

소 특 집

W-CDMA 스마트 안테나 시스템 및 성능분석 (W-CDMA Smart Antenna System and Performance Analysis)

좌 혜 경, 이 준 환, 박 재 준, 오 현 서

한국전자통신연구원

요 약

스마트 안테나 기술은 CDMA 이동통신 시스템에서 다른 사용자 간섭신호 및 무선 채널 특성에 의한 성능 열하 현상에 대해 효과적으로 성능 및 채널 용량을 개선할 수 있는 대표적인 해결 방법으로 알려지고 있다. 본 논문에서는 이러한 스마트 안테나 기술의 개요 및 국내외 기술동향에 대하여 기술하고, 단말기의 mobility를 고려한 스마트 안테나 채널 모델을 제안하였으며, W-CDMA FDD 상향 링크에서 칩 레벨 빔 형성 알고리즘을 적용한 스마트 안테나 기술의 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 스마트 안테나 기술을 적용한 경우, 채널 용량이 증가함을 알 수 있으며, 특히 DD(Decision-Directed) 모드의 칩 레벨 빔 형성 알고리즘을 적용했을 경우에 성능이 더욱 향상됨을 알 수 있다.

I. 서 론

이동통신시스템은 이동하는 단말기들과 셀 내 기지국간 무선 링크를 통하여 원하는 신호를 주고 받으며, 동일 주파수 대역에서 셀 내 여러 사용자들이 기지국과의 무선 링크를 효율적으로 사용하기 위해서 다중접속기술을 필요로 한다. 일반적으로 다중접속 기술에는 FDMA(Frequency Division Multiple Access), TDMA(Time Division Multiple Access), 그리고 CDMA

(Code Division Multiple Access) 방식으로 구분할 수 있다. 이 중에서 CDMA 방식은 기지국의 셀 내 채널 용량과 성능측면에서 가장 우수한 무선접속방식으로, IS-95 기반 셀룰러 이동통신기술 상용화와 실제 운용을 통하여 이 방식의 우수성이 입증되었다.

CDMA 이동통신시스템의 성능 및 채널 용량은 셀 간 혹은 일반적으로 셀 내에서 발생하는 동일채널 간섭신호와 경로손실, 다중경로 페이딩, 신호의 지연 및 도플러 확산 및 음영현상 등의 무선 전파채널 특성에 의해 근본적으로 제한된다. 즉, 셀 내 다수 사용자로 인한 간섭신호와 단말기와 기지국간 전파 채널 특성에 의해 채널 용량이 저하되므로, 이러한 성능 저하를 극복하기 위한 기술이 요구된다. 현재 CDMA 이동시스템에서는 이러한 성능 및 용량 제한현상을 보상하기 위한 기술로 대역확산, 전력제어, 채널코딩, RAKE 수신기, 안테나 다이버시티, 셀의 섹터화, 주파수 분할, 등의 기술을 사용하고 있다. 그러나 음성 서비스 외에 고속 데이터 서비스와 영상 서비스, 등의 이동 멀티미디어 서비스의 욕구가 증대되면서, 기존의 기술만으로는 고성능, 고용량의 무선 링크를 충족시키기는 점차 어려워질 것으로 판단된다. 예로, cdma2000 1X 시스템에서 2 Mbps의 고속 데이터를 전송하면 전송신호의 전력 크기가 크기에 실질적으로 다른 음성 채널을 제공하는 어려운 채널 환경이 된다.

이러한 다른 사용자 간섭신호 및 무선 채널 특성에 의한 성능 열하 현상에 대해 효과적으로 성능 및 채널 용량을 개선할 수 있는 방법이 '스마트 안테나 기술'이다^{[1][2][3]}.

스마트 안테나 시스템은 주어진 신호환경에 반응하여 자신의 방사 빔 패턴을 자동적으로 변화시킬 수 있는 지능형 안테나 시스템을 말하며, 복수개의 배열 안테나 소자를 선형, 평면형 또는 원형형태로 배열된 안테나 소자들로부터 수신신호를 적응적으로 결합하는 '빔 형성기'에 기반을 둔다.

본 논문은 먼저 이러한 스마트 안테나 기술의 개요 및 국내외 기술동향에 대하여 2장에서 기술하고, 3장에서는 단말기의 mobility를 고려한 스마트 안테나 채널 모델을 소개하였다. 4장에서는 이러한 채널 모델을 바탕으로 W-CDMA FDD 시스템의 스마트 안테나 성능을 평가해 보고, 5장에서 결론을 맺는다.

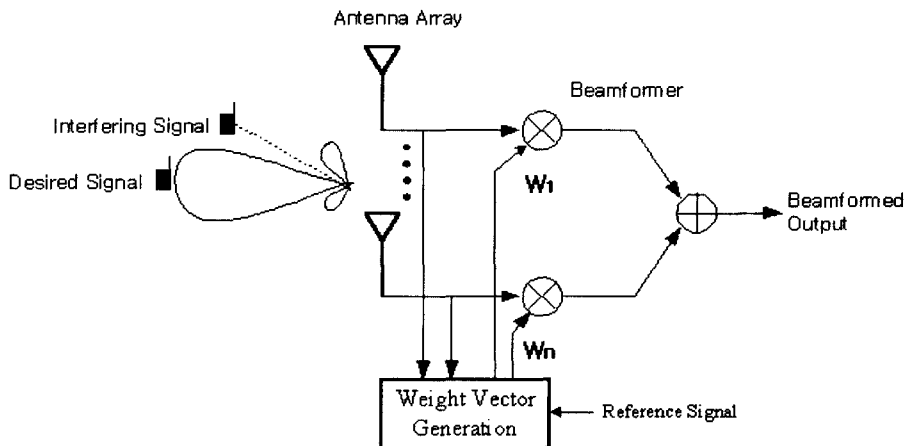
II. 스마트 안테나 기술

1. 개요

스마트 안테나 기술은 <그림 1>처럼 여러 개의 안테나를 사용하여 원하는 사용자에게는 안테나 이득이 크도록 빔 패턴을 생성하고, 간섭을 주는 사용자에게는 안테나 이득이 최소화 되도록 빔 패턴을 형성함으로써 궁극적으로 채널 용량을 증대시키는 공간 필터링 기술이다. 이러한 공간 필

터링은 안테나 어레이 간 수신되는 신호간에 상호 상관성이 큰 경우를 가정하며 공간 필터링을 위해서 어레이 신호를 결합하기 위한 적응 알고리즘이 필요하다.

기존의 다이버시티 기술은 안테나간에 간격이 5λ 이상이 되어 안테나를 통하여 수신되는 신호간에 서로 상관성이 거의 없는 채널을 가정하며, 이 경우 안테나 수신신호를 결합하는 기술로서 다중 경로 페이딩 채널에서 성능 저하를 개선할 수 있는 기술이다. 송신 전파 신호는 지형지물의 반사 및 산란을 거쳐 여러 개의 안테나에 수신이 되고 안테나간의 수신신호가 서로 상관성이 없다고 가정하면, 한 경로의 신호가 페이딩에 의해 적게 수신되어도 다른 경로에 의해 수신되는 신호는 크게 수신될 수 있는 현상이 발생한다. 따라서, 여러 안테나에 수신된 신호를 서로 결합함으로써 페이딩에 의한 신호의 감소를 현저히 개선하며, 안테나간 수신신호를 결합하는 방법에는 Selection Combining, Equal Gain Combining, Maximal Ratio Combining 방식이 있다. Selection Combining 방식은 수신되는 신호 중 신호 세기가 가장 큰 것을 선택하고, Equal Gain Combining 방식은 수신 신호들에 동일한 가중치를 곱하여 결합하는 방식이며, Maximal Ratio Combining 방식은 수신신호의 세기에 비례하여 가중치를 곱하고 결합하는 방식이다.



