \\ E[I_{MA}^2] &= E\left[\left(\sum_{k=2}^K \exp(\beta x_k) + F \sum_{k=1}^K \exp(\beta y_k) + \frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}}\right)^2\right] \\ &= (K-1) \exp(2\beta m_x + 2 \beta^2 \sigma_x^2) + (K-1)(K-2) \exp(2\beta m_x + \beta^2 \sigma_x^2) \\ &\quad + F^2 (K \cdot \exp(2\beta m_y + 2 \beta^2 \sigma_y^2) + K(K-1) \exp(2\beta m_y + \beta^2 \sigma_y^2)) \\ &\quad + 2F \cdot K(K-1) \exp(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2) \exp(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2) \\ &\quad + \left(\frac{3}{2G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}}\right)^2 + \frac{3}{G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} (K-1) \exp(\beta m_x + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_x^2) \\ &\quad + \frac{3F}{G_A^{(k)} SNR_i^{(k)}} K \cdot \exp(\beta m_y + \frac{1}{2} \beta^2 \sigma_y^2) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서  $\beta = \ln(10)/10$ 이고 랜덤 변수  $x$ 와  $y$ 는 각각  $N(0, \sigma_x^2)$ 과  $N(0, \sigma_y^2)$ 인 분포로 가정하면, 랜덤 변수  $x$ 와  $y$ 의 합인 새로운 랜덤 변수  $z$ 의 평균과 분산은 다음과 같이 표현할 수 있다[7].

$$\begin{aligned} m_z &= 2 \ln(E[I_{MA}]) - \frac{1}{2} \ln(E[I_{MA}^2]) \\ \sigma_z^2 &= \ln(E[I_{MA}^2]) - 2 \ln(E[I_{MA}]) \end{aligned} \quad (18)$$

그러므로, 다중접속 간섭  $I_{MA}$ 에 대하여  $(E_b/N_o)$ 는 다음

과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_o}\right) &= \frac{L_c G_A^{(1)} SNR_i^{(k)} 10^{\frac{x_i}{10}}}{\frac{2}{3} G_A^{(k)} SNR_i^{(k)} [I_{MA}]} \\ &= \frac{3}{2} L_c \frac{G_A^{(1)}}{G_A^{(k)}} 10^{\frac{x_i - 10 \log_{10}(\exp(1))z}{10}} \end{aligned} \quad (19)$$

따라서, 블록킹 확률에 대한 표현식은 사용자 수 및 어레이 안테나 수에 대한 함수로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_B \left( \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{dB} < \xi_{dB} \right) = Q \left( \frac{10 \log \left( \frac{3}{2} L_c \frac{G_A^{(1)}}{G_A^{(k)}} \right) - 10 \log(\exp(1))m_z - \xi_{dB}}{\sqrt{\sigma_z^2 + 100 \log^2(\exp(1))\sigma_z^2}} \right) \quad (20)$$

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

#### IV. 성능 분석

분석에 사용된 파라미터들은 입력 SNR=15 dB, 처리 이득 PG=21 dB, 어레이 수는 8, 12개, 전력 제어 오차는 2.5, 4 dB이다.

그림 1은 다중셀 간섭을 고려한 경우, 블록킹 확률에 따른 사용자 수를 나타낸 것으로 8, 12개의 어레이 안테나를 사용하여 나타낸 것이다. 블록킹 확률이 1%인 경우, 8개의 어레이 안테나를 사용한 경우 전력 제어 오차가 2.5 dB와 4 dB일 때 시스템 용량은 각각 27명과 15명이었다. 반면에 12개의 어레이 안테나를 사용한 경우에는 오차가 2.5 dB와 4 dB일 때 시스템 용량은 각각 43명과 21명으로 어레이 안테나 수가 증가할수록 시스템 용량도 증가함을 알 수 있다.

그림 2는 요구되는  $E_b/N_o$ 에 따른 블록킹 확률 대 사용자 수를 나타낸 것으로 어레이 안테나 수는 8개로 고정하였으며 요구되는  $E_b/N_o$ 가 작아짐에 따라 시스템 용량도 증가함을 알 수 있다.

#### V. 결론

다중접속 간섭을 효과적으로 제거할 수 있는 적응 어레이 안테나를 DS/CDMA 셀룰라 시스템에 적용하였을 경우, 전파음영 환경하에서 전력 제어 오차에 따른 시스템 성능을 분석하였다. 1% 블록킹 확률을 가정한 경우에, 어레이 안테나 수가 8개에서 12개로 증가하고 전력제어오차가 각각 2.5 dB와 4 dB일 때 사용자 수는 각각 59%와 50%가 증가하였으며 전력제어오차가 2.5 dB인 경우에 요구되는  $E_b/N_o$ 가 작아질수록(7, 6, 5 dB) 시스템 용량은 14, 17, 21명으로 증가함을 알 수 있었다. 향후, 다중경로 채널 환경하에서 기지국 어레이 안테나를 적용한 DS/CDMA 시스템의 성능을 분석할 예정이다.

#### 참 고 논 문

- [1] S. Choi and D. Yun, "Design of an adaptive antenna array for tracking the source of maximum power and its applications to CDMA mobile communications," *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 45, no. 9, pp. 1393-1404, Sep. 1997.
- [2] R. Lupas and S. Verdu, "Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 35, no. 1, pp. 123-136, Jan. 1989.
- [3] D. D. Lee, D. H. Kim, Y. J. Chung, H. G. Kim, and K. C. Whang, "Other-cell interference with power control in macro/microcell CDMA networks," *IEEE 46th Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 1120-1124, April/May 1996.
- [4] J. E. Miller and S. L. Miller, "DS-SS 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.
- [5] 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, August 1977.
- [6] 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, November 1995.
- [7] R. Padovani, "Reverse link performance of IS-95 based cellular systems," *IEEE Papers. Comm. Mag.*, vol. 1, pp. 28-34, 3rd quarter, 1994.

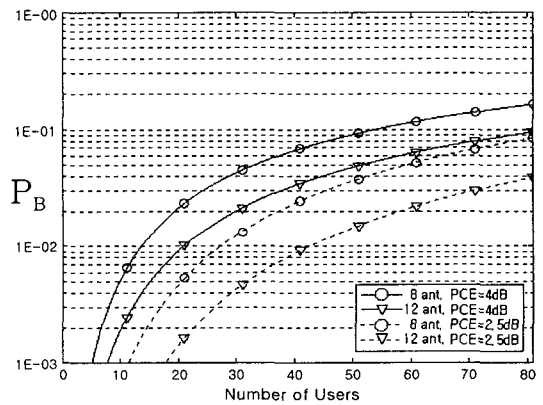


그림 1. 전력제어오차와 어레이 안테나 수에 따른 사용자 수.

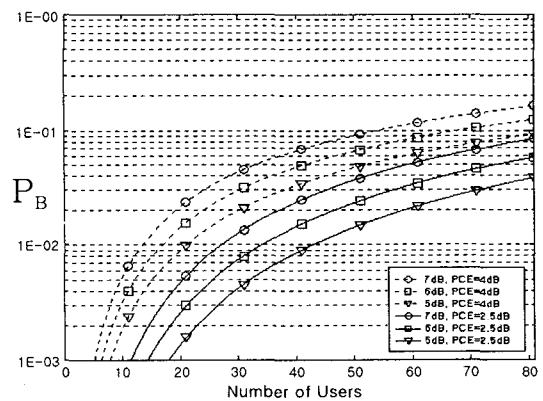


그림 2. 요구되는  $E_b/N_o$ 에 따른 사용자 수(N=8).