(19)대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) 。Int. Cl.[7]
H04B 7/06
H04L 27/26
H04L 1/00

(11) 공개번호 10-2004-0091671
(43) 공개일자 2004년10월28일

(21) 출원번호 10-2004-7013391
(22) 출원일자 2004년08월26일
번역문 제출일자 2004년08월26일
(86) 국제출원번호 PCT/US2003/005365
(86) 국제출원출원일자 2003년02월19일
(87) 국제공개번호 WO 2003/073646
(87) 국제공개일자 2003년09월04일

(30) 우선권주장 10/085,456 2002년02월26일 미국(US)

(71) 출원인 퀄컴 인코포레이티드
미국 92121-1714 캘리포니아주 샌 디에고 모어하우스 드라이브 5775

(72) 발명자 멧베데브이리나
미국 02144 메사츄세츠주 섬머빌 리버티 애버뉴 68 아파트 넘버2

왈튼제이알
미국 01886 메사츄세츠주 웨스트포드 레지우드 드라이브 7

월러스마크
미국 01730 메사츄세츠주 베드포드 마델 레인 4

(74) 대리인 특허법인코리아나

심사청구 : 없음

(54) 다중 송신 모드를 갖는 다중-입력 다중-출력(MIMO) 시스템

요약

더 적은 채널 상태 정보 (CSI) 를 필요로 하는 다중 송신 방식을 사용하여 다중-채널 통신 시스템에서 다수의 송신 채널을 통해 데이터를 송신하는 기술이 개시되어 있다. 이들 방식은 사용을 위해 선택된 각 송신 안테나를 통해 단일 데이터를 송신하는 부분-CSI 송신 방식 및 모든 송신 전력을 최상의 성능을 갖는 단일 송신 채널에 할당하는 '빔-형성' 송신 방식을 포함할 수도 있다. 각 송신 방식은 동작 상태 (또는 동작 SNR) 의 특정한 범위에 양호한 또는 거의 최적의 성능을 제공할 수도 있다. 그 후, 이들 다중 송신 방식은 MIMO 시스템에 의해 지원되는 동작 상태의 전체 범위를 커버하는 '다중-모드' 송신 방식을 형성하기 위해 불연속 방식으로 조합될 수도 있다. 임의의 소정의 순간에 데이터 송신을 위해 사용될 특정의 송신 방식은 상기 순간에 시스템이 경험하는 특정한 동작 상태에 따른다.

대표도

도 2

색인어

MIMO 시스템

명세서

배경

기술분야

본 발명은 일반적으로 데이터 통신에 관한 것으로, 좀더 자세하게는, 다중 송신 모드를 갖는 다중 채널 통신 시스템 (예를 들어, 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 시스템) 에 관한 것이다.

배경기술

무선 통신 시스템에서, 송신기로부터의 RF 변조 신호는 다수의 전파경로 (propagation paths) 를 경유하여 수신기로 도달될 수도 있다. 통상적으로, 전파경로의 특성은, 페이징 및 다중경로와 같은 다수의 인자들로 인하여 시간에 따라 변한다. 해로운 경로의 영향에 대한 다이버시티를 제공하고 성능을 향상시키기 위하여, 다중의 송신 안테나 및 수신 안테나가 이용될 수도 있다. 일반적으로, 적어도 어느 정도는 참인 바와 같이, 만약 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 전파경로가 선형적으로 독립이면 (즉, 일 경로를 통한 송신이 다른 경로를 통한 송신들의 선형 조합으로서 형성되지 않음), 데이터 송신을 정확하게 송신할 가능성 (likelihood) 은, 안테나의 갯수가 증가함에 따라 증가한다. 일반적으로, 송신 및 수신 안테나의 수가 증가함에 따라, 다이버시티가 증가하고 성능이 개선된다.

다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신 시스템은, 데이터 송신을 위하여 다중의 (N_T 개의) 송신 안테나 및 다중의 (N_R 개의) 수신 안테나를 이용한다. N_T 개의 송신 안테나 및 N_R 개의 수신 안테나에 의해 형성되는 MIMO 채널은 N_S 개의 독립 채널로 분해될 수도 있다 (여기서, $N_S \le \min\{N_T, N_R\}$ 임). N_S 개의 독립 채널 각각은 MIMO 채널의 공간 서브채널이라고도 하며, 일 차원 (dimension) 에 대응한다. 만약 다중의 송신 및 수신 안테나에 의해 생성되는 추가적인 차원이 이용되면, MIMO 시스템은 개선된 성능 (예를 들어, 증대된 송신 용량) 을 제공할 수 있다. 예를 들어, N_S 개의 공간 서브채널들 각각을 통해 독립적인 데이터 스트림이 송신되어, 시스템 스펙트럼 효율을 증대시킬 수도 있다.

MIMO 시스템의 공간 서브채널은 상이한 채널 조건 (예를 들어, 상이한 페이딩 및 다중경로의 영향) 를 경험할 수도 있으며, 소정의 송신 전력량에 대하여 상이한 신호대 잡음비 (SNR) 을 달성할 수도 있다. 따라서, 데이터 스트림에 할당되는 송신 전력량 및 달성된 SNR 에 의존하여, 공간 서브채널에 의해 지원될 수도 있는 데이터 레이트는 서브채널에 따라 상이할 수도 있다. 통상적으로, 채널 조건은 시간에 따라 변하기 때문에, 공간 서브채널의 송신 용량도 시간에 따라 변한다.

코딩된 통신 시스템에서의 가장 큰 과제는, 채널 조건에 기초하여, N_S 개의 공간 서브채널을 통한 데이터 송신을 위한 송신기에서 이용가능한 총 송신 전력 P_{tot} 를 효율적으로 이용하는 것이다. 공간 서브채널을 통하여 데이터를 송신하기 위하여 다양한 방식들이 이용될 수도 있다. 각각의 송신 방식은 MIMO 채널에 관한 일정한 타입의 정보를 요구할 수도 있으며, 또한, 송신기 및 수신기에서의 일정한 신호 프로세싱에 대하여 전제될 수도 있다. 일반적으로, 상이한 용량의 공간 서브채널들에 상이한 송신 전력량을 할당하고, 이들 서브채널을 통하여 송신하기 전에 데이터 스트림을 미리 컨디셔닝 (pre-conditioning) 함으로써, 더 복잡한 송신 방식은 최적에 더 근접한 스펙트럼 효율을 달성할 수도 있다. 그러나, 일반적으로, 이러한 송신 방식들은 MIMO 채널에 관한 더 많은 정보를 요구하며, 이것은 수신기에서 획득하기에 어려울 수도 있으며, 또한, 송신기로의 리포팅을 위해 공중-링크 (air-link) 자원을 요구한다. 덜 복잡한 송신 방식들은, 동작 조건의 제한된 범위에 대해서만 양호한 성능을 제공할 수 있지만, 더 적은 채널 정보를 요구할 수도 있다.

따라서, 높은 스펙트럼 효율을 달성하고 저감된 복잡도를 갖는 MIMO 시스템에서의 데이터 송신 기술이 당업계에 요구된다.

요약

여기에서는, 더 높은 전체 시스템 스펙트럼 효율 및/또는 이점을 달성할 수도 있는 다중-채널 통신 시스템에서 가용 송신 채널을 통하여 데이터를 송신하는 기술이 제공된다. 송신 시스템은, MIMO 시스템의 공간 서브채널, OFDM 시스템의 주파수 서브채널, 또는 MIMO-OFDM 시스템에서의 주파수 서브채널의 공간 서브채 널에 대응할 수도 있다.

일 양태에서는, 최적에 가깝거나 근접하는 전체 효율을 제공하기 위하여, 다중의 송신 방식이 선택적으로 이용된다. 각각의 송신 방식은, 전체 또는 부분 채널-상태 정보 (CSI; 후술됨) 가 송신 채널을 통하여 송신되기 전에 데이터를 프로세싱하기 위하여 송신기에서 이용가능한지 여부에 의존한다. 부분-CSI 송신 방식의 경우, 데이터 스트림은 각각의 송신 안테나를 통하여 (예를 들어, 피크 송신 전력으로) 송신될 수도 있다. 소정의 순간에 데이터 송신을 위하여, N_T 개의 모든 송신 안테나 또는 그 서브세트 (subset) 가 이용될 수도 있다.

전체-CSI 송신 방식의 경우, 하나 이상의 데이터 스트림이 전체-CSI 프로세싱 (또는, 후술되는 바와 같이, 그 변형체)에 기초하여 송신기에서 프로세싱되고 MIMO 채널을 통하여 송신된다. 전체-CSI 송신 방식은, 송신기에서의 전체-CIS 프로세싱에 의존하여, 워터-필링 (water-filling) 송신 방식, '선택적인 채널 반전 (selective channel inversion)' 송신 방식, '균일한 (uniform)' 송신 방식, '중요한 고유모드 빔-형성 (principal eigenmode beam-forming)' 송신 방식, 및 '빔-스티어링 (beam-steering)' 송신 방식을 포함한다. 워터-필링 송신 방식은, 더 작은 잡음을 갖는 송신 채널에게 더 많은 송신 전력을 할당하고, 더 많은 잡음을 갖는 채널에게 더 적은 송신 전력을 할당하는 것이다. 워터-필링 송신 방식은 최적이며 용량을 달성할 수 있다. 선택적인 채널 반전 송신 방식은, 사후-검출 (post-detection) SNR 이 선택된 송신 채널들에 대해 유사하도록 송신 채널들 중 선택된 채널에 대해 송신 전력을 비-균일하게 할당하는 것이다. 균일한 송신 방식은 모든 송신 채널에게 전체 송신 전력을 동일하게 할당하는 것이며, 빔-형성 송신 방식은, 최고의 성능을 갖는 단일의 송신 채널에 모든 송신 전력을 할당하는 것이다. 빔-스티어링 송신 방식은, 단일의 데이터 스트림을 송신하는데 이용되는 모든 송신 안테나에게 전체 송신 전력을 균일하게 할당하지만, 그 데이터 스트림이 그 송신 안테나들로부터 적절한 위상을 가지고 송신되는 것이다. 일반적으로, 임의의 갯수 및 타입의 송신 방식이 다중-모드 MIMO 시스템에 의해 이용되어 개선된 전체 성능이 제공될 수도 있다.

각각의 송신 방식은, 동작 신호대 잡음비 (SNR) 에 의해 측정될 수도 있는 동작 조건의 특정한 범위에 대하여 양호한 또는 준-최적의 성능을 제공할 수도 있다. 그 후, 상이한 타입 (즉, 부분 CSI, 전체 CSI 등에 기초함) 의 이러한 다중 송신 방식들은 불연속적 (piece-wise fashion) 으로 결합되어, MIMO 시스템에 의해 지원되는 SNR 의 전체 범위를 커버하는 '다중-모드' 송신 방식을 형성할 수도 있다. 이 때, 소정의 순간에 데이터를 송신하는데 이용될 특정 송신 방식은 그 순간에서 시스템에 의해 경험되는 특정 동작 조건에 의존한다.

특정한 실시형태에는, 다중-채널 통신 시스템에서 다수의 송신 채널을 통하여 데이터를 송신하는 방법이 제공된다. 그 방법에 의하면, 먼저, 시스템의 동작 조건 (예를 들어, 동작 SNR) 이 결정되고, 결정된 동작 조건 및 송신기에서 이용가능한 채널 상태 정보량에 기초하여, 가능한 다수의 송신 방식들 중에서 특정의 송신 방식이 선택된다. 그 송신 방식들 각각은, 동작 SNR 의 각각의 범위를 위 해 이용되도록 지정될 수도 있다. 그 후, 선택된 송신 방식에 기초하여, 송신될 하나 이상의 데이터 스트림이 결정된다. 그 후, 그 하나 이상의 데이터 스트림은, 선택된 송신 방식 및 가용 CSI 에 기초하여 프로세싱된다. 예를 들어, 각각의 데이터 스트림을 위해 이용되는 데이터 레이트 및 코딩 방식 및 변조 방식은 CSI 에 기초하여 결정될 수도 있다. 일 실시형태에서는, 만약 동작 SNR 이 임계 SNR 보다 크면, 부분-CSI 송신 방식이 이용되도록 선택되며, 만약 동작 SNR 이 임계 SNR 보다 작으면, 빔-형성 송신 방식이 이용되도록 선택된다.

