

# 광대역 다중경로 실측 채널에서 스마트 안테나를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 각도퍼짐에 따른 성능분석

## Analysis of W-CDMA System with Smart Antenna for Angular Spread in Realistic Wideband Multipath Channel

전 준 수 · 김 철 성\*

Jun-Soo Jeon · Cheol-Sung Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 기지국에 스마트 안테나를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 성능을 각도퍼짐(angular spread)에 따라 분석하였다. 채널모형은 광대역 다중경로 실측 채널인 JTC 채널모형에 클러스터링(clustering) 개념을 도입한 채널모형을 적용하였다. 즉 광대역 다중경로 실측 채널모형인 JTC 채널모형을 사용하여 시간정보를 고려하였으며, 여기에 공간정보를 나타내기 위하여 클러스터들의 각도퍼짐이 고려된 배열응답벡터(array response vector)를 삽입하여 실제 환경에 보다 근접한 채널 환경에서 광대역 CDMA 시스템의 성능을 분석하였다.

광대역 CDMA의 경우에는 칩 구간(chip duration)이 보다 짧기 때문에 다중경로 현상이 협대역의 경우와는 다르다. 본 논문에서는 한 칩 구간 내에 들어오는 다중경로 성분을 분리하여 가장 큰 신호 성분만을 찾아내어 원하는 사용자의 신호로 사용하는 방법으로 모의실험을 실행하였다. 모의실험 결과, 광대역 다중경로 실측 채널에서 2D-RAKE 수신기를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 성능이 전통적인 RAKE 수신기를 사용했을 때보다 우수하다는 것을 알 수 있었으며, 또한 클러스터의 각도퍼짐이 커질수록 이에 비례한 이득이 발생됨을 알 수 있었다.

### Abstract

In this paper, the performance of W-CDMA system with smart antenna is analyzed for angular spread in realistic wideband multipath channel. The realistic wideband channel is assumed, one of which is JTC channel model. And each multipath is assumed as a reflective wave from only one direction (only one cluster) in space. Several multipaths within one chip are distinguished into each one and the strongest signal is selected. As a result, the performance of the W-CDMA system with smart antenna in realistic wideband multipath channel has been considerably improved in proportion to the increase of angular spread.

Key words : Smart Antenna, 2D-RAKE Receiver, W-CDMA, Angular Spread, JTC Channel Model

### I. 서 론

최근 몇 년 동안 3세대 셀룰러 이동통신 시스템에 대한 연구와 개발의 노력이 상당히 진행되어 왔다. 2세대 셀룰러 이동통신 시스템의 모든 기술은

1세대와는 다르게 디지털 기술이 적용되었다. 그러나 제한된 음성 서비스 그리고 저속의 데이터 서비스만 제공되었다. 2세대 시스템에서 채택하고 있는 1.25 MHz(칩율 : 1.2288 Mcps) 시스템 대역폭으로 가능한 데이터 전송 속도는 이론적으로 64 Kbps이

「본 연구는 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었습니다.」  
전남대학교 컴퓨터공학과(Dept. of Computer Engineering, Chonnam National University)

\*전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부(Dept. of Electronic & Computer Engineering, Chonnam National University)

· 논문 번호 : 20030214-030

· 수정완료일자 : 2003년 4월 14일

지만 3세대의 W-CDMA 시스템에서는 보다 넓은 5 MHz(칩율: 3.84 Mcps)의 대역폭을 채택하여 최대 2 Mbps의 고속으로 고품질의 음성, 데이터, 그리고 멀티미디어 정보의 전송이 가변적으로 가능하다<sup>[1]</sup>. 그러나 데이터 전송 속도가 증가하면 그에 비례한 시스템의 성능 저하도 발생하게 된다. 따라서 고속 데이터 전송시 요구되는 낮은 비트 에러율(bit error rate: BER)과 시스템의 용량 증대를 위해서 광대역 CDMA 시스템에 스마트 안테나를 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 배열 안테나를 이용한 공간 필터링 기술은 이동통신 시스템의 용량을 상당히 증대시킨다. 실제로 기지국에 배열 안테나를 적용한 이동통신 시스템의 용량 증가는 지금까지 많은 연구들에서 증명되어져 왔다.

본 논문에서는 스마트 안테나를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 성능을 수신신호의 각도퍼짐(angular spread)에 따라 분석하였다. 본 논문과 관련 있는 국외의 기 발표된 논문<sup>[2],[3]</sup>의 경우에는 대부분 시스템 대역폭에 관계없이 각각의 배열 안테나에 수신되는 한 칩 구간 내의 다중경로 성분은 분해할 수 없다고 가정하여 해석하고 있다. 그러나 대역폭이 커지면 한 칩 구간 내에 존재하는 다중경로의 수가 적어지고 이로 인하여 다중경로 페이딩의 영향이 작아지며 또한 협대역 시스템보다 많은 다중경로 성분을 분리할 수 있어 더 많은 수의 RAKE 가지를 사용하여 성능 향상을 이룰 수 있다. 따라서 기존에는 하나의 칩 구간 내에 공간적으로 한 방향에 존재하는 단 하나의 클러스터에 해당하는 다중경로만 존재한다고 가정하여 해석하였으나, 본 논문에서는 채널의 분해가능시간(resolution time)과 시스템 대역폭에 따라 한 칩 시간 구간 내에 공간적으로 서로 다른 방향에 존재하는 클러스터들에 해당하는 다중경로들을 모두 고려하였다.