<그림 1> 스마트안테나 기술 개념

빔 형성기술은 안테나간에 간격이 0.5λ 정도에서 안테나를 통하여 수신되는 신호간에 서로 상관이 큰 경우의 채널을 가정하며, 안테나 수신 신호를 결합하여 원하는 빔 패턴을 생성할 수 있다. 안테나간의 상호 상관이 0.7 이상이 되어야 빔 형성이 정상적으로 이루어 지는데, 만약에 안테나간 상호상관이 0.7 이하로 되면 빔 형성의 효과보다는 상대적으로 다이버시티 효과가 크게 발생하게 된다.

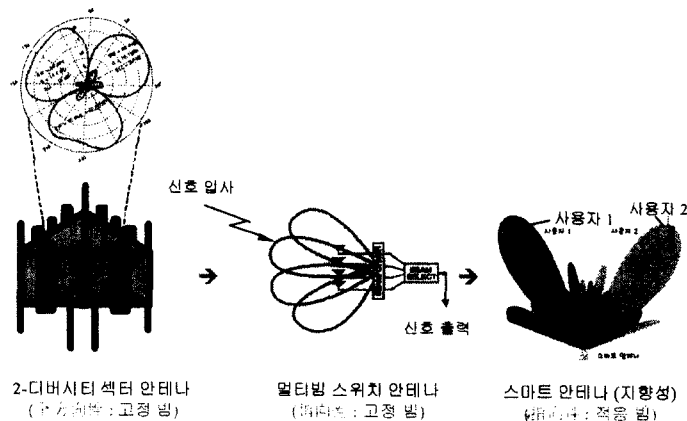
스마트 안테나의 빔 패턴을 생성하기 위해서는 <그림 1>에서처럼 수신신호에 가중치 값을 곱하고 결합을 하며, 이 가중치 값을 구하는 방법에는 여러 가지 방식이 연구되어 왔다. 가중치를 구하는 방법에는 Spatial Reference 빔 형성 방식과 Temporal Reference 빔 형성 방식이 있다. Spatial Reference 빔 형성 방식은 수신신호로부터 DOA(Direction of Arrival) 정보를 알아내고, DOA 방향으로 빔 형성 가중치 값을 생성하는 방법으로 대표적인 알고리즘으로는 MUSIC이나 ESPRIT 알고리즘이 있다. Temporal Reference 빔 형성 방식은 파일럿 신호를 이용하여 가중치 값을 생성하는 방법으로 MMSE, LMS, RLS 등의 대표적인 적응형 알고리즘을 적용한다.

안테나 빔 패턴의 폭은 성능에 크게 영향을 미치는데, 빔 패턴의 폭은 안테나 어레이 개수에 의

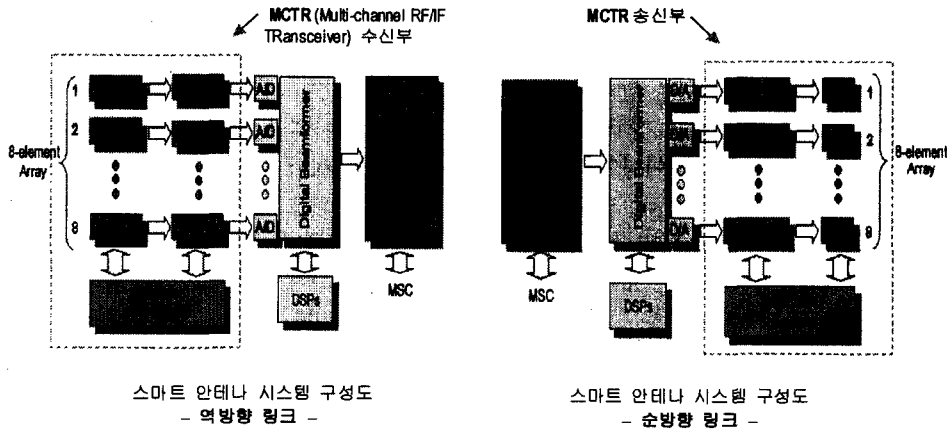
해 결정이 된다. 즉, 어레이 개수가 증가할수록 빔 패턴의 폭이 줄어들게 되어 공간 필터링 효과가 좋아진다. 안테나 어레이 개수가 증가하면 성능은 좋아지나, 반대로 RF 송수신기의 개수가 안테나 어레이 수만큼 증가하므로 RF 시스템이 복잡하게 되고 시스템의 단가도 증가하게 된다. 따라서, 안테나 시스템의 성능과 시스템의 복잡도를 고려하여 보통 4~12개의 안테나 어레이를 사용하게 된다.

안테나 어레이의 빔 형성은 원하는 사용자에게는 안테나 이득을 주고, 간섭을 주는 사용자에게는 안테나 빔을 nulling 시키는데, 간섭신호에 대한 빔 패턴을 nulling 시키는 수는 안테나 어레이 개수에 의해 결정이 된다. 안테나 어레이 개수가 M이면 안테나 빔 패턴의 nulling 수는 (M-1)이 된다.

CDMA 이동통신시스템에서 사용되는 안테나 기술에는 <그림 2>에서처럼 섹터 안테나 기술과 Switched 빔 형성 기술, 그리고 적응형 안테나 기술이 있다. 섹터 안테나 기술은 Omni형 안테나 대신 3섹터 안테나를 사용하며 IS-95 CDMA 시스템에 적용되어 채널 용량을 3배 정도 개선시켰다. 실제로 셀 내의 트래픽 양은 시간에 따라서 변화하기 때문에 시간에 따라 섹터 안테나의 빔 폭을 조정하는 적응형 섹터 안테나 기술도 사용이 되고 있다. 섹터 안테나 보다 향상된 대표적인



<그림 2> 이동 기지국 안테나 빔 형성 기술의 진화



<그림 3> 스마트 안테나 시스템의 주요 서브시스템 구성도

기술로는 Switched 빔 형성기술과 적응형 빔 형성기술이 있다. Switched 빔 형성기술은 여러 개의 안테나 빔을 형성하고 한 개의 안테나 빔을 선택하여 사용하는 방식으로, 구현이 간단하고 성능이 우수한 이점이 있으나 빔 스위칭 시에 통신 호가 절단이 되는 단점이 있고 사용자 그룹별로 빔 형성이 이루어지므로 최적의 성능을 얻기가 어렵다. 적응형 빔 형성 기술은 사용자별로 빔 형성이 이루어지므로 최적의 성능을 얻을 뿐만 아니라 단말기의 이동과 채널의 변화에 따라 가중치 값을 지속적으로 갱신함으로써 빔 형성이 이루어지므로 가장 우수한 성능을 얻을 수 있다.

2. 스마트 안테나 구성 및 기능

스마트 안테나는 크게 역방향 빔 형성 기술과 순방향 빔 형성 기술로 나뉘어지며 다음과 같은 구성과 기능을 갖는다<그림 3 참조>.

- ① Antenna Array : 다수의 안테나로 구성되어 원하는 안테나 빔 패턴을 생성하는데, 안테나 수가 증가할수록 빔 패턴이 좁아져서 성능이 증가하지만 시스템의 복잡도를 고려하여 보통 4~12개가 사용된다. 안테나 형태로는 Uniform Linear Array, Uniform Circular Array 등이 있다.
- ② RF Transceiver : 배열 안테나 수와 동일

하게 사용되며, 각 배열 안테나로부터 입력된 RF 입출력 신호에 대한 Up/Down converter RF/IF 모듈로 구성되어 진다.