이하, 본 발명의 다양한 양태들 및 실시형태들을 더 상세히 설명한다. 또한, 이하 더 상세히 설명되는 바와 같이, 본 발명은, 본 발명의 다양한 양태, 실시형태, 및 특성을 구현하는 방법, 프로세서, 송신기 유닛, 수신기 유닛, 기지국, 단말기, 시스템, 및 다른 장치 및 엘리먼트를 제공한다.

도면의 간단한 설명

이하, 본 발명의 특징, 특성 및 이점은 도면과 함께 제시된 상세한 설명으로부터 명백히 알 수 있으며, 도면에서 동일한 도면부호는 도면 전반에 걸쳐서 동일한 대상을 나타낸다.

도 1 은 워터-필링 송신 방식, MMSE-SC 를 갖는 부분-CSI 송신 방식, 및 빔-형성 송신 방식을 이용하여, 4×4 MIMO 시스템에 대하여 달성된 효율의 3 개의 도면을 도시한 것이다.

도 2 는 다중-모드 송신 방식에 기초하여, MIMO 시스템에서의 가용 송신 채널을 통하여 데이터를 송신하기 위한 프로세스의 일 실시형태에 대한 흐름도이다.

도 3 은 송신기 시스템 및 수신기 시스템의 일 실시형태에 대한 블록도이다.

상세한 설명

여기에 설명되어 있는 데이터 송신 기술들은 다양한 다중-채널 통신 시스템용으로 이용될 수도 있다. 그러한 다중-채널 통신 시스템은, 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신 시스템, 직교 주파수분할 멀티플렉싱 (OFDM) 통신 시스템, OFDM 을 이용한 MIMO 시스템 (즉, MIMO-OFDM 시스템) 등을 포함한다. 또한, 다중-채널 통신 시스템은 코드분할 다중접속 (CDMA), 시분할 다중접속 (TDMA), 주파수분할 다중접속 (FDMA), 또는 기타 다른 다중접속 기술들을 구현할 수도 있다. 다중접속 통신 시스템은 다수의 단말기 (즉, 사용자) 와의 동시 통신을 지원할 수 있다. 명료화를 위하여, 본 발명의 양태 및 실시형태를, 다중-안테나 무선 통신 시스템과 같은 MIMO 시스템에 대하여 상세히 설명한다.

MIMO 시스템은, 데이터 송신을 위하여 다중의 (N_T 개의) 송신 안테나 및 다중의 (N_R 개의) 수신 안테나를 이용한

다. N_T 개의 송신 안테나 및 N_R 개의 수신 안테나에 의해 형성되는 MIMO 채널은 $N_R \times N_T$ MIMO 시스템이라 하며, N_S 개의 독립 채널로 분해될 수도 있다 (여기서, $N_S \le \min\{N_T, N_R\}$ 임). 또한, N_S 개의 독립 채널 각각은 MIMO 채널의 공간 서브채널 (또는 송신 채널) 이라고도 한다. 공간 서브채널의 갯수는, N_T 개의 송신 안테나와 N_R 개의 수신 안테나 간의 응답을 나타내는 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 에 차례로 의존하는 MIMO 채널에 대한 고유모드의 갯수 에 의해 결정된다.

채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 의 성분들 (elements) 은,

수학식 1

$$\underline{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix}$$

과 같이, 독립적인 가우스 랜덤 변수로 이루어지는데, 여기서, $h_{i,j}$ 는 j번째 송신 안테나와 i번째 수신 안테나 사이의 커플링 (즉, 복소 이득) 이다.

MIMO 시스템에 대한 모델은,

수학식 2

$$\underline{\mathbf{y}} = \underline{\mathbf{H}}\underline{\mathbf{x}} + \underline{\mathbf{n}}$$

로서 표현할 수 있는데, 여기서,

$\underline{\mathbf{y}}$ 는 수신 벡터, 즉, $\underline{\mathbf{y}} = [y_1\ y_2 \cdots y_{N_R}]^T$ 인데, 여기서, $\{y_i\}$ 는 i번째 수신 안테나를 통해 수신된 엔트리이고 $i \in \{1, \cdots, N_R\}$ 이며,

$\underline{\mathbf{x}}$ 는 송신 벡터, 즉, $\underline{\mathbf{x}} = [x_1\ x_2 \cdots x_{N_T}]^T$ 인데, 여기서, $\{x_j\}$ 는 j번째 송신 안테나를 통해 송신된 엔트리이고 $j \in \{1, \cdots, N_T\}$ 이며,

$\underline{\mathbf{H}}$ 는 MIMO 채널에 대한 채널 응답 행렬이며,

$\underline{\mathbf{n}}$ 는, 평균 벡터가 $\underline{\mathbf{0}}$ 이고 공분산 행렬이 $\underline{\mathbf{\Lambda}}_n = \sigma^2\underline{\mathbf{I}}$ 인 가산 백색 가우시안 잡음 (AWGN) 인데, 여기서, $\underline{\mathbf{0}}$ 는 제로 벡터이고 $\underline{\mathbf{I}}$ 는 대각선을 따라 1 이고 나머지는 0 인 항등 행렬이며 σ^2 는 잡음의 분산이며,

$[.]^T$ 는 [.] 의 전치행렬이다.

간략화를 위하여, MIMO 채널은 플랫-페이딩 (flat-fading) 채널로 가정한다. 이 경우, 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 의 성분은 스칼라이며, 각각의 송신-수신 안테나 쌍 사이의 커플링 $h_{i,j}$ 는 단일의 스칼라 값에 의해 표현될 수 있다. 그러나, 여기에 개시되어 있는 기술들은, 상이한 주파수에서 상이한 채널 이득을 갖는 주파수 선택 채널 (frequency selective channel) 에 적용될 수도 있다. 그러한 주파수 선택 채널에서, 동작 대역폭은 다수의 (동일한 또는 동일하지 않는) 주파수 대역들로 분할되어, 각각의 대역이 플랫-페이딩 채널로서 간주될 수도 있다. 그 후, 각각의 주파수 대역에 대하여 특정의 송신 방식이 이용될 수도 있으며, 이것은 소정의 송신 안테나의 모든 주파수 대역에 대하여 이용되는 전체 송신 전력을 그 안테나의 피크 송신 전력 이내로 유지하는 것과 같은 어떠한 제약에 따른다. 이러한 방식으로, 개별 주

파수 대역의 채널 응답이 데이터 송신에서 고려될 수도 있다.

전파환경에서의 산란 (scattering) 으로 인해, N_T 개의 송신 안테나로부터 송신된 N_S 개의 데이터 스트림은 수신기에서 서로 간섭한다. 다중의 데이터 스 트림은, MIMO 채널의 특성을 설명하는 채널-상태 정보 (CSI) 를 이용하여, 공간 서브채널을 통해 송신될 수도 있다. CSI 는 '전체 CSI' 또는 '부분 CSI' 로서 분류될 수도 있다. 전체 CSI 는 ($N_R \times N_T$) MIMO 행렬에서의 각각의 송신-수신 안테나 쌍 사이의 전파경로에 대한 충분한 특성 (예를 들어, 진폭 및 위상) 및 데이터 스트림에 대한 적절한 변조/코딩 정보를 포함한다. 부분 CSI 는, 예를 들어, 데이터 스트림의 신호대 잡음 및 간섭비 (SNR) 을 포함할 수도 있다. 전체 또는 부분 CSI 는 수신기에서 (예를 들어, 수신 파일럿 및/또는 트래픽 데이터에 기초하여) 결정되고 송신기에 리포팅될 수도 있다.

전체 또는 부분 CSI 가 송신기에서 이용가능한지 여부에 기초하여, 상이한 송신 방식이 이용될 수도 있다. 전체 CSI 를 이용할 수 있을 경우, 데이터 스트림은, MIMO 채널의 고유모드를 통하여 송신될 수도 있다. 후술되는 바와 같이, 이것은, 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 로부터 유도된 (우측) 고유벡터의 세트에 기초하여, 송신기에서 데이터 스트림을 미리 컨디셔닝함으로써 달성될 수도 있다. 수신기에서, 송신 데이터 스트림은, 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 로부터 유도된 (좌측) 고유벡터의 세트와 수신 심볼 스트림을 승산함으로써 복원될 수도 있다. 따라서, 전체-CSI (또는 고유모드) 송신 방식은 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 에 대한 인지에 의존한다. 이하, 전체-CSI 송신 방식 및 이 방식의 변형을 더 상세히 설명한다.

오직 부분 CSI 만을 이용할 수 있을 경우, 데이터 스트림은, 송신기에서 미리 컨디셔닝되지 않고도 송신 안테나로부터 송신될 수도 있다. 수신기에서, 수 신 심볼 스트림은, 그 데이터 스트림을 분리하도록 시도하는 특정 공간 또는 공간-시간 수신기 프로세싱 기술에 따라서 프로세싱된다. 이하, 또한, 부분-CSI 송신 방식을 더 상세히 설명한다.

전체 및 부분 CSI 송신 방식 모두에 대하여, 각각의 데이터 스트림에 대한 데이터 레이트 및 코딩 및 변조는 데이터 스트림에 대해 획득되는 SNR 에 의존한다. 각각의 데이터 스트림의 SNR 이 수신기에서 추정될 수도 있다. 그 후, 추정된 SNR 또는 각각의 데이터 스트림에 대해 이용될 특정의 코딩 및 변조 방식을 나타내는 정보는 송신기에 제공되고, MIMO 채널을 통해 송신되기 전에 데이터 스트림을 프로세싱하는데 이용될 수도 있다.

전체 CSI 를 이용할 수 있을 경우, 데이터 스트림에서의 간섭을 제거 또는 저감시키는 일 기술은, MIMO 채널을 '대각선화 (diagonalize)' 하여, 데이터 스트림이 직교 공간 서브채널을 통해 효율적으로 송신되게 하는 것이다. MIMO 채널을 대각선화하기 위한 일 기술은,

수학식 3

$$\underline{\mathbf{H}} = \underline{\mathbf{U}}\underline{\mathbf{D}}\underline{\mathbf{V}}^H$$

으로 표현될 수 있는 채널 응답 채널 $\underline{\mathbf{H}}$ 에 대한 특이값 분해 (singular value decomposition) 를 수행하는 것인데, 여기서,

$\underline{\mathbf{U}}$ 는 $N_R \times N_R$ 유니터리 행렬 (즉, $\underline{\mathbf{U}}^H\underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{I}}$) 이며,

$\underline{\mathbf{D}}$ 는 $N_R \times N_T$ 행렬이며,

$\underline{\mathbf{V}}$ 는 $N_T \times N_T$ 유니터리 행렬이며,

' H ' 는 행렬의 복소 전치행렬을 나타낸다.

행렬 $\underline{\mathbf{D}}$ 의 대각선 엔트리는, λ_i 및 $i \in \{1, \cdots, N_S\}$ 에 의해 나타내지는 $\underline{\mathbf{G}} = \underline{\mathbf{H}}^H\underline{\mathbf{H}}$ 의 고유 값 (eigenvalue) 의 제곱근인데, 여기서, $N_S \le \min\{N_T, N_R\}$ 는 분해가능한 데이터 스트림의 갯수이다. $\underline{\mathbf{D}}$ 의 모든 비-대각선 엔트리는 0 이다.

따라서, 대각선 행렬 $\underline{\mathbf{D}}$ 는 대각선을 따라 음이 아닌 실수값이고 다른 곳은 0 을 포함하는데, 여기서, 음이 아닌 실수값은 $d_i = \sqrt{\lambda_i}$ 이다. d_i 는 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 의 특이값이라고도 한다. 특이값 분해 (SVD) 는, 당업계에 공지되어

있고 다양한 참조문헌에 설명되어 있는 행렬 연산이다. 그 참조문헌 중 하나는 Gilbert Strang 의 저서 'Linear Algebra and Its Applications' 제2판, Academic Press, 1980 이며, 여기에서는 이것을 참조한다.

