

이동통신용 다중 송수신 안테나 전송기술 동향

Overview of MIMO Technology for Mobile Communications

차세대 이동통신 특집

최인경 (I.K. Choi)	WiBro무선전송연구팀 책임연구원
예충일 (C.I. Yeh)	WiBro무선전송연구팀 책임연구원
송영석 (Y.S. Song)	WiBro무선전송연구팀 선임연구원
이승준 (S.J. Lee)	WiBro무선전송연구팀 선임연구원
권동승 (D.S. Kwon)	WiBro무선전송연구팀 팀장

목 차

-
- I. 서론
 - II. 개루프 다중 송수신 안테나 전송기술
 - III. 페루프 다중 송수신 안테나 전송기술
 - IV. 안테나 간격이 좁은 경우의 다중안테나 전송기술
 - V. 다중사용자를 고려한 다중 송수신 안테나 전송기술
 - VI. 결론

다중 송수신 안테나 시스템은 추가적인 주파수나 송신전력의 할당 없이도 채널 용량을 안테나 수에 비례하여 증가시킬 수 있는 장점으로 인해 차세대 통신기술의 핵심으로 부각되고 있다. 본 원고에서는 이동통신 시스템에서 다중 송수신 안테나간 채널 특성을 활용하여 무선링크의 신뢰도와 전송률을 증대시키는 다중 송수신 안테나 전송기술과 전체 채널용량을 증가시키기 위한 다중사용자 다중 송수신 안테나 전송기술의 내용 및 동향을 소개한다.

I. 서론

최근 무선 통신 환경에서 음성 서비스를 비롯한 다양한 멀티미디어 서비스를 제공하고, 고품질 및 고속의 데이터 전송을 지원하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구의 일환으로 공간영역의 채널을 이용하는 MIMO 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. MIMO 기술은 송수신 양단에 다중안테나를 사용함으로써 한정된 주파수 자원 내에서 채널 용량을 증대하여 높은 데이터 전송률을 제공할 수 있다. 다중 송수신 안테나를 이용하는 기술로서 어레이 안테나를 이용하는 레이더 기술, 수중 공간에서의 소나 기술, 무선 통신 시스템의 빔형성 기법 등이 예전부터 연구되어 왔으며, 최근 무선 통신 시스템에서의 용량 증대에 대한 요구가 증가되면서 이러한 MIMO 기술 연구에 대한 관심이 집중되고 있다. Space-Time 기술이라고도 불리는 MIMO 기술은 산란체가 풍부한 채널 환경에서 다중 송수신 안테나를 사용함으로써 이론적으로는 송신과 수신 안테나 중 적은 수의 안테나 수에 비례하는 채널 용량을 얻을 수 있다[1]. 실제로 Bell Lab.을 중심으로 한 많은 연구 결과를 통해 송수신단에 여러 개의 안테나를 사용하고 적절한 신호처리 기술을 사용함으로써 높은 시스템 용량을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

현재까지의 다중 송수신 안테나 관련 연구동향을 살펴보면 다중 송수신 안테나 간 채널 모델링을 위한 측정 및 채널 모형 도출 연구, 채널의 공간 상관도 및 다중사용자를 고려한 다중 송수신 안테나 시스템의 이론적 채널 용량 분석 연구, 다중 송수신 안테나 시스템을 이용하여 무선 링크 신뢰도 향상 및 전송률을 증대시키기 위한 단일사용자 다중 송수신

● 용어해설 ●

MIMO(Multiple Input Multiple Output): 송수신 양단에 다중안테나를 사용함으로써 한정된 주파수 자원 내에서 채널 용량을 증대하여 높은 데이터 전송률을 제공할기 위한 기술

안테나 전송기술 연구와 다중사용자를 고려한 MIMO 시스템에서 전체 채널용량을 증대시키기 위한 다중 사용자 다중 송수신 안테나 전송기술 등에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 단일사용자 다중 송수신 안테나 전송기술은 크게 송신기에서 채널 정보를 알지 못하는 개루프 전송기법과 송신기에서 채널 정보를 알고 있는 페루프 전송기법으로 분류될 수 있다[2].

본 논문에서는 다중 송수신 안테나 채널의 독립적인 특성과 시공간 신호처리 기술을 활용해 무선 링크의 신뢰도를 향상시키고 시스템의 전송률을 증대시키기 위한 단일사용자 다중 송수신 안테나 전송 기술과 다중사용자가 고려된 전체 시스템의 용량을 증대시키기 위한 다중사용자 다중 송수신 안테나 전송 기술에 대해 살펴보기로 한다.

II. 개루프 다중 송수신 안테나 전송기술

이동통신 시스템에서 다중 송수신 안테나 통신 기술을 이용하여 셀 커버리지를 넓히며 또한 전송률을 높이기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 개루프 다중 송수신 안테나 전송기술에 있어서 셀 커버리지를 넓히기 위해서는 페이딩에 대응하기 위해 공간 다이버시티 이득을 높이는 기술이 연구되고 있으며 또한 전송률을 높이기 위해서는 안테나간 경로 이득들간의 비상관성을 이용하여 공간적 전송률을 높이는 기술이 연구되고 있다. 개루프 전송기법에서는 공간채널을 독립적인 복소 가우시안 확률변수임을 가정하여 전송 심볼의 평균오차가 최소화되도록 심볼을 시공간 부호화하는 것으로 송신기에서 채널 정보를 필요로 하지 않으므로 상향링크의 무선 자원을 낭비하지 않고 비교적 간단한 구조로 송수신기를 구성할 수 있다. 그러나 채널 변화에 적응적으로 대처할 수 없어 채널의 공간상관도가 증가하거나 다중채널이 동시에 깊은 페이딩을 겪는 경우 성능이 크게 열화되는 단점을 갖는다.

