
스마트 안테나를 적용한 MC-CDMA 시스템의 성능 분석

이종길*

Performance analysis of MC-CDMA Mobile Communication
Systems with Smart Antennas

Jong Gil Lee*

본 연구는 한국과학재단 지정 인천대학교 멀티미디어 연구센터의 지원으로 수행되었음

요 약

무선망을 통한 개인별 고속 멀티미디어 서비스의 필요성이 커짐에 따라 데이터 전송 속도의 고속화 및 많은 가입자의 수용이 요구되고 있다. 따라서 앞으로 이와 같은 멀티미디어 서비스용 이동 통신 시스템의 구현을 위해서는 기지국에 스마트 안테나 기술을 적용하여야 할 것이다. 그러므로 본 논문에서는 MC-CDMA(Multi-Carrier Code Division Multiple Access)와 DS-CDMA(Direct Sequence) 방식에 스마트 안테나를 적용한 시스템의 BER 성능을 비교 분석하였다. 적응 빔 형성(Adaptive Beamforming) 기법 및 신호 스펙트럼 대역폭에 따른 MC-CDMA와 DS-CDMA의 특성을 주파수 선택적 Rayleigh 페이딩에서의 역 방향 링크 채널을 가정하여 모의 실험 하였다. 스마트 안테나의 빔 폭을 적게 할수록 전체적으로 BER 성능이 향상됨을 알 수 있었고 MC-CDMA 시스템의 경우 사용자 수가 급격히 증가하더라도 DS-CDMA 에 비하여 BER 성능이 훨씬 우수함을 확인하였다.

ABSTRACT

Smart antennas will be used more widely for the higher data rate and the larger number of users as the demand of wireless multimedia service is increased. Therefore, the BER performance is analyzed in this paper for DS-CDMA and MC-CDMA systems using smart antennas. A reverse link channel is simulated assuming the frequency selective Rayleigh fading. The simulation results are presented based on the characteristics of DS-CDMA and MC-CDMA systems according to the signal spectrum bandwidth and the method of adaptive beamforming. The BER performances of both systems are improved as the beam width of smart antennas is decreased. Also, it is shown that the performance of MC-CDMA system is much better than that of DS-CDMA system as the number of users is increased.

키워드

스마트 안테나, MC-CDMA, BER, 적응빔 형성

1. 서 론

최근 무선 통신은 그 편리성 때문에 사용자 수가 급증하여 왔다. 이러한 이동 통신은 앞으로 음성, 화상 및 고속의 데이터 통신 등 멀티미디어 서비스를 제공하게 되면서 그 수요가 급속하게 증가할 것이다. 그러나 현재의 DS-CDMA 방식은 고속의 데이터 통신 서비스를 많은 사용자에게 제공하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 즉 다중 사용자 간섭으로 인하여 많은 사용자의 수용에 한계가 있고 무선채널의 특성인 다중경로로 인한 주파수 선택적 페이딩 때문에 심각한 열화현상이 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 문제점의 해결을 위해 제안된 방식이 MC-CDMA 기법이다 [1][2].

MC-CDMA 방식은 지연 확산 보다 훨씬 긴 심볼간 간격을 가지게끔 하기 위하여 N개의 협대역 부반송파를 이용하여 정보를 전송하므로 고속 데이터 전송 시 심볼간의 간섭을 없앨 수 있으며, 주파수 다이버시티 효과를 기대할 수 있다. 또한 이러한 시스템의 구현은 FFT (Fast Fourier Transform) 기법을 적용할 수 있으므로 비교적 고속으로 구현이 가능하다[2]. 그리고 스마트 안테나 시스템은 다수의 안테나 소자를 이용하여 각 안테나 소자로 수신되는 신호의 이득과 위상을 조절하여 다른 방향의 신호성분에 의한 간섭과 잡음을 최소화 시켜 원하는 방향의 사용자 신호를 최대로 하여 수신하는 시스템으로 무선 채널상태의 개선 및 많은 사용자를 동시에 수용할 수 있다는 장점을 가지고 있다[5].