특이값 분해는 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 을 2 개의 유니터리 행렬 ($\underline{\mathbf{U}}$ 및 $\underline{\mathbf{V}}$) 및 대각선 행렬 $\underline{\mathbf{D}}$ 로 분해한다. 행렬 $\underline{\mathbf{D}}$ 는, 공간 서브채널에 대응하는 MIMO 채널의 고유모드를 설명한다. 유니터리 행렬 $\underline{\mathbf{U}}$ 및 $\underline{\mathbf{V}}$ 는, 각각, 수신기 및 송신기에 대한 '스티어링' 벡터 (또는, 각각, 좌측 고유 값 및 우측 고유 값) 를 포 함하는데, 이것은 MIMO 채널을 대각선화 시키는데 이용될 수도 있다. 좀더 자세하게는, MIMO 채널을 대각선화하기 위하여, 신호 벡터 $\underline{\mathbf{s}}$ 는 송신기에서 행렬 $\underline{\mathbf{V}}$ 와 미리 승산되어,

수학식 4

$$\underline{\mathbf{x}} = \underline{\mathbf{V}}\underline{\mathbf{s}}$$

와 같은 송신 벡터 $\underline{\mathbf{x}}$ 를 제공할 수도 있다. 그 후, 이 벡터 $\underline{\mathbf{x}}$ 는 MIMO 채널을 통하여 수신기로 송신된다.

수신기에서, 수신 벡터 $\underline{\mathbf{y}} = \underline{\mathbf{H}}\underline{\mathbf{x}} + \underline{\mathbf{n}}$ 는 행렬 $\underline{\mathbf{U}}^H$ 와 미리 승산되어,

수학식 5

$$\begin{aligned}\underline{\mathbf{r}} &= \underline{\mathbf{U}}^H\underline{\mathbf{H}}\underline{\mathbf{V}}\underline{\mathbf{s}} + \underline{\mathbf{U}}^H\underline{\mathbf{n}} \\ &= \underline{\mathbf{D}}\underline{\mathbf{s}} + \underline{\hat{\mathbf{n}}}\end{aligned}$$

와 같은 복원 벡터 $\underline{\mathbf{r}}$ 를 획득할 수도 있는데, 여기서, $\underline{\hat{\mathbf{n}}}$ 는 $\underline{\mathbf{n}}$ 의 간단한 회전이며, 이것은 $\underline{\mathbf{n}}$ 와 동일한 평균 벡터 및 공분산 행렬을 갖는 가산 백색 가우시안 잡음을 발생시킨다.

수학식 4 에 나타낸 바와 같이, 신호 벡터 $\underline{\mathbf{s}}$ 와 행렬 $\underline{\mathbf{V}}$ 를 미리 승산하고 수신 벡터 $\underline{\mathbf{y}}$ 와 행렬 $\underline{\mathbf{U}}^H$ 를 미리 승산하는 것은, 신호 벡터 $\underline{\mathbf{s}}$ 와 복원 벡터 $\underline{\mathbf{r}}$ 사이의 전달 함수인 유효 대각선 채널 $\underline{\mathbf{D}}$ 을 생성한다. 따라서, MIMO 채널은 N_S 개의 독립적이고 비-간섭적이고 직교 및 병렬 채널들로 분해된다. 또한, 이들 독립 채널은 MIMO 채널의 공간 서브채널이라고도 한다. 공간 서브채널 i 또는 고유모드 i 는, 고유 값 λ_i 와 동일한 이득을 가지며, 여기서, $i \in I$ 이고 세트 I 는 $I = \{1, \cdots, N_S\}$ 로서 정의한다. N_S 개의 직교 공간 서브채널들을 획득하기 위하여 MIMO 채널을 직교화하는 것은, 송신기가 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 의 추정치를 제공받을 경우에 획득될 수 있다.

전체-CSI 송신 방식의 경우, 일 데이터 스트림은 N_S 개의 공간 서브채널 또는 고유모드 각각을 통하여 송신될 수도 있다. 데이터 송신용으로 이용될 각각의 공간 서브채널에 대하여, 송신기는 그 서브채널에 대한 (우측) 고유벡터 및 적절한 변조/코딩 정보를 제공받는다. 따라서, 만약 모두 N_S 개의 공간 서브채널이 데이터 송신용으로 이용되면, 송신기는 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 또는 유니터리 행렬 $\underline{\mathbf{V}}$, 및 적절한 변조/코딩 정보를 제공받는다.

부분-CSI 송신 방식의 경우, 일 데이터 스트림은 N_T 개의 송신 안테나 각각을 통하여 송신될 수도 있다 ($\underline{\mathbf{H}}$ 는 풀-랭크 (full-rank) 행렬이고 $N_S = N_T = N_R$ 로 가정함). 부분-CSI 송신 방식의 경우, 데이터 스트림들이 MIMO 채널을 통하여 송신되기 전에 미리 컨디셔닝되지 않기 때문에, 송신기는 채널 응답 행렬 $\underline{\mathbf{H}}$ 또는 유니터리 행렬 $\underline{\mathbf{V}}$ 를 제공받을 필요가 없다.

부분-CSI 송신 방식의 경우, 송신 데이터 스트림을 분리하도록 수신 심볼 스트림을 프로세싱하기 위해, 수신기에서, 다양한 수신기 프로세싱 기술이 이용될 수도 있다. 이들 수신기 프로세싱 기술은 공간 수신기 프로세싱 기술 (이 기술은 플랫-페이딩을 갖는 비-분산 채널용으로 이용될 수도 있음) 및 공간-시간 수신기 프로세싱 기술 (이 기술은 주파수 선택 페이딩을 갖는 분산 채널용으로 이용될 수도 있음) 을 포함한다. 공간 수신기 프로세싱 기술은 채널 상관 행

렬 반전 (CCMI) 기술 및 최소 평균 자승 에러 (MMSE) 기술을 포함한다. 공간-시간 수신기 프로세싱 기술은 MMSE 선형 이퀄라이저 (MMSE-LE), 결정 피드백 이퀄라이저 (DFE), 및 최대-우도 시퀀스 추정기 (MLSE) 를 포함한다. 일반적으로, 이들 공간 및 공간-시간 프로세싱 기술은 수신기 (송신기가 아님) 에서의 채널 응답의 추정치를 요구한다.

또한, 상술한 임의의 공간 또는 공간-시간 기술과 함께 '순차적인 널링/이퀄라이제이션 및 간섭 제거' 수신기 프로세싱 기술 (이 기술을 '순차적인 간섭 제거' 또는 '순차적인 제거' 수신기 프로세싱 기술이라고도 함) 을 이용하여 개선된 성능을 제공할 수도 있다. 예를 들어, 순차적인 간섭 제거는 MMSE 와 함께 이용되어 (즉, MMSE-SC), 데이터 스트림을 복원하기 위해 수신 심볼 스트림을 수신기에서 프로세싱될 수도 있다.

다양한 수신기 프로세싱 기술이, 2001년 11월 6일자로 출원된 미국특허 출원번호 제 09/993,087 호의 'Multiple-Access Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Communication System', 2001년 5월 11일에 출원된 미국특허 출원번호 제 09/854,235 호의 'Method and Apparatus for Processing Data in a Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Communication System Utilizing Channel State Information', 및 동일한 발명의 명칭으로 2001년 3월 23일 및 2001년 9월 18일에 각각 출원된 미국특허 출원번호 제 09/826,481 호 및 제 09/956,449 호의 'Method and Apparatus for Utilizing Channel State Information in a Wireless Communication System' 에 상세히 개시되어 있다. 이들 출원은, 본 발명의 양수인에게 모두 양도되었으며 여기에서 참조한다.

전체-CSI 송신 방식은, 통상 수신기에서 유도되어 송신기로 리포팅되는 MIMO 채널 (예를 들어, 행렬 $\mathbf{H}$) 에 관한 더 많은 정보를 요구한다. 따라서, 전체-CSI 송신 방식의 구현과 관련된 더 많은 오버헤드 비용이 존재한다. 부분-CSI 송신 방식은 이러한 추가적인 정보를 요구하지 않는다.

통상적인 MIMO 시스템에서는, N_T 개의 송신 안테나 각각에 대하여 피크 송신 전력 P_{max} 이 부과될 수도 있다. 이 경우, 모두 N_T 개의 송신 안테나에 대하여 송신기에서 이용가능한 전체 송신 전력 P_{tot} 는,

수학식 6

$$P_{tot} = N_T \cdot P_{\max}$$

으로서 표현할 수도 있다. 전체 송신 전력 P_{tot} 는, 다양한 방식에 기초하여 데이터 스트림에 할당될 수도 있다.

다수의 송신 방식들이 전체-CSI 송신 방식에 기초하여 유도될 수도 있으며, 그 각각의 송신 방식은 전체 송신 전력이 고유모드에 할당되는 방법에 (부분적으로) 의존한다. 이러한 송신 방식들은 '워터-필링 (water-filling)' 송신 방식, '선택적인 채널 반전 (selective channel inversion)' 송신 방식, '균일한 (uniform)' 송신 방식, '중요한 고유모드 빔-형성 (principal eigenmode beam-forming)' (또는 간단히 '빔-형성') 송신 방식, 및 '빔-스티어링 (beam-steering)' 송신 방식을 포함한다. 또한, 보다 소수의, 추가적인, 및/또는 상이한 송신 방식들이 고려될 수도 있으며, 이들은 본 발명의 범위 내에 있다. 워터-필링 송신 방식의 경우, 더 많은 송신 전력이 더 작은 잡음을 갖는 송신 채널에게 할당되고, 더 적은 송신 전력이 더 많은 잡음에 할당되도록 전체 송신 전력이 할당된다. 선택적인 채널 반전 송신 방식의 경우, 전체 송신 전력은, 거의 동일한 사후-검출 (post-detection) SNR 을 획득하도록 송신 채널들 중 선택된 채널에 대해 비-균일하게 할당된다. 균일한 송신 방식의 경우, 전체 송신 전력은 송신 채널들에게 동일하게 할당된다. 빔-형성 송신 방식의 경우, 모든 송신 전력은 최고의 성능을 갖는 단일의 송신 채널에 할당된다. 빔-스티어링 송신 방식의 경우, 전체 송신 전력은, 단일의 데이터 스트림을 송신하는데 이용되는 모든 송신 안테나에게 균일하게 할당되지만, 그 데이터 스트림이 그 송신 안테나들로부터 적절한 위상을 가지고 송신된다. 이러한 송신 방식들은, 이용하기 위해 선택된 각각의 송신 채널에 대하여 송신기에서의 전체-CSI 프로세싱 (또는 그 변형) 에 의존한다. 이하, 이러한 다양한 전체-CSI 기반 송신 방식을 상세히 설명한다.

워터-필링 송신 방식은, 송신 용량 (즉, 스펙트럼 효율) 을 극대화하기 위하여 전체 송신 전력 P_{tot} 를 고유모드에 할당한다. 워터-필링 전력 할당은 고정된 양의 물을 불균일한 바닥을 갖는 용기에 퍼붓는 것과 유사하며, 여기서, 각각의 고유모드는 용기 바닥 상의 한 점에 해당하고, 소정 점에서의 바닥의 융기 (elevation) 은 고유모드와 관련된 신호대 잡음비 (SNR) 의 역수에 대응한다. 따라서, 낮은 융기는 높은 SNR 에 대응하고, 역으로, 높은 융기는 낮은 SNR 에 대응한다. 그 후, 전체 송신 전력 P_{tot} 는, 용기의 가장 낮은 지점 (즉, 더 높은 SNR) 이 먼저 충만되고 더 높은 지점 (즉, 더 낮은 SNR) 이 나중에 충만되도록, 용기에 부어진다. 전력 분배는 전체 송신 전력 P_{tot} 및 바닥 표면에 대한 용기의 깊이에 의존한다. 전체 송신 전력이 모두 부어진 후, 용기에 대한 물 표면 레벨은 용기의 모든 지점에 대하여 일정하다. 물 표면 레벨 이상의 융기를 갖는 지점은 충만되지 않는다 (즉, 특정한 임계값 보다 작은 SNR 을 갖는 고유모드는 이용되지 않음). 워터-필링 분배는, 여기서 참조하며 Robert G. Gallager 가 저술한 'Information Theory and

Reliable Communication', John Wiley amp; Sons, 1968 에 개시되어 있다.

용량은, 정보가 임의적으로 낮은 에러 확률을 갖고 통신될 수 있는 가장 높은 스펙트럼 효율로서 정의되며, 통상적으로 bps/Hz (bits per second per Hertz) 의 단위로 나타낸다. SNR 이 γ 인 하나의 가우시안 채널에 대한 용량은,

수학식 7

$$C = \log_2(1+\gamma)$$

로서 표현할 수 있다.