본 논문에서 적용한 광대역 벡터 채널모형은 기존의 광대역 스칼라 채널모형에 공간적인 요소를 고려한 확장으로 볼 수 있다. 즉 광대역 다중경로 실측 채널모형인 JTC(Joint Technical Committee) 채널모형을 이용하여 시간정보를 고려하였으며 여기에 공간정보를 고려하기 위하여 각 다중경로의 공간적인 도래각과 각도퍼짐이 고려된 배열응답벡터를 삽입하였다. 또한 한 칩 구간 내에 존재하는 해

상 가능한 각각의 다중경로는 해상할 수 없는 다수의 부-다중경로로 구성되어 있으며, 이 때 공간적으로 일정량의 각도퍼짐을 갖는 다수의 부-다중경로 성분으로 구성된 한 개의 반사파가 한 방향으로부터만 수신된다는 각도퍼짐 현상을 가정하였으며, 채널의 해상 시간은 100 [nsec]로 두었다.

모의실험에서는 한 칩 구간 내에 들어오는 다중경로를 채널에서 해상할 수 있는 구간으로 분리하고 가장 큰 신호를 원하는 사용자의 신호로 처리하여 빔을 형성하고, 가장 큰 신호를 제외한 나머지 다중경로 성분은 자기간섭(self interference) 성분으로 처리하여 스마트 안테나를 적용한 광대역 CDMA 시스템에 대한 성능을 다중경로의 각도퍼짐에 따라 분석하였다. 이 때 수신된 다중경로 신호들의 공간적인 처리와 시간적인 처리를 수행하기 위하여 배열 안테나를 적용한 2D-RAKE 수신기를 사용하여 성능을 분석하였다.

## II. 채널 모형화

스마트 안테나에 대한 기존 연구에서 사용한 채널모형들은 한 칩 구간 내에 하나의 경로가 공간적으로 한 방향으로부터 작은 각도퍼짐을 가지고 수신된다고 가정하여 왔다. 그러나 본 논문에서는 그림 1(a)와 같이 한 칩 구간 내에는 채널의 해상 시간의 정수배 되는 시간에 존재하는 하나 이상의 다중경로들이 공간적으로 서로 다른 방향에서 수신되며 각각의 다중경로들은 일정량의 각도퍼짐을 갖는 다수의 부-다중경로(sub-multipath) 성분으로 구성된다고 가정하였다. 이때 채널의 분해가능시간은 광대역 실측 JTC 채널모형을 적용할 수 있도록 100 [nsec]로 설정하였으며 한 칩 구간( $T_c$ ) 내의 다중경로의 수는 채널의 분해가능시간과 시스템 대역폭의 역수인 한 칩 구간에 따라 결정됨을 그림 1(a)로부터 알 수 있다. 그림 1(b)는 상향 링크에서 단말기로부터 송신된 전파가 단말기와 기지국 주위의 채널 환경에 의해서 다수의 클러스터가 발생함을 보여준다. 각각의 클러스터는 평균 도래각(Angle Of Arrival: AOA)을 중심으로  $\Delta$  이내의 각도퍼짐을 갖는 다수의 부-다중경로들로 구성된다.  $\theta_1$ 은 첫 번째 클러스터의 평균 AOA와 배열 안테나의 수직 연장선과의 사이

광대역 다중경로 실측 채널에서 스마트 안테나를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 각도퍼짐에 따른 성능분석

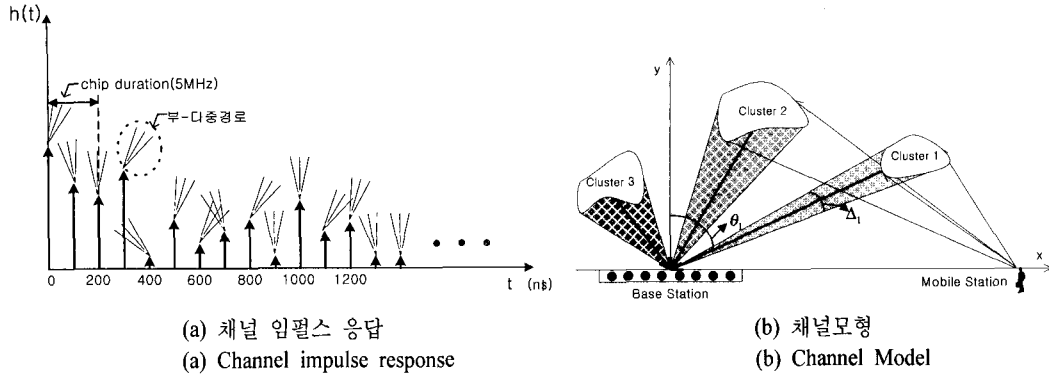


그림 1. 클러스터링 개념을 적용한 채널 임펄스 응답과 채널모형

Fig. 1. Channel impulse response & channel model applying the concept of clustering.

각도이고  $\Delta_1$ 은 첫 번째 클러스터의 각도퍼짐을 의미한다. 또한 부-다중경로들의 AOA는  $\Delta$  이내에 균일 분포를 갖는다고 가정한다.

JTC 채널모형에서  $k$ 번째 사용자의 채널 임펄스 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_k(t) = \sum_{d=1}^D \sqrt{P_{k,d}} a_{k,d} \delta(t - \tau_{k,d}) e^{j\beta_{k,d}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $k$ 는 사용자를 구분하는 지수이고,  $d$ 는 다중경로를 구분하는 지수이다. 각 다중경로 성분은 분해가능시간의 정수배 되는 시간에 발생하며 불규칙한 크기와 위상지연을 가지는데, 크기( $a_{k,d}$ )는 레일리 분포를 따르며 위상 ( $\beta_{k,d}$ )은  $[-\pi \sim \pi]$  사이에 균일 분포를 가지는 것으로 가정한다<sup>[4]</sup>. 여기에 클러스터링 현상을 가정하기 위해서 식 (1)의  $\sqrt{P_{k,d}} a_{k,d} e^{j\beta_{k,d}}$  을 부-다중경로를 구분하는 지수  $l$  을 이용하여  $\sum_{l=1}^L \rho_{k,d,l} \cdot e^{(j\beta_{k,d,l})}$  으로 두고 공간 정보를 고려하기 위하여 클러스터의 각도퍼짐이 고려된 배열응답벡터인  $\mathbf{a}(\cdot)$ 을 삽입하면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$\mathbf{h}_k(t) = \sum_{d=1}^D \sum_{l=1}^L \rho_{k,d,l} \delta(t - \tau_{k,d}) e^{j\beta_{k,d,l}} \cdot \mathbf{a}(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d}) \quad (2)$$

