

# 이동통신시스템의 다중안테나통신기술 동향

## Overview of Multiple Antenna Communication Technologies in Mobile Communication Systems

방승찬(S.C. Bang)	다중안테나통신연구팀 책임연구원, 팀장
김영훈(Y.H. Kim)	다중안테나통신연구팀 선임연구원
박경(K. Park)	다중안테나통신연구팀 선임연구원
김남일(N.I. Kim)	다중안테나통신연구팀 선임연구원
김일규(I.G. Kim)	다중안테나통신연구팀 선임연구원
남상우(S.W. Nam)	무선액세스연구그룹 책임연구원, 그룹장

이동통신 시스템은 점차 고품질 및 고속의 멀티미디어 서비스를 제공하는 방향으로 가고 있다. 이동통신 시스템의 성능과 용량은 셀 혹은 섹터에서 발생하는 간섭신호와 다중경로 페이딩, 도플러와 같은 무선 채널 특성에 의해 제한된다. 이러한 성능 저하 요소에 대응하여 전체 시스템 성능 및 용량을 늘릴 수 있는 기술이 다중안테나기술이다. 다중안테나기술은 크게 빔형성기술, 다이버시티기술, 그리고 멀티플렉싱기술로 분류된다. 본 고에서는 이들에 대한 기본개념을 소개하고, 이동통신시스템별(3GPP, 3GPP2, IEEE802 계열) 이들에 대한 적용방식 및 연구개발 동향을 살펴본다.

## I. 머리말

### 1. 다중안테나통신기술 개요

이동통신시스템에서 다중안테나통신기술이라 하면, 기본적으로 2개 이상의 복수의 안테나를 사용하여 모뎀신호처리를 수행하는 기술을 일컫는다. 이동통신시스템은 계속해서 고품질에 훨씬 높은 용량을 필요로 하는 멀티미디어 통신서비스가 될 것이며, 음성조차도 유선 통화음질 정도나 그 이상의 고품질 음성 서비스를 요구 받게 될 것이다. 이러한 요구 사항을 만족시킬 수 있는 기술로 유망한 핵심기술이 다중안테나통신기술이다. 이것은 크게 빔형성기술, 다이버시티기술, 그리고 멀티플렉싱기술과 같이 세 가지 부류로 나눌 수 있다. 이들을 전송 데이터가 각 안테나별로 동일하거나 그렇지 않은가에 따라 두 가지로 구분하면, 빔형성과 다이버시티 기술은 동일한 것에 속하고 멀티플렉싱기술은 그렇지 않은 것에 속한다. 또한 빔형성기술은 각 안테나별로 위상정보를 조정하여 기지국과 사용자의 위치각도에 따라 신호

세기를 조절하여 주변의 간섭을 제거하여 성능을 높이는 것이고[1]-[3], 다이버시티 기술은 안테나간의 신호를 서로 독립적으로 만들어 주기 위해 안테나간에 어느 정도 거리를 두어 성능을 향상시키는 기술이다[4].

이동통신시스템의 성능은 크게 두 가지로 표현될 수 있다. 하나는 최대전송속도이고 다른 하나는 용량이다. 최대전송속도는 한 사용자가 받을 수 있는 전송속도의 최대치를 말한다. 셀 혹은 섹터에서 한 사용자가 최대전송속도를 서비스 받고 있을 때, 다른 사용자가 어떤 데이터 전송을 서비스 받을 수 있으면, 용량은 최대전송속도보다 크지만, 그렇지 않으면 용량은 최대전송속도가 되는 것이다. 최대전송속도를 향상시키는 기술에는 BPSK/QPSK/QAM과 같이 변조방식을 다르게 하는 방법이 있고, 멀티플렉싱 다중안테나기술이 있다. 변조방식이 하나로 고정되어 있으면(예, QPSK), 빔형성과 다이버시티 기술은 용량을 증대시키는 기술이라고 볼 수 있다. 이때 요구되는 SNR이 작아짐으로써 성능이 향상되어

용량이 증대되는 것인데, 이 향상된 용량 대신에 변조방식을 변경하여(예, 16QAM) 한 사용자에게 대한 최대전송속도를 높일 수 있다. 이런 관점에서 보면 빔형성과 다이버시티 기술도 최대전송속도와 무관하지 않다. 멀티플렉싱기술은 최대전송속도를 높이는 기술이지만 어떤 채널환경에 대해서는 요구되는 SNR이 높아진다. 이 경우, 셀 혹은 섹터에서 수용하는 용량에 미치지 못하여 이 기술을 사용할 수 없는 경우가 있으므로, 멀티플렉싱기술도 용량과 무관하지 않다.

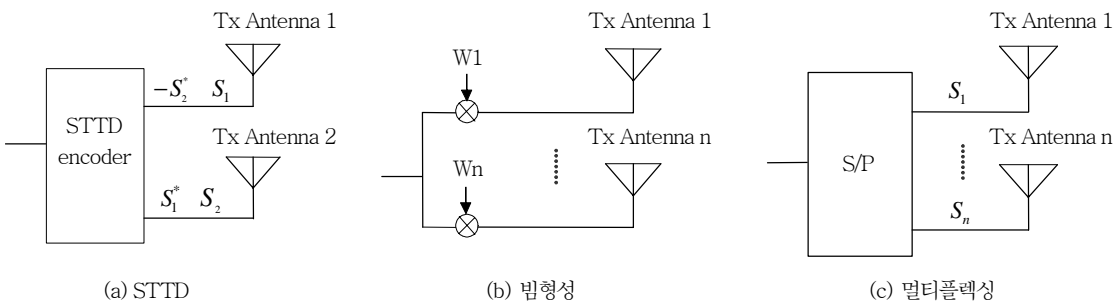
## 2. 다중안테나통신기술 전송 구성도

다이버시티, 빔형성, 그리고 멀티플렉싱기술을 전송 측면에서 보면 서로 이해하는 데 더욱 도움이 된다. (그림 1)은 이들을 나타내는데, 다이버시티 기술에 대해서는 대표적으로 3GPP에 있는 두 개의 안테나를 사용한 STTD(Space Time Transmit Diversity)[5] 전송 구성도를 나타내었고, 빔형성과 멀티플렉싱 기술에서는 n개의 안테나가 사용되는 것을 나타내었다. 그림에서 보듯이 STTD와 빔형성은 유사하거나 같은 데이터가 각 안테나로 전송되는 반면, 멀티플렉싱은 서로 다른 데이터가 전송된다.