제한된 전체 송신 전력 P_{tot} 를 갖는 MIMO 시스템의 경우, 워터-필링 송신 방식은, 용량을 달성하도록 전체 송신 전력을 N_S 개의 공간 서브채널에 최적으로 할당할 수 있다. 워터-필링 송신 방식은, 가장 낮은 잡음 분산 (즉, 가장 높은 SNR) 을 갖는 고유모드가 전체 송신 전력의 가장 큰 부분을 수신하는 방식으로, 고유모드에 대한 전체 송신 전력 P_{tot} 를 분배한다. 워터-필링의 결과로서 고유모드 i 에 할당된 전력의 양은 P_i $(i \in I)$ 로서 나타내며, 여기서,

수학식 8

$$P_{tot} = \sum_{i \in I} P_i$$

이다.

고유모드 i 에 대한 P_i $(i \in I)$ 의 할당 송신 전력에 기초하여, 고유모드 i 에 대한 유효 SNR, γ_i 은,

수학식 9

$$\gamma_i = \frac{P_i \cdot \lambda_i}{\sigma^2}$$

로서 표현할 수 있는데, 여기서, λ_i 는 서브채널 i 에 대한 채널 이득이며, σ^2 은 MIMO 채널에 대한 잡음 분산이며, 이때, 모든 서브채널에 대해서는 동일한 잡음 분산을 가정한다. 또한, N_S 개의 공간 서브채널에 대한 워터-필링 송신 방식에 의해 획득되는 용량은,

수학식 10

$$C = \sum_{i=1}^{N_S} \log_2(1+\gamma_i)$$

으로 표현할 수 있다.

각각의 고유모드의 스펙트럼 효율은, SNR 에서의 특정한 단조 증가에 기초하여 결정될 수도 있다. 스펙트럼 효율을 위해 이용될 수도 있는 일 함수는 수학식 7 에 나타낸 용량 함수이다. 이 경우, 고유모드 i 에 대한 스펙트럼 효율, ρ_i 는

수학식 11

$$\rho_i = \log_2(1+\gamma_i)$$

로서 표현할 수도 있다. 시스템의 전체 스펙트럼 효율은 모든 고유모드들의 스펙트럼 효율의 합이며, 각각의 스펙트럼 효율은 수학식 11 에 나타낸 바에 따라 결정할 수도 있다.

MIMO-OFDM 시스템에 대한 워터-필링 전력 할당을 위한 특정 알고리즘은, 2001년 10월 15일에 출원된 미국특허 출원번호 제 09/978,337 호의 'Method and Apparatus for Determining Power Allocation in a MIMO Communication System' 에 개시되어 있다. MIMO 시스템에 대한 워터-필링 전력 할당을 위한 특정 알고리 즘은, 2002년 1월 23일에 출원된 미국특허 출원번호 [**대리인 식별번호 제 020038 호**] 의 'Reallocation of Excess Power in a Multi-Channel Communication System' 에 개시되어 있다. 이들 모두의 출원은 본 발명의 양수인에게 양도되었고 여기에서 참조한다.

선택적인 채널 반전 송신 방식은 N_S 개의 고유모드들 중 선택된 고유모드에 대하여 전체 송신 전력 P_{tot} 을 비-균일하게 할당하여, 그 선택된 고유모드를 통해 송신되는 데이터 스트림의 사후-검출 SNR 이 거의 유사하도록 한다. 이 송신 방식의 경우, 열등한 고유모드는, 이용하기 위해 선택하지 않는다. 유사한 사후-검출 SNR 은 동일한 코딩 및 변조 방식이 모두 데이터 스트림에 대해 이용되게 하며, 이것은 송신기 및 수신기 모두에서의 프로세싱을 간소화시킬 수 있다.

유사한 사후-검출 SNR 을 획득하기 위한 송신 전력 할당 기술은, 같은 발명의 명칭으로, 2001년 5월 17일에 출원된 미국특허 출원번호 제 09/860,274 호, 2001년 6월 14일에 출원된 미국특허 출원번호 제 09/881,610 호, 및 2001년 6월 26일에 출원된 미국특허 출원번호 제 09/892,379 호의 'Method and Apparatus for Processing Data for Transmission in a Multi-Channel Communication System Using Selective Channel Inversion' 에 개시되어 있으며, 이는 본 발명의 양수인에게 양도되었으며 여기서 참조한다.

균일한 송신 방식은 N_S 개의 고유모드 모두에 대하여 전체 송신 전력 P_{tot} 을 동일하게 할당한다. 이것은 각각의 고유모드에게 P_{tot}/N_s 를 할당함으로써 달성 될 수 있다. 고유모드 i 에 대한 할당된 송신 전력 P_{tot}/N_s ($i \in I$) 에 기초하여, 고유모드 i 에 대한 유효 SNR, $\hat{\gamma}_i$ 은,

수학식 12

$$\hat{\gamma}_i = \frac{P_{tot} \cdot \lambda_i}{N_S \cdot \sigma^2}$$

으로 표현할 수 있다.

이때, N_S 개의 공간 서브채널에 대하여 균일한 송신 방식에 의해 획득되는 스펙트럼 효율은,

수학식 13

$$\hat{C} = \sum_{i=1}^{N_S} \log_2(1+\hat{\gamma}_i)$$

으로 표현할 수 있다.

빔-형성 송신 방식은 전체 송신 전력 P_{tot} 을 단일의 고유모드에 할당한다. 용량에 근접하기 위하여, 전체 송신 전력은, 가장 높은 고유 값 λ_{max} 에 대응하는 고유모드에 할당된다. 그 후, 이것은 데이터 송신을 위해 단일의 고유모드를 사용하여 제약이 제공되는 경우에 SNR을 최대화시킨다. 단일의 (최상의) 고유모드에 대한 유효 SNR 은,

수학식 14

$$\tilde{\gamma} = \frac{P_{tot} \cdot \lambda_{\max}}{\sigma^2}$$

으로 표현할 수 있다. 고유 값 λ_i (i ∈ I) 은 감소하는 순서로 정렬될 수도 있다. 이 경우, λ_1 는 가장 높은 고유 값이다 (즉, $\lambda_1 = \lambda_{\max}$).

N_S 개의 공간 서브채널들에 대한 빔-형성 송신방식에 의해 얻어지는 스펙트럼 효율은 다음,

수학식 15

$$\tilde{C} = \log_2(1+\tilde{\gamma})$$

으로서 표현될 수 있다. 오직 하나의 고유모드만이 데이터 송신에 이용되기 때문에, 식 (15) 은 워터-필링 (water-filling) 및 균일 송신방식들 각각에 대한 식 (10) 및 (13) 의 경우와 마찬가지로, N_S 개의 공간 서브채널들에 대한 합산값을 포함하지 않는다.

빔-형성 송신방식이 송신기에서의 전체-CSI 프로세싱에 기초하고 있지만, 하나의 고유모드만이 데이터 송신에 이용되기 때문에 이러한 송신방식을 구현하는데 채널 상태정보가 거의 요구되지 않는다. 더 자세하게는, 선택된 고유모드에 대응하는 하나의 특이 벡터 (singular vector) 만이 송신기에 제공될 필요가 있는데, 이후 송신기는 이 특이 벡터를 이용하여 MIMO 채널을 통한 송신 이전에 데이터 스 트림을 프리컨디셔닝한다. 이 특이벡터는 채널 응답 매트릭스 ($\mathbf{H}$) 에 기초하여 수신기에서 유도된 다음 송신기에 제공될 수 있다.

빔-스티어링 (beam-steering) 송신방식은 총 송신전력 (P_{tot}) 을, 단일 데이터 스트림을 송신하는데 이용되는 모든 송신 안테나에 균일하게 할당한다. 낮은 SNR들의 경우, 워터-필링 송신방식은 대부분의 총 송신전력을 주요 고유모드에 할당하는 경향이 있는데, 이 주요 고유모드는 최고 고유값 (λ_{max}) 에 대응하는 고유모드이다. 빔-형성 송신방식에서는, 단일 데이터 스트림이 주요 고유모드에서 송신되며, 이 데이터 스트림은 주요 고유모드에 대응하는 특이 벡터에 의해 결정되는, 데이터 송신에 이용되는 각각의 송신 안테나와 관련된 복소 이득값에 의해 스케일링된다. 복소이득값의 크기는 송신 안테나에 이용되어질 송신전력의 크기를 결정한다.

빔-스티어링 송신방식은 빔-형성 송신방식과 동일하며, MIMO 채널을 통하여 단일 데이터 스트림을 송신한다. 그러나, 하나의 데이터 스트림만이 송신되기 때문에, 송신 채널들을 대각화하거나 주요 고유모드에 대응하는 단일 송신채널을 통한 데이터 스트림의 송신을 제한할 필요가 없다. 빔-스티어링 송신방식은 주요 고유모드에 의존하는데, 이 주요 고유모드는 최상의 성능을 달성하지만, 총 송신 전력을, 데이터 송신에 이용되는 모든 송신 안테나에 균일하게 할당한다. 이러한 방식으로, 데이터 스트림에 대하여 더 높은 송신 전력이 이용되며, 이에 의해 향상된 성능을 달성할 수 있다.

빔-스티어링 송신방식에서는, 최고 고유값 (λ_{max}) 에 대응하는 고유모드가 초기에 (예를 들면, 수신기에서) 식별되며, 이 고유모드에 대응하는 특이 벡터가 결정된다. 이 특이 벡터는 N_T 개의 송신 안테나에 이용되어질 복소 이득에 대한 N_T 개의 복소 값들을 포함한다. 빔-스티어링 송신방식은 특이 벡터에서의 N_T 개의 복소 이득값의 위상인 적절한 위상을 갖는 것을 제외한 전체 전력에서 N_T 개의 송신 안테나들로부터의 단일 데이터 스트림을 송신한다. 따라서, 특이 벡터에서의 N_T 개의 엘리먼트들의 위상들만이 송신기에 제공될 필요가 있다. 이후, 이러한 데이터 스트림은 주요 고유모드에 대한 위상들을 갖는 것을 제외한, 정규화된 (예를 들면, 전체) 송신 전력에서 N_T 개의 송신 안테나들로부터 송신된다. 이후, 이는 N_T 개의 송신 안테나들로부터의 송신들을 수신기에서 구성적으로 (또는 코히어런트하게) 합성시키고 이에 의해 향상된 성능을 제공할 수 있다.

또한, 복수의 송신방식들이 부분-CSI 송신방식에 기초하여 유도될 수 있다. 한 방식으로, 피크 송신 전력 (P_{max}) 이 각각의 데이터 스트림마다 이용되며, N_T 개의 데이터 스트림들이 부분-CSI 프로세싱 (즉, 송신기에서의 프리컨디셔닝) 을 이용하여 N_T 개의 송신 안테나들로부터 송신된다. 또 다른 방식 (이하, '선택적 부분-CSI 방식'이 함) 으로, N_T 개의 송신 안테나들 중의 선택된 안테나들만이 데이터 송신에 이용되며, 하나의 데이터 스트림이 (예를 들면, 피크

송신전력을 이용하 여) 각각의 선택된 송신 안테나로부터 송신된다. 부분-CSI 송신방식의 또 다른 변형이 형성될 수도 있다.

따라서, 복수의 송신방식들이 데이터 송신에 이용될 수 있다. 각각의 송신방식은 전체 또는 부분 CSI 가 송신기에서 이용가능한지의 여부에 의존한다.

도 1 은 상술한 워터-필링 송신방식, 균일 송신방식 및 빔-형성 송신방식을 이용하여 예를 들어 4×4 MIMO 시스템에 대하여 얻어지는 효율성들의 3 개의 플롯을 나타낸 것이다. 이 효율성들은 상관되지 않은 복소 가우시안 채널 모델의 가정에 기초하여 결정되며, 이에 의해 MIMO 채널은 다른 간섭들을 경험하지 않지만 추가적인 백색 가우시안 잡음 (AWGN) 을 경험한다.

워터-필링 송신방식에서는, 대부분의 랜덤 채널 세트들 (즉, 랜덤 고유값들을 가진 공간 서브채널들의 세트들) 이 초기에 생성된다. 이들 채널 세트들은 잡음 편차 (σ^2) 의 여러 별도의 값들에 대하여 평가되는데, 각각의 잡음 편차값은 후술될, 특정 '동작' SNR 에 대응한다. 각각의 채널 세트마다, 워터-필링 방식을 이용하여, 채널들의 고유값들에 기초하여, 그리고 여러 잡음 편차값들에 대하여 총 송신전력을 세트에서의 공간 서브채널들에 할당한다. 각각의 세트에서의 공간 서브채널들의 효과적인 SNR들은 서브채널들의 고유값들, 할당된 송신전력 및 잡음 편차에 의존하며, 식 (9) 에 표현된 바와 같이 결정될 수 있다. 이후, 식 (10) 에 나타낸 바와 같이, 각각의 채널세트의 효율성이 각각의 잡음 편차 값마다 결정된다. 이후, 모든 채널 세트들의 효율성의 통계적 평균값이 각각의 잡음 편차 값마다 얻어진다.