그러므로 본 논문에서는 이러한 스마트 안테나를 적용한 시스템을 가정하여 다중경로 및 광대역 Rayleigh 페이딩 환경 하에서의 MC-CDMA 방식과 DS-CDMA 방식을 비교 분석함으로써 사용자의 수 및 시스템 구성에 따른 성능의 변화정도를 고찰하였다.

II. 시스템 모델

1. DS-CDMA 모델

이러한 방식은 원래의 데이터 신호를 확산 코드를 이용하여 주파수 영역에서 확산시킨다. 이러한 확산 코드의 상호상관(cross-correlation) 특성을 이용하여

다른 사용자에 의한 간섭을 억제할 수 있다. 또한 주파수 선택적 페이딩 채널에서 다중경로에 의한 신호는 시간영역에서 서로 다른 지연시간을 가지게 되어 심볼간 간섭이 발생하는데 이러한 간섭의 제거에는 확산 신호의 자기상관(auto-correlation) 특성을 활용하게 된다. BPSK 동기식 검파 방법을 채택한 DS-CDMA 방식의 수신기를 그림 1에 도시하였다. 여기서 $c_m(t)$ 는 m번째 사용자의 확산 코드이고 K_{ds} 는 처리 이득이다[1].

2. MC-CDMA 모델

이러한 신호는 송신단에서 직교하는 N 개의 확산 코드를 쓰고 F/T_b Hz의 간격으로 부반송파를 배열하여 각 지로의 출력 값을 더해 전송하게 된다. j 번째 데이터 비트, m번째 사용자의 전송신호 $s_m(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$s_m(t) = \sum_{i=0}^{N-1} c_m[i] b_m[j] \times \cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t) p_{T_b}(t - j T_b) \quad (1)$$

여기서 $c_m[i] \in \{-1, 1\}$. (2)식에서

$c_m[0], c_m[1], \dots, c_m[N-1]$ 는 m번째 사용자의 확산 코드이다. 확산 코드는 Walsh Hadamard 코드를 사용하였다. 입력 심볼 $b_m[j]$ 는 m번째 사용자의 j 번째 심볼이고 -1과 1의 발생확률이 같다고 가정하였다. $p_{T_b}(t - j T_b)$ 는 $[0, T_b]$ 시간 사이에서 일정한 크기를 가지는 구형파로 한다. 각 부반송파는 F/T_b 만큼 떨어져 있고 F는 충분히 큰 임의의 정수이다. 상관 대역폭이 $\frac{1}{T_b} \ll BW_c \ll \frac{F}{T_b}$ 에 존재하는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 인접 심볼 사이의 간섭 및 도플러 주파수 천이 현상은 무시하였고 각 부반송파는 독립적이라고 가정한다. 역방향 링크 채널에서 각 부반송파에서는 flat 페이딩이 일어나므로 전달 함수는 다음과 같이 표시된다.

$$H_m \left[f_c + i \frac{F}{T_b} \right] = \rho_{m,i} e^{j\theta_{m,i}} \quad (2)$$

$\rho_{m,i}$ 와 $\theta_{m,i}$ 는 $f_c + i \frac{F}{T_b}$ 주파수에서 m번째

사용자, i 번째 부 반송파의 랜덤 신호 크기와 랜덤 위상이다. 랜덤신호의 크기는 Rayleigh 분포를 가지며 위상은 $[0, 2\pi]$ 에서 균일한 분포를 가지고 각각은 T_b 주기 동안에 일정한 값을 유지한다고 가정하였다. 따라서 m 번째 사용자의 i 번째 부 반송파의 신호의 평균 전력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{p_{m,i}} &= E \left[\rho_{m,i} \cos(2\pi i \frac{F}{T_b} t + \theta_{m,i}) \right]^2 \\ &= \frac{1}{2} E [\rho_{m,i}^2] \end{aligned} \quad (3)$$

모든 부 반송파의 평균 전력의 크기가 서로 같다면, 서로 독립적인 N 개의 부 반송파들의 합으로 표시되는 전체 전송 신호의 평균전력은 각 평균 전력의 합이 되므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{p_m} = N \cdot \overline{p_{m,i}}$$

3. 스마트 안테나

무선 채널 환경에서 수많은 사용자들이 기지국의 주변에 놓여 있게 되는데 어레이 안테나를 적용하면 기지국에서 여러 개의 안테나 소자를 이용하여 다른 방향의 사용자 신호를 최소화하면서 필요로 하는 사용자들의 신호가 최대가 되게끔 적응 빔 형성을 할 수 있다. K 개의 안테나 출력은 N 개의 부 반송파와 곱해지고 확산코드로 역 확산된다.