(그림 1)은 다중안테나통신을 전송측면에서 살펴본 것이고, 이들을 복조 측면에서 살펴보는 것은 다른 의미가 있다. 먼저 멀티플렉싱기술에 대해 살펴보면, 이것은 전송 시에 각 안테나 데이터를 구분하는 수단(예로, CDMA에서는 코드)을 보통 적용하지

않는다. CDMA에서 그런 코드를 적용하는 경우 코드 용량이 부족할 수 있다. 이렇게 적용하지 않는 경우, 전송된 각 안테나의 데이터를 복조할 때, 단일 안테나를 사용하는 경우에는 복조가 불가능하다. 따라서 복조할 때 복수 안테나를 사용하게 되는데, 보통 전송 안테나 개수 이상으로 복조 시에 안테나가 사용된다. 복조 시에 같은 수의 안테나가 사용되는 것이 보통인데 이런 경우 MIMO가 되는 것이다. 복조 시에 n개 이상의 안테나를 사용한다 해도 채널 환경이 충분한 산란 형태(rich scattering)가 아니면 각 안테나 데이터를 복조한다는 것은 매우 어렵다. 이것은 복조 시에 채널행렬의 역행렬을 이용하는데, 이 경우 역행렬이 존재하지 않기 때문이다[6],[7]. 한편, 다이버시티와 빔형성기술에 대해서는 복조 시에 한 개 이상의 안테나이면 가능하다. 복조 시에 두 개 이상의 안테나를 사용하는 경우 복조 시에 다이버시티 기술을 이용하거나 빔형성 기술을 이용하여 성능을 향상시키게 된다.

위와 같이 다이버시티, 빔형성, 그리고 멀티플렉싱 기술은 전송 및 복조 형태가 다를 수 있는데, 이런 여러 가지 형태는 용도가 서로 다르기도 하고 같은 용도라 하더라도 복잡성에 따라 각기 다른 성능을 나타내게 된다. 성능을 더욱 향상시키기 위해, 이들을 서로 결합하는 형태가 존재할 수 있다. 빔형성과 다이버시티 결합은 비교적 자연스럽게 진행되고 있고, 최근에 산업체의 기술개발 동향을 보면 빔형성과 MIMO의 결합기술도 연구되고 있다.



(그림 1) 다중안테나통신 방식별 전송기술 구성도

### 3. 다중안테나통신기술 역사

2세대 이동통신시스템이라 일컬어지는 IS-95 CDMA 시스템과 GSM TDMA 시스템에서는 다중안테나 통신기술 개념은 사실상 본격적으로 존재하지 않았다. 초창기 IS-95 시스템에서는 순방향(하향)링크에서는 안테나 1개, 역방향(상향)링크에서는 안테나 두 개를 사용하였다. 안테나를 2개 이상을 사용할 때 다중안테나기술이라고 본다면, 이 때 역방향에서는 다중안테나기술이 사용되었다고 볼 수 있는데, 이것은 다중안테나 기술 중 매우 기본적인 수준인 다이버시티 기술을 이용한 것이다. 즉, 안테나 두 개를 대략 10배의 파장길이 이상으로 떨어뜨리면 입력되는 전파의 특성이 서로 상관관계가 떨어지는 현상을 이용하여 성능을 향상시키는 기술이다. 이 기술은 아날로그 시스템 및 GSM TDMA 시스템에서도 사용될 수 있는 기술이다.

3세대 IMT-2000 이동통신은 CDMA 기술로 통합되었다. 이것은 크게 3GPP와 3GPP2 그룹 기술로 대별될 수 있다. 여기서는 2세대의 CDMA 기술을 향상시키기 위해 많은 기술들이 발명되어 표준기술로 채택되었다. 이 중 두 그룹에 공통적으로 하향링크 다중안테나통신기술이 추가되어 성능을 향상시키고 있는데, 무선인터넷 서비스 등 서비스의 양상이 하향링크에 더 치중되는 것을 고려할 때, 이것이 3세대 기술 중 가장 중요한 기술이라고 해도 과언은 아니다.

하향링크의 다중안테나통신기술 중 대표적인 것이 STTD인데, 이것은 안테나 두 개를 사용하여 하향링크에 직교코드용량을 유지하면서 두 배의 경로다이버시티를 얻는 효과가 있다. STTD는 3GPP 용어나, 유사한 것이 3GPP2에 OTD(Orthogonal Transmit Diversity)로서 있다. 두 개의 안테나를 사용하는 기술 중에 빔형성 기술을 적용한 TxAA(Transmit Antenna Array) 기술도 3GPP에 있다. 이외에도 빔형성 기술을 적용할 수 있도록 상하향에 해당하는 파일럿을 채택한 바 있다. 빔형성 기술은 3세대에서 본격적으로 거론되었으나, 2세대 GSM 기지국에도 적용되어 상용화되고 있다. 3.5세대라 불리는 HSDPA 혹

은 EV-DV에서는 4개의 안테나를 사용한 송신 다이버시티 기술, 빔형성과 다이버시티를 결합한 기술, MIMO 멀티플렉싱 기술 등이 연구되고 있다.

향후 4세대가 되면, 요구되는 서비스가 더욱 고속화되어 다중안테나통신기술이 더욱 더 활용될 것으로 예상하고 있다. 실제로 ITU-R에서 작성한 비전문서에서는 다중안테나통신기술을 4세대의 중요 기술로 분류하고 있다[8]. 4세대의 이동통신 주파수는 2GHz보다 높아질 것으로 예상된다. 이렇게 되면 특히 빔형성 기술을 사용할 때 보통 안테나간의 길이를 반파장으로 하는데, 이 간격이 더욱 좁아지게 된다. 또한 다이버시티 혹은 멀티플렉싱에서 요구되는 안테나 간격도 작아지므로, 기지국의 안테나 크기나 안테나간 간격이 작아져서 더욱 상용화 가능성이 높아진다. 더욱이 단말기 측면에서도 다중안테나기술이 가능해 질 수 있다. 예를 들면, 휴대 단말기 송수신에서 빔형성기술을 적용하여 성능을 향상시키는 기술이 실현될 가능성도 매우 높아진다.

본 고의 나머지 부분에서는 이동통신 시스템별 다중안테나통신기술에 대해 기술한다. 먼저 II장에서는 3GPP 다중안테나통신기술을 세대별로 기술하고, III장에서는 3GPP2에 대해 세대별로 기술하고, IV장에서는 IEEE802 계열에 대해 이동통신에 관련이 있다고 생각되는 802.11, 802.16, 그리고 802.20 계열에 대한 다중안테나통신기술에 대해 설명하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 3GPP 다중안테나통신기술

### 1. 2세대

3GPP의 2세대 기술이라 할 수 있는 GSM 방식도 3GPP2의 IS-95 방식과 마찬가지로 기지국에 2개의 수신 안테나를 사용하는 안테나 다이버시티를 적용하여 상향링크 성능을 향상시켰다. 음성 위주 서비스를 제공하는 2세대 이동통신 시스템에서 스마트 안테나 시스템은 안테나 및 RF 송수신기의 증가로 인한 비용 증가와 자원 및 채널할당의 복잡도 증가로 인하여 적용이 활성화되지 않았다. 그러나

스마트 안테나 시스템의 효율적 구현을 위한 노력은 여러 곳에서 진행되고 있다. Ericsson은 독일 GSM 1800 시스템 사업자인 Mannesmann과 함께 GSM 1800 시스템에 스마트 안테나 시스템을 적용한 바 있다고 발표한 적이 있다. ArrayComm은 GSM 규격에 스마트 안테나 시스템을 적용한 바 있다. Nortel에서도 GSM 시스템을 위한 스마트 안테나 시스템을 구현하였음을 보고하였다[9].