빔-형성 송신방식에서는, 최고 고유값에 대응하는 고유모드만이 이용을 위하여 선택되는 것을 제외하고는, 동일한, 랜덤하게 생성된 채널 세트들이 평가된다. 각각이 채널 세트는 잡음 편차 (σ^2) 의 여러 별도의 값들에 대하여 동일하게 평가된 다음, 이들 채널 세트의 효율성의 통계적 평균값이 잡음 편차값마다 구해진다. 균일 송신방식에서는, 총 송신전력이 각각의 램덤하게 생성된 채널 세트의 고유모드에 균일하게 할당된다. 또한, 각각의 세트는 여러 별도의 잡음 편차 값들에 대하여 평가되며, 채널 세트들의 효율성의 통계적 평균값이 잡음 편차값마다 구해진다.

도 1 에 나타낸 바와 같이, 각각의 송신방식에 의해 얻어진 효율성은 대비 동작 SNR로 플롯된다. 동작 SNR 은 수신기에서의 추가 백색 가우시안 잡음의 전력에 역을 취한 것으로, 다음,

수학식 16

$$\gamma_{op} = \frac{1}{\sigma^2}$$

과 같이 정의된다.

동작 SNR 은 MIMO 채널의 동작상태의 측정값이다. 식 (16) 으로 나타낸 바와 같이, 동작 SNR 과 잡음 편차 (σ^2) 는 역관계에 있다. 각각의 송신방식 마다의 여러 잡음 편차 값들에 대하여 얻어지는 효율성들은 쉬운 이해를 위하여 잡음 편차 대신에 대비 동작 SNR 로 플롯될 수 있다. 도 1 에 나타낸 바와 같이, 플롯 112 에 의해 도시된 워터-필링 송신방식의 스펙트럼 효율성이 3 개의 송신방식 중 가장 우수하며, 용량과 동일하도록 도시될 수 있다. 균일 송신방식 및 빔-형성 송신방식에 대한 효율성들은 플롯 114 와 116 로 각각 도시되어 있다. 낮은 SNR에서는, 하나의 고유모드만이 종종 이들 SNR에서 액티브하기 때문에 빔-형성 송신방식은 최적에 가깝게 (즉, 워터-필링 송신방식에 가깝게) 된다. 높은 SNR에서는, 균일 송신방식이 워터-필링 송신방식의 최적의 성능에 근접하게 된다.

플롯 114 에 나타낸 균일 송신방식의 효율성은 송신기에서 전체-CSI 프로세싱을 이용하여 얻어진다. 더욱 자세하게는, 식 (13) 은 효율성 ($\hat{C}$) 이 공간 서브채널들에 대한 $\hat{\gamma}_i$ 의 효과적인 SNR 에 기초하여 달성될 수 있음을 나타내며, 식 (12) 은 전체 CSI (예를 들면, 채널 응답 매트릭스, $\mathbf{H}$) 가 고유값 (λ_i) 을 유도하는데 필요함을 제안하는데, 이후, 이 고유값은 효과적인 SNR 을 결정하는데 이용된다. 그러나, 이것은 MMSE-SC 수신기 프로세싱 기술이 수신기에 이용되어, 송신된 데이터 스트림들을 프로세스하고 리커버하는 경우, 효율성 ($\hat{C}$) 이 부분-CSI 송신방식에 대해서도 또한 얻어질 수 있는 것으로 나타나 있다. 어떤 다른 수신기 프로세싱 기술이 MMSE-SC 기술을 대신하여 수신기에서 이용되는 경우, 부분-CSI 송신방식에 대한 효율성은 식 (13) 에 나타낸 효율성보다 작을 수 있다.

워터-필링 송신방식의 최적의 효율성을 얻기 위하여, 송신기는 MIMO 채널의 전체 지식 (knowledge), 즉, 전체 CSI 를 요구한다. 전체 CSI 는 채널응답 매트릭스 ($\mathbf{H}$) 와 잡음 편차 (σ^2) 에 의해 제공될 수 있다. 이후, 채널응답 매트릭스 ($\mathbf{H}$) 가 (예를 들면, 특이 값 분해를 이용하여) 평가되어, 매트릭스 ($\mathbf{G}=\mathbf{H}^H\mathbf{H}$) 의 고유모드와 고유값을 결정할 수 있다. 이후, 총 송신 전력이 워터-필링 송신방식을 이용하여 고유값과 잡음 편차에 기초하여 고유모드들에 할당될

수 있다.

워터-필링 송신방식은 여러 인자에 의해 몇몇 MIMO 시스템에 대하여 바람직하지 않거나 이용가능하지 않을 수 있다. 먼저, 전체 CSI 는 각각의 송신 수신 안테나 페어 간의 채널 이득의 측정을 요구하기 때문에 (예를 들면, 통상적으로 수신기에서) 얻기가 어려울 수 있다. 둘째, 수신기로부터 다시 송신기로 모든 고유모드에 대하여 전체 CSI 를 보고하는데 추가적인 무선 링크 자원이 필요하다. 셋째, 어떠한 에러도 직교화에서의 대응손실로 번역되기 때문에, 더 높은 정확성 (즉, 더 많은 비트들) 이 채널 이득들을 표현하는데 필요할 수 있다. 넷째, 채널 이득들은 MIMO 채널이 시변 (time-varying) 하는 경우, 지연을 측정하고 보고하는데 더욱 민감하다. 이들 인자은 일부 MIMO 시스템에 대하여 워터-필링 송신방식의 이용을 못하게 한다.

일 태양에서, 구현하는데 CSI를 거의 필요로 하지 않지만 표면적으로 준최적의 효율성 (seemingly sub-optimal efficiencies) 을 가진 다중 송신방식은 최적화에 근접한 또는 가까운 전체적인 효율성을 제공하는데 선택적으로 이용될 수 있다. 예를 들면, 이들 준최적 송신방식은 상술한, (예를 들면, MMSE-SC 수신기 프로세싱을 이용하는) 부분-CSI 송신방식 및 빔-형성 송신방식 (또는 빔-스티어링 송신 방식) 을 포함한다. 상이한 및/또는 추가의 송신 방식도 또한 이용될 수 있으며, 이는 본 발명의 범위 내에 있다.

'근최적'의 전체적인 성능은 필요한 CSI 를 송신기에 제공함으로써 준최적 송신방식에 대하여 얻을 수 있다. 이 CSI 는 후술할 바와 같이 공간 수신기 프로세싱을 수행한 후 수신기에서 결정되는, N_S 개의 고유모드들에 대한 데이터 송신의 '사후-프로세싱'된 SNRs 를 포함할 수 있다. 사후-프로세싱된 SNRs 은, (1) 데이터 송신을 위하여 이용하는 가능한 다중 송신 방식들 중에서부터의 특정의 송신 방식 및 (2) 데이터 스트림마다 이용하는 코딩 및 변조 방식과 데이터 레이트를 선택하는데 송신기에 의해 이용된다.

빔-형성 송신방식에서는, (예를 들면, 최고 고유값 (λ_{max}) 에 대응하는) 선택된 고유모드와 관련한 스칼라값의 특이 벡터 ($\underline{v}$) 가 송신기에 또한 제공되어, 이 고유모드에 대한 데이터 송신을 빔형성하는데 이용된다. 수신기는 수신 벡터 ($\underline{y}$) 와 대응 특이 벡터 ($\underline{u}$) 를 미리 승산하여 송신된 데이터 스트림을 리커버할 수 있다.

부분 CSI 만을 이용하여 높은 성능을 달성하기 위하여, 수신기는 MMSE-SC 수신기 프로세싱 기술을 이용할 수 있는데, 이 기술은 전체 CSI를 요구하는 균일 송신 방식에 의해 얻어지는 스펙트럼 효율성을 생성할 수 있다.

SNR이 감소함에 따라, 워터-필링 송신방식은 보다 우수한 성능을 가진 주요 고유모드에 전체 송신전력의 보다 큰 부분을 할당하는 경향이 있다. 어떤 임계SNR (γ_{th}) 에서, 양호한 방법은 전체 송신전력을 최대 고유값에 대응하는 고유모드에 할당하는 것이다. 도 1 에 도시된 바와 같이, 빔-형성 송신방식 (플롯 116) 의 성능은 SNRs 이 점차적으로 낮아짐에 따라 워터-필링 송신방식 (플롯 112) 의 최적의 효율성에 접근한다. 이와 반대로, SNR이 증가함에 따라, 전체 송신전력에 대하여, 워터-필링 송신방식에 의해 할당되는 고유모드 당 전력의 차이는 감소하며, 전력할당은 더욱 균일하게 나타난다. SNR 이 증가함에 따라, 잡음 편차 (σ^2) 는 감소하고, 상이한 고유모드들의 추정값 (σ^2 / λ_i) 은 더욱 낮게 떨어진다. 도 1에 또한 도시된 바와 같이, MMSE-SC (플롯 114) 를 가진 부분-CSI 송신 방식과 균일 송신 방식의 성능은 점차적으로 높아지는 SNRs에서 워터-필링 송신방식의 효율성에 접근하게 된다.

수신기에서는, MMSE-SC (또는 이와 등가의 방식) 를 가진 부분-CSI 송신방식은 균일 송신방식에 의해 요구되는 전체 CSI 와 관련한 추가의 '비용' 없이도, 특정한 조건 하에서 균일 송신 방식의 스펙트럼 효율성을 달성할 수 있다. 도 1 에 나타낸 바와 같이, MMSE-SC를 가진 부분-CSI 송신방식의 스펙트럼 효율성은 낮은 SNRs에서 상당히 감소한다.

일 태양에서, MIMO 시스템은 다중 송신방식들 (예를 들면, MMSE-SC 를 가진 부분-CSI 송신방식 및 빔-형성 송신방식 또는 빔-스티어링 송신 방식) 을 유용하게 이용하여 더 넓은 범위의 SNRs에 걸쳐 향상된 성능을 제공한다. MIMO 시스템의 의해 이용디는 각각의 송신 방식은 각각의 동작 모드에 대응할 수 있다. 이후, '다중모드' MIMO 시스템은 채널 (또는 동작) 조건들에 의존하여, 지원되는 여러 동작 모드들 (예를 들면, 부분-CSI 모드와 빔-형성 모드) 간을 스위칭할 수 있다. 이러한 방식으로, 주어진 동작 조건에 대하여 최상의 성능을 제공하는 송신 방식이, 높은 성능을 제공하는데 이용하기 위하여 선택될 수 있다.

또한, 도 1 은 (MMSE-SC를 가진) 부분-CSI 방식과 빔-형성 송신방식 모두를 이용하는 다중모드 MIMO 시스템에 의해 달성되는 효율성에 대한 (원형의 점들로 표시되는) 플롯 120 을 나타낸다. 어떤 동작 SNR에서의 다중 모드 시스템의 달성되는 스펙트럼 효율성 (C_{mm}) 은 다음,

수학식 17

$$C_{mm} = \max(\hat{C}, \tilde{C})$$

로 표현될 수 있으며, 여기서, $\hat{C}$ 와 $\tilde{C}$ 는 각각 식 (13) 와 (15) 에 의해 주어지는 MMSE-SC 를 가진 빔-형성 송신방식을 이용하는 부분-CSI에 대한 스펙트럼 효율성이다. 이들 2 개의 송신 방식에 의해 발생하는 효율성에서의 최대 손실은 γ_{op} =0 dB인 동작 SNR 근처에서 발생하며 4개의 송신 안테나와 4 개의 수신 안테나를 이용한 이 예의 MIMO 시스템의 경우 대략 1.75 dB 이다. 이러한 다중 모드 시스템의 구현에서는, 낮고 높은 SNRs 에서 모두 그 효율성에서의 손실이 감소한다. 도 1 에 나타낸 바와 같이, 빔-형성 송신방식이 이용되어, MIMO 시스템에 대한 (즉, 낮은 SNRs 를 커버링하는) 확장된 동작 범위를 제공할 수 있다. MMSE-SC를 가진 부분-CSI 및 빔-형성 송신방식들에 대한 성능은 상관되지 않은 채 널 모드인 것으로 가정한다. 채널이 더욱 상관될수록, 더 적은 데이터 스트림이 수신기에서 분해될 수 있다. 따라서, MMSE-SC를 가진 부분-CSI 및 빔-형성 송신방식의 교차점은 더 높은 SNR로 시프트되며, 빔-형성 송신방식은 하단에서 더 높은 범위의 SNRs 에 대하여 선택된 동작 모드로 된다.