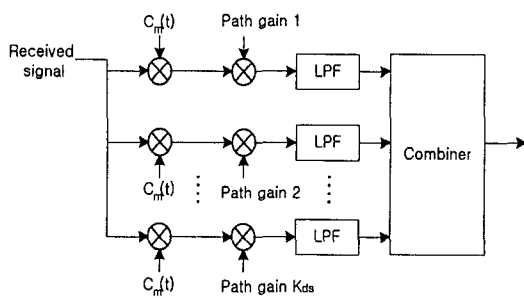


그림 1. DS-CDMA 시스템의 수신기 구조
Fig. 1 Structures of DS-CDMA system

III. 적응 빔 형성과 가중치 벡터 추정

전송 신호 $s_m(t)$ 가 채널을 거쳐 K 개의 안테나로

들어온 신호 $r(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r_{m,i,k}(t) &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{m,i} b_m[j] c_m[i] \\ &\times a_{m,i,k,l} \cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t) \end{aligned} \quad (4)$$

$r_{m,i,k}(t)$ 는 m 번째 사용자, i 번째 부 반송파, k 번째 안테나로 들어온 신호이다. $a_{m,i,k,l}$ 은 l 번째 경로로 들어온 신호의 어레이 응답이다.

$$\begin{aligned} a_{m,i,k,l} &= R_{m,l} \\ &\times \exp \left[-j \phi_{m,l} + j \frac{2\pi}{\lambda_i} d(k-1) \sin \theta_l \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$R_{m,l}$ 는 m 번째 사용자의 l 번째 경로로 들어오는 입력 신호의 전력이고 $\phi_{m,l}$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$\phi_{m,l} = 2\pi(f_d \cos \psi_l t - f_c \tau_l) \quad (6)$$

여기서 τ_l 은 l 번째 경로의 지연 시간, f_c 는 반송파 주파수, $f_d \cos \psi_l$ 은 도플러 천이, ψ_l 는 1번째 scatterer와 모빌 이동방향 이 이루는 각, f_d 는 최대 도플러 천이, λ_i 는 i 번째 반송파 주파수의 파장이다. θ_l 은 1번째 경로의 DOA(Direction of Arrival)이며 d 는 안테나 간격이다[4]. 최종적으로 K 개의 안테나에 수신된 신호벡터 $r(t)$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{m,i} c_m[i] b_m[j] \\ &\times a_m \cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t + \theta_{m,i}) + n(t) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $jT_b \leq t \leq (j+1)T_b$ 이며 $\rho_{m,i}$ 는 i 번째 부 반송파에서 m 번째 사용자와 기지국 사이의 Rayleigh 분포를 가지는 랜덤진폭, $\theta_{m,i}$ 는 $[0, 2\pi]$ 에서 균일한 분포를 갖는 랜덤 위상, $b_m[j]$ 는 m 번째 사용자의 j 번째 데이터 비트, $c_m[i]$ 은 확산코드, a_m 은 m 번째 사용자의 어레이 응답 벡터, f_c 는 반송파 주파수, F 는 부 반송파 주파수 사이의 간격, T_b 는 데이터 비트 주기이다. 수신된 신호는 다른 사용자에 의한 간섭신호 이외에 추가백색 잡음이 존재하며 이 잡음은 전력 스펙트럼 밀도 벡터 $n(t)$ 로 표시하였고 N_0 인 일정한 값을 가진다고 가정하였다. 원하는 사용자를 0번째 사용자로 하였을 경우 각 지로에 자기 자신의 직교 코드가

