

광대역 실측채널모델에서 스마트 안테나를 적용한 W-CDMA 성능분석

김병학, 배형오, 김철성
전남대학교 컴퓨터공학과

On the W-CDMA system with Smart Antenna over Wideband Realistic Channel Model

Byoung-Hak Kim, Hyoung-Oh Bae, Cheol-Sung Kim
Dept. of Computer Engineering, RRC, Chonnam National University
E-mail : chskim@chonnam.chonnam.ac.kr

Abstract

In this paper, the performance of the W-CDMA system with smart antenna is investigated. The realistic wideband channel is assumed, one of which is JTC(Joint Technique Committee) channel model. It is also assumed that multipaths are clustered. The beamforming-RAKE receiver structure of W-CDMA system is proposed, whose performance is analyzed on the assumption of perfect channel estimation.

The probability density function (pdf) of SINR(Signal to Interference and Noise Ratio) for different number of antennas and users is presented, and the BER(Bit Error Rate) is presented based on that. As a result, the performance of the W-CDMA system with smart antenna in the realistic wideband channel has been considerably improved.

1. 서론

향후의 광대역 CDMA 시스템에서는 화상통신 등의 멀티미디어 데이터 서비스를 제공하여야 하기 때문에 수신신호의 에러발생확률을 현재 시스템보다 더욱 낮춰야 한다. 이를 충족시키기 위해서는 신호처리 기법을 도입하여 에러발생확률을 낮추든지 기지국 당 사용자수를 제한하여 간섭신호를 줄임으로써 에러 발생확률을 낮춰야 한다. 스마트 안테나 시스템은 복수개의 배열 안테나 소자를 이용하여 각각의 안테나 소자에서 수신되는 신호들의 위상을 적절히 조절하여 원하는 사용자신호의 방향으로 큰 이득을, 다른 방향으로 입사되는 간섭신호에는 작은 이득을 주어서 다중접속 간섭잡음(Multiple Access Interference ; MAI)과 자기

간섭잡음(Self Interference ; SI)을 크게 감소 시켜 시스템의 성능을 향상시키고 채널 용량을 증가시키는 시스템이다.

스마트 안테나 시스템은 크게 스위칭 빔 안테나 시스템과 적응형 빔 안테나 시스템으로 나눌 수 있으며, 현재까지 연구결과 적응형 빔 안테나 시스템이 복잡하기는 하나 성능이 우수한 것으로 알려지고 있다.

본 논문은 광대역 다중경로 실측채널 모델인 JTC 채널 모델과 clustering개념을 도입하여 채널을 모델화 하였고, 그러한 채널 환경에서 적응형 스마트 안테나 시스템의 성능을 분석하였다. 스마트 안테나 시스템은 채널 모델화에 따라 성능에 차이가 있는데, 본 논문은 실측 채널 모델인 JTC 채널 모델을 사용함으로써 실제환경에 보다 근접한 채널환경에서 W-CDMA 시스템을 분석할 수 있으므로 더욱 정확한 성능 분석이 될 것으로 예상된다.

2. 본론

1) 채널 모델화

기존의 스마트 안테나에 대한 연구 중 채널의 모델화는 시간 분해능 안에 들어오는 신호가 일정한 방향에서 어느 정도의 각도 퍼짐으로만 들어온다는 가정 하에서 이뤄졌다. 그러나 그 분해능 안에는 여러 방향에서도 수신될 수도 있다. 먼저, JTC 채널 모델에서 한 사용자의 채널 임펄스 응답을 보면 다음과 같다.

$$h_i(t) = \sum_{p=0}^{P-1} \sqrt{P_{ip}} a_{ip}(t) \delta(t - \tau_p) e^{j\theta_p}$$

각각의 다중경로 성분은 랜덤한 크기와 시간지연, 위상지연을 나타낸다. 크기는 Rayleigh 분포, 위상은 $[-\pi, \pi]$ 사이에 균일 분포를 갖는다.