또한, 상술한 몇몇 송신 방식들 (예를 들면, 빔-스티어링 송신 방식) 이 시스템에 의해 이용될 수 있다. 또한, 또 다른 송신 방식이 이용될 수도 있으며 이것은 본 발명의 범위 내에 있다. 예를 들면, '선택적인 고유모드' 송신 방식이, 고유모드들의 서브세트 중에 전체 송신 전력을 균일하게 할당하는데 이용될 수 있다. 예를 들면, 2 개 이상의 고유모드들이 어떤 임계 SNR 보다 큰 효율적인 SNRs 을 달성하는 경우, 선택적인 고유모드 송신방식이 이용을 위하여 선택될 수 있다. 또한, '선택적인 부분-CSI' 송신 방식이 이용될 수 있음으로써, 몇몇 송신 안테나들만이 데이터 송신을 위하여 이용되며 이후, 나머지 송신 안테나들이 턴오프될 수 있다.

또한, 상술한 송신 방식에 대한 변형이 구현될 수도 있으며, 이는 본 발명의 범위 내에 있다. 예를 들면, 송신 다이버시티 방식이 이용될 수 있음으로써, 단일 데이터 스트림이 어떠한 빔 형성도 없이 전체 전력에서 모든 N_T 개의 송신 안테나들을 통하여 송신될 수 있다. 특정한 조건 하에서 균일한 송신 방식과 동일한 스펙트럼 효율성을 발생시키는 MMSE-SC 를 가진 CSI 송신방식에서는, 주어진 데이터 스트림에 대하여 이용되는 실제 송신 전력이 주어진 (양자화된) 데이터 레 이트에 대하여 필요한 최소양으로 되도록 조정될 수 있다.

일반적으로, 어떠한 개수 및 형태의 송신 방식도 다중모드 MIMO 시스템에 의해 이용되어, 향상된 전체 성능을 제공할 수 있다. 각각의 송신 방식은 몇몇 동작 조건 (예를 들면, SNRs의 특정 범위) 이상의 우수한 또는 근최적의 성능을 제공할 수 있다. 이후, 이들 다중 송신 방식은 피스형 (piece-wise) 방식으로 결합되어, MIMO 시스템에 의해 지원되는 모든 동작 조건들 (예를 들면, SNRs의 전체 범위) 을 커버하는 다중 모드 송신방식을 형성할 수 있다.

도 1 은 3개의 (워터-필링, 균일, 및 빔-형성) 송신 방식 각각에 의해 달성되는 스펙트럼 효율성을 나타내는데, 이 효율성은 일반적으로 평균인 것으로 간주한다. 그러나, 도 1 에 나타낸 스펙트럼 효율성은 특이 벡터의 양자화, 채널의 상관화 및 또 다른 인자들과 관련된 손실들을 고려하지 않은 것이다.

일반적으로, 주어진 순간에 각각의 송신 방식에 의해 달성되는 스펙트럼 효율성은 그 순간의 채널 뿐만 아니라 동작 SNR의 함수이다. 따라서, 높은 성능을 달성하기 위하여, 채널 (및 또 다른 인자들) 이 이용될 송신 방식을 선택하는 경우 고려될 수 있다. 천천히 변하는 채널들에서는, 순간 채널 추정값이 가능한 송신 방식을 평가하는데 이용될 수 있다. 빠르게 변하는 채널에서는, 채널의 시간 평균값이 채널 추정값으로서 구해진 다음 이용될 수 있다.

어떤 주어진 순간에 데이터 송신을 위하여 이용될 특정 송신 방식은 여러 방법으로 선택될 수 있다. 송신 방식 선택은 그 순간에 시스템에 의해 경험되어지는 특정한 동작 조건들에 의존할 수 있으며 또 다른 인자들을 고려할 수도 있다. 송신 방식들을 선택하기 위한 수개의 방법은 다음과 같다.

송신 방식을 선택하는 일 방법으로, 데이터 송신에 이용하는 특정 송신 방식은 동작 SNR 에 단독으로 기초하여 선택된다. 이러한 방법은 구현하기에 간단하고 원하는 레벨의 성능을 제공할 수 있다.

송신 방식을 선택하는 또 다른 방법으로는, 수신기가 각각의 가능한 송신 방식들을 평가한 다음, 가장 높은 스펙트럼 효율성을 생성할 수 있는 송신 방식을 선택하는 것이다. 빔-형성 및 부분-CSI 송신방식들을 단지 지원하는 시스템에서는, 수신기는 (양자화된 특이 배터를 이용한) 빔-형성 송신방식과, MMSE-SC (또는 다른 몇몇 수신기 프로세싱) 를 가진 부분-CSI 방식에 대하여 달성되는 성능을 평가할 수 있다. 이후, 수신기는 가장 높은 스루풋을 생성하는 송신방식을 선택할 수 있고 그 정보를 송신기에 제공할 수 있다.

송신 방식을 선택하는 또 다른 방법으로는, 수신기는 각각의 가능한 송신 방식들을 평가한 다음, 달성가능한 스펙트럼 효율성 및 또 다른 고려사항들에 기초하여 송신 방식들 중의 하나를 선택한다. 예를 들면, 수신기는 빔-형성 및 균일 송신 방식에 대하여 달성되는 성능을 평가할 수 있다. 스펙트럼 효율성의 비 (예를 들면, 빔-형성 스펙트럼 효율성/균일 스펙트럼 효율성) 가 어떤 임계값보다 더 큰 경우, 빔-형성 송신방식이 이용을 위하여 선택될 수 있다. 또 다른 방법으로, 부분-CSI 송신방식이 선택될 수 있다. 통상적으로, 균일 송신방식은 MMSE-SC 을 가진 부분-CSI 방식보다 '더 용이하게' (계산적으로 거의 저가이고 고속으로) 평가되며, 대용으로 이용될 수 있다 (이 수신기는 전체 CSI를 얻

을 수 있 기 때문에 균일 송신 방식의 성능을 평가할 수 있다). 그러나, 몇몇 구현 손실로 인하여, 균일 송신 방식의 스펙트럼 효율성은 MMSE-SC을 가진 부분-CSI 방식의 스펙트럼 효율성과 정확하게 동일할 수 없다. 또한, 빔-형성 송신방식과 관련하여 양자화 손실이 존재한다. 따라서, 임계값은 여러 인자들을 고려하도록 선택될 수 있다.

주어진 순간에 이용하는 특정 송신 방식을 선택하는 또 다른 방법들도 고려될 수 있으며, 이는 본 발명의 범위 내에 있다. 일반적으로, 어떠한 개수의 가능한 송신 방식 (또는 이들의 등가방식) 도 평가될 수 있으며, 데이터 송신에 이용될 특정 송신 방식이 (1) 달성 가능한 스펙트럼 효율성, 및 (2) 추정된 구현 손실 등과 같은 여러 요소들에 기초하여 선택될 수 있다.

도 2 는 다중 모드 송신 방식에 기초하여 MIMO 시스템에서 데이터를 송신하는 프로세스 200 의 일 실시형태의 플로우도이다. 먼저, MIMO 시스템의 동작 조건이 결정된다 (단계 212). 이 동작 조건은 동작 SNR 에 의해 양자화될 수 있는데, 식 (16) 에 의해 도시된 바와 같은 잡음 편차 및/또는 다른 인자들에 기초하여 결정될 수 있다. 동작 조건은 당해 기술에 알려진 바와 같이 데이터와 함께 송신되는 파일럿에 기초하여 추정될 수 있다.

이후, 특정 송신방식이 결정된 동작 조건에 기초하여 다중 송신 방식들 중에서 선택된다 (단계 214). 상술한 바와 같이, 어떠한 수의 송신 방식도 MIMO 시스템에 의해 지원될 수 있다. 데이터 송신에 이용하기 위한 특정 송신방식은 하나 이상의 임계 SNR들에 대하여 동작 SNR 을 비교함으로써 결정될 수 있다. MIMO 시스템은 부분-CSI과 빔-형성 송신방식들만을 지원하고, 이후, 동작 SNR 이 임계 SNR (γ_{th}) 이상인 경우 부분-CSI 방식이 선택될 수 있으며, 동작 SNR 이 임계 SNR (γ_{th}) 보다 작은 경우 빔-형성 송신방식이 선택될 수 있다.

이후, 송신될 데이터 스트림의 수가 결정되는데, 이 수는 선택된 송신 방식에 의존한다 (단계 216). 예를 들면, 단일 데이터 스트림이 빔-형성 송신방식에 대한 최고의 고유값에 대응하는 단일 고유모드로 송신될 수 있으며, N_T 개의 데이터 스트림이 부분-CSI 송신방식의 N_T 개의 송신 안테나들 상에 송신될 수 있다. 이후, 시스템에 이용가능한 전체 송신전력 (P_{tot}) 이, 선택된 송신 방식에 기초하여 하나 이상의 데이터 스트림에 할당된다 (단계 218). 하나 이상의 데이터 스트림은 선택된 송신 방식에 기초하여 그리고 할당된 송신 전력과 이용가능한 CSI 에 따라서 프로세싱된다 (단계 220). 도 2 에 도시된 프로세스는 각각의 송신 간격을 두고 수행될 수 있으며 이 간격은 스케줄링 간격에 대응할 수 있다.

또한, 여기에 설명된 송신 기술들은 OFDM 시스템들, MIMO-OFDM 시스템들 등과 같은 다른 다중 채널통신 시스템들에 대하여 이용될 수 있다.

OFDM 시스템은 시스템 대역폭을 복수의 (N_F) 주파수 서브채널들로 효과적으로 분할하는데, 또한, 이를 주파수 빈들 또는 서브대역들이라 한다. 각각의 주파수 서브채널은 상부에서 데이터가 변조될 수 있는 개개의 서브캐리어 (또는 주파수 톤) 과 관련된다. 주파수 서브채널의 대역폭에 의존할 수 있는 각각의 시간 슬롯에서, 변조 심볼은 N_F 개의 주파수 서브채널들 각각에 송신될 수 있다. OFDM 시스템에서, 각각의 주파수 서브채널은 송신 채널이라 할 수 있으며 OFDM 시스템에 대하여 $N_C = N_F$ 개의 송신채널이 존재한다.

OFDM 시스템의 주파수 서브채널들은 주파수 선택적 페이딩 (즉, 상이한 주파수 서브채널들에 대하여 상이한 양의 감쇠) 을 경험할 수 있다. 주파수 서브채널에 대한 특정응답은 송신 안테나와 수신 안테나 간의 전파경로의 특성 (예를 들면, 페이딩 및 다중경로 효과) 에 의존한다. 이와 반대로, 효과적인 상이한 SNRs 은 주어진 크기의 송신 전력의 상이한 주파수 서브채널들에 대하여 달성될 수 있다. 이 경우, 특정 송신 방식이 고유모드들에 대하여 상술한 방법과 동일한 방법으로 N_F 개의 주파수 서브채널들에 이용하기 위하여 선택될 수 있다.

MIMO-OFDM 시스템은 N_S 개의 고유모드들 마다 N_F 개의 주파수 서브채널들을 포함한다. 각각의 고유모드의 각각의 주파수 서브채널은 송신 채널이라 할 수 있으며, MIMO-OFDM 시스템에 대하여 $N_C = N_F$ 개의 송신채널이 존재한다. MIMO-OFDM 시스템에서의 각각의 고유모드의 주파수 서브채널들은 상이한 채널 상태들을 유사하게 경험할 수 있으며 주어진 크기의 송신전력에 대하여 상이한 SNRs 을 달성할 수 있다. 이 경우, 특정 송신 방식이, 고유모드들에 대하여 상술한 방법과 동일한 방법으로 N_F 개의 주파수 서브채널들에 이용하기 위하여 선택될 수 있다. 그러나, 각각의 송신 안테나가 P_{max} 의 피크 송신전력에 의해 제한되므로, 주어신 송신 안테나의 모든 주파수 서브채널들에 대하여 이용되는 전체 송신전력은 P_{max} 로 제한된다.

