

역방향 동기식 광대역 CDMA용 적응 배열 안테나 성능 연구

정희원 한진규*, 문철*, 정한욱*, 운영중*, 박한규*

Performance Analysis of Coherent Reverse Link WCDMA Systems Using Adaptive Array Antennas

J.K.Han, C.Mun, H.W.Jung, Y.J.Yoon, H.K.Park *Regular Members*

요약

최근 적응 배열 안테나를 이용하여 원하는 사용자 신호를 최대화하고 간섭 신호를 최소화함으로써 이동통신의 셀 용량을 개선하고자하는 시도가 증가하고 있다. 본 논문에서는 적응 배열 안테나의 각 배열소자간 상관 특성을 고려한 벡터 채널 모델을 이용하여 역방향 동기식 CDMA의 성능을 분석한다. 또한 광대역 CDMA 시스템인 IS-665의 chip-level 시뮬레이터를 개발하고 이에 적응 빔 성형 알고리즘을 적용하여 적응 배열 안테나를 통한 셀 용량 증가를 분석한다. 2D RAKE 수신기 구조를 통해 경로 및 공간 다이버시티의 효과와 빔 성형과 다이버시티 간의 상충관계를 살펴본다.

ABSTRACT

Adaptive array antennas have emerged as a useful technique to enhance the cell capacity of mobile communications by maximizing the user signal and rejecting interferences. In this paper, the performance of the coherent reverse link CDMA systems using adaptive array antennas in basestation is analyzed by the vector channel model in which the correlation between the fading signals received at each antennas is considered. Also chip-level simulator of IS-665 wideband CDMA modem is developed and the adaptive beamforming part is inserted to analyze the effect on the cell capacity by adaptive array antennas. The effect of path-spatial diversity and trade off between beamforming and diversity is also discussed using 2D RAKE receiver structure.

I. 서론

현재 급증하는 이동통신 수요에 대처하기 위해 제한된 스펙트럼의 사용효율을 높이려는 연구가 많은 분야에서 진행되고 있다. 이 중 기지국에서 적응 배열 안테나를 사용하여 각 사용자에 지향성 빔을 할당함으로써 CDMA방식에서 발생하는 다중접속간섭(Multiple Access Interference)를 억제하여 용량을 증가시키려는 연구가 대표적이다^[1]. 또한 기지국 적응 배열 안테나 시스템은 무선 채널에서 발생하는 다

중경로페이딩을 줄임으로서 IMT-2000 시스템이 목표로 하고 있는 광대역 데이터 전송에서 발생하는 심볼간 간섭(Inter Symbol Interference)을 줄일 뿐 아니라^[2] 계층화된 셀간의 간섭을 줄이는 장점이 있다^[3].

따라서 기지국에 적응배열 안테나를 사용한 시스템의 성능 및 특성을 분석하려는 연구가 활발히 이루어지고 있고 이미 많은 연구성과들이 발표되었다^[4,5]. 배열 안테나에서는 배열 소자간의 거리에 따른 수신 신호간 공간 상관특성(spatial correlation)을 갖

* 연세대학교 전파공학과(untuchbl@bubble.yonsei.ac.kr)