Clustering 개념은 채널의 시간 분해능에 들어는 수신신호는 임의의 각도에서 어느 정도의 각도 퍼짐만을 가지고 들어온다는 개념으로서 이 개념을 광대역 실측

채널모델인 JTC에 적용한다면 하나의 안테나와 한 사용자에 대한 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$h_{k,\theta} = \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{l=1}^{L_p} \frac{\sqrt{P_{\theta}}}{L_{ip}} a_{ip}(t) \delta(t - \tau_{ip}) e^{j\omega t} e^{(2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_p + v_{ip}\Delta))} \quad (1)$$

P_p 는 I 번째 사용자의 다중경로성분 개수, L_{ip} 는 각 경로성분에 대한 부경로 성분개수, θ_{ip} 는 주경로 도착각도, Δ 은 각도 퍼짐을 의미한다. 위 식에서처럼 각각의 다중경로에서는 L_p 개의 부경로에 대한 크기, 위상, 각도성분을 고려해줘야 한다. 그리고 N 개의 안테나 소자를 등간격($\lambda/2$)간격으로 선형 배열로 사용하므로 i 번째 사용자에 대한 채널응답을 벡터적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{h}_i(t) = \sum_{p=1}^P \vec{a}_{ip}(t) \delta(t - \tau_{ip}) \quad (2)$$

$$\vec{a}_{ip}(t) = [\tilde{a}_{ip1} \dots \tilde{a}_{ipN}]^T \\ = \left[\sum_{l=1}^{L_{ip}} a_{ip}(t) \cdot \exp(j\varphi_{ip}) \dots \sum_{l=1}^{L_{ip}} a_{ip}(t) \cdot \exp\left\{j\left[\varphi_{ip1} + 2\pi \frac{d}{\lambda} (N-1) \sin(\theta_{ip} + v_{ip}\Delta)\right]\right\} \right]^T$$

2) 수신신호 모델화

변조방식을 BPSK로 가정했을 때, n 번째 안테나 소자 수신되는 총 신호는 다음과 같다.

$$x_n(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{p=1}^{P_i} \sqrt{2P_{i,p}} s_i(t - \tau_{ip}) \cdot c_i(t - \tau_{ip}) \cos(\omega_0 t + \Psi_{ipn}(t)) \cdot \tilde{a}_{ipn}(t) + n_n(t) \quad (3)$$

여기서, $s_i(t)$ 는 $\sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{ik} \text{rect}_T(t - kT)$, $c_i(t)$ 는

$\sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{ik} \text{rect}_T(t - kT)$ 이고, M 은 사용자, M 은 사용자 수, $P_{i,p}$ 는 각 사용자의 송신전력, d_{ik} 와 c_{ik} 는 ± 1 값을 갖는 원하는 사용자 신호 및 칩열을 의미한다. 식(3)과 같은 수신신호가 Down converting과 역확산 그리고, 심볼단위 샘플링을 거쳐지게 되면 식(4)와 같게 된다.

$$z_{11}(k) = \sqrt{\frac{P_{\theta}}{2}} (d_{1k}) \vec{a}_{11}(k) + \vec{m}(k) + \vec{i}(k) + \vec{n}(k) \quad (4)$$

위 식에서 $\vec{a}_{11}(k)$ 는 식(2)와 같이 첫 번째 사용자의 첫 번째 다중경로 성분에 대한 여러개의 부경로들의 steering vector들의 합이고, $\vec{m}(k)$ 는 다중접속 간섭(MAI), $\vec{i}(k)$ 는 자기간섭(SI), $\vec{n}(k)$ 는 thermal noise성분을 나타낸다. 원하지 않는 신호성분은 식(5)와 같다.

$$\vec{n}(k)' = \vec{m}(k) + \vec{i}(k) + \vec{n}(k) \quad (5)$$

이들의 시간적 통계적 특성은 white하다. 따라서 각각의 분산을 구해보면 식(6)과 같다.

$$E[m_n(k) m_n^*(k+h)] \cong \sigma_{mn}^2 \delta(h) \quad (6)$$

$$E[i_n(k) i_n^*(k+h)] \cong \sigma_{in}^2 \delta(h) \text{ for } 1 \leq n \leq N$$

$$\sigma_{mn}^2 = \sum_{i=2}^M \sum_{p=1}^{P_i} \frac{P_{i,p}}{2} |a_{ipn}|^2 \frac{PG}{T} (R_{\theta}^2(\tau_{ip}) + R_{\theta}^2(T_c - \tau_{ip}))$$

$$\sigma_{in}^2 = \sum_{p=2}^P \frac{P_{i,p}}{2} |a_{1pn}|^2 \frac{PG}{T} (R_{\theta}^2(\tau_{1p}) + R_{\theta}^2(T_c - \tau_{1p}))$$