MIMO-OFDM 시스템에서는, (즉, 공간 및 주파수 차원 양측에 대하여) 모든 송신 채널들이, 데이터 송신에 이용할 특정 송신 방식을 결정하는데 고려될 수 있다. 다른 방법으로, 송신 방식 선택은, 하나의 차원만이 어떤 주어진 순간에 고려되도록 수행될 수도 있다.

또한, 여기에 설명한 기술들은 송신 채널들의 그룹에 이용될 수 있다. 각각의 그룹은 어떤 수의 송신 채널들을 포함할 수 있으며, 개개의 동작 포인트와 관련될 수 있다. 예를 들면, 각각의 그룹은 독립적인 데이터 스트림에 이용될 송신 채널들을 포함할 수 있는데, 이 데이터 스트림은 특정 데이터 레이트와 특정 코딩 및 변조 방식과 관련될 수 있다. 다

중 액세스 통신 시스템에서는, 각각의 그룹이 상이한 수신기에 할당될 송신 채널들과 관련될 수 있다.

주파수 선택적 페이딩을 경험할 수 있는 광역 MIMO 시스템에서는, 동작 대역폭이 복수의 (동일하거나 동일하지 않은) 주파수 대역들로 분할될 수 있어, 그 결과, 각각의 대역이 플랫-페이딩 채널로서 고려될 수 있다. 그 경우, 채널 응답 매트릭스 ($\mathbf{H}$) 의 각각의 엘리먼트는 스칼라를 대신하여 선형 전사 함수의 양태를 띠며 각각의 송신 수신 안테나 페이 간의 커플링 ($h_{i,j}$) 은 N_F 개의 스칼라 값들의 벡터에 의해 각각의 주파수 대역마다 하나의 스칼라 값으로 기술될 수 있다. 여러 송신 방식은 광대역 MIMO 시스템에 대하여 이용될 수 있으며 이들 중 일부를 아래 설명한다.

광대역 MIMO 시스템에 대한 제 1 송신 방식에서는, 빔-형성이 주파수 대역들마다 이용된다. 이 제 1 송신 방식의 일 실시형태에서, 먼저, 최대 고유값이 주파수 대역마다 결정되며, 이 고유값에 대응하는 고유모드는 이용을 위하여 선택된다. 이후, 이들 고유모드들에 대한 '최적의' 전력 할당이, 모든 N_T 개의 송신 안테나들에 대한 송신기에서 이용 가능한 전체 송신전력 (P_{tot}) 에 기초하여 결정될 수 있다. 이러한 전력 할당은 상술한 미국특허출원 번호 제 09/978,337에 개시된 바와 같이, 워터필링을 이용하여 달성될 수 있다. 이후, N_F 개의 데이터 스트림들이 프로세싱된 다음, N_F 개의 주파수 대역들의 N_F 개의 선택된 고유모드들로 송신될 수 있다.

채널 응답 매트릭스 ($\mathbf{H}$) 와 잡음 편차 (σ^2) 에 의존하여, N_F 개의 선택된 고유모드들로 송신되는 각각의 데이터 스트림들은 상이한 사후검출SNR을 얻을 수 있다. 일 실시형태에서, 각각의 데이터 스트림은 그 사후검출 SNR 에 기초하여 그 데이터 스트림에 대하여 선택된 각각의 코딩 및 변조 방식에 기초하여 코딩되고 변조될 수 있다. 또 다른 실시형태에서, 전체 송신 전력 (P_{tot}) 은, 거의 동일한 사후 검출 SNRs 이 모든 데이터 스트림에 대하여 얻어지도록 할당된다. 이러한 실시형태에 대하여, 하나의 공통 코딩 및 변조 방식은 모든 데이터 스트림들에 대하여 이용될 수 있는데, 이는 송신기와 수신기에서의 프로세싱을 간략하게 할 수 있다.

동일한 사후검출 SNRs 을 얻기 위하여 송신전력을 할당하는 기술들은 미국특허 출원번호 제09/860,274호, 제09/881,610호, 및 제09/892,379호에 개시되어 있다. 광대역 MIMO 시스템에 대하여 송신기와 수신기에서의 데이터 프로세싱하는 기술들은 상술한 미국특허 출원번호 제09/993,087호 및 2001 년 12월 7일 출원된, 발명의 명칭이 'Time-Domain Transmit and Receive Processing with Channel Eigen-mode Decomposition with MIMO Systems'인 미국특허 출원번호 제10/017,308호에 개시되어 있다. 이들 출원들은 모두 본 발명의 양수인에게 양도되었고, 그 내용을 본문중에 참조한다.

광대역 MIMO 시스템에 대한 제 2 송신방식에서는, 부분-CSI 송신방식이 각각이 주파수 대역마다 이용된다. 이 제 2 송신방식의 일 실시형태에서는, 각각의 송신 안테나에 대한 피크 송신전력(P_{max}) 이 N_F 개의 주파수 대역들 간에 동일하게 분할된다. 이후, N_S 개의 데이터 스트림들이 프로세싱된 다음 각각의 N_F 개의 주파수 대역들로 송신된다. 일 실시형태에서, 각각의 데이터 스트림은 그 얻어진 사후검출 SNR 에 기초하여 코딩되고 변조될 수 있다. 또 다른 실시형태에서, 송신기와 수신기 모두에서의 코딩 및 변조를 간단하게 하기 위하여, 송신전력을 불균일하게 할당할 수 있고, 그 결과 공통 코딩 및 변조 방식이 (1) 주파수 대역마다의 모든 N_S 개의 데이터 스트림, (2) 공간 서브채널마다의 모든 N_F 개의 데이터 스트림들, (3) 모든 $N_S \cdot N_F$ 개의 송신 채널들에 대한 모든 데이터 스트림들, 또 는 (4) 주파수/공간 서브채널들의 어떤 조합도 포함할 수 있는 송신 채널들의 그룹 마다의 모든 데이터 스트림들에 이용될 수 있다.

광대역 MIMO 시스템에 이용하기 위하여 선택되는 송신방식마다, 송신기는 송신 이전에 적절하게 데이터를 프로세싱하는데 요구되는 정보를 제공받는다. 예를 들면, N_F 개의 주파수 대역 마다 빔-형성을 이용하는 제 1 송신방식에서는, 송신기는 (1) 이들 N_F 개의 주파수 대역들에 대한 N_F 개의 특이벡터 및 (2) N_F 개의 선택된 고유모드 마다의 사후검출 SNR 을 나타내는 정보 또는 데이터 스트림마다 이용될 코딩 및 변조 방식을 제공받을 수 있다. N_F 개의 주파수 대역마다 부분 CSI 송신방식을 이용하는 제 2 송신 방식에서는, 송신기는 (1) 데이터 스트림 마다 또는 데이터 스트림들의 그룹 마다의 사후검출 SNR 을 제공받을 수 있다.

또한, 전체-CSI 또는 부분-CSI 프로세싱에 기초할 수 있는 또 다른 송신방식들은 광대역 MIMO 시스템에 이용될 수 있으며, 이는 본 발명의 범위 내에 있다. 이들 여러 송신방식들에 의해 광대역 MIMO 시스템이 데이터 송신을 위한 개개의 주파수 대역들의 채널 응답을 고려할 수 있다.

일 실시형태에서, 제 1 및 제 2 송신 방식에 대하여 상술한 바와 같이, 하나의 전체-CSI 또는 부분-CSI 기초 송신방식은 광대역 MIMO 시스템의 모든 주파수 대역들에 대하여 이용되도록 선택된다. 이는 송신기와 수신기에서의 프로세싱을 간략하게 할 수 있다. 또 다른 실시형태에서, 각각의 주파수 대역은 독립적으로 처리될 수도 있고 상이한 전체-CSI 또는 부분-CSI 기초 송신방식이 주파수 대역 마다의 이용을 위하여 선택될 수 있는데, 각각의 주파수 대역은 주어진 송신 안테나의 모든 주파수 대역들에 대하여 이용되는 전체 송신전력을 피크 송신 전력 (P_{max}) 내에서 유지시키는 것과 같은 어떤 구속조건을 받는다.

광대역 MIMO 시스템에서는, 등화기가 수신기에 이용되어, 채널 응답에서의 주파수 선택적 페이딩을 등화시키는데

이용될 수 있다. 이 경우, 협대역 MIMO 시스템에 대하여 이용가능한 송신방식은 광대역 MIMO 시스템에 이용될 수도 있다.

통상적으로, 송신기와 수신기에서의 프로세싱을 간략하게 하는 것이 바람직하다. 이는 데이터 송신에 대하여 가능한 적은 코딩 및 변조방식들 (예를 들면, 하나의 코딩 및 변조 방식) 을 이용하여 달성될 수 있다. 이를 달성하기 위한 일 방법은 선택적 채널 반전을 이용하여 송신 전력을 불균일하게 할당하여, 동일한 사후검출 SNRs이 송신채널들에 대하여 얻어지도록 하는 것이다. 이후, 독립적인 데이터 스트림이 (예를 들면, 공통 코딩 및 변조 방식에 기초하여) 프로세싱된 다음, 이들 송신 채널들 각각을 통하여 송신된다. 다른 방법으로, 하나의 데이터 스트림이 (예를 들면, 공통 코딩 및 변조 방식에 기초하여) 프로세싱된 다음 디멀티플렉스되고 이들 다중 송신채널들을 통하여 송신된다. 예를 들면, 선택적 채널반전은 상술한 제 1 송신 방식과 결합하여 제공될 수도 있고 하나의 데이터 스트림이 프로세싱된 다음 N_F 개의 주파수 대역들의 N_F 개의 선택된 고유모드들을 통하여 송신될 수 있다.

<u>채널 상태 정보의 양자화</u>

전체 CSI (예를 들면, 채널 응답 매트릭스) 를 대신하여 감소된 크기의 CSI (예를 들면, 사후프로세싱된 SNRs 및 특이 벡터) 에 의존하는 송신 방식들의 이용은 수신기로부터 송신기로 보고될 필요가 있는 채널 정보의 크기를 상당히 감소시킬 수 있다. 전체 CSI 에 의존하는 송신 방식은 $N_R \cdot N_T$ 복소 채널 이득에 잡음 편차를 더한 것 또는 송신기에 보고될 이와 동등한 정보를 요구한다. 이와 반대로, 부분-CSI 송신방식은 N_S 개의 SNR 값만을 요구하는데, 여기서, $N_S \le \min\{N_T, N_R\}$이다. 각각의 SNR 값은 MIMO 시스템에 의해 지원되는 특정 '레이트'에 매핑된 다음 표현될 수 있다. 이 레이트는 대응하는 송신 안테나에 대한 데이터 스트림에 이용될, 특정 데이터 레이트와 코딩 및 변조 방식을 나타낸다.

빔-형성 송신방식은, 선택된 고유모드에 대한 데이터 송신을 빔-형성하는데 이용하는, 선택된 고유모드 (또는 하나의 레이트 값) 와 특이 벡터 ($\underline{\mathbf{v}}$) 에 대하여 하나의 SNR 값만을 요구한다. 특이 벡터는 송신 안테나 마다 하나씩 N_T 개의 복소 채널 이득들로 구성된다. 각각의 복소 채널이득의 각각의 실수 또는 허수 차원을 양자화하는데 이용되는 비트들의 수가 Q 로 표시되는 경우, 특이벡터를 코딩하는데 필요한 비트들의 총 수는 $2N_T Q$ 이다.

표 1 은 N_T 개의 송신 안테나들와 M 개의 가능한 레이트들을 가진 MIMO 시스템에 대한 부분-CSI와 빔-형성 송신 방식들의 여러 형태들을 나타내는데 필요한 비트들의 수를 나열한 것이다. 표 1 에서, 심볼 '⌈ ⌉' 는 괄호 내에서의 크기의 다음 최고 정수값을 나타낸다.

표 1

	부분-CSI	빔-형성
코딩/변조	$N_T \lceil \log_2 (M) \rceil$	$\lceil \log_2 (M) \rceil$
특이 벡터	0	$2N_T Q$

일반적으로, 송신기로 역으로 보고될 정보의 양을 감소시키기 위해 가능한 소수의 비트로 특이 벡터에 대한 합성 채널 이득을 양자화하는 것이 바람직하다. 그러나, 양자화는 성능을 현저하게 저하시키지 않는다.