** 한국통신 무선통신연구소

논문번호: 98215-0512, 접수일자: 1998년 5월 12일

* 본 논문은 한국통신의 정보통신 기초 연구 과제의 연구 지원에 의해 연구되었음

게 되며 또한 배열 소자 각각은 이동국의 이동과 다중 경로 페이딩에 따른 시간 상관특성(temporal correlation)을 갖는 신호가 수신되므로 시공간 상관특성(spatial and temporal correlation)을 갖는 채널이 적응 배열 안테나의 성능 및 특성을 분석하기 위해서는 필수적이다. 그러나 대부분의 기존 연구들은 각 배열 소자에 수신되는 신호를 서로 독립적으로 가정함으로써 배열 소자간 간격에 따른 다이버시티 성능 특성과 적응 배열 안테나 성능 특성을 동시에 분석하지 못하는 한계를 가져 왔다¹¹⁾. 또한 본 연구는 역방향에서 동기 방식을 사용하는 광대역 CDMA인 IS-665 모델을 chip-level로 구현하여 적응 배열 안테나의 빔성형 프로세서에 필요한 신호들을 발생시키고 이를 적응 배열 안테나 알고리즘에서 chip-level로 처리함으로써 적응 배열 안테나 시스템이 셀 용량에 미치는 영향을 분석하였다. 이는 기존 연구의 분석적인 방법에서 사용한 근사화 과정들을 없애므로서 실질적인 성능 및 특성을 분석 가능하게 할 뿐 아니라 채널에 의한 코드간의 직교성 열화를 고려할 수 있게 한다.

따라서 본 논문에서는 시공간 상관특성을 갖는 채널하에서 IS-665 모델과 적응 배열 안테나를 결합하여 chip-level로 시뮬레이션 함으로써 광대역 CDMA 역방향에서의 적응 배열 안테나의 성능과 특성을 분석하였다.

II. 시공간 상관 특성을 갖는 벡터 채널 시뮬레이터

적응 배열 안테나는 여러개의 배열 소자가 동간격으로 배치되는 구조를 가지며, 적응 빔 성형 과정에서 각각의 배열 소자에 수신된 신호들은 동시에 신호처리된다. 신호처리의 분석을 용이하게 하기 위해 적응 배열 안테나의 수신신호는 배열 소자의 수신신호를 원소로 하는 벡터로 표현할 수 있다. 마찬가지로 배열 소자의 수신신호가 겪은 채널 역시 벡터로 표현된 random 과정으로 표현이 가능하다. 이러한 이유로 적응 배열 안테나 시스템의 채널 모델링은 벡터 채널 모델링이라 하고, 단일 안테나 시스템의 경우에는 이와 구분하여 스칼라 채널 모델링이라 한다.

적응 배열 안테나의 각 배열 소자에 수신되는 신호들 사이에는 공간 상관 관계가 있는데 이를 고려하여 벡터 채널 모델링을 하기 위해서는 안테나의

구조와 이동국의 위치 정보가 필요하다. 안테나의 구조는 배열 소자의 개수 M 과 배열 소자 간격 d 에 의해 정의되며, 이동국의 위치 정보는 DOA(direction of arrival)와 AOS(angle of spread)에 의해 정의 된다. 또한 스칼라 채널에서의 마찬가지로 각 배열 소자의 수신신호는 시간상관 특성을 갖는다. 식 1은 WSSUS(wide sense stationary uncorrelated scattering) 가정하에서 벡터 채널의 시공간 상관 관계를 나타낸다⁶⁾.

$$E\{a(t) a^*(t+\tau)\} = J_0(2\pi f_d \tau) \cdot R_s \quad (1)$$

단 $J_n(\cdot)$ 는 n 차 1종 Bessel 함수이고 f_d 는 최대 doppler 주파수이다. 식 1에서 $J_0(2\pi f_d \tau)$ 는 시간 상관특성을 나타내고, R_s 는 공간 상관특성을 나타낸다. DOA를 θ 로 표기하고 AOS를 Δ 로 표기할 때 기지국의 배열 안테나에 $[\theta-\Delta, \theta+\Delta]$ 범위 내로 동일한 분포를 가진 신호가 수신된다고 가정하면 행렬 R_s 는 식 2와 같이 전개된다⁶⁾.

$$\begin{aligned} Re\{R_s(m, n)\} &= J_0(z_{mn}) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z_{mn}) \cos(2k\theta) \frac{\sin(2k\Delta)}{2k\Delta} \\ Im\{R_s(m, n)\} &= 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k+1}(z_{mn}) \sin((2k+1)\theta) \frac{\sin((2k+1)\Delta)}{(2k+1)\Delta} \end{aligned} \quad (2)$$

단, 식 2에서 $z_{mn} = 2\pi(m-n)d/\lambda$ 이고 m 과 n 은 배열 소자의 index이다.