단, $\tau_{ip} = \tau_{ip} \bmod T_c$ 이고, N 은 안테나 소자 개수이다. τ_{ip} 가 $[0, T_c]$ 구간 내에서 균일한 분포를 갖는다면, SI와 MAI의 분산은 식(7)과 같다.

$$\sigma_{mn}^2 = \sum_{i=2}^M \sum_{p=1}^{P_i} \frac{P_{i,p}}{2} |a_{ipn}|^2 \frac{PG}{T} \frac{2}{3} T_c^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{in}^2 = \sum_{p=2}^P \frac{P_{i,p}}{2} |a_{1pn}|^2 \frac{PG}{T} \frac{2}{3} T_c^2$$

전체적인 Beamforming-RAKE 블록 다이어그램을 보면 그림 1과 같다.

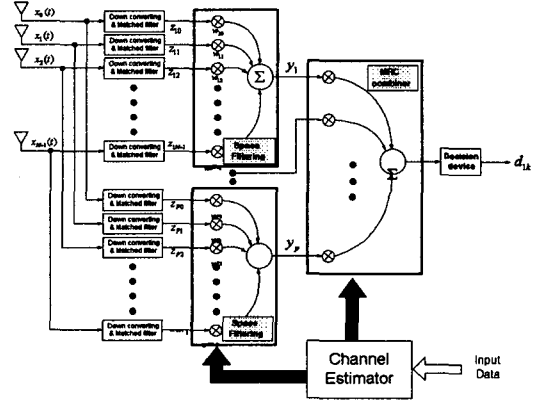


그림 1. Beamforming-RAKE 수신기 블록다이어그램

심볼단위로 샘플링된 신호는 적절한 적응 알고리즘에 의해서 가중치가 곱해지고 MRC에 의해 합쳐져서 원하는 사용자신호를 결정한다. 적응알고리즘에 의해 곱해지는 가중치의 최적인 값은 Wiener solution에 의해 결정되는데 식(8)과 같다[2].

$$\vec{w}_{opt} = \alpha \mathbf{R}_T^{-1} \vec{a}_{11} \quad (8)$$

여기서 α 는 출력 SINR에 영향을 주지 않는 임의의 factor이고, \mathbf{R}_T 는 전체 간섭잡음의 상관행렬이다. \mathbf{R}_T 는 Bessel 함수와 연관이 있으나[5], 본 논문에서는 \mathbf{R}_T 의 대각성분들을 제외한 나머지 요소들이 아주 작은 값이라고 가정하여 $\mathbf{R}_T = \sigma^2 \mathbf{I}$ 이라고 가정하였다. 따라서 그림 1에서와 같이 Channel estimator가 원하는 사용자의 원하는 다중경로 성분의 steering vector를 찾을 수 있다면, 가중치로는 steering의 conjugate 성분을 사용함으로써, 구조상 간단하면서도 우수한 성능을 나타내는 구조가 된다.

3) Beamforming-RAKE 수신기의 성능분석

MRC 각 앞단에서의 가중치는 Channel estimator에 의해서 얻어지는 인자 즉, 식 (9)을 사용하게 된다.

$$w_{1p}(k) = \alpha \vec{a}_{1p}(k) \quad (9)$$

$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\vec{a}_{1p}(k)^H \vec{a}_{1p}(k)}}$ 를 사용하고 식(4)에 곱하면 MRC 입력단 신호들을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$y_p(k) = \sqrt{\frac{P_{b1}}{2}} (d_{1k}) |\vec{a}_{1p}(k)| + \vec{n}_p(k) \quad (10)$$

$$\text{여기서, } |\vec{a}_{1p}(k)| = \frac{\vec{a}_{1p}(k)^H \cdot \vec{a}_{1p}(k)}{\sqrt{\vec{a}_{1p}(k)^H \cdot \vec{a}_{1p}(k)}} = \sqrt{\sum_{m=0}^{N-1} |a_{1pm}(k)|^2}$$

이고, $\vec{n}_p(k)$ '는 가중치 ($w_{1p}(k)$)가 곱해진 간섭잡음성분이다. $\vec{n}_p(k)$ '에 대한 분산, $\sigma_p^2 = \sigma^2$ 이다. 이 $y_p(k)$ 신호는 RAKE 수신기의 입력에 사용되고 MRC의 가중치가 곱해지고 합성되어 출력된다. MRC의 각 branche 가중치는 식 (11)과 같다.