## 2. 3세대

### 가. FDD(Frequency Division Duplex)

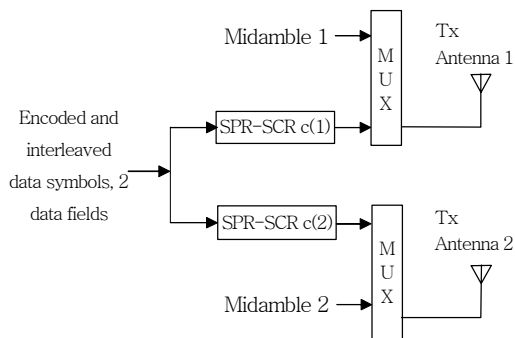
3GPP의 3세대 규격이라 할 수 있는 Release 99와 Release 4 규격에서는 송신 다이버시티 기술을 도입하였다[10]. 기지국에서의 수신 안테나 다이버시티는 구현 상의 문제이므로 규격에선 언급하지 않지만 적용이 가능하다. 그러나 단말은 여러 개의 안테나를 설치할 공간적 제약과 전력 소모, 비용 등의 문제로 이러한 방식을 적용하기 어렵기 때문에 고안된 방식이 송신 다이버시티 기술이다. 즉 기지국에서 두 개의 안테나로 데이터를 전송하고 단말은 하나의 안테나로 수신함으로써 수신 안테나를 두 개 사용한 것과 유사한 다이버시티 효과를 줄 수 있도록 한 방식이다. 이 방식에는 단말로부터 피드백 정보를 수신하는지 여부에 따라 개루프(open loop) 방식과 폐루프(close loop) 방식으로 분리할 수 있다. 3GPP Release 99와 Release 4에서 표준 방식으로 채택된 개루프 방식으로는 STTD와 TSTD(Time Switched Transmit Diversity)가 있다. STTD는 3GPP의 여러 종류의 물리채널 중 SCH(Synchronization Channel) 이외의 모든 하향링크 채널에 적용되며 일종의 space time 블록 코딩 방식으로 2개 안테나로 수신 MRC(Maximum Ratio Combining)한 것과 같은 효과가 있다. TSTD는 SCH에만 적용되며 SCH를 슬롯 단위로 두 개의 안테나에 번갈아 가면서 전송하여 다이버시티 효과를 얻는다. Release 99와 Release 4에서의 폐루프 방식은 2개의 안테나를 사용하여 피드백 정보를 단말이 전송하는 TxAA를 사용한다. 두 개의 송신 안테나의 위상 정보만을 단말이 피드백하

는 Mode 1과 전력 정보도 함께 피드백하는 Mode 2 방식이 있다. 일반적으로 페루프 방식은 개루프 방식의 채널변화 속도에 비해 피드백 값의 지연이 발생하므로 고속 이동상황보다는 저속에서 우수하다. 스마트 안테나 시스템을 위한 빔 형성 알고리즘들은 구현이슈로 분리되어 표준 규격에는 언급되지 않고 있다. 그러나 빔 형성을 위해 현재 규격에 S-CPICH(Secondary-Common Pilot Channel)과 secondary 스크램블링 코드 등이 반영되어 있어 상향 및 하향링크에 빔 형성 방식의 적용이 가능하다[11]. ETRI에서는 WCDMA/FDD에 상향은 적응빔 형성기법, 하향은 고정빔형성기법을 사용하여 스마트 안테나시스템을 2002년부터 2003년에 걸쳐 개발하였다.

### 나. TDD(Time Division Duplex)

알려진 바와 같이 3GPP의 TDD 방식은 3.84Mcps를 사용하는 HCR(High Chip Rate) 방식과 중국과 독일의 지멘스에 의해 제안되어 Release 4 규격에 반영된 1.28Mcps를 사용하는 LCR(Low Chip Rate) 방식이 있다[12]. 두 방식의 규격에서 언급하고 있는 다중안테나기술도 FDD와 같은 송신 다이버시티 방식과 빔 형성이다. 사용 안테나 수는 2개이고 사용되는 기술도 FDD와 비슷하나 적용 채널 등에서 약간의 차이가 있다. 먼저 HCR에 적용된 다중안테나기술을 살펴본다. 이 또한 폐루프 다이버시티 방식으로 TxAA와 STD를 사용하고 있다. TxAA는 FDD에 설명한 방식과 유사하며, STD는 단말에서 측정된 하향링크의 품질에 의해 기지국의 두 개의 안테나 중 하나를 선택하는 방식이다. 개루프 방식으로는 TSTD와 SCTD(Space Code Transmit Diversity)가 있다. TSTD는 FDD에서와 같은 방식이며, (그림 2)에 있는 SCTD는 인코딩과 인터리빙된 동일한 심볼을 서로 다른 직교채널 코드를 곱하여 2개의 안테나로 전송하는 방식이다.

SCTD 방식은 비컨(beacon) 채널에만 적용된다. 3GPP TDD 방식에 정의하는 비컨 채널이란 measurement를 목적으로 한 공통 채널로 특정 시간 및 코드를 사용한다. 비컨 채널은 빔 형성을 하지 않고



(그림 2) SCTD의 구조

기준 전력으로 전송된다. 각각의 방식이 HCR에 적용되는 채널은 TSTD는 SCH에만 적용되며, SCTD는 P-CCPCH(Primary-Common Control Physical Channel), S-CCPCH(Secondary-Common Control Physical Channel), PDSCH(Physical Downlink Shared Channel), PICH(Paging Indicate Channel)에 적용 가능하다. 사용자의 트래픽 데이터가 전달되는 DPCH, PDSCH는 페루프 방식을 사용한다.

LCR 방식에서 사용하는 송신 다이버시티 기술은 HCR과 동일하다. 다만 적용되는 채널이 차이가 있다. 즉 페루프 방식과 SCTD가 적용되는 채널은 HCR과 같고 TSTD가 하향링크의 모든 채널(P-CCPCH, S-CCPCH, PDSCH, DPCH, PICH, DwPCH)에 사용 가능하다. DwPCH는 HCR 방식에서 SCH와 같이 하향 링크의 동기를 위한 채널이다.

3GPP 규격에서는 빔 형성 기술을 하향 링크 적용시에 해당 사용자의 전용 채널은 midamble을 포함하여야 한다고 규정하고 있다[13]. Midamble은 일종의 훈련 시퀀스로서 빔 형성을 위한 채널 및 도래각 추정에 사용될 수 있다.