- ③ 빔 형성기 : 원하는 사용자 방향으로의 빔 형성을 수행하는 모듈로, 빔 형성을 위한 Weight 벡터를 계산하기 위해 다양한 적응형 알고리즘이 사용된다. 일반적으로 DOA (Direction of Arrival)에 의하여 Weight 벡터를 구하는 방법과 Time Reference에 의하여 Weight 벡터를 구하는 방법이 있으며, 빔형성을 위한 가중치 벡터의 실시간 계산을 위하여 고도의 DSP 처리기술이 필요하다.
- ④ RF Calibration : Multi-channel 수신기의 각 배열 안테나 소자 특성의 미세한 차이와 RF 채널 송수신기간 진폭과 위상의 오차는 빔 형성기의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 각 안테나 소자의 특성 차이를 보상하고, 배열 안테나간 RF 채널 송수신기의 진폭과 위상의 차이를 보정하는 것이 필요하다. 안테나 오차 보정은 Off-line Calibration 방법을 사용하고, RF 채널 오차 보정은 On-line Calibration이 사용된다. 실제 상용화 시스템에서는 실시간 제어에 의해 이를 보상할 수 있는 On-line Calibration이 요구된다.



〈그림 4〉 유럽의 TSUNAMI I Effort : DECT/SDMA 데모

- ⑤ Adaptive BTS : 기존의 기지국 시스템으로 채널 카드와 채널 카드 제어 기능 및 망 접속 기능으로 구성된다. 스마트 안테나 기술을 적용하기 위해서는 기존의 채널 카드내의 일부 모듈 구조 변경이 필요하다.

3. 스마트 안테나 기술동향

스마트 안테나 기술은 기관별로 혹은 공동기술 연구 협의체 구성을 통하여 유럽, 미국 등 선진국을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 국내에서는 한국전자통신연구원에서 스마트 안테나 원천기술과 시스템 설계 및 개발에 관한 연구가 진행되고 있고 일부 학교에서 알고리즘 연구가 진행되고 있다. 국외에서는 현재 FDMA 및 TDMA 방식의 이동시스템을 위한 스마트 안테나 시스템 연구개발은 상용화 수준까지 상당히 진척된 것으로 보이나, CDMA 방식에 기초한 본격적인 스마트 안테나 시스템 연구개발 및 구현은 아직 미진한 상태이다.

미국의 켈컴사도 스탠포드 대학과 공동연구를 수행한 바 있으며, 유럽은 RACE II ('92~'94)의 TSUNAMI I R2108 연구 프로젝트와 ACTS ('95~'97)의 TSUNAMI II AC020 연구 프로젝트를 통해 각각 DECT/TDMA/SDMA〈그림 4 참조〉 및 DCS1800/TDMA/SDMA 축소 모형 하부구조에 적용한 스마트 안테나 시스템의 적용가능성 및 경제성을 시연했다. 그 외에도 캐

나다의 Nortel, 스웨덴의 Ericsson, 영국의 ERA Technology, 이스라엘의 Rafael사, 일본의 선도적 R&D 회사인 Miyoshi Electronics Corporation과 NTT DoCoMo, 미국의 Virginia Polytechnic의 MPRG, AT&T, Lucent Technology, Celwave, Hazeltine Corp., Metawave Communications Corp., ArrayComm, Inc. 등과 같은 회사들이 이 분야의 연구개발에 이미 적극적으로 참여해 오고 있다. 대부분 switched-beam 방식의 안테나 시스템을 실험 운용하거나 상용화하는 연구개발 노력을 기울이고 있으며, 최근에는 Ericsson에서 상용수준의 GSM 스마트 안테나 시스템을 개발하여 발표한 바 있다. 가장 최근에 유럽은 SUNBEAM 프로젝트를 시작하여 비동기식 WCDMA 스마트 안테나 시스템을 연구개발하고 있으며, 일본 NTT DoCoMo도 자신들의 비동기식 IMT-2000 표준 RTT에 기반을 둔 스마트 안테나 시스템 개발에 어느 정도의 노력을 기울이기 시작하였다. 한편, Lucent Technology도 동기식 cdma2000 시스템에 Full adaptive 스마트 안테나 기술을 적용한 RTT를 ITU-R에 제안한 이후 IMT-2000 CSAS 시스템 개발에 적극적인 노력을 기울여 온 것으로 파악된다.

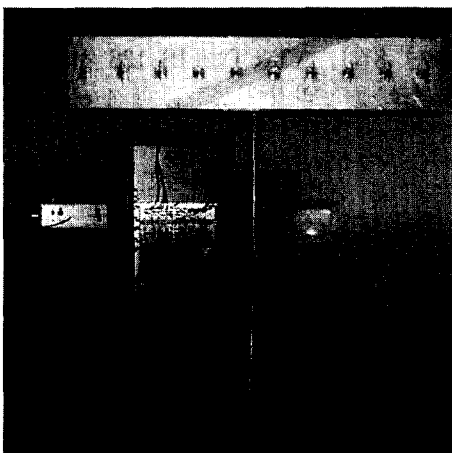
스마트 안테나 시스템의 상용시험 또는 설치 예로는 Ericsson이 독일의 이동사업자인 Mannesmann Mobi-funk GmbH와 공동연구 끝에 상용 GSM 망에서 실제 운영시험을 한 바 있고 (1998년 8월), AT&T는 IS-136 시스템망〈그림 5 참조〉을 브라질에 설치할 때 4-element 스



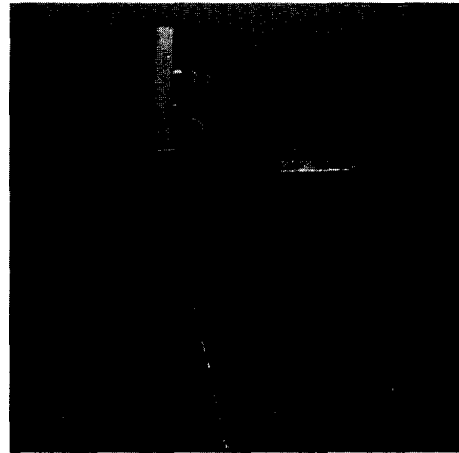
〈그림 5〉 IS-136 스마트 안테나 Testbed

마트 안테나 기지국 시스템을 설치할 수 있도록 설계하여 선택사항으로 설치 운용토록 하였다. 한편, 스마트 안테나 시스템의 상용제품 개발사례는 미국의 Metawave사와 ArrayComm사에 의한 시스템 제작판매가 대표적인 경우이다. Metawave 시스템(상품명: SpotLight-2000)의 지능성은 12개의 배열 안테나 시스템으로 약 40% 정도 수준의 용량증대를 보장하는 빔 스위칭에 의한 고정 빔 형성 방식의 수준을 벗어나지 못하고 있으나, ArrayComm의 시스템(상품명: IntelliWave WLL)은 특수한 채널 identification 알고리즘에 기초한 일종의 Full adaptive 빔 형성 방식으로 보다 나은 성능(고성능의 음질 보장) 및 용량 개선을 제품에서 선보이고 있다. ArrayComm의 시스템은 모두 WLL 응용 위주의 시스템으로써 일본의 PHS 무선접속 인프라에 IntelliWave WLL을 접목하여 개발된 시스템을 상당수 실전 배치하였으며, 음질과 잦은 통화불통의 문제를 상당히 해결한 것으로 알려지고 있다.

ETRI에서는 1997년도에 빔형성 알고리즘, S-T 배열 송수신기 구조 연구에 기초한 CA³TS (CDMA Adaptive Antenna Array Testbed System)를 개발하였고(그림 6 참조), 이를 위한 배열 안테나 및 RF/IF chain 보드 개발 및 CA³TS의 현장시험을 통한 IMT-2000 스마트



〈그림 6〉 ETRI의 IS-95 Testbed: CA³TS.