$$r_p = |\vec{a}_{1p}(k)| \quad (11)$$

그러면, Beamforming-RAKE 수신기의 최종 출력은 식 (12)와 같게 된다.

$$Z_1(k) = \sqrt{\frac{P_{b1}}{2}} \sum_{p=1}^P d_{1k} |\vec{a}_{1p}(k)| + n_p''(k) \quad (12)$$

여기서 $n_p''(k)$ 의 분산, σ^2 은 $\sigma^2 \sum_{p=1}^P |\vec{a}_{1p}(k)|^2$ 이 된다. 총 간섭잡음성분을 가우시안으로 근사화 시키고 에러 확률을 구해보면, 식 (13)과 같다.

$$P_e = \int f_{r_b}(r_b) P_e(e|r_b) dr_b \quad (13)$$

SINR(r_b)에 대한 조건부 error 확률, $P_e(r_b)$ 는 BPSK 변조방식이고, 총간섭잡음을 가우시안으로 근사화 시켰으므로 다음과 같다.

$$P_e(r_b) = Q(\sqrt{2r_b})$$

여기서, SINR(r_b)을 구해보면, 식 (14)와 같다.

$$r_b = \frac{E_b}{N_0} \frac{\left(\sum_{p=1}^P |\vec{a}_{1p}|^2 \right)^2}{\sum_{p=1}^P |\vec{a}_{1p}|^2} = \frac{E_b}{N_0} \sum_{p=1}^P |\vec{a}_{1p}|^2 \quad (14)$$

단, $E_b = P_b \cdot T$ 이고, $N_0 = \sigma^2 \cdot 4T$ 이다.

식 (14)에서, SINR 자체가 랜덤하므로, SINR에 대한 pdf를 구해보면, 수신신호의 각도 퍼짐이 어느 정도 클 때, SINR의 분포는 서로 독립적이고 degree of freedom이 2인 chi-square 분포 $N \cdot P$ 개의 합이 된다.

즉, $r_b = \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^{N-1} r_{pm}$ 이다. 여기서 r_{pm} 은 자유도가 2인 chi-square 분포를 갖는다.

3. 성능분석

본 논문에서는 10MHz의 채널 대역폭과 2.5MHz의 칩율, 그리고 100Kbps 데이터 전송률을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 완벽한 전력제어와 코드 동기, 그리고 완벽한 채널 추정을 가정하였다.

JTC 전력지연 프로파일로는 표 1에서와 같은 실외 도심 고층 보행자 환경의 전력 parameter중 채널 A parameter를 사용하였다.

Tap	Channel A		Channel B	
	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)
1	0	0	0	0
2	100	-3.6	200	-0.9
3	200	-7.2	800	-4.9
4	300	-10.8	1200	-8.4
5	500	-18.0	2300	-7.8
6	700	-25.2	3700	-23.9

표 1. JTC outdoor urban high-rise, low antenna tapped delay line parameter.

표 1에서 relative delay는 첫 번째 다중경로 성분과의 시간 차이를 의미하고, 평균 전력은 가장 큰 신호로 정규화 한 것을 의미한다.

그림 2는 사용자수를 10명으로 고정시키고 안테나 개수를 변화 시켰을 때 SINR의 분포를 도시하였다. 안테나 8 개를 사용했을 때, SINR이 큰 쪽에 분포가 많이 나타났고, 한 개를 사용했을 때는 낮은 쪽에 분포가 많았다. 즉, SINR이 큰 쪽에 많이 나타났다는 것은 그만큼 BER이 줄어들게 될 것이고, 따라서 성능 또한 향상된다는 것을 알 수 있다.