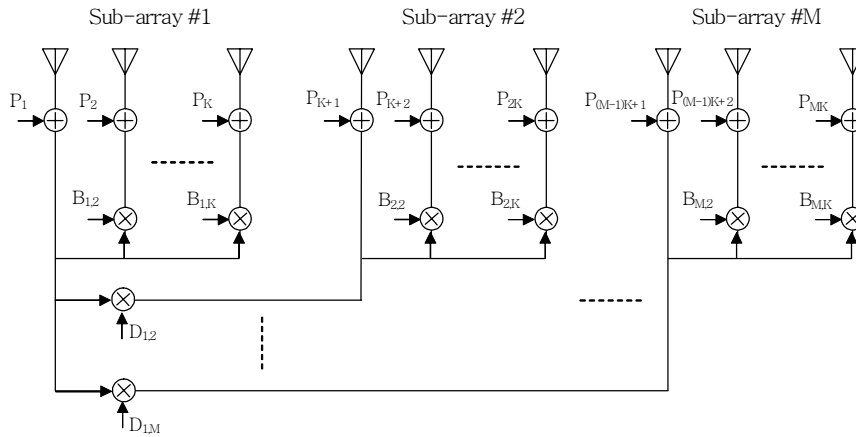
### 다. 3.5세대(HSDPA)

3.5세대라 할 수 있는 HSDPA(High Speed Downlink Packet Access) 방식과 같이 사용될 다중안테나기술들이 제안되고 있다[14]. 기존의 송신 다이버시티 방법은 2개의 안테나를 사용하는 것으로 규격화되어 있으나 이를 4개로 확장하여 성능을

높이거나 빔 형성 기술과 결합하는 방식 등이 제안되어 있다[15],[16]. 또한 데이터의 전송률을 향상시키기 위한 MIMO(Multi Input Multi Output) 방식에 대하여도 표준화가 진행중이다[17].

각각의 기술에 대하여 살펴 보면 다음과 같다. 개루프 송신 다이버시티 방식은 Rel 5에서 HSDPA 시스템을 위해 4개의 안테나를 사용하는 방식으로 제안된 4-Tx STTD 방식이 있다. 페루프 방식도 Rel 5에서는 최대 4개의 안테나를 사용하는 것을 가정하고 있다. 이러한 방식에는 eigenbeamformer, basis selection, 빔 형성과 같이 사용되는 송신 다이버시티 기술, 4개의 안테나일 경우 피드백 정보량을 줄인 모드 1, 2방식 등이 제안되었다. 위의 방식은 크게 4개의 안테나를 사용하는 경우에 문제가 되는 피드백량을 줄여서 Rel 99에서 사용하는 FBI(Feedback Information)양인 1500bit/sec을 유지할 수 있도록 하는 방안과 beamforming과 Tx diversity를 결합하여 성능을 향상시키는 방법으로 분류할 수 있다.

Eigenbeamformer는 모드 1/2와 같이 피드백 정보를 전송할 경우 안테나 수에 비례하여 피드백 정보량이 증가되므로 한정된 피드백 채널 자원을 유지하기 위해 제안된 방식이다. 더욱이 단말의 이동속도가 빠를 경우는 한정된 피드백 정보량으로는 채널변화에 적응할 수 없다. 이를 극복하기 위한 방법으로 각 안테나의 채널간 상관 관계가 있음을 가정하여 이를 eigenanalysis를 통해 decorrelation 할 경우 정보량이 줄어드는 점을 이용한 방식이다. Long term 피드백 정보는 공간적인 채널의 평균 상관행렬을 구하고 여기서 수신된 전력이 가장 큰, 즉 eigenvalue가 가장 큰 빔 벡터(eigenvector, eigenbeam)의 값을 상대적으로 긴 시간 동안 노드 B에 전송한다. 또한 매 슬롯 단위로 선택된 eigenbeam 값이 단기 정보로 피드백 된다. Basis selection 방식은 최적의 안테나 가중치 벡터가 4개의 기저벡터의 선형 합임을 이용하여 피드백 정보량을 줄이는 원리이다. 피드백되는 정보는 안테나 가중치 값이 아니라 기준 안테나와 다른 안테나 기저 벡터의 위상 차와 선택된 안테나를 가리키는 인덱스 정보만을 전송하는 방식이다.



(그림 3) 송신 다이버시티와 빔형성을 모두 지원하는 계층적 안테나 Weighting 구조

(그림 3)에서 보는 바와 같이 빔 형성 특성을 갖는 송신 다이버시티 방법은 빔 형성의 장점과 다이버시티 효과의 장점을 모두 이용하기 위한 구조이다. 그러나 다이버시티 효과는 안테나들간 공간적 상관특성이 적을수록 성능이 좋고, 빔 형성은 어느 정도 상관 특성이 있어야 성능이 발휘된다. 따라서 이것은 빔 형성을 위한 서브 어레이로 나누고 각각의 서브 어레이간 다이버시티를 적용하여 성능을 높이고자 하는 방법이다.

다중 안테나를 사용하여 전송 데이터 속도를 향상시키기 위해 3GPP에서 제안된 MIMO 기술도 페루프와 개루프 기술로 구분할 수 있다. 대표적인 개루프 기술로 코드 재사용을 통해 전송속도를 향상시키는 BLAST(Bell Laboratory Layered Space Time)와 STTD를 기반으로 하는 D(Double)-STTD가 있다[18],[19]. 페루프 기술로는 BLAST와 달리 안테나 별 전송속도를 가변하고 포스트 디코딩 방식을 사용하는 PARC(Per Antenna Rate Control)가 있다. 각각의 기술들을 공정하게 비교 평가하기 위해서는 MIMO 채널 모델이 결정되어야 하는데 3GPP에서는 이것에 대한 표준화도 진행중이다. 다음은 각각의 기술에 대하여 간단히 살펴 본다. 개루프 MIMO 중 BLAST는 code reuse 기술 중 하나로 각 안테나 별로 동일한 전송 속도와 직교 코드(Orthogonal Variable Spreading Factor: OVSF)를

사용하여 전송한다. 각각의 안테나는 수신단에서의 채널추정을 위해 서로 다른 K개의 파일럿을 전송한다. 수신단에서는 MMSE(Minimum Mean Squared Error) 디코더 등을 사용하여 간섭제거를 통해 수신 심볼이 검출된다.

개루프 MIMO 기술인 D-STTD는 Rel 99의 STTD의 확장된 개념으로 4개의 안테나를 이용하고 2개의 STTD 부호화기를 사용한다. STTD 부호화에 의해 안테나 1과 2, 안테나 3과 4는 직교이다. 즉, 두 개의 부호화기에 의한 안테나간은 직교성이 보장되지 않는다. 이를 극복하기 위해 수신단에서 MMSE 디코더 등을 이용하여 간섭을 제거할 수 있다. D-STTD에서는 각각의 STTD 데이터 스트림에 서로 다른 변조 방식(QPSK 또는 16QAM)을 사용하여 전송속도를 높일 수 있다. 또한 두 개의 STTD 부호화된 결과가 다수의 안테나 중 정해진 안테나로 일정하게 전송되지 않고, 공간 채널의 상관특성을 수신기에서 측정하여 그 결과를 송신기로 피드백한 다음, 이것에 따라 송신 안테나를 선택하도록 하는 안테나 셔플링 방식이 제안되었다. 페루프 MIMO 방식으로는 PARC이 있다. 이것은 안테나 별 동일 속도 MIMO와는 달리 각 안테나 별로 채널 상황에 따라 변조와 코딩 방법을 달리하여 성능을 향상시키는 방법이고, 여러 안테나의 변조 및 코딩 정보를 수신기가 송신기로 피드백 해야 한다. 수신

단에서는 동일 속도 MIMO와 달리 각 안테나 별로 demux 후에 변조 및 코딩이 이루어지므로 심볼 디코딩 후에 간섭 제거가 가능하여 심볼 복호 전에 간섭 제거를 하는 동일 속도 MIMO 보다 성능이 우수하다.