〈그림 7〉 ETRI의 W-CDMA Testbed: W-CA³TS

안테나 시스템의 Extrapolated field 성능분석을 수행하였다^[4]. 1998년도에는 빔형성 알고리즘, 성능분석 시뮬레이션 프로그래밍 및 Searcher 빔 형성 방식의 복조기 구조에 관한 기초연구를 수행하였고, 1999년도에는 Target 빔 형성 알고리즘 비교선정 및 설계, 스마트 안테나 시스템 설계 및 성능분석, 오차보정 (Calibration) 기술 연구를 수행하였다^[5]. 2000년도에는 동기식 IMT-2000/cdma2000 1X CSAS(CDMA Smart Antenna System) 개발을 위한 서브시스템 설계, 그리고 실시간 신호처리 기술 연구 및 시스템 성능분석을 1차 완료하였으며^[6], 현재는 비동기식 IMT-2000/WCDMA CSAS 개발을 위한 연구를 수행중이다^[7](그림 7 참조).

III. Mobility를 고려한 스마트 안테나 채널 모델

무선 이동통신의 폭발적인 증가에 따라 무선 채널 환경에서 기지국의 효율적인 채널 운영과 용량 증가를 도모하기 위한 3세대 이동 통신의 한 분야인 스마트 안테나 기술의 개발이 가속화되고 있다. 스마트 안테나 시스템 개발을 위한 시뮬레이터를 구현 시 실제 통신 환경에 대한 모델

링과 설정된 환경에 적합한 알고리즘의 선택을 위한 성능 분석이 먼저 수반되어야 한다. 특히, 무선 통신 채널 환경에 대한 정확한 이해와 이론적인 채널 모델의 설정이 중요하게 여겨지게 되었다. 스마트 안테나 시스템이 적용되는 셀 환경은 크게 기지국이 관리하는 셀 타입에 따라 Macro cell과 Micro cell로 구분할 수 있다. 스마트 안테나 채널 모델, 즉 무선 통신 환경에 대한 채널 모델에는 크게 반송파의 지연에 따른 위상 변위와 진폭 변화, 배열 안테나를 이용함에 따른 ASV(Array Steering Vector)가 존재한다. 이때, 위상 변위(도플러 주파수에 따른 영향 포함)와 진폭 변화를 총칭해서 채널의 small scale 페이딩이라고 하며, ASV는 배열 안테나로 입사되는 수신 신호의 도래각 정보(DOA)에 따른 채널을 말한다. 무선 통신 환경에서 페이딩의 영향이라고 하면, path loss나 shadowing과 같은 large scale 페이딩과 scatterer나 단말기의 이동에 따른 small scale 페이딩에 의한 영향을 말한다^[8]. 언급한 것과 같이 스마트 안테나 채널 모델, 즉 벡터 채널 모델은 이동국과 배열 안테나를 사용하는 기지국 간의 무선 통신 채널상에서의 페이딩 현상과 ASV에 따른 배열 응답 벡터의 고려가 주된 채널 파라미터라고 할 수 있다. 또한 스마트 안테나 채널 모델은 크게 static 채널 모델과 이동국의 이동도를 고려한 mobility 채널 모델로 구분할 수 있다. Static 채널 모델이라 함은 등속도로 이동하는 이동국에 따른 페이딩 채널 모델이며, mobility 채널 모델이라 함은 등가속도 운동을 하는 이동국에 대한 페이딩 채널 모델을 말한다.

이동국의 mobility를 고려한 스마트 안테나 채널 모델을 구성하는 것은 static 채널 모델과 크게 다르지 않다. <그림 8>에서 보여지는 것과 같이 이동국 셀 내에서 방향을 갖고 등가속도 운동을 할 경우 이동국 주변에 존재하는 scatterer의 분포가 달라지게 된다. 이동국 주변에 scatterer가 존재하는 영역을 active 셀(cluster) 영역이라 설정한다면, 이러한 active 셀 내부의 scatterer의 위치나 개수에서 변화가 생기며 이

러한 요소들을 시간의 변화에 따라 고려한 채널 모델을 mobility를 고려한 스마트 안테나 채널 모델이라 한다. 본 채널 모델을 구성하기 위해서는 active 셀 내에서의 scatterer로부터 기지국의 기준 안테나까지의 거리 정보와 입사각 정보가 채널을 구성하는데 있어서 가장 중요한 파라미터가 된다. 이들 파라미터들은 아래 <그림 8>에서 보여지며, (수식 1)과 (수식 2)을 이용한다.

$$\text{Time delay} = \frac{\vec{r}_{BS,s1} + \vec{r}_{BS,s1}}{c} \quad (1)$$

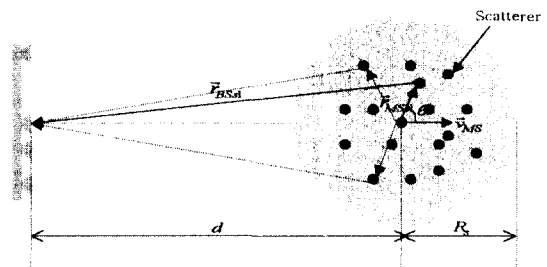
$$\begin{aligned} \text{Doppler shift} &= \frac{\vec{v}}{\lambda} \cos \theta \\ &= \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{(\vec{r}_{BS,s1} \cdot \vec{v}_{MS})}{\|\vec{r}_{BS,s1}\| \cdot \|\vec{v}_{MS}\|} \end{aligned} \quad (2)$$

이동국의 Mobility를 고려한 채널을 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h(\tau, \theta, t) &= \sum_{l=1}^L \alpha_l(t) \cdot \\ &\sum_{q=1}^Q \beta_{q,l}(t) a(\theta_{q,l}(t)) \\ &\delta(\tau - \tau_{q,l}(t)) \delta(\theta - \theta_{q,l}(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

$\alpha_l(t)$ 은 각 다중 경로에 대한 크기를 말하고, $\beta_{q,l}(t)$ 은 scatterer에 따른 경로 손실, $\tau_{q,l}(t)$ 은 각 cluster에서 scatterer에 따른 시간 지연, $\theta_{q,l}(t)$ 은 cluster에서 scatterer로부터의 AOA(Angle of Arrival)을 말한다.

Mobility 채널 모델 또한 static 채널 모델과 마찬가지로 NLOS(Non-Line Of Sight)에서는 레일리 페이딩 분포를 가정하므로 발생된 채



<그림 8> Active 셀과 scatterer의 분포.

널 데이터의 envelope 분포는 레일리 페이딩 분포를 가져야 한다. 특히, mobility 채널 모델에서 중요한 점은 scatterer의 발생부분이다. Static 채널 모델에서와 같이 scatterer의 분포가 uniform 분포를 따를 경우는 8~10개의 scatterer만을 이용한다 하더라도 레일리 분포를 갖게 된다. 그러나 mobility 채널 모델에서는 scatterer의 분포를 가우시안 분포로 가정하여 발생시키게 되는데, 이럴 경우 static 채널 모델과 같은 결과를 얻기 위해서는 적어도 16개 이상의 scatterer를 이용하여야 한다. 따라서, static 채널 모델을 이용하였을 경우보다 mobility 채널 모델을 적용하였을 경우가 시뮬레이션 수행시간이 많이 걸리게 된다. 물론 현실적인 채널 환경을 모델링하여 시뮬레이션을 수행하는 것이 가장 바람직하지만, 시뮬레이션 수행 시간의 문제점으로 인하여 static 스마트 안테나 채널 모델^[9]을 주로 사용한다.