여기서는 최근 이동통신시스템의 표준화 단체에서 논의되고 있는 개루프 다중 송수신 안테나 전송 기술에 대해서 IEEE 802.16e[3], IEEE 802.20[4] 과 3GPP LTE[5]를 중심으로 고찰한다.

1. IEEE 802.16e

IEEE 802.16e에서는 송신안테나 개수 및 공간 전송률에 따라 블록부호 형태의 다양한 시공간(혹은 주파수 공간) 부호화 기술이 도입되었다.

송신 안테나가 2개이며 공간 전송률 1인 부호로 (1)과 같은 Alamouti 부호가 사용되고 있다.

$$A = \begin{pmatrix} s_i & -s_{i+1}^* \\ s_{i+1} & s_i^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

송신 안테나가 2개이며 공간 전송률 2인 부호로는 (2)와 같은 공간 다중화 부호뿐만 아니라 공간 다중화와 공간 다이버시티를 최대로 활용하는 (3)이 사용되고 있다.

$$B = \begin{pmatrix} s_i \\ s_{i+1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{1+r^2}} \begin{pmatrix} s_i + jrs_{i+3} & rs_{i+1} + s_{i+2} \\ s_{i+1} - rs_{i+2} & jrs_i + s_{i+3} \end{pmatrix}, r = \frac{-1 + \sqrt{5}}{2} \quad (3)$$

송신 안테나가 3개이며 공간 전송률이 1인 부호로는 간단한 수신방식을 유지하면서도 최대 다이버시티 이득을 추구하고자 하는 (4)와 같은 부호가 사용되고 있다.

$$x_i = s_i e^{j\theta}, \theta = \tan^{-1}\left(\frac{1}{3}\right), i = 1, 2, 3, 4$$

$$\tilde{x}_1 = x_{1I} + jx_{3Q}, \tilde{x}_2 = x_{2I} + jx_{4Q},$$

$$\tilde{x}_3 = x_{3I} + jx_{1Q}, \tilde{x}_4 = x_{4I} + jx_{2Q}$$

$$A_i = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 & -\tilde{x}_2^* & 0 & 0 \\ \tilde{x}_2 & -\tilde{x}_1^* & \tilde{x}_3 & -\tilde{x}_4^* \\ 0 & 0 & \tilde{x}_4 & \tilde{x}_3^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

그 외에도 공간 전송률이 2인 경우에도 다이버시티 이득을 최대화하는 부호가 사용되고 있으며, 전송률이 3인 경우에는 공간 다중화부호가 사용되고

있다. 송신 안테나가 4개인 경우에도 공간 전송률이 1, 2, 4인 부호가 사용되고 있다.

2. IEEE 802.20

Qualcomm에서 제시하고 있는 MBFDD/MBTDD에서는 블록부호 형태의 다이버시티 부호로는 송신안테나 2개에 대한 Space-Time Transmit Diversity (STTD) 부호만을 사용하고 있다. MBFDD/MBTDD의 개루프 다중 송수신 안테나 기술의 한 가지 특징으로는 송신안테나를 효율적으로 활용하기 위해, 유효 안테나의 개념을 도입하고 있다는 것이다. 하나의 유효 안테나는 물리 안테나들이 만들어내는 하나의 빔을 나타낸다. 물리 안테나가 N개인 경우에 물리안테나 신호로부터 유효 안테나 신호로의 매핑은 (5)에 의해 이루어진다.

$$\begin{bmatrix} e^{j\theta_N} & 0 & \Lambda & 0 \\ 0 & e^{j\theta_N} & \Lambda & 0 \\ M & M & O & M \\ 0 & 0 & \Lambda & e^{j\theta_{N-1}} \end{bmatrix} [DFT\ matrix] \quad (5)$$

(5)에서 θ_N 는 임의 위상이다. 한 개의 codeword가 시간에 따라 서로 다른 유효 안테나를 사용하게 하여 다이버시티 이득을 얻도록 한다.

3. 3GPP Long Term Evolution

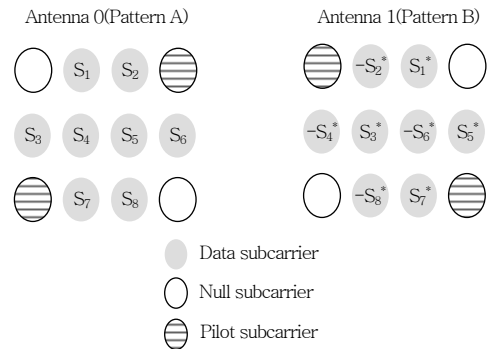
3GPP Long Term Evolution(LTE)에서는 현재 개루프 다중 송수신 안테나 기술이 논의중이다. 안테나 개수가 2와 4인 경우의 IEEE 802.16e의 개루프 다중 송수신 안테나 기술과 IEEE 802.20의 개루프 다중 송수신 안테나 기술들이 3GPP LTE에서도 검토중에 있다. 그 외에도 공간 다이버시티를 얻기 위해 블록 부호 기반의 시공간(혹은) 부호화 기술 이외에도 보다 간단히 구현될 수 있는 다이버시티 기술로 순환 지연 다이버시티(cyclic delay diversity) 기술이 논의되고 있다. 또한 시공간(혹은 주파수공간) 블록 부호화 기술과 순환 지연 다이버시티 기술이 결합된 형태의 전송기법도 같이 논의중이다.