$$\mathbf{a}(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d}) = [1 \ e^{-j\psi_{k,2}} \ \dots \ e^{-j\psi_{k,M}}]^T, \quad |s_{k,d,l}| \leq 1/2 \quad (3)$$

$$\psi_{k,m} = \sum_{l=1}^L \frac{2\pi}{\lambda} d_{1,m} \sin(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d}) \quad (4)$$

식 (2)에서  $\theta_{k,d}$ 와  $\Delta_{k,d}$ 는  $k$ 번째 사용자의  $d$ 번째 클러스터의 평균 AOA와 각도퍼짐을 의미하고,  $s_{k,d,l}$ 은  $k$ 번째 사용자의  $d$ 번째 클러스터의  $l$ 번째 부-다중경로의 AOA를 결정하는 인자이다. 또한  $\rho_{k,d,l}$ 과  $\beta_{k,d,l}$ 은  $k$ 번째 사용자의  $d$ 번째 클러스터의  $l$ 번째 산란체에 의해 수신되는 부-다중경로의 크기와 위상을 의미한다.  $\mathbf{a}(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d})$ 는  $k$ 번째 사용자의  $d$ 번째 클러스터의  $l$ 번째 산란체에 의해 수신되는 방향에 의한 배열응답벡터이고, 이 값은 안테나 배열 구조에 따라 식 (3), 식 (4)와 같이 결정된다<sup>[5]</sup>. 식 (3)에서 윗 첨자  $T$ 는 벡터의 전치(transpose)를 나타낸다.  $d_{1,m}$ 은 첫번째 안테나 소자와  $m$ 번째 안테나 소자와의 거리이고,  $\lambda$ 는 반송파의 파장이며,  $(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d})$ 은  $k$ 번째 사용자의  $d$ 번째 클러스터의  $l$ 번째 산란체의 입사 방향과 배열 안테나의 수직 연장선과의 사이 각도이다.  $M$ 은 안테나의 개수이며 각 안테나는 등 간격으로 선형적으로 배열하였다. 각 다중경로는 서로 다른 시간지연( $\tau_{k,d}$ )을 갖고, 평균 AOA인  $\theta_{k,d}$ 에서  $s_{k,d,l} \Delta_{k,d}$  만큼의 각도퍼짐을 갖는  $L$ 개의 부-다중경로 성분의 합으로 구성되어 있고, 각 부-다중경로는 서로 다른 크기와 위상을 갖는다.

식 (2)에서  $\sum_{l=0}^L \rho_{k,d,l} \cdot e^{(j\beta_{k,d,l})} \cdot \mathbf{a}(\cdot)$  을 채널벡터,  $\rho_{k,d}$ 로 두면 사용자  $k$ 에 대한 채널 임펄스 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{h}_k(t) = \sum_{d=1}^D \rho_{k,d} \delta(t - \tau_{k,d}) \quad (5)$$

$$\rho_{k,d} = \sum_{l=1}^L \rho_{k,d,l} \cdot e^{(j\beta_{k,d,l})} \mathbf{a}(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d}) =$$

$$[\rho_{k,d\langle 1 \rangle} \ \rho_{k,d\langle 2 \rangle} \ \dots \ \rho_{k,d\langle m \rangle}]^T \quad (6)$$

식 (6)에서  $\rho_{k,d,l}$  과  $\beta_{k,d,l}$ 은 불규칙한 값이며, 다수의 부-다중경로  $L$ 개를 더한  $\rho_{k,d\langle m \rangle}$ 은 CLT (Central Limit Theorem)에 의해 평균이 0인 복소 가우시안 불규칙 변수가 된다. 이 때  $\rho_{k,d\langle m \rangle}$ 은  $m$ 번째 안테나에 수신되는  $k$ 번째 사용자의  $d$ 번째 경로의 크기를 의미한다.

### III. 2D-RAKE 수신기에서의 광대역 CDMA신호 해석

본 논문에서는 BPSK 변조 방식을 적용한 광대역 CDMA 시스템을 고려하였다. 그리고 채널 코딩은 사용하지 않았다.

$k$ 번째 사용자의 광대역 CDMA의 전송신호는 식 (7)과 같다.

$$s_k(t) = m_k(t) c_k(t) \cos(\omega_c t) \quad (7)$$

식 (7)에서  $m_k(t)$ 는  $k$ 번째 사용자의 이진 불규칙 데이터이고,  $c_k(t)$ 는  $k$ 번째 사용자의 확산코드이며 칩율은 3.84 Mcps이다.

그림 2는 본 논문에서 사용한 스마트 안테나 시스템용 2D-RAKE 수신기의 구조로 입력신호의 낮은 SNR을 개선하고자 상관기를 빔 형성기 전단에 두어서 신호의 SNR 값을 높인 후에 입력신호로 사용하였다.