곱해지고 적분되어 $y(t)$ 를 얻게 된다.

$$y(t) = \frac{2}{T_b} \int_{jT_b}^{(j+1)T_b} r(t) \times \cos(2\pi f_c t + 2\pi i \frac{F}{T_b} t + \vartheta_{0,i}) dt \quad (8)$$

$\vartheta_{0,i}$ 는 i 번째 부 반송파에서의 위상 추정 값이다. 완전 위상 추정, 동기가 이루어 졌다면 출력 신호를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$y(t) = b_0[j] \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0,i} d_{0,i} a_0 + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} b_m[j] c_m[i] c_0[i] \rho_{m,i} d_{0,i} a_m \cos \vartheta_{m,i} + \eta \quad (9)$$

잡음 성분 η 는 수신된 AWGN으로 인한 값이고, $\vartheta_{m,i} = \theta_{0,i} - \theta_{m,i}$ 이며 $\vartheta_{m,i}$ 는 균일한 분포를 가진다. 어레이 응답벡터 a_m 은 안테나에 수신된 신호의 pre-correlation 과 수신부를 거친 후의 post-correlation 값으로부터 수신기의 요건에 맞는 고유벡터(eigenvector)를 얻어 구할 수 있다[4]. 식(8)에서 $y(t)$ 의 두 번째 항 MAI(multiple access interference) 성분과 세 번째 항 잡음 신호 성분은 백색 가우시안 랜덤 벡터로 근사화 되어 원하지 않는 신호 성분 합 correlation을 표시하는 R_{uu} 는 identity matrix 가 된다. 따라서 최적 빔 형성 계수 값은 $w_m = \xi a_m$ 과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 ξ 는 복소 상수이다.

IV. 사용자 신호 결정과 BER 성능 분석

안테나를 통해 수신된 신호는 수신단을 거쳐 빔 형성 계수를 곱해 최종적으로 얻고자 하는 신호를 검출해 낼 수 있게 된다. 즉, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_0 = w_0^* y = a_0^* y = b_0[j] \sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0,i} a_0^* a_0 + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} b_m[j] \times c_m[i] c_0[i] \rho_{m,i} a_0^* a_m \cos \vartheta_{m,i} + a_0^* \eta \quad (10)$$

v_0 의 첫 번째 항은 원하는 신호 성분이고 두 번째 항은 다른 사용자의 간섭 신호이고 세 번째 항은 잡음 성분이다. *는 Hermitian transpose 이다. 잡음 성분은 평균이 0이고 분산이 $\sigma_n^2 = N \frac{N_0}{T_b}$ 인 가우

시안 분포가 된다. 다른 사용자의 간섭 신호는 $b_m[j] c_m[i] c_0[i] \in \{-1, 1\}$ 로 표시되고 Rayleigh 랜덤 변수의 in-phase의 성분 $\rho_{m,i} \cos \vartheta_{m,i}$ 는 가우시안 랜덤변수가 되므로 MAI성분은 $(M-1) \times N$ 독립 랜덤변수의 합인 가우시안 분포가 된다[2]. MAI성분은 평균이 0이고 분산은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{MAI}^2 = (M-1) \bar{p}_m E[\|a_0^* a_m\|^2] \quad (11)$$

여기서 $\|a_0^* a_m\|^2$ 은 셀 내의 간섭신호 유무를 나타내는 Bernoulli 랜덤변수로 B 를 안테나의 유효 빔 폭이라고 하면 간섭 신호가 존재할 확률은 $\frac{B}{2\pi}$ 로 표시할 수 있다[5].