4. 상향링크 MIMO 기술동향

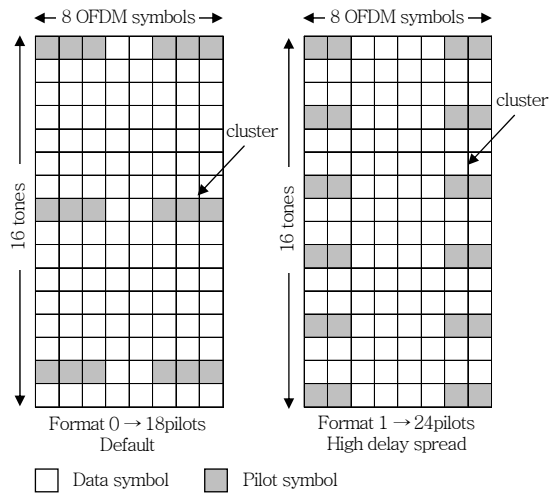
이동통신 단말기는 전력공급의 제한이 있고 전력 소모는 무선 송신에 관계된 부분이 수신보다 훨씬 크다. 이를 고려하여 송신안테나 수가 수신안테나 수보다 적은 것을 가정한 규격이 승인되었거나 제안되고 있다.

802.16에서는 (그림 1)에 나타내었듯이 상향링크에 최대 2개의 송신안테나를 가정하여 STTD, 공간다중화, 그리고 협력적 공간다중화(collaborative spatial multiplexing) 3가지의 표준화 기술이 채택되어 있다. 이들 기술을 3가지 채널 모드인 PUSC와 optional PUSC, 그리고 optional band AMC에 적용하고 있다. 협력적 공간다중화는 2대의 단말기가 각각 하나의 송신안테나를 가질 경우에 같은 주파수 자원을 할당받아 동시에 데이터를 전송하는 기법이다. 또한 2대의 단말기가 각각 2개의 송신안테나를 가질 경우에도 파일럿(pilot)만 코드다중화로 보내며 각각의 단말기가 2개의 다른 데이터 스트림을 보낼 수 있다. (그림 1)은 PUSC 모드에서의 STTD 전송시 데이터 매핑을 보인 것이다. 채널 추정을 위한 파일럿은 안테나별로 구분 가능하여야 하므로 null 부반송파를 사용하여 안테나끼리의 파일럿 충돌을 피한다. 공간다중화 및 협력적 공간다중화도 마찬가지로 파일럿을 송신한다.

IEEE 802.20에서는 웰컴이 하나의 단말 송신안테나 및 다수의 기지국 수신안테나를 전제로 Quasi Orthogonal Reverse Link(QORL)를 제안하고 있다. 이는 기본적으로 IEEE 802.16에서의 협력적 공간다중화 방식과 동일하다. 다만 IEEE 802.16에서는 최대 2대의 단말기 다중화 전송이 이루어지는데 비해 3대까지 가능하다는 차이점이 있다. 이는 파일럿 할당 방식의 차이에 의해 발생한다. 파일럿 할당 패턴에는 (그림 2)에서 보듯이 기본 패턴과 주파수 선택도가 큰 단말기를 위한 패턴이 있다. QORL을 위해 동일 블록에 파일럿 위치를 동일하게 할당하지만 직교 파일럿 코드가 공간다중화를 위한 단말기에 할당되어 동시 채널 추정을 가능하게 한다. 왼쪽의 패턴에는 3×3 직교 파일럿 코드가 할당되어 단말기



(그림 1) 상향링크에서 2개의 송수신 안테나를 위한 파일럿 할당 방법



(그림 2) IEEE802.20 상향링크에서 다중 송수신 안테나를 위한 파일럿 할당

가 3대까지 다중화 전송 가능하며 오른쪽 패턴에는 2대까지 할당된다.

Ⅲ. 페루프 다중 송수신 안테나 전송기술

페루프 전송기법이란 송신단이 수신단에서 추정된 채널 정보를 귀환 받아 그 정보를 이용하여 데이터를 전송하는 기법으로 채널의 정보를 이용함으로써 시스템의 용량이나 평균 오차율을 향상시킬 수 있다. 이때 송신단이 수신단으로부터 받는 채널 정보의 특성에 따라 크게 전체 채널 귀환과 제한된 채

널 궤환방식으로 구분할 수 있으며 이러한 채널 정보로부터 여러 전송기법을 적용할 수 있다. 그러나 이 경우 채널 정보를 궤환하기 위해 상향링크의 많은 주파수 자원을 점유하는 문제점을 안고 있으며 궤환 채널에 오차가 발생할 경우 성능이 급격히 열화되는 단점을 나타낸다.

전체 채널 궤환인 경우는 수신단에서 추정된 MIMO 시스템의 모든 채널 정보를 송신단에 궤환하고 송신단은 이 채널 정보를 이용하여 시스템 성능을 향상시키기 위한 전송기법을 적용할 수 있다. 송수신단이 모든 채널 정보를 알고 있으면 고유치 분해로부터 채널을 간섭이 존재하지 않는 가상의 평행한 부채널들로 분리할 수 있고 각 부채널에 대한 고유치를 이용하여 신호 처리함으로써 채널 용량과 평균 오차율을 최적화할 수 있다. 총 송신 전력이 제한되어 있을 때, water-filling 기법을 이용하여 송신 전력을 안테나마다 할당함으로써 채널 용량에 대한 최적해를 구할 수 있다[6]. 이러한 채널 용량은 개루프 방식에서 송신 안테나마다 동일한 전력을 할당하는 방식에 비해 큰 값을 갖는다. 특히, 신호 대 잡음비가 작을수록 또한 채널 간 상관도가 클수록 그 차이는 (그림 3)에서 알 수 있듯이 더욱 커지게 된다.