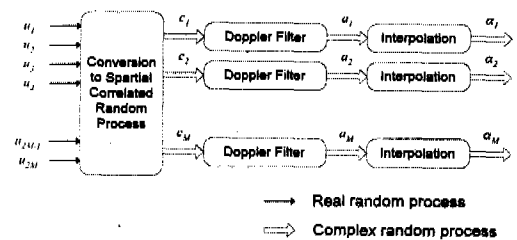


그림 1. 시공간 상관특성을 갖는 채널 시뮬레이터의 구조

그림 1은 식 1, 식 2와 같은 시공간 상관 특성을 갖는 벡터 채널 시뮬레이터의 구조를 나타낸 것이다⁷⁾. 배열 소자 개수의 두배의 독립적인 실 Gaussian random 과정이 공간 상관특성을 가진 배열 소자 개수의 복소 Gaussian random 과정으로 변환되고 각 random 과정은 시간 상관 특성을 갖도록 doppler 필터를 거친다. 본 논문에서는 doppler 필터로 FIR(finite impulse response) 필터를 이용하였는데 이는 IIR(infinite impulse

response) 필터를 이용했을 경우 LCR(level crossing rate) 특성이 좋지 않아 시물레이션의 신뢰도를 떨어뜨리기 때문이다. 마지막으로 시공간 상관 특성을 가진 random 과정을 모뎀 시뮬레이터에서 사용하는 송수신 신호의 sampling rate에 맞추어 보간(interpolation)한다.

그림 2와 그림 3은 채널 시뮬레이터가 발생시킨 random 과정의 envelope을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, AOS가 커지면 공간 상관도가 낮아진다.