신호 판단시 오류가 발생하는 평균적인 확률은 비트 오류율로 표시되는데 간섭신호의 성분과 잡음성분이 서로 독립적인 가우시안 분포를 가지기 때문에 간섭 신호 성분과 잡음 신호 성분의 합의 평균은 0이고 분산은 각각의 분산의 합으로 구해지므로 오류확률을 구할 수 있다. 그런데 평균적인 오류 확률을 얻어내기 위해서는 순시 신호 크기 $\sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0,i}$ 는 평균적인 값으로 유도되어야 한다. Law of Large Number(LLN) 정리를 이용한 근사 방법을 적용하면 $\sum_{i=0}^{N-1} \rho_{0,i} \approx NE[\rho_{0,i}]$ 로 표시된다. Rayleigh 랜덤 변수의 평균과 제곱평균 값을 이용하여 다음과 같이 평균 오류 발생 확률을 얻어낼 수 있다.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\pi}{4} \frac{\bar{p}_0 T_b}{(M-1) \frac{\bar{p}_m T_b B}{N} + N_0}} \right) \quad (12)$$

V. 모의 실험

DS-CDMA 의 경우 동기화 채널에서 확산 코드의 자기상관특성이 우수한 Hadamard Walsh 코드를 사용하고 MC-CDMA 에서 최적 직교 코드를 사용한 시스템을 가정하였으며 각 파라미터는 다음과 같이 표시하였다.

- 심볼 전송율 : $R (=1/T_b)$ (bits/s), T_b : 데이터 심볼 주기

- 처리이득 (Processing Gain) : K_{ds} (DS-CDMA의 경우), K_{mc} (MC-CDMA의 경우)
- 부반송파의 수 : N

DS-CDMA의 대역폭 B_{ds} 는 전송율에 Nyquist 이론을 적용하여 확산 코드의 길이 만큼의 대역폭을 차지하는 $B_{ds} = 2RK_{ds}$ 와 같이 표시되고 MC-CDMA 대역폭은 $B_{mc} = RK_{mc}(N+1)/N$ 으로 표현할 수 있다. 이러한 내용을 바탕으로 본 논문에서는 셀당 사용자 수를 최대 200명으로 설정하고 E_b/N_0 를 10dB 및 20dB로 유효안테나 빔폭을 20도, 10도로 변화시키면서 MC-CDMA와 DS-CDMA의 BER 성능을 비교 분석하였다. 그 결과를 그림 2부터 그림 4까지 그래프로 표시하였다. 결과 그래프로 알 수 있는 것처럼 스마트 안테나의 빔 폭이 늘어남에 따라 간섭으로 작용하는 사용자 신호가 늘어나기 때문에 공통적으로 전반적인 성능의 저하가 일어남을 알 수 있다. 또한 사용자의 수가 증가함에 따라 두 시스템 모두 성능이 점점 나빠지는 것을 보여주고 있다. 그러나 MC-CDMA와 같이 다중 반송파를 사용할 경우 DS-CDMA에 스마트 안테나를 적용한 방식에 비하여 셀 당 사용자수가 많아져도 상대적으로 성능의 저하정도가 훨씬 적다는 것을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 스마트 안테나를 적용한 MC-CDMA와 DS-CDMA 이동 통신 시스템을 분석하였다. 기지국에서 완전 위상추정이 이루어졌다고 가정하고 역방향 링크에서의 BER을 유도하였는데 빔 폭을 변화시켜 살펴본 결과 빔 폭이 좁아짐에 따라 전체적으로 BER 성능이 향상되는 것을 알 수 있었다. 또한 사용자의 수가 증가함에 따라 간섭현상으로 인하여 두 시스템 모두 BER 값이 증가하였다. 그러나 MC-CDMA 시스템에 스마트 안테나를 쓴 경우 사용자 수가 증가하더라도 DS-CDMA 시스템에 비하여 BER 성능이 상당히 향상된다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 다중 반송파를 이용하는 MC-CDMA 시스템에 스마트 안테나를 적용하면 많은 가입자를 수용하면서도 광 대역을 요구하는 멀티미디어 서비스가 가능할 것으로 기대된다. 이러한 시스템은 특히 무선 채널에 의한 페이딩 및 심볼간의

간섭에 강인하기 때문에 갈수록 고속의 전송률이 요구되는 첨단 무선 멀티미디어 서비스에 매우 적합한 방식이 될 것이다.