IV. W-CDMA FDD 시스템의 빔 형성 성능 분석

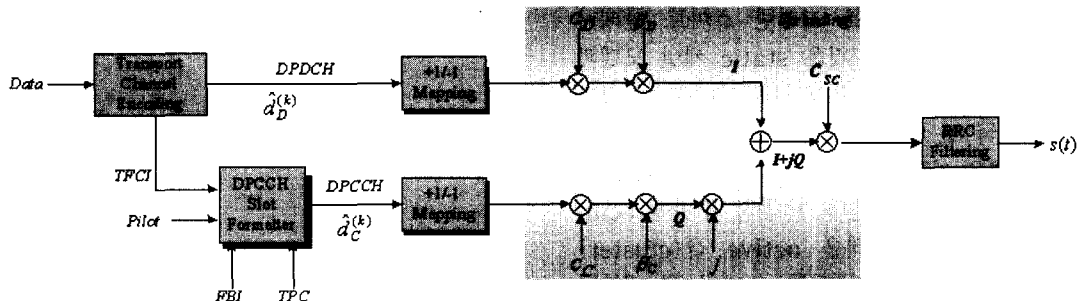
WCDMA/FDD 모드에서 스마트 안테나 시스템의 성능 분석을 위한 시뮬레이터에 대한 상세 설명을 하고, 칩 레벨 빔 형성 알고리즘을 적용한 스마트 안테나 시스템의 성능을 보인다. 특히, Decision-Directed 모드 적용했을 경우의

성능을 비교하였다.

1. 단말기 송신부 시뮬레이션 모델

WCDMA FDD 방식의 상향 링크 송신부 구조는 <그림 9>와 같다. 본 시뮬레이터는 WCDMA FDD 방식에서 스마트 안테나 시스템의 성능을 분석하기 위한 것이므로, WCDMA FDD 방식의 송신기 구조^{[10][11]}에서 가장 기본적인 블록만을 고려하여 구성하기 위해 다음과 같은 가정을 전제로 한다.

- 스마트 안테나 시스템을 적용하기 위해 가장 적절한 물리 채널은 통화 상태에 열리는 전용 물리 데이터 채널(DPDCH)과 이와 함께 전송되는 전용 물리 제어 채널(DPCCH)로 이 두 채널을 전송하는 송신기를 구성한다. 한 슬롯씩 데이터를 처리한다.
- 전용 물리 데이터 채널(DPDCH) 구성 시, CRC, 채널 코딩 및 인터리빙 과정을 거치지 않는다. 즉, 트랜스포트 채널 인코더(TrCH Encoder) 및 디코더(TrCH Decoder)를 구현하지 않는다. 또한, 고속 데이터 전송 시 지원되는 다중 코드 전송(Multi-code transmission)은 하지 않으며, Compressed mode는 고려하지 않는다.
- 트랜스포트 채널 인코더를 구현하지 않으므로, 인코더의 출력으로부터 알 수 있는 DPDCH의 SF(Spreading Factor)는 안다고 가정하고, 또한 전용 물리 제어 채널(DPCCH)



<그림 9> WCDMA FDD mode 상향 링크 시뮬레이터의 단말기 송신부 구조

을 구성하는 요소인 트랜스포트 형식 조합 지시자(TFCI, Transport Format Combination Indicator)는 없다고 가정하거나, 만약 DPCCH의 슬롯 형식에서 TFCI를 지원하는 경우 랜덤 데이터를 사용한다. 따라서, TFCI 인코더 및 디코더는 구현하지 않는다.

- DPCCH를 구성하는 요소인 피드백 정보(FBI)도 없다고 가정하거나, 필요한 경우 랜덤 데이터를 사용하며, 송신 전력 제어 정보(TPC)도 랜덤 데이터를 사용한다.
- 확산 과정에서 이루어지는 각 채널의 전력 제어(power control)는 하지 않는다.
- 시간이 많이 소요되는 펄스 형성 필터는 사용하지 않는다.

위의 가정과 WCDMA FDD mode의 단말기 송신부에 관한 규격을 바탕으로 <그림 9>와 같이 단말기 송신부를 구성한다.

2. 기지국 수신부 시뮬레이션 모델

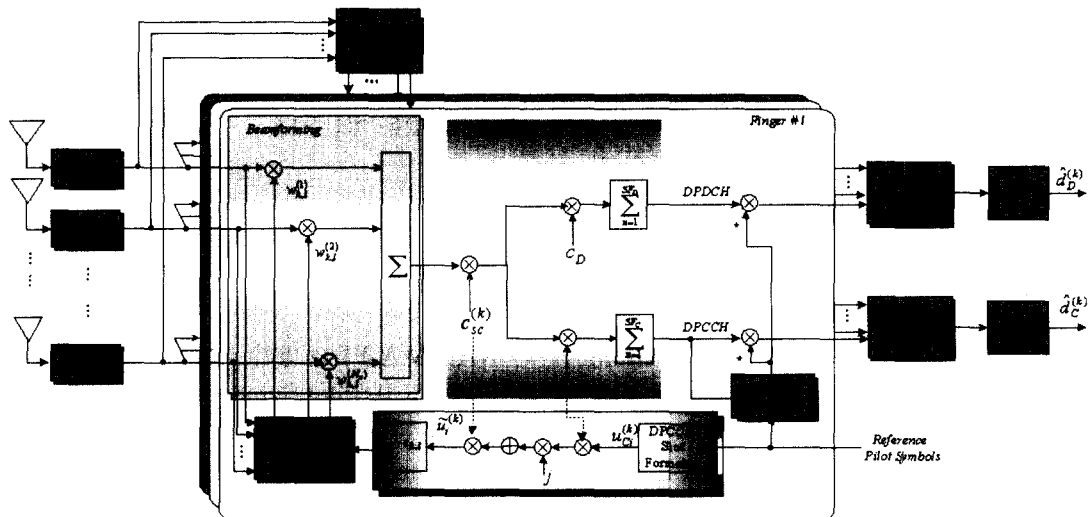
<그림 10>은 PSCLB(Pilot Symbol Chip-Level Beamforming)을 적용한 WCDMA FDD mode 기지국 스마트 안테나 시스템의 수신기 구조

조이고, <그림 11>은 DDCLB(Decision-Directed Chip-Level Beamforming)을 적용한 스마트 안테나 시스템 수신기 구조이다^[12]. 단말기 송신기와 마찬가지로 기지국 스마트 안테나 시스템 수신기 구조를 구성하는 데에도 다음과 같은 가정이 필요하다.