그림 2에서 각 디지털 빔 형성 블록(Digital Beam Forming Block) 내부에서는  $M$ 개의 배열 안테나를 이용하여 공간적인 처리를 수행하고,  $N$ 개의 병렬로 연결된 디지털 빔 형성 블록의 출력들로부터 시간

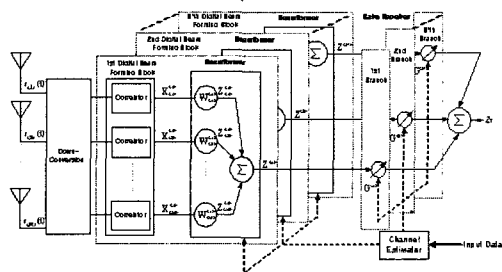


그림 2. 2D-RAKE 수신기의 구조  
Fig. 2. The 2D-RAKE receiver structure.

적인 처리를 수행한다. 디지털 빔 형성기의 개수인  $N$ 은 적용한 JTC 채널모형의 상대 지연시간과 시스템 대역폭의 역수인 한 칩 구간( $T_c$ )에 따라 결정된다.

본 논문에서 변수 우측에 표기된 <윗첨자>와 <아래첨자>는 각각 디지털 빔 형성 블록의 지수와 배열 안테나 지수를 나타내며, 안테나 지수 1의 안테나를 기준 안테나로 두었다.

$M$ 개의 배열 안테나에 수신되는 총신호 중  $\langle n \rangle$ 번째 빔 형성 블록에서 처리될 다중경로 신호들은 다음과 같다.<sup>[6]</sup>

$$r^{\langle n \rangle}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sqrt{2P_b} m_k(t - \tau_{k,d}^{\langle n \rangle}) \cdot c_k(t - \tau_{k,d}^{\langle n \rangle}) \cos(\omega_c t + \phi_{k,d}^{\langle n \rangle}) \rho_{k,d}^{\langle n \rangle} + N^{\langle n \rangle}(t) \quad (8)$$

식 (8)에서  $P_b$ 는 비트전력이고,  $\tau_{k,d}^{\langle n \rangle}$ ,  $\rho_{k,d}^{\langle n \rangle}$ ,  $N^{\langle n \rangle}(t)$ 은 각각  $\langle n \rangle$ 번째 빔 형성 블록에서 처리될  $k$ 번째 사용자의  $d$ 번째 다중경로의 시간지연, 채널벡터, 가산성 잡음벡터를 의미하며,  $\phi_{k,d}^{\langle n \rangle}$ 은  $-\omega_c \tau_{k,d}^{\langle n \rangle}$ 이다.

$\langle n \rangle$ 번째 빔 형성 블록에서 처리될 다중경로 신호들 중 첫 번째 사용자( $k=1$ )의 가장 큰 신호를 갖는 경로( $d=d_{\max}$ )를 원하는 사용자의 신호가 수신되는 경로로 가정하고, BPSK 변조방식과 완벽한 코드동기, 캐리어동기를 가정하면,  $\langle n \rangle$ 번째 빔 형성 블록에서 복조와 역확산을 취한 후, 시간  $i$ 에서 심볼당 샘플링을 취한 후의 신호  $X^{\langle n \rangle}(i)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$X^{\langle n \rangle}(i) = \sqrt{\frac{P_b}{2}} d_1(i) \rho_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i) + J_{co}^{\langle n \rangle}(i) + I_{co}^{\langle n \rangle}(i) + N_{co}^{\langle n \rangle}(i) = \sqrt{\frac{P_b}{2}} d_1(i) \rho_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i) + N_T^{\langle n \rangle}(i) \quad (9)$$

식 (9)에서 아래첨자 “co”는 자기 상관기 출력 (correlator output)을 나타내며,  $\rho_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}$   $\langle n \rangle$ 번째 빔 형성 블록의 첫 번째 사용자의 다중경로 중 가장 큰 신호를 갖는 경로의 조정벡터이고,  $J_{co}^{\langle n \rangle}(i)$ ,  $I_{co}^{\langle n \rangle}(i)$ ,  $N_{co}^{\langle n \rangle}(i)$ 는 각각  $\langle n \rangle$ 번째 빔 형성 블록의 상관기의 출력에서 “원하는 사용자의 다중경로 성분 중 가장 큰 신호를 갖는 경로를 제외한 나머지 성분(자기간

광대역 다중경로 실측 채널에서 스마트 안테나를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 각도퍼짐에 따른 성능분석

섭), “원하지 않는 사용자의 다중경로 성분(다중접속간섭)”, “가산성 잡음 성분”을 의미한다. 그리고  $\langle n \rangle$  번째 빔 형성 블록의 상관기 출력 중 총 간섭잡음 성분  $\mathbf{N}_T^{\langle n \rangle}(i) = \mathbf{J}_{\infty}^{\langle n \rangle}(i) + \mathbf{I}_{\infty}^{\langle n \rangle}(i) + \mathbf{N}_{\infty}^{\langle n \rangle}(i)$ 이다.<sup>[6]</sup>

간섭잡음 각각의 통계적 특성은 백색(white)이다.<sup>[3]</sup> 식 (9)에서 행렬  $\mathbf{X}^{\langle n \rangle}(i)$ 의  $\langle m \rangle$  번째 안테나에 해당하는 신호 중 자기간섭의 분산인  $\sigma_{J_{\infty}}^2 \langle n \rangle$ 과 다중접속간섭의 분산인  $\sigma_{I_{\infty}}^2 \langle n \rangle$ 을 통계적으로 구해보면 식 (10)과 식 (11)으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{J_{\infty}}^2 \langle n \rangle &= \sum_{d=1, d \neq d_{\max}}^D \frac{P_b}{2} |\rho_{1,d} \langle n \rangle|^2 ([R_{1,1}(\tau_{1,d}^{\langle n \rangle})]^2 \\ &\quad + [R'_{1,1}(\tau_{1,d}^{\langle n \rangle})]^2) \\ &= \sum_{d=1, d \neq d_{\max}}^D \frac{P_b}{2} |\rho_{1,d} \langle n \rangle|^2 \frac{PG}{2} T_c^2 \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{I_{\infty}}^2 \langle n \rangle &= \sum_{k=2}^K \sum_{d=1}^D \frac{P_b}{2} |\rho_{k,d} \langle n \rangle|^2 ([R_{k,1}(\tau_{k,d}^{\langle n \rangle})]^2 \\ &\quad + [R'_{k,1}(\tau_{k,d}^{\langle n \rangle})]^2) = \sum_{k=2}^K \sum_{d=1}^D \frac{P_b}{2} |\rho_{k,d} \langle n \rangle|^2 \\ &\quad \frac{2}{3} \cdot PG \cdot T_c^2 \quad (11) \end{aligned}$$