### III. 3GPP2 다중안테나통신기술

본 장에서는 현 2G 및 동기식 3G 시스템에서의 다중안테나통신기술 고려 및 적용에 대해 알아본다. 즉, IS-95 및 cdma2000 시스템에서의 빔 형성, 송수신 다이버시티 및 MIMO 기술 적용여부를 각 시스템별로 알아보고, 규격 외에 각 우수 기업이나 연구단체에서 이 시스템들을 근간으로 하는 다중안테나통신 기술 적용에 대한 동향을 알아보고자 한다.

2G 시스템에서는 다중안테나통신을 고려하지 않아서 빔 형성, 다이버시티 및 MIMO 기술을 바로 적용하기 어렵다. 반면 cdma2000의 경우 빔 형성 및 송수신 다이버시티 기술을 적용할 수 있도록 고려되어 있다. 아울러 BLAST MIMO를 cdma2000 규격의 일부로서 채택되는 것이 고려되고 있다.

#### 1. 2세대(IS-95 A/B) 시스템

IS-95 계열의 2세대 디지털 셀룰러 규격(TIA/EIA IS-95B)[20]은 음성과 저속 데이터 서비스 제공을 목적으로 1995년도 이전에 만들어진 규격으로서 빔 형성, 다이버시티 및 MIMO 기술 적용을 위한 규격이 만들어지지 않았다.

IS-95 계열의 2세대 디지털 셀룰러 규격의 순방향 링크에서는 각각의 기지국에 1개의 공통 파일럿 채널만을 정의하고 기지국 내에 모든 단말기는 공통 파일럿 채널을 이용하여 채널 추정된 결과를 트래픽 채널의 코히런트 복조에 사용한다. 각 기지국에서 사용하는 공통 파일럿 채널은 215 길이의 M-시퀀스를 사용하는데 GPS로부터 수신한 절대 시간에 대한 64칩 단위의 위상 천이를 이용하여 각 기지국을 구분하며 Walsh 코드 "0"번을 사용함으로써 기지국 내 다른 순방향 채널과 구분된다.

순방향 다이버시티 혹은 빔형성 시 빔별 채널추

정용으로 별도의 파일럿 채널 혹은 전용 파일럿 심볼을 지원하지 않기 때문에 기본적으로 송신 다이버시티 기술이나 MIMO 그리고 사용자 별 빔 형성 기술을 적용하기가 어렵다. 다만 한 개의 섹터에 여러 개의 공통 스위칭 빔을 형성한 뒤 스위칭 빔 별 파일럿 채널의 코드 시퀀스의 위상을 서로 다른 것으로 사용하는 공통 스위칭 빔 형성 기술은 도입할 수 있다. 이 경우 이동국이 인접한 빔 커버리지로 이동할 경우 빔 스위칭 핸드오버를 수행하여야 한다. 이것은 기존의 3-섹터 기지국의 소프트 핸드오버와 동일한 절차를 요구한다. 즉, 각각의 스위칭 빔도 하나의 독립된 섹터와 동일하기 때문에 이동국의 속도 및 멀티패스 환경에 따라 빈번한 빔 스위칭 핸드오버가 요구되어 higher layer signaling load가 커지는 단점이 있다. 또한 고속 이동국 환경에서 섹터 당 스위칭 빔의 개수가 많을 경우 빔 스위칭 핸드오버를 위해 요구되는 higher layer signaling이 빔 스위칭률을 따라올 수 없는 상황도 발생할 수 있다.

IS-95 계열의 2세대 디지털 셀룰러 규격의 상향 링크는 기본적으로 64진 직교코드(하다마드코드)를 이용한 논 코히런트 복조 방식을 사용하며 규격에는 언급되어 있을 필요가 없지만 기지국 수신단에서 기본적으로 섹터별 2개의 수신 안테나를 두어 안테나 다이버시티 컴바이닝을 수행한다. 이동국의 송신 안테나 다이버시티 혹은 MIMO 기술을 적용하지 않으며 논코히런트 복조를 기본으로 하므로 파일럿 채널 혹은 파일럿 심볼이 따로 없기 때문에 상향 링크에서 사용자 별 빔 형성 기술을 적용하기가 매우 어렵다. 다만 앞서서와 같이 공통 스위칭 빔 기술은 도입할 수 있으나 이 경우 빔 별로 다 경로 탐색기를 따로 두어야 하기 때문에 기지국 수신기가 매우 복잡해 질 수 있다. ETRI에서는 cdma에 대한 빔형성 송·수신기 구조 연구에 기초한 CA3TS(CDMA Adaptive Antenna Array Testbed System)을 개발한 바 있다.

#### 2. 3세대(cdma2000 1x, EV-DO/DV) 시스템

cdma2000 순방향 링크는 1개의 공통 파일럿 채널 외에 1개의 다이버시티 파일럿 채널 그리고 다수

의 auxiliary 파일럿 채널과 auxiliary 다이버시티 파일럿 채널을 정의한다[21]. 이러한 파일럿 채널들은 spreading factor가 512인 Walsh 코드 혹은 Quasi-Orthogonal 코드로 구분되며 순방향 링크에서는 기본적으로 송신 다이버시티 기술을 도입하는데 OTD 방식 등을 사용할 수 있게 되어 있다. 다이버시티 파일럿 채널은 이러한 송신 다이버시티 기술 도입 시 수신단에서 코히런트 복조를 위한 채널 추정을 할 때 송신 안테나 구분을 위해 사용된다.

Auxiliary 파일럿 채널은 순방향 링크의 빔 형성을 위해 사용되며 공통 스위칭빔용 혹은 사용자 별 빔 형성용으로 사용될 수 있다[22]. Auxiliary 다이버시티 파일럿 채널은 순방향 링크의 빔 형성 및 다이버시티 기술이 동시에 적용될 경우 사용된다.

IS-95 계열의 2세대 디지털 셀룰러 규격과는 달리 상향링크에서 파일럿 채널을 두어 코히런트 복조를 가능하게 하는 구조이므로, 이것은 WCDMA의 상향링크 구조와 유사하다. 상향링크에서 파일럿 채널을 사용하기 때문에 WCDMA에서처럼 상향 링크에 빔 형성 기술을 도입할 수 있다[23]. WCDMA와의 차이점은 이동국의 배터리 소모량을 줄이기 위해 상향링크 파일럿 채널 게이팅을 도입하는 것이다. Gating rate는 1, 1/2, 1/4의 세 가지가 있는데 gating rate가 1일 경우에는 continuous pilot이 되지만 1/2 및 1/4일 경우는 discontinuous 파일럿 채널이 되어 상향링크의 빔 형성 알고리즘을 rate별로 다르게 가져가야 한다. 상향링크는 빔 형성기술뿐만 아니라 수신 다이버시티기술도 도입할 수 있고 지국 단에서 듀얼 어레이 형태를 이용하여 빔 형성 및 다이버시티를 동시에 지원할 수도 있다.