송신단이 순시적인 채널에 대한 모든 정보를 갖는 전체 채널 궤환 방식이 시스템의 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있지만 많은 궤환 정보량으로 인

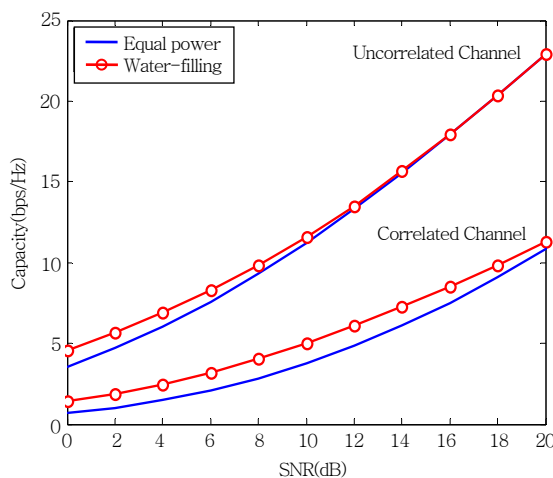
해 상향링크의 무선 자원을 많이 점유하는 단점을 지니고 있다. 또한 실제 시스템에서는 수신단에서 채널 정보를 완벽히 추정할 수 없으며, 추정된 채널 정보를 송신단에서 궤환하는 과정에서 시간적 지연 및 전송 오차가 발생하게 된다. 이러한 여러 요인에 의해서 성능 열화 현상이 발생할 수 있다. 그러므로 순시적인 채널 정보 대신 채널의 통계적 특성이나 전송기법에 이용할 수 있는 파라미터만을 아래의 4 가지 제한된 채널 궤환 방식을 고려할 수 있다.

1. 안테나 선택 기법

MIMO 시스템은 각 안테나의 공간 상관도에 의해 시스템의 성능이 저하되는 특성을 지니고 있다. 이러한 저해 요인을 줄이기 위해 송신단의 모든 안테나를 사용하지 않고 한정적으로 선택하여 데이터를 전송하는 기법을 안테나 선택 기법이라 한다[7]. 시스템의 특성에 따라 수신단에서 채널 용량을 최대화하거나 평균 오차율을 최소화하도록, 추정된 채널 정보로부터 송신단에서 사용할 안테나를 결정한다. 이와 같이 모든 채널 정보 대신 선택된 안테나에 대한 정보를 송신단에 궤환함으로써 송신단에서는 선택된 안테나에 의해서만 데이터를 전송한다. 안테나 선택 기법은 선택된 안테나에 대한 인덱스만을 궤환하기 때문에 궤환 정보량이 현저히 줄어들면서 채널에 적합한 안테나 선택과 그에 따른 다이버시티 효과에 의해 성능 열화가 적은 장점이 있다.

2. 모드 스위칭 기법

개루프 전송방식은 공간다중화 기법과 전송 다이버시티 기법으로 분류될 수 있으며, 총 데이터 전송률이 동일한 경우, 채널 상태에 따라 두 기법의 평균 오차율이 다르게 나타난다. 즉 신호 대 잡음비가 높은 경우, 공간다중화 기법이 더 우수한 성능을 보이는 반면 신호 대 잡음비가 낮은 경우, 전송 다이버시티 방식이 더 우수한 성능을 나타낸다. 이와 같은 시스템의 특성을 이용하여 채널 상태에 따라 두 방식 중에 하나를 선택함으로써 시스템의 성능을 향상시

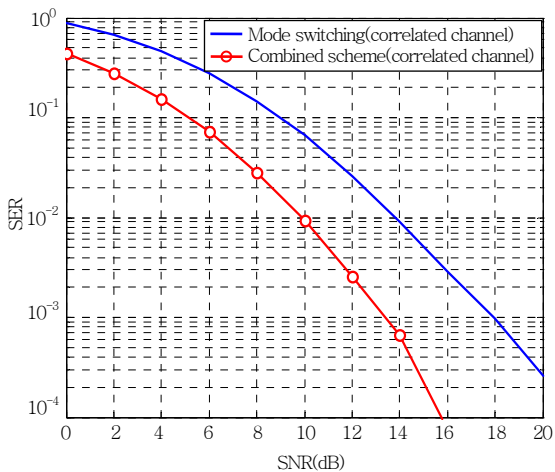


(그림 3) 4x4 MIMO 시스템의 채널 용량

킬 수 있으며 이러한 기법을 모드 스위칭 기법이라 한다. 이 때 모드 스위칭의 기준은 수신단에서 연산한 평균 오차율을 이용하게 되며, 선택된 모드에 대한 정보를 송신단에 귀환하게 된다.

3. 안테나 및 모드 스위칭 결합 기법

안테나 및 모드 스위칭 결합 기법은 안테나 선택과 모드 스위칭을 결합함으로써 각각의 기법을 이용하는 경우보다 성능 개선 효과를 얻을 수 있다[8]. 즉, 각 기법으로부터 채널의 공간 상관도에 의한 성능 열화 현상의 극복과 평균 오차율의 향상을 동시에 얻을 수 있는 장점이 있는데, (그림 4)는 공간 상관도가 존재하는 MIMO 시스템에서 모드 스위칭 기법과 안테나 및 모드 스위칭 결합 기법의 성능을 비교한 결과로서 결합 기법이 평균 비트오차율에서 약 4.8dB 정도 우수함을 확인할 수 있다. 이는 결합 기법이 모드 스위칭 기법에 의한 효과와 더불어 공간 상관도에 의한 성능 열화를 안테나 선택 기법으로 감소시키기 때문에 나타나는 결과이다.