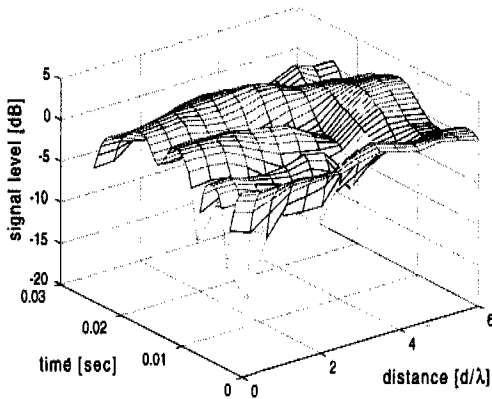


그림 2. DOA = 0°, AOS = 10°, $f_d = 100\text{Hz}$ 일 때의 envelope fading

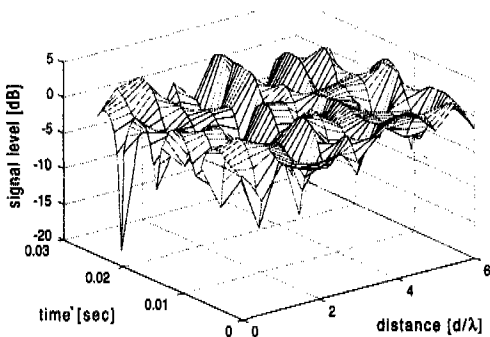


그림 3. DOA = 0°, AOS = 90°, $f_d = 100\text{Hz}$ 일 때의 envelope fading

III. IS-665 시스템

본 논문에서는 광대역 CDMA 시스템으로 IS-665 표준을 이용하였다. 현재 국내에서 상용화된

CDMA 시스템인 IS-95의 역방향 링크는 비동기 방식인 walsh 코드를 이용한 직교 변조(orthogonal modulation) 방식을 채택하고 있는데 이는 시스템 성능의 열화에 영향을 주는 요소 중 하나이다. 비동기 방식은 동기 방식에 비해 채널 추정이 복잡하고 부정확하다는 단점이 있어서, 정확한 채널 추정이 필수적인 적응 배열 안테나 적용에 많은 문제점을 갖는다. 이러한 단점을 개선하고자 IMT-2000등 차세대 이동통신 시스템은 역방향 링크에서 동기 방식을 적용하려고 하고 있다. 역방향 링크에서 동기 방식을 채택한 대표적인 광대역 CDMA 시스템은 일본의 Oki사가 제안한 IS-665이다[8]. 표 1은 IS-665 역방향 링크 시스템의 사양을 나타내고 있다. 본래 IS-665는 PCS 대역에 할당되어 있으나 본 논문에서는 IMT-2000에 할당된 2GHz 대역을 이용하였다.

표 1. IS-665 역방향 링크 시스템 사양

Data Rate	64kbps
PN Chip Rate	4.096Mcps
PN Code Period	$2^{32} - 1$
Frame Size	5msec (320bits)
FEC	(2,1,9) Convolutional code
Interleaver	16×20 Block Interleaver
Channel Spacing	5MHz
Rake Receiver	3 finger
Pilot Suppression	6dB down from traffic channel

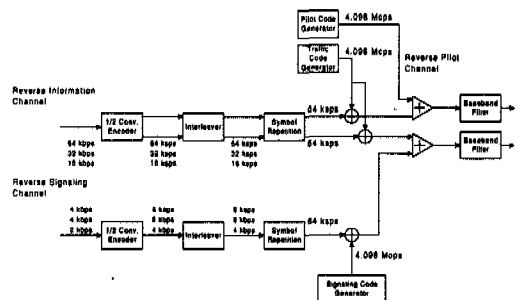


그림 4. IS-665 역방향 링크 송신기 구조

그림 4에서와 같이 IS-665는 동기화를 위해 각 사용자에게 pilot 채널이 할당되어 있다. Pilot 채널과 information 채널, signaling 채널은 각각 walsh 코

드에 의해 분리되며, 사용자는 long PN 코드에 의해 분리된다. 위의 세 채널은 같은 경로를 가지며, 동일한 반송파를 이용하기 때문에 pilot 신호를 이용한 동기 복조가 가능하다.

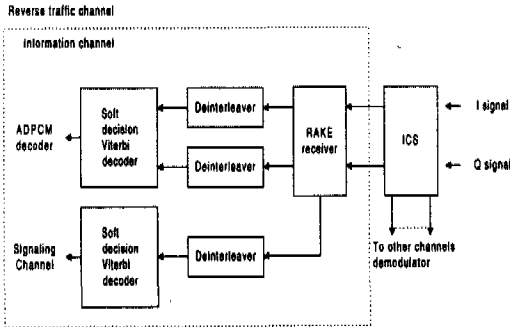


그림 5. IS-665 역방향 링크 수신기 구조

IS-665 역방향 시스템의 수신기 구조는 그림 5와 같다. IS-665에서는 ICS(interference canceller system)을 기본 사양으로 하고 있으나 본 논문은 적응 배열 안테나의 성능에 초점을 맞추고 있으므로 시뮬레이션의 간략화를 위해서 생략하였다. 그리고 본 논문의 IS-665 시뮬레이터는 decoder로 표준안에서 제시한 Viterbi decision soft decoder를 이용하였는데, 양자화는 8 level로 하고 truncated path length는 40으로 하였다.