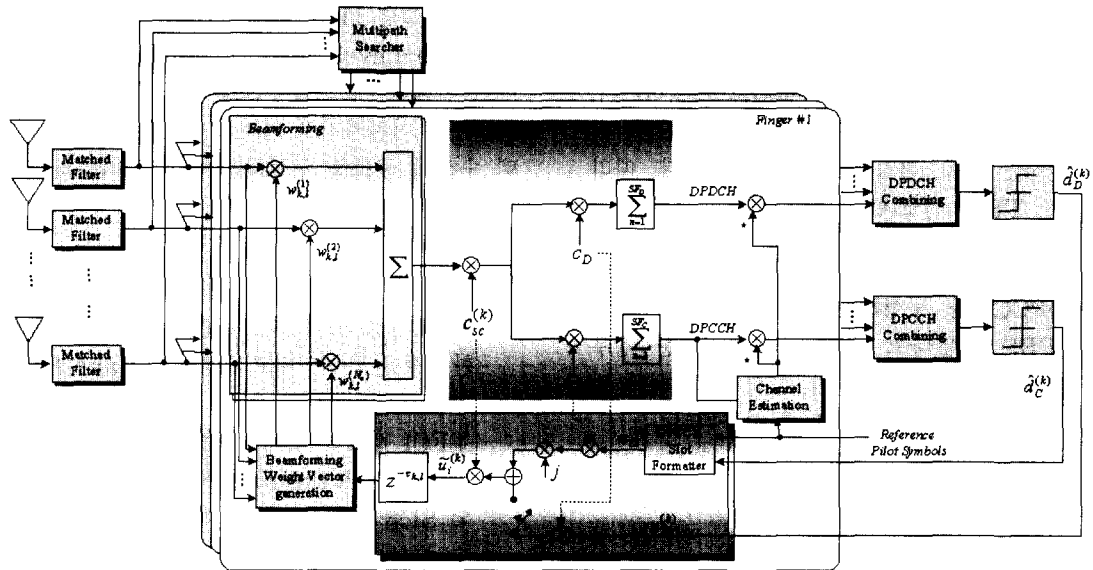
- 수신부의 펄스 성형 필터도 사용하지 않는다.
- 다중 경로 탐색기는 채널의 다중 경로에 관한 정보를 모두 안다고 가정하고, Rake finger 수는 4개로 한다.
- TFCI 정보를 보내지 않는다고 가정을 했기 때문에 각 Rake finger에서 이미 DPDCH의 SF를 안다고 가정하여 역확산을 한다.
- 수신기에서는 이미 해당 사용자에 대한 파일럿 신호를 안다고 가정한다.

이를 바탕으로 기지국 수신기에서는 각 안테나로 수신된 신호를 기저대역 신호로 변환하고, ADC, RRC 정합 필터를 거친 후, 다중 경로 탐색기로 찾은 경로의 정보를 바탕으로 각 경로마다 Rake finger로 할당한다.

<그림 10>을 바탕으로 하는 수신기는 PSCLB(Pilot Symbol Chip-Level Beamforming)을



<그림 10> PSCLB(Pilot Symbol Chip-Level Beamforming)을 적용한 스마트 안테나 시스템의 수신기 구조



〈그림 11〉 DDCLB(Decision-Directed Chip-Level Beamforming)을 적용한 스마트 안테나 시스템 수신기 구조

적용한 스마트 안테나 수신기로서, 각 finger마다 파일럿 심볼을 이용하여, 칩 레벨 빔 형성 과정을 거친 후, 빔 형성기의 출력 신호에 해당 사용자의 Scrambling 코드와 채널 코드를 곱하고 해당 사용자가 보낸 DPDCH/DPCCH 부분을 추출하여 SF 만큼씩 Intergrate&dump 필터를 거친다. 해당 사용자의 Scrambling 코드는 수신부에서 이미 알고 있는 정보이며, 채널 코드의 경우, DPCCH는 항상 SF=256이고 코드 number가 0인 채널 코드를 사용하므로 이를 곱하고, 256 chip을 더하여 내보낸다. DPDCH의 SF는 실제 역확산 과정에서는 모르는 정보로 이는 Rake combining 후의 TFCI를 디코딩 하여 알 수 있는 것이다. 그러나, 본 시뮬레이터에서는 TFCI 정보는 보내지 않았으므로, 이 과정에서 DPDCH의 SF와 코드 number를 안다고 가정하여 채널 코드를 생성시켜 곱하고, SF만큼씩 더하여 내보낸다. 이렇게 역확산된 후에 MRC(Maximal Ratio Combininb)를 위해 역확산된 DPCCH와 이미 알고 있는 파일럿을 가지고 채널 추정을 한다. 이 채널 추정값을 역확산된 DPDCH와 DPCCH에 각각 곱한 후, 각 finger에 대하여 combining 한다. 이후, 우리는 DPDCH에 보내

고자 하는 데이터를 실어보냈으므로, hard-decision 과정을 거쳐 BER(Bit error rate)을 계산한다.

〈그림 11〉를 바탕으로 하는 수신기는 DDCLB(Decision-Directed Chip-Level Beamforming)을 적용한 스마트 안테나 수신기^[12]로서 〈그림 10〉의 수신기에서 나온 DPDCH/DPCCH 심볼과 파일럿 심볼을 이용하여 decision-directed 데이터를 이용한 DD-DPCCH/DD-DPDCH scheme 중 한 개의 기준 신호를 만들어 칩 레벨 빔 형성 과정부터 hard-decision 과정을 되풀이하여 BER을 계산한다.

V. 시뮬레이션 결과

WCDMA FDD 방식 상향 링크 모델을 바탕으로 PSCLB(Pilot Symbol Chip-Level Beamforming)과 DDCLB(Decision-Directed Chip-Level Beamforming)을 적용한 스마트 안테나 시스템의 성능을 분석하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. Eb/No, 안테나의 수, 셀 내의

〈표 1〉 ETSI에서 제안한 채널 파라미터
(Classic Doppler spectrum)

Tap	Pedestrian Channel B model		Vehicular Channel B model	
	Relative Delay (ns)	Avg. Power (dB)	Relative Delay (ns)	Avg. Power (dB)
1	0	0	0	2.5
2	200	-0.9	300	0
3	800	-4.9	8900	-12.8
4	1200	-8.0	12900	-10.0
5	2300	-7.8	17100	-25.2
6	3700	-23.9	20000	-16.0

사용자 수 등, 다양한 parameter를 변화시키면서 상향 링크 스마트 안테나 시스템의 BER (Bit Error Rate) 성능을 알아본다.

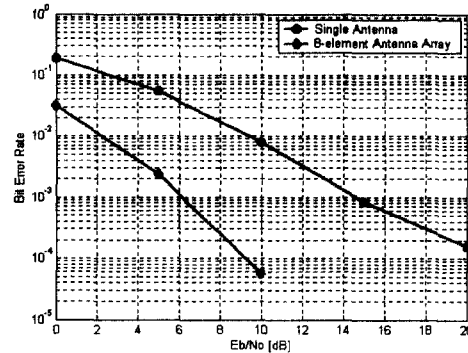
1. 파라미터 설정

Simulation을 위해 필요한 공통적인 parameter를 다음과 같이 설정하였다. 중심 주파수는 1962.5 MHz, chip rate는 3.84 Mcps, 배열 안테나는 안테나 사이의 간격이 0.5λ인 uniform linear array를 이용하였고, 〈표 1〉의 채널 파라미터를 사용하였다.

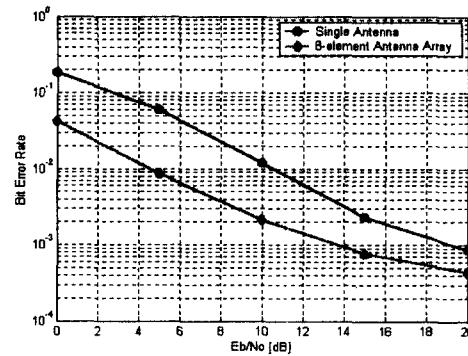
2. PSCLB(Pilot Symbol Chip-Level Beamforming)을 적용한 스마트 안테나 시스템 성능 분석을 위한 시뮬레이션

1) 안테나 수 변화에 따른 E_b/N_0 대 uncoded BER 성능

- 사용자 수 : 1
- SF of DPDCH : 16(240kbps, 16bits/1slot)
- Slot Format of DPCCH : #1(Pilot : 8 bits, TPC : 2bits)
- 기지국 안테나 수 : 1, 8개로 변화
- 빔 형성 알고리즘 : SMI 알고리즘
- 무선 채널 : 6-path Pedestrian channel, 6-path Vehicular channel
- 해당 단말 이동 속도 : Pedestrian channel-10 km/h, Vehicular channel-120 km/h



(a) Pedestrian Channel



(b) Vehicular Channel

〈그림 12〉 칩 레벨 빔 형성 알고리즘을 적용한 스마트 안테나 시스템에서의 안테나 수의 변화에 따른 E_b/N_0 대 uncoded BER 특성.