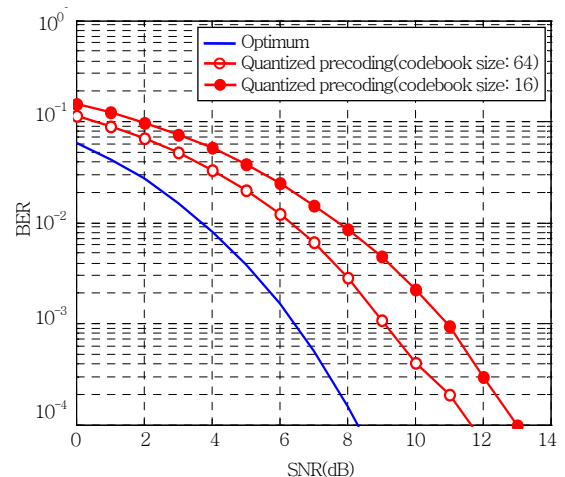


(그림 4) 모드 스위칭 기법과 안테나 및 모드 스위칭 결합 기법의 성능 비교

4. 양자화 송신 부호화기 기법

미리 결정된 몇 개의 채널 세트를 수신단에서 갖

고 있고, 송신단에서는 각 채널 세트에 적합한 코드북이 주어질 경우 양자화 전처리 기법이 사용될 수 있다. 즉, 현재 채널과 가장 유사한 채널 세트를 수신단에서 결정된 후 그 인덱스를 송신단에 귀환함으로써 송신단은 결정된 채널 세트에 적합한 코드북을 선택하여 데이터를 전송하게 된다[9]-[11]. 채널 세트에 대한 인덱스만 귀환하면 되기 때문에 귀환 정보량이 현저히 감소하게 된다. 양자화 전처리 기법에서 시스템 성능에 영향을 끼치는 요인으로 채널 세트의 구성 방법이나 코드북의 종류, 크기 등이 있다. 이러한 요인들을 채널 용량의 증가나 평균 오차율의 최소화 등의 목적에 따라 적합하게 설계하고 설정하는 방식이 이 기법의 중요한 이슈가 된다. 대표적인 예로 그래스매니안 부공간 패킹방식이 있다. (그림 5)는 그래스매니안 부공간 패킹방식으로 채널 세트와 코드북을 설계한 후 코드북 크기에 따른 시스템 성능을 비교한 그래프이다. 귀환 정보량이 현저히 줄어들지만 모든 채널 정보를 이용하는 경우에 비해 성능 열화 현상을 보이는 트레이드 오프가 발생한다. 그러나 코드북의 크기가 증가함에 따라 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 즉, 귀환 정보량을 충분히 줄이면서 최적의 성능에 근접할 수 있다.



(그림 5) 1×4 MIMO 시스템의 코드북 크기에 따른 성능 비교

IV. 안테나 간격이 좁은 경우의 다중안테나 전송기술

정보이론에 의하면 단위주파수 당 전송 가능한 비트의 수는 한정적이거나 다중안테나 기술을 사용하여 스펙트럼 효율을 증대시킬 수 있다. 다중안테나 기술은 안테나 사이의 상관관계 유무에 따라 2가지 형태로 분류가 가능하다. 일반적으로 송수신기 사이의 거리에 비하여 안테나간 간격이 현저히 작을 경우 평면파 이론이 성립되므로 각 안테나가 경험하는 채널의 효과는 평면파의 입사각에 따른 위상 차이만 있을 뿐 동일하다고 볼 수 있다. 그러나 안테나간 간격이 작지 않을 경우는 각 안테나가 경험하는 채널의 상관이 줄어들게 되고 충분히 이격되었을 경우 상관이 없음을 가정할 수 있다. 송신안테나 수를 n_T 수신안테나 수를 n_R 이라고 할 경우 $n_R \times n_T$ 크기의 채널 행렬(H)를 얻을 수 있으며 안테나간 상관이 없을 경우 동일 주파수로 전송할 수 있는 심볼의 최대 수는 r 개로 결정되고 (6)과 같이 주어진다.

$$r = \text{rank}(H) = \min(n_T, n_R) \leq n_R \quad (6)$$

만일 안테나 간격이 좁아 상관계수가 1이라면 rank가 1이 되어 공간 다중화 또는 다이버시티 효과를 기대할 수 없다. 이는 다원 일차 연립방정식의 해를 구하는 것과 같은 문제로 n 원 일차 연립방정식의 해를 구하는 데 n 개의 독립적 방정식을 필요로 하는 것과 같은 원리이다. 반면 빔포밍을 하려면 안테나간 상관계수가 1에 가까울수록 유효하다. 빔포밍은 FIR 필터의 계수와 같은 개념의 가중 벡터를 안테나 어레이에 적용하고 공간 필터링에 의해 원하는 방향으로 전력을 집중하여 SNR을 개선함과 동시에 간섭을 완화하는 데 목적을 두고 있다. FIR에서 탭과 탭 사이의 신호가 위상만 달리하는 동일한 신호이듯이 빔포밍의 경우도 안테나와 안테나 사이의 신호가 완전 상관되어야 가중 벡터를 이용한 공간 필터링이 가능하다. 이 경우 rank가 1이므로 다중 송신안테나를 이용하여 상이한 심볼을 전송할 수 없으며 있다 하더라도 상이한 심볼을 전송하면 가중 벡터가 달라

져 원하는 방향으로 빔포밍이 불가능하다. 따라서 빔포밍을 이용할 경우 SNR 증대에 의한 고효율변조 방식 적용에 의한 성능 향상, 셀 커버리지 확장, 간섭 완화에 따른 주파수 재사용에 의한 스펙트럼 효율 향상 등을 얻을 수 있고 빔포밍을 적용할 경우 대부분의 구현 복잡도를 기지국에 둘 수 있어 상업화에 용이한 장점을 가진다. 포괄적 의미의 공간분할 다중액세스는 동일주파수를 이용하여 다수의 사용자에게 서비스를 제공하는 것을 의미한다. 정보이론에서 MIMO 채널용량은 (7)과 같이 주어진다.