IV. 적응 빔 성형 알고리즘과 2D RAKE 수신기

IS-665 역방향 링크에는 pilot 채널이 사용자마다 할당되어 있으며 이 채널을 통해 전송되는 Pilot 신호는 위상 왜곡을 보정하기 위해 사용되므로 정보를 포함하지 않는다. 따라서 기지국 입장에서 사용자의 pilot 신호는 이미 알고 있는 신호로서 training 신호로 간주할 수 있다. Training 신호가 존재하는 시스템에서는 적응 빔 성형 알고리즘으로 MMSE (minimum mean squared error) 방법을 사용할 수 있다. MMSE에 의한 각 배열 소자의 가중치는 식 3과 같다[9].

$$\begin{aligned}
 w &= R_{xx}^{-1} r_{xd} \\
 R_{xx} &= E\{x(t)x^*(t)\} \\
 r_{xd} &= E\{x(t)d(t)\}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

단, 식 3에서 $x(t)$ 는 수신신호로 원하는 사용자의 수신신호와 동일채널 간섭신호, AWGN(additive white Gaussian noise)이 모두 더해진 신호이다. $d(t)$ 는 원하는 신호로 IS-665의 경우 pilot 신호를 적용하면 기지국에서의 적응 빔 성형을 구현할 수 있다. 식 3의 가중치 해는 상관관계를 가진 원하지 않는 신호의 상관도를 줄이는 기능을 가지고 있으며, Wiener-Hopf의 해로 잘 알려져 있다[9].

RAKE 수신기는 시간 지연차를 가지고 수신되는 다중 경로 신호를 분리해 내어 결합하는 경로 다이버시티 기능을 갖는다. 이는 직접 확산(direct sequence spreading)을 위해 사용하는 PN 코드가 자기 상관특성이 우수하다는 것을 이용한 것이다. RAKE 수신기의 원리를 적응 배열 안테나에 적용한 것이 2D RAKE 수신기이다[10]. 그림 6은 2D RAKE 수신기의 구조를 나타내고 있다.

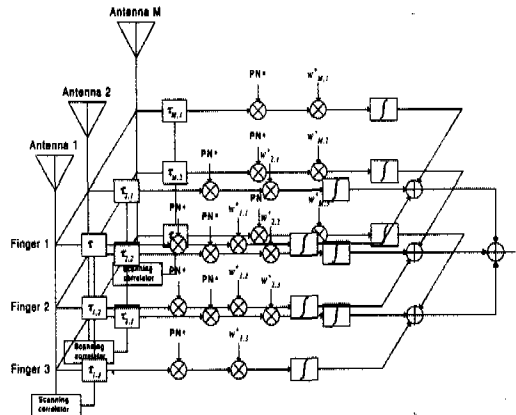


그림 6. 2D-RAKE 수신기

각 finger의 신호는 서로 다른 경로를 거쳤기 때문에 통계적으로 독립적인 특성을 갖는다. 따라서 각 finger마다 MMSE 알고리즘에 의해 배열 소자신호의 가중치를 결정할 수 있다. 그리고 각 finger마다 수신 전력의 세기에 따라 가중치가 결정된다. 2D RAKE 수신기는 이와 같은 방법으로 finger와 배열 소자마다 서로 다른 가중치가 결정되고 결정된 가중치를 적용하여 수신신호를 선형 결합한다.

V. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 동기방식인 IS-665 역방향 모델 시뮬레이터와 시공간 상관특성을 나타낼 수 있는 벡터 채널 시뮬레이터를 개발하여 MMSE 알고리즘

과 2D RAKE 수신기 구조의 성능을 살펴 보았다. 시뮬레이션에 사용된 다중 경로파들의 지연 시간과 세기, DOA, AOS 등은 표 2에 나타나 있다. 이동국의 이동속도는 $54\text{km/h}(f_d=100\text{Hz})$ 이다.