여기에서  $R_{k,j}(\tau^{\langle n \rangle})$ 는  $\int_0^{\tau^{\langle n \rangle}} m_k(t-\tau) c_k(t-\tau) \cdot c_j(t) dt$ ,  $R'_{k,j}(\tau)$ 는  $\int_{\tau^{\langle n \rangle}}^T m_k(t-\tau) c_k(t-\tau) c_j(t) dt$

이며,  $T$ ,  $T_c$ ,  $PG$ 는 각각 심볼 구간, 칩 구간, 처리이득(processing gain)을 의미한다.

심볼단위로 샘플링된 신호는 적절한 적응 알고리즘에 의해서 가중치가 곱해지고 합쳐진 후, 각각의 값들은 다시 최대 결합비 기준에 의해 합쳐져서 원하는 사용자의 신호를 결정한다. 적응 알고리즘에 의해 곱해지는 가중치의 최적값은 Wiener solution에 의해 식 (12)와 같이 결정된다.<sup>[7]</sup>

$$\mathbf{W}_{opt} = \beta \mathbf{R}_T^{-1} \boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^H \quad (12)$$

여기에서  $\beta$ 는 임의의 스칼라 계수이며,  $\mathbf{R}_T$ 는 전체 간섭잡음의 상관행렬이고 윗 첨자  $H$ 는 공액전치행렬(Hermitian matrix)을 의미한다. 일반적으로  $\mathbf{R}_T$ 는 시간, 공간적으로 백색이며, 또한 정규화된  $\mathbf{R}_T$ 는  $M \times M$  단위행렬에 근접한다. 즉  $\mathbf{R}_T = \sigma^2 \mathbf{I}$ 라고 가정할 수 있다.<sup>[3]</sup> 만약 채널 추정기가 원하는 사용자의

원하는 다중경로 성분의 채널벡터만 찾을 수 있다면, 최적의 가중치로 채널벡터의 공액전치행렬을 사용하면 시스템의 전체 구조는 단순화되고 더 우수한 성능을 보일 수 있다.

#### IV. Beamforming-RAKE 수신기의 성능 분석

채널 추정기에 의해 얻어지는  $\langle n \rangle$  번째 빔 형성기 (beamformer)의 가중치 벡터는 식 (13)과 같다.

$$\mathbf{W}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle} = \beta^{\langle n \rangle} \cdot \boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)^H \quad (13)$$

여기에서  $\beta^{\langle n \rangle}$ 은  $1/\sqrt{\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)^H \cdot \boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)}$ 이고,  $\langle n \rangle$  번째 레이크 수신기 가지의 가중치 값인  $G^{\langle n \rangle}$ 을 식 (14)의  $|\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)|$ 로 설정하면, Beamforming-RAKE 수신기의 최종 출력 신호는 식 (15)와 같고, 총 간섭 신호의 분산은 식 (16)과 같다.<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} |\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)| &= \frac{\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)^H \cdot \boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)}{\sqrt{\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)^H \cdot \boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)}} \\ &= \sqrt{\sum_{m=1}^M |\rho_{1,d_{\max}} \langle n \rangle|^2} \quad (14) \end{aligned}$$

$$Z_T = \sqrt{\frac{P_b}{2}} \sum_{n=1}^N d_1(k) |\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)|^2 + \hat{N}_T^{\langle n \rangle}(i) \quad (15)$$

$$\sigma_T^2 = \sigma^2 \sum_{n=1}^N |\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)|^2 \quad (16)$$

식 (15)에서 총잡음(자기간섭+다중접속간섭+가산성잡음)을 가우시안 분포로 근사화 시키면, 조건부 에러확률  $P_c(\gamma_b)$ 는 SINR( $\gamma_b$ )이 주어질 때 가산성 잡음 환경에서의 조건부 에러확률을 구하는 방법과 동일하게 된다. 즉  $P_c(\gamma_b) = Q(\sqrt{2\gamma_b})$ 이다. 이때 변조방식은 BPSK로 가정하였으며, SINR( $\gamma_b$ )는 식 (15)와 식 (16)에 의해서 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} r_b &= \frac{E_b}{N_0} \frac{\left( \sum_{n=1}^N |\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)|^2 \right)^2}{\sum_{n=1}^N |\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)|^2} \\ &= \frac{E_b}{N_0} \sum_{n=1}^N |\boldsymbol{\rho}_{1,d_{\max}}^{\langle n \rangle}(i)|^2 \quad (17) \end{aligned}$$

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

식 (17)의 결과식에서  $\sum_{i=1}^N |\rho_{1,d_{max}}^{(n)}(i)|^2$  부분은  $N$ (다지털 빔 형성 블록의 수)개의 원하는 경로에 대한 평균 신호 전력 각각을  $M$ (안테나 수)개 더하여 최종 결합함을 의미한다. 따라서 SINR은 원하는 경로에 대한 채널 백터와 전체 간섭잡음의 상관행렬에 의해서 결정되어짐을 알 수 있다.