$$C_{MIMO} = \log_2 \det \left(I_m + \frac{P}{n_T \sigma^2} Q \right), m = \min(n_R, n_T), \quad (7)$$

$$Q = \begin{cases} HH^H, & n_R < n_T \\ H^H H, & n_R \geq n_T \end{cases}$$

만일 충분히 이격된 n_T 개의 안테나를 구비한 기지국과 단일 안테나를 구비한 n_R 명의 사용자간 $n_R \times n_T$ 채널에서 $\text{rank} = r$ 이라면 MIMO의 채널용량은 (8)과 같고, 데이터 파이프의 수가 r 이므로 공간분할 다중액세스가 가능하다.

$$C_{MIMO} = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{P}{n_T \sigma^2} \lambda_i \right), \quad (8)$$

$$r = \text{rank}(HH^H \text{ or } H^H H)$$

여기서 λ_i 는 $H^H H$ 또는 HH^H 의 고유치이다.

송신기가 채널을 알고 있을 경우 상태가 양호한 데이터 파이프에 전력을 더 많이 공급하고 그렇지 못한 파이프에 전력을 적게 공급하는 “water-pouring” 또는 “water-filling” 기법을 이용하여 MIMO 채널용량은 증대시킬 수 있다.

$$C_{MIMO}^{WaterPouring} = \max_{\sum_{i=1}^r \gamma_i} \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{P \gamma_i}{n_T \sigma^2} \lambda_i \right), \quad (9)$$

$$\gamma_i = E[|s_i|^2], \quad \sum_{i=1}^r \gamma_i = n_T$$

여기서 s_i 는 i 번째 데이터 파이프를 이용하여 전송되는 심볼을 의미한다.

송신기 측에 채널이 알려져 있지 않은 개루프의 경우 동일 전력을 사용할 경우 SISO 시스템과 $n_T \times 1$

MISO 시스템의 용량을 비교하면 (10)과 같이 동일하다.

$$C_{SISO} = C_{MISO} = \log_2 \left(1 + \frac{P|h|^2}{\sigma^2} \right) \quad (10)$$

그러나 MISO에 빔포밍을 적용할 경우 증대된 용량을 얻을 수 있다. 왜냐하면 원하는 가입자로 향하는 빔을 형성하기 위해 채널을 알아야 하므로 MISO 빔포밍이 water-pouring 기법의 일종이기 때문이다.

$$C_{MISO}^{BF} = \log_2 \left(1 + \frac{n_r P}{\sigma^2} |h|^2 \right) \quad (11)$$

Single 수신 안테나를 구비한 n_r 사용자에 대하여 MISO 빔포밍을 이용하여 공간분할 다중액세스를 실현할 수 있다. 이는 빔포밍이 전력을 특정 방향으로 집중시켜 간섭이 완화되므로 사용자의 위치가 이격되어 있을 경우 동일주파수를 여러 번 활용할 수 있기 때문이다. 따라서 다중 셀 환경에서 MISO 빔포밍 용량은 (12)와 같이 표현될 수 있다.

$$C_{MISO}^{BF} = F_{BF} \times \log_2 \left(1 + \frac{n_r P}{\sigma^2} |h|^2 \right) \quad (12)$$

(12)에서 F_{BF} 는 동일 셀에서 동일 주파수 재사용 횟수를 의미한다. <표 1>에 방식별로 공간분할 다중액세스의 특징을 비교하였다. 이와 같은 SDMA는 IEEE 802.16 TGe에서 표준화가 완료되었고 IEEE 802.20 MBWA의 문서 IEEE P802.20/D1에 채택되어 표준화 과정을 거치고 있으며 3GPP LTE 등

에서도 가능성이 논의되고 있는 중이다.

V. 다중사용자를 고려한 다중 송수신 안테나 전송기술

최근 하나의 기지국이 여러 개의 단말기를 지원하는 다중사용자 환경에서, 다중사용자를 고려한 MIMO 시스템의 전체 채널용량을 증대시키기 위하여 다중사용자를 고려한 다중 송수신 안테나 전송기술(MU-MIMO) 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 다중사용자의 채널환경은 모든 MU-MIMO 기법들이 공간 자유도를 완전히 이용할 수 있도록 채널행렬의 well-conditioned가 보장되어야 하며, 그리하여 다중사용자가 간섭에 의해 제한되지 않고 각각 원하는 전송률로 동시에 통신할 수 있어야 한다.

MU-MIMO에서 상향링크는 다중사용자가 동일한 기지국을 향해 데이터를 전송하고(many-to-one) 하향링크는 기지국이 다중사용자에게 신호를 전송하며(one-to-many), 다중사용자들간에는 어떠한 협조도 할 수 없다는 것이 일반적인 단일사용자 MIMO processing과의 차이이다.

상향링크 시나리오에서는 사용자간의 협조가 불가능하여 각 송신신호의 최적화가 어려운 반면, 다중사용자의 신호를 수신한 기지국에서 각 사용자의 전송신호들을 분리해내는 기법들이 적용될 수 있다. 상향링크의 전송 기법으로 일반적인 MIMO에서와

<표 1> MIMO 별로 공간 다중액세스의 특징

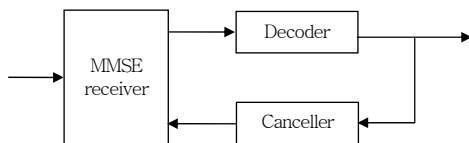
	SISO	MISO	MISO BF	MIMO
용량	$\log_2 \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} h ^2 \right)$	$\log_2 \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} h ^2 \right)$	$F_{BF} \times \log_2 \left(1 + \frac{n_r P}{\sigma^2} h ^2 \right)$	$\sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{P}{n_i \sigma^2} \lambda_i \right)$
SDMA 적용	불가능	불가능	가능	가능
SDMA 적용 시 고려사항	불가능	불가능	단말 간격이 충분히 이격되어야 함	단말 간격에 대한 제한 없음
SDM 적용	불가능	불가능	불가능	가능
Diversity 활용	불가능	가능	불가능	가능
안테나 간격	의미 없음	Not correlated	Correlated	Not correlated
구현 이슈	가장 간단	비교적 간단	복잡도 기지국 집중	복잡도 기지국 및 단말에 분산