표 2. 다중 경로 환경

지연시간	상대 전력	DOA	AOS
0 T_c	0 dB	10°	$9^\circ (3^\circ, 30^\circ)$
1 T_c	-0.6 dB	5°	$9^\circ (3^\circ, 30^\circ)$
5 T_c	-3.2 dB	-5°	$9^\circ (3^\circ, 30^\circ)$

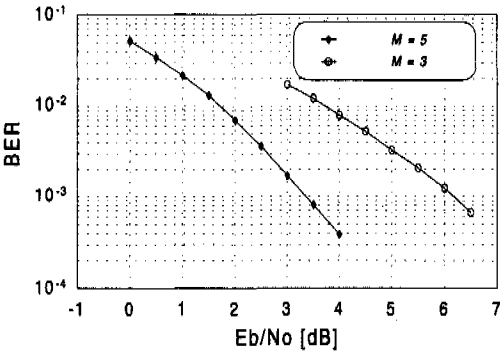


그림 7. 배열 소자 간격이 0.5λ 일 때의 배열 소자 개수에 따른 BER 성능

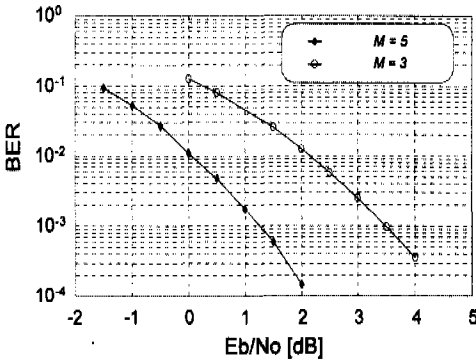


그림 8. 배열 소자 간격이 2λ 일 때의 배열 소자 개수에 따른 BER 성능

그림 7과 그림 8은 적응 배열 안테나의 배열 소자 개수에 따른 단일 사용자의 BER(bit error rate) 성능 시뮬레이션 결과이다. 그림 7은 배열 소자간의 간격을 파장의 0.5배로 설정하였을 때의 결과이며 그림 8은 파장의 2배로 설정하였을 때의 결과이다. 그림 7과 그림 8의 결과에 따르면 배열 소자의 개수를 증가 시킴에 따라 BER이 감소하는 특성이 관

찰된다. 이는 신호대 잡음비가 배열 소자의 개수에 비례하여 증가한다는 원리에 만족하는 결과이다. 또한 배열 소자간의 간격을 넓힐수록 BER 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 배열 소자간의 간격이 좁아질수록 각 배열 소자에 수신되는 신호가 겪은 페이딩의 상관도가 높아져서 동시에 깊은 페이딩(deep fading)에 놓일 확률이 증가하게 된다. 반면 배열 소자간의 간격이 넓어지면 동시에 깊은 페이딩에 놓일 확률이 크게 감소하게 되어 공간 다이버시티(diversity)를 통한 성능 개선이 이루어진다. 그러나 배열 소자간의 간격이 파장의 길이의 0.5배 이상이면 경우에 따라 grating lobe가 발생하게 되고, 파장의 길이의 1배 이상이면 항상 grating lobe가 발생하게 된다. 따라서 배열 소자간의 간격이 넓으면 원하지 않는 방향으로 grating lobe가 빔을 형성하게 되어 원하는 방향의 빔에 할당된 전력이 감소하게 된다. 이를 통하여 배열 소자간의 간격에 따라 다이버시티와 빔 형성간에 상충관계가 존재함을 확인할 수 있다.