다음으로 평균 에러확률  $P_e$ 는 다음과 같다.

$$P_e = \int f_{\gamma_b}(\gamma_b) P_e(\gamma_b) d\gamma_b \quad (18)$$

여기에서  $f_{\gamma_b}(\gamma_b)$ 는  $\gamma_b$ 의 확률 밀도 함수이며, 이 값은 배열 안테나들 사이의 원하는 경로 신호에 대한 상관값에 의해서 결정되며, 이 상관값은 각도 퍼짐에 의존한다. 식 (17)에서  $\rho_{1,d_{max}}^{(n)}(i)$ 은 평균이 0인 복소 가우시안 불규칙 변수이므로, 만약 안테나 사이에 수신되는 원하는 경로 신호에 대한 상관값이 작아지면  $f_{\gamma_b}(\gamma_b)$ 는 자유도가 2인  $M*N$ 개(안테나 소자수( $M$ )\*빔 형성 블록수( $N$ ))의 독립적인 chi-square( $\chi^2$ ) 분포의 합이 된다.

각 안테나 소자 사이의 원하는 경로에 대한 상관값을 고려하면 식 (17)은 다음과 같이 식 (19)로 쓸 수 있다<sup>9)</sup>.

$$r_b = \frac{E_b}{N_0} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \gamma_{1,d_{max}}^{(n)} |u_{d_{max},m}^{(n)}|^2 \quad (19)$$

여기에서  $\gamma_{1,d_{max}}^{(n)}$ 은  $\rho_{1,d_{max}}^{(n)}(i)$ 의 상관행렬의 고유치(eigenvalue) 중  $\langle m \rangle$ 번째 값이고,  $u_{d_{max},m}^{(n)}$ 은 i.i.d(independent, identically, distributed)이고 평균이 0인 복소 가우시안 불규칙 변수이다. 식 (19)의  $\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \gamma_{1,d_{max}}^{(n)} |u_{d_{max},m}^{(n)}|^2$  부분은  $N$ 개의 원하는 경로 신호들에 대한 상관행렬의  $M$ 개 고유치에 의해서 자유도가 2인  $M*N$ 개의 독립적인 chi-square( $\chi^2$ ) 분포를 갖는 불규칙 변수들이 각각 크기가 다르게 더해짐을 의미한다.

다음 장에서는 지금까지 해석한 이론을 바탕으로 컴퓨터 모의실험을 통하여 광대역 CDMA 신호를 발생시켜 스마트 안테나를 적용한 W-CDMA 시스템의 각도퍼짐에 따른 성능을 분석하기로 한다.

### V. 모의 실험

표 1. JTC 채널모형의 실외 도심 고층 건물지역의 보행자 환경에서 탭 지연 선로 파라미터

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

Tap	Channel A		Channel B	
	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)
1	0	- 2.4	0	- 3.8
2	100	- 6.0	200	- 4.8
3	200	- 9.6	800	- 8.9
4	300	-13.2	1200	-12.2
5	500	-20.4	2300	-11.6
6	700	-27.6	3700	-28.0

모의 실험에 사용할 채널은 광대역 채널모형에서 널리 통용되는 JTC 채널모형을 가정하였고, JTC 전력지연 프로파일로는 표 1에서와 같은 실외 도심 고층 보행자 환경의 전력 파라미터 중 채널 A 파라미터를 사용하였다.

표 1에서 상대지연은 첫 번째 다중경로 성분과의 시간 차이를 의미하고, 평균 전력은 전체 송신 전력으로 정규화한 값이다. 즉 임의의 한 사용자의 송신된 모든 경로의 전력을 더하면 1이다. 경로의 빔 패턴 형성을 위해 완벽한 채널추정을 가정하였으며, 모의실험 환경의 주요 파라미터는 표 2와 같다.

모든 데이터는 +1로 가정하고 완벽한 전력제어와 코드 동기를 가정하였으며 채널 코딩은 사용하지 않았다. 100번의 시행에 의해 평균 SINR을 구하였고, 평균에러확률을 구하기 위하여 100만개의 데이터를 발생시켰다. 간섭신호는 시간적, 공간적으로 백색(white)이라고 가정하였다.

총 사용자 수( $K$ ) 100명에 해당하는 다중경로들의 입사각( $\theta_{k,d}$ )을  $-90^\circ \sim 90^\circ$  사이의 각도에서 불규칙하게 발생시켰으며, 한 사용자당 사용한 JTC 전력지연 프로파일에 해당하는 6개(D)의 다중경로 성분을 발생시키고 각 다중경로에 해당하는 8개(L)의 부-다중경로를 발생시켰다. 이 때 부-다중경로의 각도 퍼짐( $\Delta$ )은 다중경로의 평균 AOA 중심으로  $\Delta=(0^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$ 를 적용하였다. 그리고 한 칩 내에 들어오는 다중경로 성분 중 최대 전력을 갖는 성분을 원하는 사용자의 신호로 찾아내어 빔 패턴을 형성하는 방법으로 W-CDMA 시스템의 성능을 각도퍼짐에 따라 비교하였다.

표 2. 모의실험 파라미터

Table 2. The parameter used in the simulation.

시스템 대역폭	확산속도	반송파 주파수	RAKE 가지수	심볼 전송율
5 MHz	3.84 Mcps	1.9 GHz	4개	10 Kbps

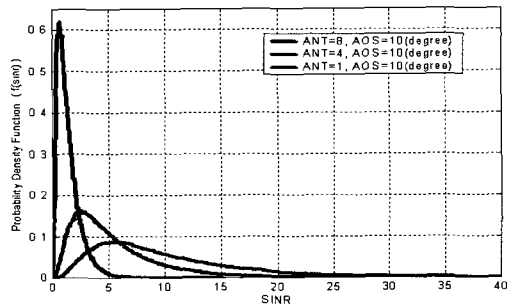


그림 3. 안테나소자 수에 따른 SINR의 pdf  
Fig. 3. The pdf of SINR according to the total number of antenna element.