3.5세대로 알려진 cdma2000 1x EV-DV의 경우에는 파일럿 채널 구조가 cdma2000과 동일하기 때문에 송신 다이버시티 기술 및 빔 형성 기술을 모두 지원할 수 있고 송신 다이버시티 기술인 STS (Space Time Spreading)[24]가 추가되어 OTD와 선택적으로 사용할 수 있게 되어 있다[25]. STS 송신 다이버시티 기술은 기존의 OTD에 약간의 변화만으로 성능향상을 가져온다. 상향링크도 채널 구조가 cdma2000과 동일하기 때문에 빔 형성 기술을

지원할 수 있고, 수신 다이버시티 기술도 구현 기술이므로 지원가능하며 또한 상향링크 빔형성과 수신 다이버시티 결합기술도 지원 가능하게 되어 있다.

cdma2000에서 채택되고 있는 송신다이버시티 기술에는 OTD와 STS가 있다. OTD와 STS 송신다이버시티 방법은 매우 유사하나 약간의 차이가 있다. 전송되는 심볼들은 직렬-병렬 변환기에 의해 짝수 및 홀수번째 심볼로 분할되고 각 스트림에 대해 두 개의 Walsh 코드에 의해 각각 스프레딩되고 선형적으로 합해져서 각 안테나로 전달된다. 두 방법은 변조에서의 차이로 인해 약간 다른 다이버시티 효과를 가져온다. 성능면에서는 STS가 나은 반면 구조적으로는 약간의 복잡도가 추가된다. 한편, BLAST로 알려진 MIMO 기술의 경우, UMTS Rel 6에서 현재 고려되는 것과 맞물려 cdma2000에서도 규격의 일부로서 MIMO가 포함되어 있다. 따라서 이러한 MIMO의 규격화를 위한 일환으로 ad hoc 그룹에 의해 3GPP와 3GPP2 사이에 MIMO 채널 모델링에 관한 작업이 활발히 진행되고 있다. 이 채널 모델은 다른 MIMO 개념들을 평가하기 위한 공통의 기준으로 사용되게 된다. Ad hoc 그룹의 최종 보고서를 통한 최종 결론과 권고 사항들이 2004년 1/4분기에 이루어지게 될 것이다.

산업체 기술개발동향을 살펴보면, Nortel Networks사와 Sprints사는 캐나다 오타와에 있는 시설에서 adaptive AABS(Antenna Beam Selection)라는 스마트 안테나 기술을 이용해서 Sprint사의 현 안테나 기술의 IS-95 시스템 음성 용량을 2배 증가시키는 시험을 진행하였다. 이 기술은 IS-95 뿐만 아니라 cdma2000 1x, EV-DO/DV 등에 적용 가능한 기술로 알려지고 있다. Qualcomm사는 cdma2000 1x EV-DV를 지원하는 CSM6700이라는 칩셋을 제공하고 있다. 이 칩셋은 위에서 언급한 OTD 및 STS 송신다이버시티를 지원하며, 아울러 빔스위칭 및 빔스티어링 솔루션을 함께 제공하고 있다. Nortel Networks는 2000년에 cdma2000 1x radio 장비에 처음으로 MIMO 데모를 보였다. 2001년에는 런던 중심가에서 MIMO의 도심지역에서의 운용 가능성을 보여주었던 시험을 완료했다.



## IV. IEEE802 계열 다중안테나통신 기술

IEEE802 LAN/MAN 표준 위원회에서는 local area network 표준과 metropolitan area network 표준을 IEEE802.11의 wireless LAN Working Group (WG)[26], IEEE802.16의 BWA(Broadband Wireless Access) WG[27] 그리고 IEEE802.20의 MBWA (Mobile Broadband Wireless Access) WG[28]에서 개발하고 있다.

본 절에서는 이동성 제공 및 광대역 데이터 전송을 위한 다중안테나 시스템을 적용하거나 향후 표준화에 반영하고자 하는 IEEE802.11/16/20 WG의 표준화 동향에 대하여 기술한다.

### 1. 802.11 계열

초기 실내 환경의 무선 LAN 기술이 최근 실외 공중망 서비스와 연계되면서 무선 LAN 기술을 이용한 신규 통신서비스 개발이 활발히 진행되고 있으며, 3세대 이동통신과의 상호 보완적 서비스 개념의 진보된 초고속 무선 이동 서비스로 새롭게 탄생되고 있다.

IEEE802.11의 무선 LAN 표준화는 higher throughput 제공을 위하여 IEEE802.11n의 task group에서 100Mbps급에서 최대 throughput을 보장하는 물리계층 표준개발을 진행하고 있다. 주요 표준화 내용은 고속 데이터 전송 및 서비스 영역의 확장을 보장하는 high throughput 제공을 목적으로 MIMO channel modeling, MAC enhancement 등의 주요 표준화 기술을 논의하고 있으며, 본 절에서는 TGn의 다중안테나를 이용한 MIMO 기술의 최근 표준화 동향에 대하여 기술한다.

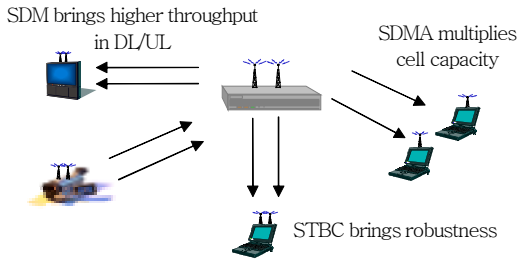
TGn의 주요 기능 요구사항은 802.11a와 802.11g와의 호환성을 가지며, 20MHz 대역폭에서 100Mbps급의 전송속도를 보장하는 것이다[29]. 이를 위하여 다중안테나를 이용한 MIMO 기술이 주요 대안으로 고려되고 있으며, 이는 각 송신 안테나에서 각각 다른 데이터를 전송하여 전송률을 송신 안테나 수 만큼 증가시키는 공간 분할 다중화(Spatial Division

Multiplexing: SDM) 방식, 시공간부호의 다이버시티 이득을 이용하여 성능 이득을 얻고 이를 통하여 서비스 영역의 확장을 가능하게 하는 시공간 부호(Space Time Code: STC) 방식 및 MAC 프로토콜의 다중접속방식을 변형하고 AP에 여러 개의 안테나를 설치하여 얻은 공간상의 자유도를 이용하여 여러 STA(station)이 동시에 접속함으로써 AP의 throughput을 향상시키는 공간 분할 다중접속(Space Division Multiple Access: SDMA) 방식이 있으며, 또한 이들을 접목한 smart MIMO 방식이 있다.

현재 주로 논의되고 있는 OFDM-MIMO 기술은 practical implementation을 고려하여 BICM(Bit Interleaved Coded Modulation)과 SM(Spatial Multiplexing)을 결합한 MIMO[30], circular delay diversity를 이용한 MIMO-OFDM[31], layered processing을 통한 MIMO-OFDM[32], high-speed WLANs을 위한 MIMO-OFDM[33], enhanced PHY를 위한 multiple antenna OFDM solution [34] 등으로 TGn에 기고되어 검토되고 있다.