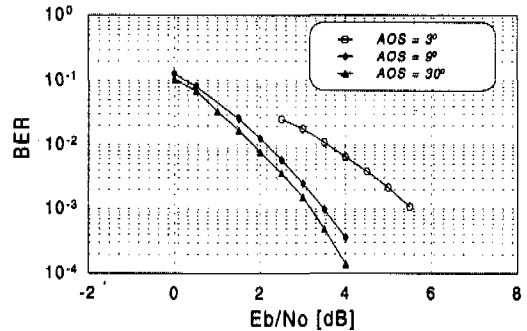


그림 9. 배열 소자 간격이 2λ , 배열 소자 개수가 3일 때의 AOS에 따른 BER 성능

그림 9는 배열 소자의 개수가 3개이고 배열 소자간의 간격이 파장의 2배일 때 서로 다른 AOS에 대한 결과이다. AOS는 사용하는 시스템의 종류와 채널의 환경에 따라 변할 수 있는 값으로 배열 소자간의 간격을 일정하게 할 때 AOS가 커지면 각 배열 소자의 페이딩간의 상관도가 감소하게 된다. 따라서 배열 소자간의 간격을 동일하게 설정하여도 채널 환경의 차이에 의해 AOS가 서로 다르다면 그에 따른 다이버시티 이득도 다르게 된다. AOS가 큰 채널 환경의 경우에는 배열 소자간의 간격을 줄여더라도 쉽게 다이버시티 이득을 얻을 수 있지만 AOS가 작은 채널 환경의 경우에는 배열 소자간의 간격을 넓혀야 원하는 다이버시티 이득을 얻을 수

있다.

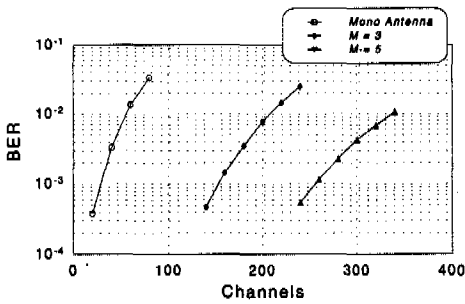


그림 10. 배열 소자 간격이 2λ일 때의 배열 소자 개수에 따른 셀 용량

그림 10은 배열 소자간의 간격이 파장의 2배일 때 배열 소자의 개수에 따른 셀 용량을 구한 결과이다. 채널의 수는 고려된 이동국의 수를 의미한다. 적용된 서비스를 음성 전송용 이동통신으로 설정하여 허용 최대 BER을 10^{-3} 에 두었다. 또한 음성 활성화율(voice activity)은 0.375로 가정하였으며 다른 셀과는 완벽하게 격리되었다고 가정하여 가용 채널수를 구하였다. 그림 10의 결과에 따르면 단일 안테나를 이용한 경우 약 28개의 채널을 확보할 수 있는데 배열 소자의 개수를 3개와 5개로 설정하여 적응 배열 안테나를 이용한 경우 가용 채널의 수가 약 150개와 250개로 증가함을 확인할 수 있다. 즉 배열 소자의 개수를 5개, 배열 소자간의 간격을 파장의 2배로 설정하면 단일 안테나를 적용한 시스템에 비해 9배의 용량이 증가한다.

VI. 결 론

본 논문에서는 실제 채널의 시공간 상관 특성을 모사한 벡터 채널 시뮬레이터와 2D RAKE 수신기를 적용한 동기식 역방향 링크 CDMA chip-level 모델 시뮬레이터를 이용하여 적응 배열 안테나를 적용하였을 때의 BER 성능과 셀 용량을 고찰하였다.

시뮬레이션의 결과에 따르면 배열 소자의 개수가 증가함에 따라 빔 성형 성능이 개선되고, 배열 소자간의 간격에 따라 다이버시티와 빔 성형간에 상충 관계가 존재함을 확인하였다. 또한 배열 소자의 수나 배열 소자간의 간격과 같은 적응 배열 안테나의 구조는 주어진 채널 환경에서의 AOS를 분석하여 최적의 다이버시티 이득과 빔 성형을 이루도록 설