Pedestrian Channel에서는 BER이 10^{-2} 일 때, 안테나 수가 1개일 때보다 8개일 때, 8dB 정도의 이득을 얻을 수 있으며, E_b/N_0 가 높아질수록 더 많은 이득을 얻을 수 있다. 여기서, 8개 안테나 어레이의 성능에서 나타나지 않은 부분은 BER이 0이다. Vehicular Channel에서는 BER이 10^{-2} , 10^{-3} 일 때, 8개의 안테나 어레이를 사용하면 단일 안테나를 사용하는 경우보다 약 6dB의 이득을 얻을 수 있다.

2) 안테나 수에 따른 사용자 수 대 uncoded BER 성능

- 사용자 수 : 1~25
- SF of DPDCH : 16(240 kbps, 16bits/1slot)

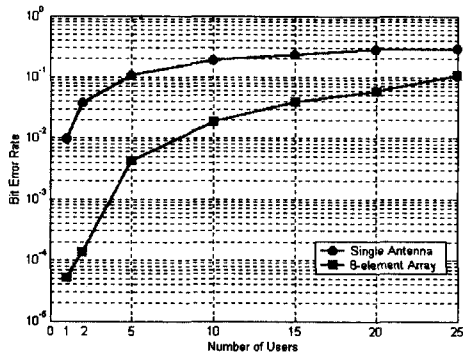
- Slot Format of DPCCH : #1(Pilot : 8 bits, TPC : 2bits)
- 기지국 안테나 수 : 1, 8개로 변화
- $E_b/N_o=10$ dB
- 빔 형성 알고리즘 : SMI 알고리즘
- 무선 채널 : 6-path Pedestrian channel, 6-path Vehicular channel
- 해당 단말 이동 속도 : Pedestrian channel-10 km/h, Vehicular channel-120 km/h

Pedestrian Channel에서는 BER이 4×10^{-2} 일 때, 안테나 수가 1개일 때보다 8개일 때는 15명/2명 배의 용량을 얻을 수 있다. Vehicular Channel에서는 BER이 4×10^{-2} 일 때, 안테나

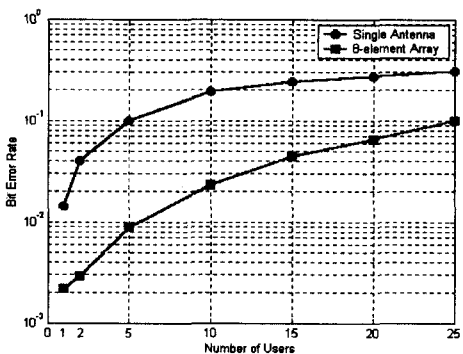
수가 1개일 때보다 8개일 때는 약 14명/2명 배의 채널 용량을 얻을 수 있음을 알 수 있다

3. DDCLB(Decision-Directed Chip-Level Beam-forming)을 적용한 스마트 안테나 시스템 성능 분석을 위한 시뮬레이션

- 1) E_b/N_o 대 uncoded BER 성능
 - 사용자 수 : 1(0-Interferer)
 - SF of DPDCH : 16(240kbps, 16bits/1slot)
 - Slot Format of DPCCH : #1(Pilot : 8 bits, TPC : 2bits)
 - 기지국 안테나 수 : 8개
 - $E_b/N_o=10$ dB

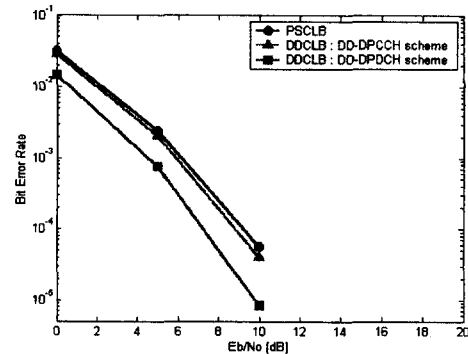


(a) Pedestrian Channel

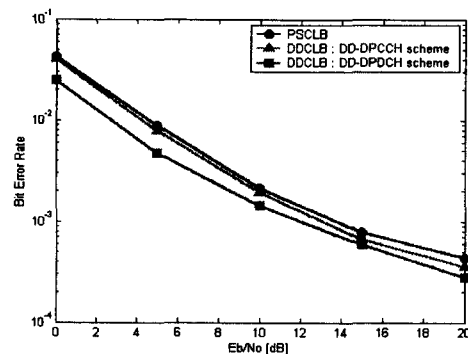


(b) Vehicular Channel

<그림 13> 칩 레벨 빔 형성 알고리즘을 적용한 스마트 안테나 시스템에서의 안테나 수의 변화에 따른 사용자 수 대 uncoded BER 특성.



(a) Pedestrian Channel



(b) Vehicular Channel

<그림 14> PSCLB와 DDCLB를 적용한 스마트 안테나 시스템의 E_b/N_o 대 uncoded BER 특성.

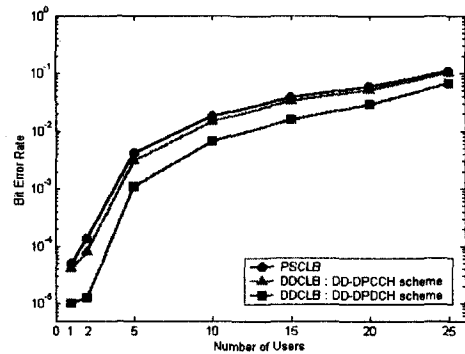
- 빔 형성 알고리즘 : SMI 알고리즘
- 무선 채널 : 6-path Pedestrian channel B model, 6-path Vehicular channel B model
- 해당 단말 이동 속도 : Pedestrian channel-10 km/h, Vehicular channel-120 km/h

Pedestrian Channel에서는 BER이 10^{-2} 일 때, DDCLB의 DD-DPDCH scheme은 PSCLB보다 약 1.42dB, DD-DPCCH scheme의 경우에는 약 0.1dB 정도의 이득을 얻을 수 있다. Vehicular Channel에서는 BER이 10^{-2} 일 때, DDCLB의 DD-DPDCH scheme은 PSCLB보다 약 2dB, DD-DPCCH scheme의 경우에는 약 0.3dB 정도의 이득을 얻을 수 있다.

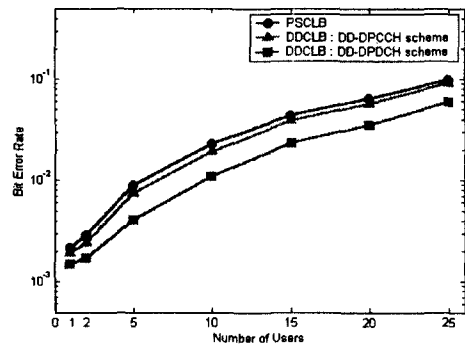
2) 사용자 수 대 uncoded BER 성능

- 사용자 수 : 1~25명
- SF of DPDCH : 16(240kbps, 16bits/1slot)
- Slot Format of DPCCH : #1(Pilot : 8 bits, TPC : 2bits)
- 기지국 안테나 수 : 8개
- $E_b/N_0=10$ dB
- 빔 형성 알고리즘 : SMI 알고리즘
- 무선 채널 : 2-path Pedestrian channel (Case 1), 6-path Vehicular B channel
- 해당 단말 이동 속도 : Pedestrian channel-10 km/h, Vehicular channel-120 km/h

Pedestrian Channel에서는 BER이 4×10^{-2} 일 때, DDCLB의 DD-DPDCH scheme은 PSCLB보다 약 23/15명 배의 성능을 얻을 수 있으며, DDCLB의 DD-DPCCH scheme을 사용했을 때에는 약 18/15명 배의 성능을 얻을 수 있다. Vehicular 채널에서는 BER이 4×10^{-2} 일 때, DDCLB의 DD-DPDCH scheme은 PSCLB보다 약 20/14명 배의 성능을 얻을 수 있으며, DDCLB의 DD-DPCCH scheme을 사용했을 때에는 약 15/14명 배의 성능을 얻을 수 있다.