여기서, high-speed WLANs을 위한 MIMO-OFDM[33]에서는 4세대 고속 통신용 WLAN의 고속 데이터 전송 및 서비스 거리의 확장, 더 많은 가입자 수용을 위한 시스템 요구사항을 위하여 smart MIMO-OFDM 시스템을 소개하였다. SDM/SDMA 방식은 더 높은 데이터 전송률 및 더 많은 가입자 수를 보장하며, STC는 더 넓은 서비스 영역을 보장한다. Smart MIMO는 사용자 하드웨어 프로파일, 사용자 QoS 요구 사항, 채널 환경 등을 고려하여 SDM/STBC/SDMA를 접목하여 사용하는 방식이다. 이에 대한 시스템 구성을(그림 4)에 도시하였다.

또한, enhanced PHY를 위한 multiple antenna OFDM solutions[34] 기고서는 100Mbps 급의 throughput을 제공하는 다중 안테나 기술로, AP에 다중안테나를 이용하고 STBC를 통한 공간 다이버시티 이득 증가, SDM을 통한 데이터율의 증가 그리고 SDM과 STBC 또는 SDM과 TS가 결합된 hybrid scheme을 통한 데이터율 증가 및 영역 확장에 대하여 언급하였다.



(그림 4) Smart MIMO 시나리오

결론적으로, IEEE802.11n은 100Mbps급의 더 높은 데이터 전송률 및 더 넓은 서비스 영역 제공을 위한 SDM/STC/SDMA/hybrid 등의 다양한 방식의 다중 안테나 시스템에 관련된 기고서를 검토하고 있으며, AP 및 STA에 적용 가능한 안테나의 수, MAC 프로토콜과의 연계성, 적용 환경 등을 고려하여 표준화를 진행중에 있다.

## 2. 802.16 계열

IEEE802.16 계열의 broadband wireless access 표준 규격은 10~60GHz 대역을 고려한 광대역 고정 무선접속규격을 baseline[35]으로 하여 2~11GHz 대역에서의 비가시선(Non-Line-Of-Sight: NLOS) 통신 환경을 고려한 IEEE802.16a 규격[36]이 제정되었으며, 나아가 현재는 이동환경을 고려한 IEEE 802.16e mobile wireless MAN 표준화가 진행되어 draft[37]를 검토중에 있다. IEEE802.16WG에서 다중 안테나 기술은 2~11GHz 허가 대역에 적용되는 wirelessMAN-SCa 물리계층, wirelessMAN-OFDM

및 wirelessMAN-OFDMA 물리계층과, 2~11GHz 비허가 대역에 적용되는 wirelessHUMAN 물리계층의 하향링크에 선택적인 표준으로 적용된다.

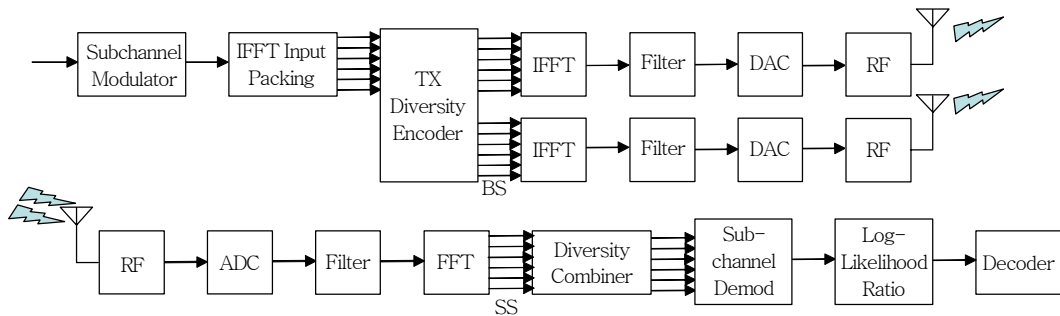
BWA 시스템의 하향링크의 다중안테나 표준은 STC 방식의 송신 다이버시티를 이용한다. 기지국에 2개의 송신 안테나와 가입자국에 1개의 수신안테나가 존재한다. 이러한 구조는 multiple input single output 채널 추정을 필요로 하며, 디코딩은 maximum ratio combining 기법과 매우 유사하다. (그림 5)는 OFDM 물리계층 선택적 표준인 STC를 사용한 송수신의 전체구조를 보여준다.

2개의 송신 안테나는 2개의 서로 다른 OFDM 데이터 심볼을 동일 시간에 전송하며 수신단의 단일안테나는 동일한 자기 상관 특성을 수신신호로부터 얻는다.

## 3. 802.20 계열

IEEE802.20 WG은 2002년 12월에 MBWA 표준화를 위하여 조직되었다. 802.20은 패킷 데이터용 MBWA 시스템을 위한 무선접속 물리계층(PHY)과 매체 접근 제어(MAC) 규격 개발을 목표로 하고 있으며 주요 기준은 다음과 같다.

- 3.5GHz 이하 주파수 대역
- 사용자 당 1Mbps 이상의 데이터율 지원
- 250km/h까지의 이동 서비스 지원
- 유비쿼터스 MAN에 적절한 셀 크기
- 높은 사용자 데이터율과 이동성을 보장하기 위한 주파수 효율



(그림 5) IEEE802.16 OFDM-PHY 의 STC

IEEE802.20 WG은 2003년 상반기 회의까지, 배열 안테나를 이용한 적응형 다중 안테나의 활용[38], MIMO 채널 모델링[39], smart 및 MC-SCDMA [40], OFDM의 전송 다이버시티를 위한 SFBC 및 STBC에 대한 비교[41] 등에 대한 기고서를 통하여 기술적 논의가 있었다. 이와 관련한 주요 업체별 기고 내용으로, Flarion사의 OFDM과 ArrayComm사의 스마트 안테나를 이용한 TDD/TDMA 방식, Navini사의 MC-SCDMA 등의 방식에 대해 발표가 있었다. 그리고, ETRI는 MBWA의 다른 채널 모델로서 다중 송/수신 안테나 기법을 사용하여 통신 용량을 증가시키고, 초고속 데이터 통신을 위한 MIMO 채널 모델을 제안하였다.

그러나 2003년 하반기부터 802.20 WG은 개별적인 무선 접속을 위한 기술적 기고서의 검토보다는 MBWA 시스템의 시스템 요구사항, 트래픽 모델, 시장 요구사항, 채널 모델링, 보안 등에 대한 논의를 주로 하였으며 이에 대한 표준화 내용을 주요 회의 내용으로 다루었다.

현재 2004년 3월 회의까지 다중안테나 기술에 대한 구체적인 표준화 검토사항은 진행되지 않고 있으며, 위에서 언급한 시스템 요구사항, 트래픽 모델 및 채널 모델에 대한 표준안이 확정된 이후에 구체적인 물리계층에서의 다중안테나 기술에 대한 논의가 진행될 것으로 사료된다.