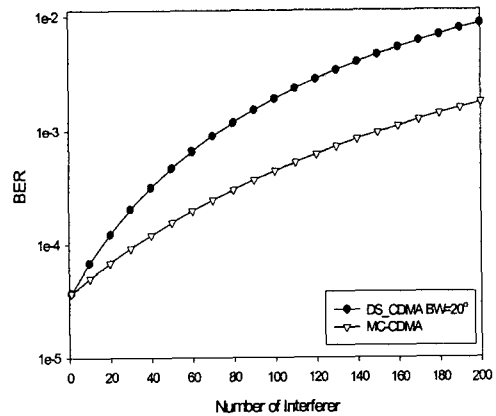


그림 2. 스마트 안테나를 적용한 시스템의 BER 분석 ($E_b/N_0=10\text{dB}$, beamwidth=20°)

Fig.2 BER analysis of smart antenna system

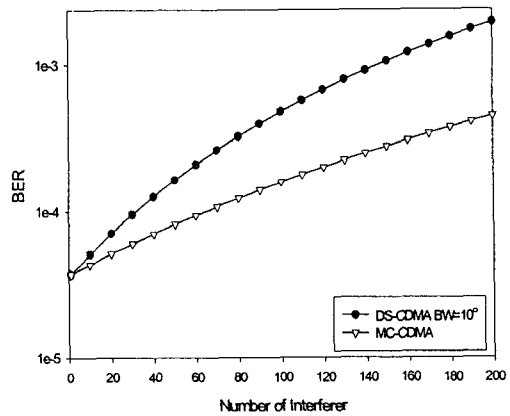


그림 3. 스마트 안테나를 적용한 시스템의 BER 분석 ($E_b/N_0=10\text{dB}$, beamwidth=10°)

Fig.3 BER analysis of smart antenna system

저자소개

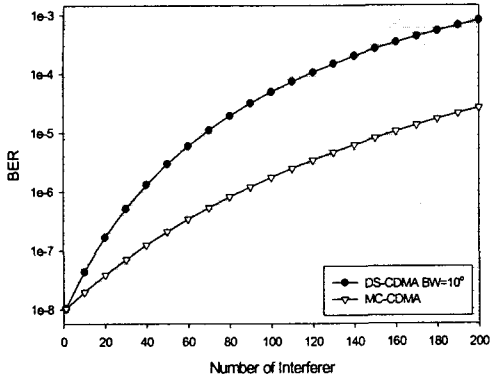


그림 4. 스마트 안테나를 적용한 시스템의 BER 분석
($E_b/N_0=20\text{dB}$, beamwidth=10°)

Fig.4 BER analysis of smart antenna system



이 종 길 (Jong Gil Lee)

1982년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 1월 미국 Case Western Reserve University, Electrical Eng. (MS)

1990년 5월 미국 Clemson University, Electrical Eng. (Ph.D.)

1991년 1월~1993년 2월 삼성전자 특수연구소

1993년 3월~현재 인천대학교 정보통신공학과 교수

※관심 분야 : 무선통신, 레이더신호처리, 통신시스템, 스펙트럼분석

참고문헌

- [1] S. Hara and R. Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," IEEE Commun. Mag., vol. 35, no. 12, pp. 126-33, Dec. 1997.
- [2] N. Yee, J.P. Linnartz and G. Fettweis, "Multi-Carrier in indoor wireless radio networks," Proc. of IEEE PIMRC '93, Yokohama, Japan, pp. 109-13, Sept.1993.
- [3] N. Morinaga, M. Nakagawa, R.Kohno, "New concept and technologies for achieving highly reliable and high capacity multimedia wireless communications systems," IEEE Commun. Mag., vol. 35, no. 1, pp.34-40, January 1997.
- [4] A. F. Naguib and A. Paulraj, "Performance of CDMA cellular networks with base-station antenna arrays," in Proc. International Zurich Seminar on Digital Communications, (Zurich, Switzerland), pp. 87-100, March 1994.
- [5] A. F. Naguib, A. Paulraj and T. Kailath, "Capacity improvement with base-station antenna arrays in cellular CDMA," IEEE Trans. Veh. Tech., vol.VT-43(3), pp.691-98, August 1994.