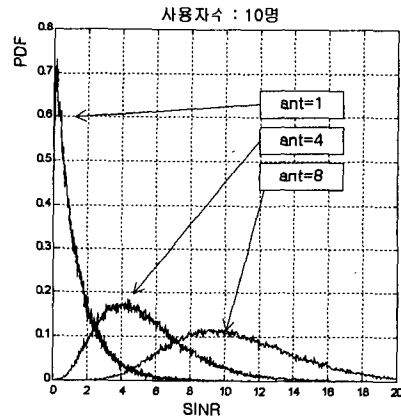


그림 2. 안테나 개수에 따른 SINR의 pdf

그림 3은 사용자수에 따른 BER을 도시하였다. 사용

자가 많아지면 그만큼 SINR이 줄어들고 BER 또한 높아졌다. 여기서 고려할 것은 안테나 개수를 1개, 4개를 사용했을 때보다 8개를 사용했을 때가 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

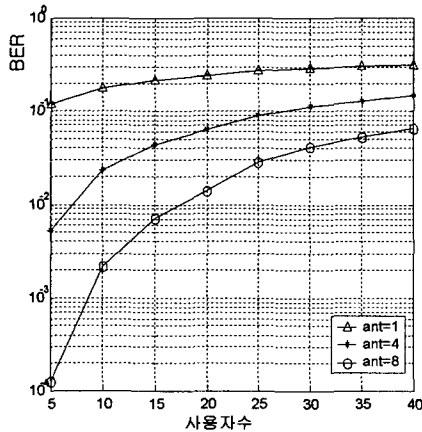


그림 3. 사용자수에 따른 BER

그림 4는 안테나 개수를 8개로 사용했을 때 사용자수에 따른 SINR의 분포를 도시해 보았다. 사용자 수가 증가할수록 SINR이 줄어든다는 것을 알 수 있으며, SINR이 줄어들면 BER은 증가함을 알 수 있다.

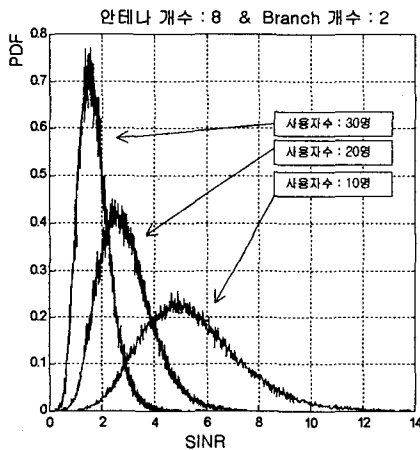


그림 4. 사용자 수에 따른 SINR의 pdf

그림 5에서는 MRC branch 개수에 따른 BER을 도시하였다. 이론상 branch를 많이 사용할수록 성능이 확연히 좋아져야 하는데, JTC 채널 모델 특성상 5번째 tap의 신호전력이 아주 작으므로 성능향상에는 크게 영향을 미치지 못했다는 것을 알 수 있다.

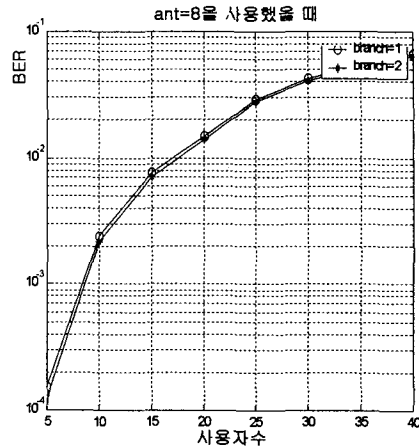


그림 5. 사용자수에 따른 BER

4. 결론

본 논문에서 Clustering개념을 도입한 JTC 채널 환경에서 기존의 RAKE 수신기와 Beamforming-RAKE 수신기에 대한 성능을 분석한 결과, SINR과 BER에서 Beamforming-RAKE 수신기의 성능이 아주 우수하다는 것을 알 수 있었으며, 이러한 기술이 낮은 BER을 요구하는 고속의 데이터 통신에 사용된다면 아주 우수한 성능을 발휘할 것으로 예상된다.

5. 참고문헌

- [1] Joseph C. Liberti, jr., Theodore S. Rappaport, "Smart Antennas for Wireless Communications", Prentice Hall PTR, 1999.
- [2] Simon Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice Hall PTR, 1996.
- [3] Barnard Widrow, Samuel D. Stearns, "Adaptive Signal Processing", Prentice Hall PTR, 1985.
- [4] Monica Dell'Anna and A. Hamid Aghvami, "Performance of Optimum and Sub-optimum combining at the Antenna Array of a W-CDMA System", IEEE, 1999
- [5] Zheng Hongming, Bi Guangguo, "Performance Analysis of Cellular CDMA Network Based on Smart Antenna Receiver", IEEE, 1999

본 논문은 정보통신부에서 지원하는 대학기초연구 지원사업으로 수행된 결과의 일부임.