계되어야 함을 확인하였다. 정량적으로 살펴본 시뮬레이션 결과에 따르면 배열 소자의 개수를 5개, 배열 소자간의 간격을 파장의 2배로 설정한 적응 배열 안테나는 단일 안테나 시스템에 비해 9배의 용량 증가를 기대할 수 있다. 그리고 적응 배열 안테나를 역방향 링크에서 pilot 채널을 이용하는 IS-665 시스템에 적용한 경우는 역방향 링크가 비동기식인 IS-95에 적용한 경우^[1]에 비해 대략 2배의 용량 개선을 보이고 있다. 따라서 IMT-2000 시스템은 적응 배열 안테나의 적용을 고려한다면 역방향에서 pilot 채널이나 pilot 심볼을 이용하는 CDMA 방식을 이용하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] A.F.Naguib, Adaptive Antennas for CDMA Wireless Network, Ph.D thesis, Dept. of Electrical Engineering, Stanford University, 1995
- [2] J.C.Liberti and T.S.Rappaport, "Reverse channel performance improvements in CDMA cellular communication systems employing Adaptive antennas," IEEE Proc. GLOBECOM, vol. VI, pp. 22-47, 1993
- [3] G.V.Tsoulos, M.A.Beach, and S.C.Swales, "Appliation of Adaptive Antenna Technology to Third Generation Mixed Cell Radio Architectures," IEEE Veh, Tech. Conf. Proc., Stockholm, pp 615-619, June 8-10, 1994
- [4] A.F.Naguib, A.Paulraj, and T.Kailath, "Capacity improvement with base-station antenna arrays in cellular CDMA," IEEE Trans. on V.T., vol. 43, pp. 691-696, Aug. 1994.
- [5] Y.Wang, J.R.Cruz, "Performace Analysis of CDMA Cellular Systems with Adaptive Antenna Arrays over Multipath Channels," IEEE I.C.C., vol. 1, pp. 536-540, June. 1996.
- [6] J.Salz and J.H.Winters, "Effect of fading correlation on Adaptive arrays in Digital mobile radio," IEEE Trans. on V.T., vol. 43, No. 4, pp. 1049-1057, Nov. 1994.
- [7] S.T.Kim, D.H.Choi, and H.K.Park, "Implementation of statistically rigorous spati-

o-temporal fading model," Electronic Letters, vol. 33, No. 12, pp. 1017-1018, June 1997

- [8] TIA/EIA IS-665, "W-CDMA(Wideband Code Division Multiple Access) Air Interface Compatibility Standard for 1.85 to 1.99 GHz PCS Applications."
- [9] R.A.Monzingo and T.W.Miller, Introduction to Adaptive Arrays, New York, John Wiley and Sons, 1980.
- [10] B.H.Khalaj, A.Paulraj, and T.Kailath, "2d rake receiver for CDMA cellular systems," IEEE Proc. GLOBCOMM, pp. 400-404, 1994

한진규(Jin-Kyu Han)

정회원



1996년 : 연세대학교 전파공학과 (공학사)
 1998년 : 연세대학교 대학원 전파공학과 (석사)
 1998년 ~현재 : 연세대학교 대학원 전파공학과 박사과정

<주관심 분야> 채널 모델링, 적응 배열 안테나, CDMA 이동통신 시스템

문철(Cheol Mun)

정회원



1995년 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (석사)
 1997년~현재 : 연세대학교 대학원 전파공학과 박사과정

<주관심 분야> 적응 배열 안테나, 채널 모델링, 능동 안테나

정한욱(Han-Wook Jung)

정회원

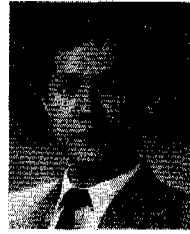
한국통신학회 논문지 제 22권 제 4호 참조

현재 : 한국통신 연구개발본부 무선통신연구소 광대역 무선시스템 연구실 실장

<주관심 분야> 무선통신, 가입자접속망, 광통신

윤영중(Young-Joong Yoon)

정회원



1981년 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학 석사)
 1991년 : Georgia institute of Technology, Ph.D.
 1992년 ~ 1993년 : 한국전자통신연구원 위성통신 기술연구단 선임연구원

현재 : 연세대학교 기계전자공학부 부교수
<주관심 분야> 안테나, 전파전파, RF 소자 설계

박한규(Han-Kyu Park)

정회원

한국통신학회 논문지 제 22권 제 9호 참조

현재 : 연세대학교 기계전자공학부 교수

<주관심 분야> 이동통신, 안테나, 마이크로파 통신 및 전파전파