같이 singular value decomposition과 water-filling 등을 사용할 수 있지만 각 사용자가 자신의 송신채널 정보를 알아야 하므로 다소 실제적이지 못하다. 기지국은 각 사용자의 데이터 스트림을 복호하기 위해서 선형 decorrelator나 MMSE 수신기를 사용할 수 있다. MMSE 수신기는 원하는 사용자의 신호세기를 최대화하거나 다른 사용자의 간섭을 억제하기 위한 최적의 절충안이다. 성능을 더욱 개선하기 위해서 간섭제거기법인 Successive Interference Cancellation(SIC)을 결합한 MMSE-SIC 기법도 고려할 수 있다(그림 6 참조). 이 때 SIC를 위한 cancellation ordering은 동일한 자원을 공유하는 다중사용자 중에서 우선권을 갖는 사용자를 결정하게 된다.

하향링크 채널에서 기지국은 동시에 여러 사용자들에게 신호를 전송하므로 각 사용자들은 원하는 신호 외에 다른 사용자의 신호를 간섭으로 수신하게 된다. 이러한 간섭을 억제하기 위한 기술은 단말수신기에서 사용하기에는 복잡도와 비용면에서 어려움이 있으므로 기지국 송신기에서 송신 신호를 지능적으로 설계함으로써 간섭을 완화시킬 수 있다. 송신기가 채널정보를 미리 알고 있는 경우에 사용자간 간섭을 다루는 가장 간단한 방법은 모든 간섭신호를 nulling 시키는 zero-forcing(혹은 block diagonalization) 기법으로 송신기에서 채널의 pseudo-inverse로 전송신호를 precoding 한다[12]. 그러나 채널의 pseudoinverse가 항상 존재하기 위해서는 기지국 송신안테나 수가 다른 사용자들의 전체 데이터 스트림 수보다 많아야 되는 제약이 있으며, 사용자들이 가까이 위치해 있는 경우(ill-conditioned channel) 이들 간섭을 nulling하기 위한 전력 소비로 전력 감소 현상(power inefficiency problem)이 발생하여 성능 저하를 초래하게 된다. 최근

MU-MIMO 환경에서 채널용량을 최대화 하기 위한 방법으로 Dirty Paper Coding(DPC)이 주목받고 있다[13]. DPC의 개념을 살펴보면, 하나의 기지국이 모든 사용자에 대한 정보를 알고 있고, 또한 채널 정보도 알고 있다면, 각 사용자에게 간섭으로 작용하는 성분인 다른 사용자 데이터를 기지국에서 채널을 고려하여 미리 제거해서, 각 사용자 입장에서는 다른 사용자 간섭을 느끼지 못하도록 데이터들을 전송할 수 있다는 것이다. DPC를 사용하면 간섭을 제거하기 위해서 전력을 소모하지 않으므로 채널용량이 간섭이 없는 AWGN 채널에서와 같아진다. 최근 DPC를 Generalized Decision Feedback Equalizer(GDFE) 구조와 함께 사용하는 방안이 제안되었지만[14], 실제로 구현하기에는 어려움이 있어 이를 대체하기 위한 연구가 진행되고 있다.

위에서 살펴본 zero-forcing, DPC와 같이 대부분의 하향링크 MU-MIMO 방법은 송신기가 채널정보를 안다는 가정을 필요로 한다. 그러나 송신기가 순시적인 채널에 대한 모든 정보를 갖기 위해서는 전체 채널을 귀환해야 하므로 (TDD 방식에서는 채널의 상호성 이용 가능) 상향링크 무선 자원의 많은 부분을 점유하게 되는 단점이 있다. 뿐만 아니라, 실제 시스템에서는 수신기의 채널 추정오류와 추정된 채널 정보를 송신기로 귀환하는 과정에서 발생하는 시간 지연 및 전송 오차 등으로 인한 성능 열화 현상이 발생할 수 있다. 그러므로 순시적인 채널 정보 대신 채널의 통계적 특성이나 전송기법에 따라 필요한 파라미터만을 귀환하는 제한된 채널 귀환 방식을 고려할 수 있다. 3GPP Long Term Evolution(LTE)에 기고된 Per User Unitary and Rate Control (PU2RC), Precoded Per User Rate Control(P-PURC), Per User and Stream Rate Control(S-PUSRC) 등과 IEEE 802.20에 기고된 MIMO-SDMA 방식 등이 그 예이다[15]-[18].



(그림 6) MMSE-SIC 수신기

VI. 결론

지금까지 전송률 증대 및 무선링크의 신뢰도를

향상시키기 위한 단일사용자를 위한 다중 송수신 안테나 전송기술과 다중사용자를 고려한 다중 송수신 안테나 시스템의 전체 채널용량을 증대시키기 위한 다중사용자 다중 송수신 안테나 전송기법에 대해 살펴 보았다.