그림 3은  $K=20$ ,  $\Delta=10^\circ$  일 경우에 대한 안테나 소자 수( $M$ )에 따른 SINR의 분포를 나타낸다.  $M=8$ 인 경우에는 SINR이 큰 값을 가지며,  $M=1$ 이면 작은 값 주위에 분포된다. 따라서 W-CDMA 시스템의 성능은 많은 배열 안테나 소자를 사용함으로써 개선될 수 있음을 알 수 있다.

그림 4는 그림 3과 동일한 조건에서 사용자 수에 따른 BER을 안테나 소자 수에 따라 분석하였다. 간섭 사용자의 수가 증가함에 따라, BER이 증가함을 그림 4로부터 알 수 있다. 또한  $M=1$ ,  $M=4$ ,  $M=8$ 인 경우를 비교해 보면 배열 안테나의 빔 형성 효과에 의하여 배열 안테나 소자 수에 비례한 성능 개선을 볼 수 있다.

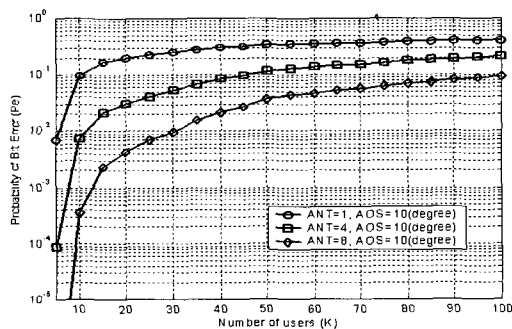


그림 4. 사용자 수에 따른 BER  
Fig. 4. BER according to the number of users.

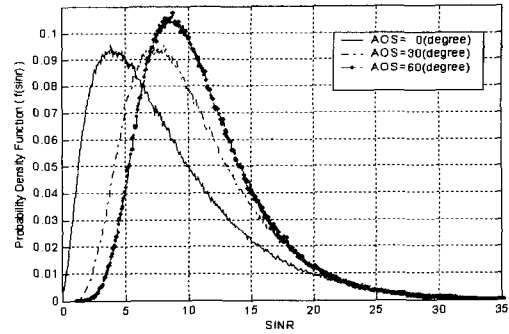


그림 5. 각도퍼짐에 따른 SINR의 pdf  
Fig. 5. The pdf of SINR according to angle spread.

그림 5는  $K=20$ ,  $M=8$ 일 경우  $\Delta=(0^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$ 에 따른 SINR의 pdf를 보여준다. 위 그림으로부터 각도퍼짐이 커질수록 성능이 좋아짐을 알 수 있으며, 원하는 경로의 각도퍼짐이  $0^\circ$ 일 때는 배열 안테나의 빔 형성에 의한 성능 개선은 얻을 수 있지만, 각 배열 안테나 소자에 수신된 경로의 성분이 모두 같은 페이딩을 겪게 되므로 공간 다이버시티에 대한 이득은 발생하지 않는다. 각도퍼짐이 커질수록 각각의 안테나에 수신되는 신호들은 각각 다른 페이딩을 겪게 되고 상관관계가 낮은 신호들을 안테나 수만큼 결합함에 의해서 다이버시티 이득이 발생하게 됨을 보여준다.

그림 6은 사용자 수에 대한 BER 성능을 안테나 소자 수와 각도퍼짐에 따라서 분석한 결과이다.  $M=1$ 인 경우에는 공간적인 처리를 수행하지 못하므로  $\Delta$ 가 변하여도 같은 결과를 보여준다.  $M=1$ 인 경우와  $M=4$ ,  $\Delta=0^\circ$ ,  $M=8$ ,  $\Delta=0^\circ$ 인 세가지 경

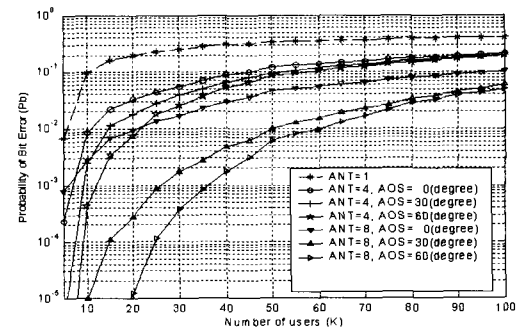


그림 6. 사용자수에 따른 BER 비교  
Fig. 6. Comparison of average error probabilities versus number of users.

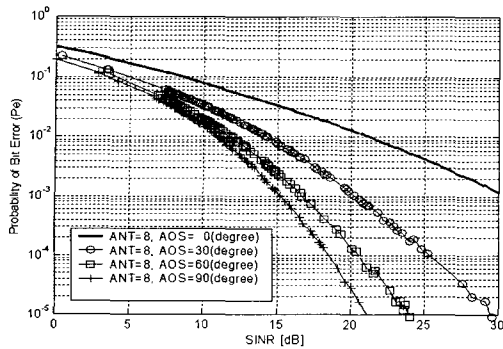


그림 7. SINR에 따른 BER 비교  
Fig. 7. Comparison of average error probability versus SINR.

표 3. 그림 6에서 BER=10<sup>-3</sup>을 만족하는 사용자 수  
Table 3. The number of users acceptable BER =10<sup>-3</sup> from Fig. 6.