(a) Pedestrian Channel



(b) Vehicular Channel

<그림 15> PSCLB와 DDCLB를 적용한 스마트 안테나 시스템의 사용자 수 대 uncoded BER 특성.

VI. 결 론

스마트 안테나 기술은 여러 개의 안테나를 사용하여 원하는 사용자에게는 안테나 이득이 크도록 빔 패턴을 생성하고, 간섭 사용자에게는 안테나 이득이 최소화 되도록 빔 패턴을 형성함으로써 채널 용량을 증대시키는 공간 필터링 기술을 말하며, 섹터 안테나 기술로부터 시작되어 switched 빔 형성 기술, 그리고 단말기의 이동과 채널의 변화에 따라 가중치 값을 적응적으로 갱신하는 적응 빔 형성 기술로 발전되어 왔다. 본 논문에서는 단말기의 mobility를 고려한 스마트 안테나 채널 모델을 제안하였고, W-CDMA FDD 상향 링크에서 칩 레벨 빔 형성 알고리즘을 적용

한 스마트 안테나 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 8개의 배열 안테나를 사용할 경우 BER이 10^{-2} 일 때, 평균적으로 7dB의 이득을 얻을 수 있으며, 채널 용량은 BER이 4×10^{-2} 일 때, 6배의 개선 효과를 가져올 수 있었으며, 특히 DD(Decision-Directed) 모드의 칩 레벨 빔 형성 알고리즘을 적용했을 경우 성능이 더욱 개선됨을 알 수 있다.

스마트 안테나 시스템의 설계개발 목표는 다중 경로 및 간섭신호 제거능력의 극대화를 통한 C³Q (Capacity, Coverage, Cost and Quality) 개선에 있다. 현재, 기술적인 관점에서 기지국에서 이동 가입자 혹은 단말기로 향해 지향성 빔 형성을 하기 위한 고성능 알고리즘 개발이 중요한 이슈가 되고 있으며, 저렴한 가격의 고성능 RF부의 대량생산을 위한 오차 보정 기술 및 특수 서비스 목적의 가입자 위치확인기술도 중요한 핵심 기술로 되어 있다. 최근에는 무선 멀티미디어의 서비스 확장으로 인하여 순방향 링크에서의 고속 데이터 전송 및 용량 증대를 위해 순방향 빔 형성 기술과 TX 다이버시티, Space-Time Coding 등의 접목을 통한 다양한 연구개발 시도가 요구되고 있다.

참 고 문 헌

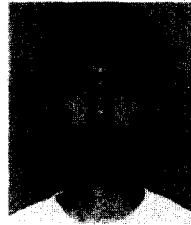
- [1] F. Naguib, A. Paulraj, T. Kailath, "Capacity improvement with base-station antenna arrays in cellular CDMA", IEEE Trans. on Veh. Technol., Vol. 43, No. 3, pp.691-698, Aug. 1994.
- [2] A. J. Paulraj et al., "Space-Time Processing for Wireless Communications," IEEE Signal Processing Magazine, Nov. 1997.
- [3] Joseph C. Liberti, Jr. and Theodore S. Rappaport, Smart Antennas for Wireless Communications : IS-95 and Third Generation CDMA Applications, Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, Inc., 1999.
- [4] M.G. Kyeong, K.H. Chang, E.S. Shin, Y.O. Park, R. Arnott, A Carr, K.C. Han, C.K. Lee, and H.G. Bahk, "CA³ TS : ETRI CDMA adaptive antenna array testbed system", CIC '97, pp.307-311, Oct. 1997.
- [5] Mun Geon Kyeong and Yang Gi Kang, "Outdoor communications using adaptive arrays in CDMA mobile systems," Proc. VTC '99, pp.264-268, May 1999.
- [6] Mun Geon Kyeong, Jae Joon Park, "3 G-class space-time array transceiver for high data service WCDMA smart antenna system," Proc. ICC '00, pp. 1025-1029, June 2000.
- [7] Jae Joon Park, Jun Hwan Lee, Hyun Seo Oh, Mun Geon Kyeong, "Performance of 3G WCDMA/TDD Space-Time Array Transceiver with Uplink MMSE/CLB and Downlink Subspace/SLB Beamforming", CIC'01, Oct. 2001.
- [8] W.C.Jakes, Microwave Mobile Communication, Wiley-Interscience publication, 1974.
- [9] P. Dent, G. F. Bottomly, and T. Croft, "Jakes Fading Model Revisited", IEEE Electronics Letters, Vol. 29, No. 13, pp.1162-1163, June 1993.
- [10] 3GPP TS 25.211. "Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD)".
- [11] 3GPP TS 25.213. "Spreading and modulation (FDD)".
- [12] Hye Kyung Jwa, Hyun Seo Oh, Mun Geon Kyeong, "Decision-Directed Chip-level Beam-forming in WCDMA adaptive array system", Proc. VTC '02, May 2002 (will be published).

저자 소개



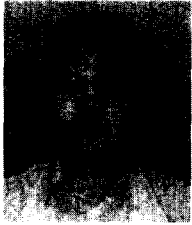
左惠景

1995년 3월~1999년 2월: 한양대학교 전자전기공학부 졸업(공학사), 1999년 3월~2001년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(공학석사), 2001년 1월~현재: 한국전자통신연구소 연구원, <주관심 분야: 적응신호처리, 이동통신시스템>



朴在俊

1991년 3월~1997년 2월: 중앙대학교 제어계측공학과 졸업(공학사), 1997년 3월~1999년 2월: 중앙대학교 제어계측공학과 졸업(공학석사), 1999년 3월~2002년 4월 현재: 한국전자통신연구소 연구원, <주관심 분야: 스마트 안테나 시스템, 디지털 통신, 적응 신호처리>



李濬煥

1992년 3월~1997년 2월: 광운대학교 전기공학과 졸업(공학사), 1998년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 기전공학과 졸업(공학석사), 1998년 3월~1998년 8월: LG 산전, 2000년 3월~2002년 4월 현재: 한국전자통신연구소 연구원, <주관심 분야: 디지털 이동통신, CDMA 변복조, 스마트안테나 신호처리 알고리즘, 스마트 안테나 채널 모델>



吳鉉瑞

1978년 3월~1982년 2월: 숭실대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1983년 3월~1985년 2월: 연세대학교 전자공학과 졸업(공학석사), 1993년 3월~1998년 2월: 연세대학교 전자공학과 졸업(공학박사), 1982년 3월~1988년 8월: 한국전자통신연구소 연구원, 1988년 9월~1998년 8월: 한국전자통신연구원 선임연구원, 1998년 9월~2000년 6월: 한국전자통신연구원 책임연구원, CDMA 모뎀 개발 과제 책임자, 2000년 7월~2002년 1월: 한국전자통신연구원 스마트안테나연구팀장, 2002년 2월~2002년 4월 현재: 한국전자통신연구원 Hot Spot Cell 연구팀장, <주관심 분야: 디지털 이동통신, CDMA 변복조, ITS 무선패킷통신, 스마트안테나 기술, 초고속 무선 패킷 변복조 및 4세대 이동통신기술>