단일사용자를 위한 다중 송수신 안테나 전송기법 중 개루프 방식은 공간다중화 기법과 전송다이버시티 기법의 장점을 결합하여 높은 전송률을 가지면서 동시에 높은 신뢰도를 추구하는 시공간부호화기의 개발에 중점을 두어 연구가 진행되었고, 표준화 단체에 반영된 방식을 중심으로 검토하였다. 이러한 시공간부호화기의 경우 일반적으로 수신기의 복잡도가 매우 큰 문제점을 안고 있으며 낮은 복잡도를 갖는 시공간부호 수신기에 대한 연구가 필요하다. 페루프 방식은 수신단에서 송신단으로 전송되는 궤환 정보로부터 시스템의 전송률이나 신뢰도를 효과적으로 향상시킬 수 있기 때문에, 궤환 정보를 이용한 시공간부호화기에 대한 연구가 진행되었고, 표준화 단체에 반영된 방식을 중심으로 검토하였다. 이러한 방식은 궤환 정보량을 최소화하면서 최적의 시스템 성능에 근접하기 위한 파라미터에 대한 연구와 이러한 궤환 파라미터를 효과적으로 적용할 수 있는 전송 기법에 대한 연구가 지속되어야 한다.

그리고, 공간 분할 다중액세스 기술로 다중사용자 환경에서 다중 송수신 안테나 기술은 주파수 혹은 시간의 무선 자원을 공간 영역에서 재사용함으로써 기지국의 전체 시스템 용량을 늘리기 위한 기법으로 안테나 간격이 좁은 경우와 안테나 간격이 넓은 경우 즉, 안테나간 상관을 이용하는 경우와 이용하지 않는 경우에 대한 분석을 하였다. 안테나 간격이 좁은 경우의 공간 분할 다중액세스 기술은 Rician 페이딩에서 가시거리의 직진파의 영향이 큰 농촌, 평야 지대와 셀 경계에서 성능 향상을 위한 것이다.

다중사용자 다이버시티 기법과 채널용량에 관한 연구가 진행되고 있다. 다중사용자 다이버시티 기법의 적용을 위해서는 전체 시스템 용량뿐 아니라 공평도의 문제를 고려해야 한다. 또한 순방향 채널의

채널용량의 영역을 밝히고, DPC를 실제 환경에서 동작시키기 위한 연구도 필요하다.

약 어 정 리

3GPP	3rd Generation Project Partnership
AWGN	Additive White Gaussian Noise
FIR	Finite Impulse Response
MBFDD	Mobile Broadband Frequency Division Duplex
MBTDD	Mobile Broadband Time Division Duplex
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MMSE	Minimum Mean Square Error
SDMA	Space Division Multiple Access
SNR	Signal to Noise Ratio

참 고 문 헌

- [1] G.J. Foschini, "Layered Space-time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when Using Multi-element Antennas," *Bell Labs Technical Journal*, Oct. 1996, pp.41-59.
- [2] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, "Introduction to Space-time Wireless Communications," Cambridge, U. K.: Cambridge Univ. Press, 2003.
- [3] IEEE P802.16e/D12, Draft IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Oct. 2005.
- [4] IEEE 802.20 Working Group on Mobile Broadband Wireless Access, MBFDD and MBTDD: Proposed Draft Air Interface Specification, Jan. 2006.
- [5] 3GPP, TR 25.814 V1.2.1(2006-2), "Technical Specification Group Radio Access Network; Physical Layer Aspects for Evolved UTRA(Release 7), 2006.
- [6] F.R. Farrokhi, G.J. Foschini and A. Lozano, R. A.Valenzuela, "Link-Optimal Space-Time Processing with Multiple Transmit and Receive Antennas," *IEEE Comm. Letters*, Vol.5, No.3, Mar. 2001.
- [7] S. Sanayei and A. Nosratinia, "Antenna Selection in MIMO Systems," *IEEE Comm. Magazine*, Vol.42,

- Issue 10, Oct. 2004, pp.68-73.
- [8] 심세준, 박승일, 이학주, 이충용, “공간적 상관도가 존재하는 채널에 강인한 다중안테나 선택 및 스위칭 시스템,” 대한전자공학회는논문지, 제 41권 제 7호, 2004. 7., pp.55-61.
- [9] D.J. Love, R.W. Heath, and T. Strohmer, “Grassmanian Beamforming for Multiple-input Multiple-output Wireless Systems,” *IEEE Trans on Inform. Theory*, Vol.49, No.10, Oct. 2003, pp.2735-2747.
- [10] K.K. Mukkavilli, A. Sabharwal and E. Erkip, B. Aazhang, “On Beamforming with Finite Rate Feedback in Multiple-antenna Systems,” *IEEE Trans on Inform. Theory*, Vol.49, No.10, Oct. 2003, pp.2562-2579.
- [11] P. Xia and G.B. Giannakis, “Design and Analysis of Transmit-beamforming Based on Limited-rate Feedback,” *IEEE Proc. of the Vehicular Technology Conf.*, Los Angeles, CA, Sep. 26-29, 2004.
- [12] Q.H. Spencer, A.L. Swindlehurst, and M. Haardt, “Zero-Forcing Methods for Downlink Spatial Multiplexing in Multi-User MIMO Channels,” *IEEE Trans. Sig. Proc.*, Vol.52, Feb. 2004.
- [13] M. Costa, “Writing on Dirty Paper,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.29, No.3, Jan. 2001, pp.211-219.
- [14] W. Yu and J.M. Cioffi, “Sum Capacity of Gaussian Vector Broadcasting Channels,” *IEEE Trans on Inform. Theory*, Vol.50, No.9, Sep. 2004, pp.1875-1892.
- [15] 3GPP R1-051353, Samsung, “Downlink MIMO for EUTA,” 2005.
- [16] R1-051407, Huawei, “Downlink MIMO for EUTA,” 2005.
- [17] 3GPP R1-050809, ETRI, “Multiuser Precoding MIMO for E-UTRA Downlink,” 2005.
- [18] IEEE C802.20-05/68r1, Qualcomm, “MBFDD and MBTDD Wideband Mode: Technology Overview,” 2005.