## V. 맺음말

본 고에서는 다중안테나통신기술의 기본개념과 3GPP, 3GPP2, 그리고 IEEE802 계열의 다중안테나통신기술에 대해 살펴보았다. 다중안테나통신기술은 크게 빔형성기술, 다이버시티기술, 그리고 멀티플렉싱기술로 나눌 수 있는데, 빔형성과 다이버시티는 용량에 많이 관계되어 있고 멀티플렉싱기술은 최대전송속도에 관계되어 있다. 3세대 IMT-2000에서는 STTD와 같은 송신다이버시티 기술이 채택되어 하향링크의 성능을 향상시켰고, 빔형성기술도 실현될 수 있도록 해당 파일럿채널 혹은 파일럿심볼

이 규격화되어 있는 것을 알았다. MIMO 멀티플렉싱 기술은 계속 연구개발중이고 조만간에 구체화될 것으로 보인다. 향후 4세대에는 더욱 더 고품질 및 고속의 이동통신서비스를 요구한다고 볼 때, 다중안테나통신기술이 매우 기본적인 기술 혹은 필수기술로 자리잡을 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

- [1] B.D. Van Veen and K.M. Buckley, "Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering," *IEEE ASSP Magazine*, Aug. 1988, pp.4-24.
- [2] LAL. C, Godara, "Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Directional-of-Arrival Considerations," *Proc. of the IEEE*, Vol. 85, No. 8, Aug. 1997, pp.1195-1245.
- [3] 신성문, 방승찬, "스마트안테나기술개발동향," 정보통신 연구진흥원 주간기술동향 1093호, 2003. 4., pp.15-23.
- [4] John G. Proakis, *Digital Communications*, 3rd ed. McGraw-Hill, 1994.
- [5] S.M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," *IEEE Journal on Select Areas in Comm.*, Vol. 16, No. 8, Oct. 1998, pp.1451-1458.
- [6] G.J. Foschini and M.J. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas," *Wireless Personal Comm.*, Vol. 6, No. 3, 1998, pp.311-335.
- [7] G.D. Golden, C.J. Foschini, R.A. Valenzuela, and P.W. Wolniansky, "Detection Algorithm and Initial Laboratory Results Using V-BLAST Space-Time Communication Architecture," *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 1, 1999, pp.14-15.
- [8] ITU-R Working Party 8F, Working Document Towards a Preliminary Draft New Report: Key Technology and Technology Trends, *7th Meeting of Working Party 8F*, Queenstown, Mar. 2002.
- [9] 심동희, 서동연, 오민석, 최진성, 연철흠, "3GPP 다중안테나기술동향(Part I: 송신다이버시티 및 빔형성을 중심으로)," *Telecomm. Review*, 12권 2호, 2002. 3.
- [10] 3GPP, "Physical Layer Procedures(FDD)," TS 25.214, V.4.3.0, Dec. 2001.
- [11] 3GPP "Physical Channels and Mapping of Transport Channels Onto Physical Channels(FDD)," TR25.211 V3.12.0, Sep. 2002.

- [12] 3GPP TS 25.221 "Physical Channels and Mapping of Transport Channels Onto Physical Channels(TDD)," TS 25.221 V4.7.0 Dec. 2002.
- [13] 3GPP TS 25.224 "Physical Layer Procedures(TDD)," TS 25.224 V4.8.0, Mar. 2003.
- [14] 3GPP, "Physical Layer Aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access(Release 4)," TR 25.848 V.4.0.0, Mar. 2001.
- [15] 3GPP, "Transmitter Diversity Solutions for Multiple Antennas," TR 25.869, V1.0.0, Feb. 2002.
- [16] 3GPP, "Beamforming Enhancement," TR 25.887, V1.0.0, Dec. 2001
- [17] 3GPP, "Multiple-Input Multiple-Output Antenna Processing for HSDPA," TR 25.876, V1.0.0, Dec. 2001.
- [18] 3GPP, "Enhancements for High Speed Downlink Packet Access(HSDPA) Using Multiple Antennas," 3GPP TSG R1-00-1096, Lucent, Aug. 2000.
- [19] 김성진, 이용석, 김호진, 이현우, "3GPP 다중안테나기술동향(Part II: MIMO를 중심으로)," *Telecommunication Review*, 12권 2호, 2002. 3.
- [20] TIA/EIA-95-B, "Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Wideband Spread Spectrum Cellular Systems," Feb. 1999.
- [21] 3GPP2 C.S0002-B, "Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems Release B," Apr. 2002.
- [22] Sang-Hoon Lim, Jeonghwa Lee, and Jongsoo Park, "Performance Evaluation of Adaptive Beamforming Using Pilot and Traffic Channel in cdma2000 Reverse Link," VTC 2002 Fall, 2002, pp.2154-2157.
- [23] Chen Zequiang and Yang Dacheng, "A Novel Smart Antennas Algorithm for 1x EV-DV Systems," VTC Spring, 2003, pp.1003-1006.
- [24] Lucent Technologies, "Downlink Improvement through Space-Time Spreading," 3GPP2-C30-19990817-014, Aug. 1999.
- [25] 3GPP2 C.S0002-D, "Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems," Mar. 2004.
- [26] www.ieee802.org/11
- [27] www.ieee802.org/16
- [28] www.ieee802.org/20
- [29] Adrian P Stephens, "IEEE P802.11 Wireless LANs 802.11 Tn Functional Requirements," Doc. No: IEEE802.11-03-813r12.
- [30] Jaekyun Moon, Hui Jin and Yong Li, "Practical MIMO Architecture Enabling Very High Data Rates," Doc.No: IEEE802.11-03/ 0999r0.
- [31] Hemanth Sampath, Ravi Narasimhan, "Advantages and Drawbacks of Circular Delay Diversity for MIMO-OFDM," Doc. No: IEEE802.11-04/0075r1.
- [32] Yang-Seok Choi and Siavash M. Alamouti, "Layered Processing for MIMO OFDM," Doc. No: IEEE802.11-04/0016r3.
- [33] Frederik Petré, Bart Van Poucke, André Bourdoux, and Liesbet Van der Perre, "MIMO-OFDM for High-speed WLANs," Doc. No: IEEE802.11-04/0136-00-000n.
- [34] Alexandre Ribeiro Dias, "Multiple Antenna OFDM Solution for Enhanced PHY," Doc. No: IEEE802.11-04/0229-00-000n.
- [35] IEEE 802.16-2001, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.
- [36] IEEE 802.16a-2003 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems-Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2~11GHz.
- [37] P802.16e™, (D1) Draft Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems-Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands.
- [38] Frederick W. Vook, "Antenna Arrays for MBWA: Overview and Field Experiments," Doc. No: C802.20-03/12.
- [39] Insoo Sohn, Heesoo Lee, and KyungHi Chang, "MIMO Channel Model for MBWA," Doc. No: C802.20-03/18.
- [40] Guanghan Xu, "Smart Antenna and MC-SCDMA," Doc. No: C802.20-03/29.
- [41] Insoo Sohn, Heesoo Lee, and Jae Young Ahn, "Comparison of SFBC and STBC for Transmit Diversity in OFDM System," Doc. No: C802.20-03/49.