M \ Δ	0°	30°	60°
4개	4 user	7 user	12 user
8개	6 user	25 user	35 user

우의 그래프를 비교해 보면 단지 배열 안테나 소자 수의 증가에 의해 성능이 개선 되어짐을 알 수 있다. 이 때 공간 다이버시티에 의한 이득은 없다. M = 8인 경우와 M = 4인 경우를 비교해 보면 Δ의 증가에 따라 M = 8인 경우가 M = 4인 경우에 대하여 더 큰 폭으로 성능이 나아짐을 알 수 있다. 표 3은 그림 5에서 BER=10<sup>-3</sup>을 만족하는 사용자 수를 배열 안테나 소자수와 각도퍼짐에 대해서 분석한 결과이다.

그림 7의 모의실험 결과는 Δ = (0°, 30°, 60°, 90°) 인 경우의 사용자 수에 따른 평균 SINR에 따른 BER의 결과이다. 문헌에 따르면 반경이 10 [Km]인 Macro-cell의 경우의 평균 각도퍼짐은 20° 이고, 반경이 1 [Km]인 밀집 도심지역 Micro-cell의 경우에는 평균 각도퍼짐이 120° 임을 알 수 있다<sup>[10]</sup>. 이 결과를 통하여 2D-RAKE 수신기를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 성능은 셀 반경이 큰 교외지역보다 셀 반경이 작은 도심지역에서 더 좋음을 예측할 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 배열 안테나를 사용하여 한 칩 내

에 들어오는 다중경로 성분 중 최대 전력을 갖는 성분을 원하는 사용자의 신호로 찾아내어 빔 패턴을 형성하는 방법으로 광대역 CDMA 시스템의 성능을 각도퍼짐과 안테나 소자 수를 고려하여 비교하였다. 따라서 동등한 조건에서 본 논문의 결과와 한 칩 구간 내에는 하나의 경로만 존재한다고 가정하여 분석한 기존 연구 결과를 비교해 보면 본 연구의 경우가 채널 환경을 보다 실제적으로 반영한 것에 비해 더 낮은 성능이 보임을 예측할 수 있다.

모의실험 결과 각도퍼짐이 0°의 경우에는 배열 안테나 소자 수를 증가시킴에 따라 단지 빔 패턴 형성에 의하여 배열 안테나 소자 수에 비례한 성능 개선만을 볼 수 있었다. 그러나 각도퍼짐이 발생하게 되면 배열 안테나에 의한 빔 패턴 형성에 의한 성능 개선 뿐만 아니라 각도퍼짐에 비례하는 공간 다이버시티에 의한 성능 개선을 얻을 수 있었다. 따라서 각도퍼짐이 적은 교외지역보다는 각도퍼짐이 큰 도심지역 채널 환경에서 광대역 CDMA 시스템에 2D-RAKE 수신기를 적용한 스마트 안테나 기법을 사용한다면 보다 나은 서비스를 제공할 수 있을 것으로 기대되며, 이는 고속 대용량의 데이터를 전송해야 하는 차세대 이동통신 시스템에서 유효하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] R. L. Choi, K. B. Letaief and R. D. Murch, "MISO CDMA transmission with simplified receiver for wireless communication handsets", *IEEE Trans. Communications*, vol. COM-49, pp. 888-898, May 2001.
- [2] Monica Dell'Anna, A. Hamid Aghvami, "Performance of optimum and sub-optimum combining at the antenna array of a W-CDMA system", *IEEE-SAC*, vol. 17, no. 12, Dec. 1999.
- [3] Ayman F. Naguib, Arogyaswami Paulraj, "Performance of wireless CDMA with M-ary orthogonal modulation and cell site antenna arrays", *IEEE J-SAC*, vol. 14, no. 9, pp. 1770-1783, Dec. 1996.
- [4] H. Suzuki, "A statistical model for urban radio



광대역 다중경로 실측 채널에서 스마트 안테나를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 각도퍼짐에 따른 성능분석

- propagation", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-25, no. 7, pp. 673-680, July 1977.
- [5] Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport "Smart Antenna for Wireless Communications", Prentice-Hall, 1999.
- [6] 전준수, 이주석, 김철성, "광대역 다중경로 채널에서 스마트 안테나를 적용한 W-CDMA 시스템의 대역폭에 따른 성능분석", 대한전자공학회논문지, 40-TC(2), pp. 47-55, 2003년 3월.
- [7] Simon Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice-Hall, 1996.
- [8] Byoung-Hak Kim, Duk-Soo Kim and Cheol-Sung Kim, "Effect of smart antenna in wide-band multipath channel", *4th ICATM*, pp. 200-203. Apr. 2001.
- [9] Seon-Taek Kim, Nam-Il Yun and Han-Wook Jung, "Spatially and temporally correlated fading channel model for smart-antenna applications", 한국통신학회논문지, 22(4), pp. 611-617, 1997년 4월.
- [10] Piter van Rooyen, Michiel Lotter and Danie Van Wyk, "Space-Time Processing for CDMA Mobile Communications", KAP, 2000.

### 전 준 수



1994년 2월: 동신대학교 전기·전자 공학과 (공학사)  
 1998년 8월: 동신대학교 전기전자 공학과 (공학석사)  
 2002년 2월: 전남대학교 컴퓨터공학과 박사과정 수료  
 [주 관심분야] 이동통신시스템, 대

역확산통신, 스마트 안테나

### 김 철 성



1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1979년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1987년 12월: University of Arizona (공학박사)  
 1979년 12월~1983년 3월: 국방과

학연구소

1987년 11월~1989년 2월: 한국전자통신연구소 이동통신 연구실장

1989년 3월~1995년 3월: 전남대학교 전자공학과 교수

1995년 3월~2001년 3월: 전남대학교 컴퓨터공학과 교수

1997년 2월~1998년 2월: UCSD, 방문교수

현재: 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 교수

[주 관심분야] 이동통신시스템, CDMA, 디지털 통신방식