표 2는 특이 벡터의 합성 채널의 각 크기를 나타내기 위해 사용된 상이한 수의 양자화 비트 (Q) 에 대한 SNR (dB에서) 에서의 저하를 나타낸다. 표 2에 도시된 저하는 빔-형성 모드에서 동작하는 4 ×4 MIMO 시스템에 기초하여 얻어진다. 양자화로 인한 SNR에서의 저하는 양자화 비트의 수의 함수이고 동작 SNR의 함수는 아니다. 이러한 저하는 2 내지 5개의 범위의 Q의 상이한 값에 대해 도시된다.

표 2

비트의 수 (Q)	2	3	4	5
SNR (dB) 에서의 열하	6.12	2.7	1.25	0.6

표 2에 나타낸 바와 같이, 4 비트/크기 (즉, Q = 4), 또는 8 비트/합성 채널 이득이 특이 벡터를 인코딩하기 위해 사용될 수도 있다. 5 비트/크기 (즉, Q = 5), 또는 10 비트/합성 채널 이득값은 더욱 양호한 성능을 제공한다. 또한, 각 합성 채널 이득을 적절하게 나타내기 위해 필요한 비트의 수는 MIMO 시스템의 차원성의 함수일 수도 있다. 예를 들어, 3 ×3 또는 2 ×2 MIMO 시스템은 합성 채널 이득의 (실 또는 허) 크기 당 4 또는 5 비트 보다 작은 것을 요구할 수도 있다.

<u>시스템</u>

도 3은 본 명세서에 설명한 다양한 양태 및 실시형태를 구현할 수 있는 송신기 시스템 (310) 및 수신기 시스템 (350) 의 실시형태의 블록도이다.

송신기 시스템 (310) 에서, 트래픽 데이터는 데이터 소스 (312) 로부터 코딩된 데이터를 제공하기 위해 하나 이상의 코딩 방식에 기초하여 트래픽 데이터를 포맷, 코딩, 및 인터리빙하는 송신 (TX) 데이터 프로세서 (314) 로 제공된다. 그 후, 코딩된 트래픽 데이터는 예를 들어, 데이터 송신을 위해 사용될 송신 채널 전부 또는 서브세트에서 시간 분할 멀티플렉스 (TDM) 또는 코드 분할 멀티플렉스 (CDM) 을 사용하여 파일럿 데이터와 멀티플렉싱된다. 통상적으로, 파일럿 데이터는 공지된 방식으로 프로세스된 공지된 데이터 패턴이다. 그 후, 멀티플렉싱된 파일럿 및 코딩된 트래픽 데이터는 변조 심볼을 제공하기 위해 하나 이상의 변조 방식 (예를 들어, BPSK, QSPK, M-PSK, 또는 M-QAM) 에 기초하여 변조 (즉, 심볼 매핑) 된다. 각 송신 채널 또는 송신 채널의 그룹에 대한 데이터 레이트, 코딩, 인터리빙, 및 변조는 제어기 (330) 에 의해 제공된 다양한 제어에 의해 결정될 수도 있다.

TX MIMO 프로세서 (320) 는 송신기 시스템 (310) 에 대한 현재의 동작 모드에 대응하는 프로세싱 방식에 따라 변조 심볼을 더 프로세스할 수도 있다. 각 송신 방식은 각각의 동작 모드와 연관될 수도 있고, 각 동작 모드는 변조 심볼에 대한 특정한 프로세싱 방식에 대응할 수도 있다. 부분-CSI 송신 방식에 있어서, TX MIMO 프로세서 (320) 는 각각의 송신기 (TMTR :322) 로 각 데이터 스트림에 대한 변조 심볼의 스트림을 단순히 통과시킨다. 빔-형성 송신 방식에 있어서, TX MIMO 송신기 (320) 는 고유모드와 연관된 특이 벡터 ($\underline{v}$) 에 기초하여 선택된 고유모드에 대한 변조 심볼의 단일 스트림을 사전-조절한다. 사전-조절은 N_T 개 스케일된 심볼을 제공하기 위해 특이 벡터에 대한 N_T 엔트리 각각과 각 변조 심볼을 승산함으로써 수행될 수도 있다. 따라서, 스케일된 심볼의 N_T 개 스트림은 특이 벡터의 N_T 개 엔트리에 대해 제공된다. 특이 벡터와의 사전-조절은 데이터 스트림에 대한 빔-형성을 효과적으로 수행한다. 어떤 경우에, N_T 개 스케일된 또는 스케일되지 않은 변조 심볼 스트림은 송신기 (322a 내지 322t) 로 제공된다.

각 송신기 (322) 는 각각의 심볼 스트림을 수신 및 프로세스한다. OFDM 시스템에 있어서, 각 송신기는 OFDM 심볼을 형성하기 위해 (예를 들어, 역 고속 퓨리에 변환 (IFFT) 을 사용하여) 심볼을 변환시키고, 대응하는 송신 심볼을 형성하기 위해 각 OFDM 심볼에 사이클릭 프리픽스를 더 첨부할 수도 있다. 각 송신기는 심볼 스트림을 하나 이상의 아날로그 신호로 전환시키고 MIMO 채널을 통한 송신에 적절한 변조된 신호를 생성하기 위해 아날로그 신호를 더 조절 (예를 들어, 증폭, 필터, 및 직교 변조) 한다. 그 후, 송신기 (322a 내지 322t) 로부터의 N_T 개 변조된 신호는 N_T 개 안테나 (324a 내지 324t) 를 통해 송신된다.

수신기 시스템 (350) 에서, 송신된 변조 신호는 N_R 개 안테나 (352a 내지 352r) 에 의해 수신되고, 각 안테나 (352) 로부터 수신된 신호는 각각의 수신기 (RCVR : 354) 로 제공된다. 각 수신기 (354) 는 수신된 신호를 조절 (예를 들어, 필터, 증폭, 및 다운변환) 하고 각각의 샘플의 스트림을 제공하기 위해 조절된 신호를 디지털화한다. 각 샘플 스트림은 수신된 심볼의 대응하는 스트림 ($\underline{y}$ 로 표기) 을 얻기 위해 더 프로세스 (예를 들어, 복구된 파일럿과 복조) 된다.

그 후, RX MIMO 프로세서 (360) 는 N_T 개 복구된 심볼 스트림 ($\underline{r}$ 로 표기) 을 제공하기 위해 다수의 공간 수신기 프로세싱 기술중의 하나에 기초하여 N_R 개 수신된 심볼 스트림을 수신 및 프로세스한다. 예를 들어, RX MIMO 프로세서 (360) 는 CCMI, CCMI-SC, MMSE, MMSE-SE, 또는 어떠한 다른 수신기 프로셍싱 기술을 구현할 수도 있다. 이들 다양한 수신기 프로세싱 기술은 상기 언급한 미국 특허 출원 번호 09/993,087 호에 상세히 설명되어 있다.

그 후, 수신기 (RX) 데이터 프로세서 (362) 는 송신된 트래픽 데이터를 제공하기 위해 복구된 심볼을 복조, 디인터리빙, 및 디코딩한다. RX MIMO 프로세서 (360) 및 RX 데이터 프로세서 (362) 에 의한 프로세싱은 송신기 시스템 (310) 에서, 각각의 TX MIMO 프로세서 (320) 및 TX 데이터 프로세서 (314) 에 의해 수행된 것과 상보적이다.

RX MIMO 프로세서 (360) 는 송신 채널에 대한 SNR의 추정치, 최고의 고유값 (또는 최상의 SNR) 을 갖는 고유모드에 대응하는 특이 벡터에 대한 채널 이득 등을 더 유도하고, 이러한 정보를 제어기 (370) 에 제공한다. 또한, RX 데이터 프로 세서 (362) 는 각 수신된 프레임 또는 패킷의 상태, 디코딩 결과를 나타내는 하나 이상의 다른 성능 메트릭, 및 다른 정보를 제공할 수도 있다. 제어기 (370) 는 RX MIMO 프로세서 (360) 및 RX 데이터 프로세서 (362) 로부터 수신된 정보 전체 또는 일부를 포함할 수도 있는 관련 CSI를 수집한다. 그 후, 이러한 CSI는 TX 데이터 프로세서 (378) 에 의해 프로세스되고, 변조기 (380) 에 의해 변조되고, 송신기 (354a 내지 354r) 에 의해 조절되고, 송신기 시스템 (310) 으로 역으로 송신된다.

송신기 시스템 (310) 에서, 수신기 시스템 (350) 으로부터 수신된 신호는 안테나 (324) 에 의해 수신되고, 수신기 (322) 에 의해 조절되고, 복조기 (340) 에 의해 복조되고, 수신기 시스템에 의해 보고된 관련 CSI를 복구하기 위해 RX 데이터 프로세서 (324) 에 의해 프로세스된다. 그 후, 보고된 CSI는 제어기 (330) 로 제공되고 송신 방식을 선택하고 TX 데이터 프로세서 (314) 및 TX MIMO 프로세서 (320) 에 대한 다양한 제어를 생성하기 위해 사용된다.

제어기 (330 및 370) 는 송신기 시스템 및 수신기 시스템 각각에서 동작을 지시한다. 메모리 (332 및 372) 는 제어기 (330 및 370) 각각에 의해 사용된 프로그램 코드 및 데이터에 저장을 제공한다.

전술한 다중-모드 송신 기술을 구현하기 위해, 제어기 (330) 는 사후-프로세스된 SNR을 포함할 수도 있는 수신기 시스템 (350) 으로부의 관련 CSI, 특이 벡터, 및/또는 MIMO 채널의 특성 또는 동작 조건을 설명하는 어떠한 다른 정보를 수신한다. 그 후, 제어기 (330) 는 (1) 데이터 송신을 위해 사용하기 위한 특정의 송 신 방식을 선택하고, (2) 각 선택된 송신 채널에 대하 사용하기 위한 레이트를 결정한다. 각 선택된 송신 채널을 위해 사용될 레이트 (즉, 데이터 레이트 및 코딩 및 변조 방식) 는 데이터 스트림에 각 할당된 송신 전력의 양에 부분 기초하여 결정된다. 또한, 전력 할당 및 레이트 결정은 송신기 시스템에서 보다는 어떠한 네트워크 엔티티에 의해 수행될 수도 있다.

본 명세서에 설명한 다중-모드 송신 기술은 다양한 수단에 의해 구현될 수도 있다. 예를 들어, 이들 기술은 하드웨어, 소프트웨어, 또는 이들의 조합으로 구현될 수도 있다. 하드웨어 구현에 있어서, 이들 기술을 구현하기 위해 사용되는 엘리먼트는 하나 이상의 응용 주문형 집적 회로 (ASIC), 디지털 신호 프로세서 (DSP), 디지털 신호 프로세싱 디바이스 (DSPD), 프로그램 가능한 로직 디바이스 (PLD), 필드 프로그램 가능한 게이트 어레이 (FPGA), 프로세서, 제어기, 마이크로-제어기, 마이크로프로세서, 본 명세서에 설명한 기능을 수행하도록 설계된 다른 전자 유닛, 또는 이들의 조합에서 구현될 수도 있다.

소프트웨어 구현에 있어서, 다중-모드 송신 기술의 특정한 양태는 본 명세서에 설명한 기능을 수행하는 모듈 (예를 들어, 절차, 함수 등) 을 사용하여 구현될 수도 있다. 소프트웨어 코드는 메모리 유닛 (예를 들어, 도 3의 메모리 (322)) 에 저장될 수도 있고 프로세서 (예를 들처 제어기 (330)) 에 의해 실행될 수도 있다. 메모리 유닛은 프로세서 내부 또는 프로세서 외부에서 구현될 수도 있고, 이것은 당업계에 공지된 바와 같은 다양한 수단을 통해 프로세서에 통신 가능하게 연결될 수 있다.

제목은 특정한 섹션을 참조하고 위치시키기 위해 포함된다. 이들 제목은설명한 개념의 범위를 제한하는 것이 아니고, 이들 개념은 전체 명세서 전반적으로 다른 섹션에 적용성을 가질 수도 있다.

개시한 실시형태의 이전의 설명은 당업자가 본 발명을 제조 또는 사용할 수 있도록 제공된다. 이들 실시형태의 다양한 변형이 당업자에게는 명백할 것이고, 본 명세서에 정의한 일반 원리가 본 발명의 사상 또는 범위를 벗어나지 않고 다른 실시형태에 적용될 수도 있다. 따라서, 본 발명을 본 명세서에 나타낸 실시형태에 제한하려는 것이 아니라 본 명세서에 개시한 원리 및 신규한 특징과 일관되는 가장 광범위한 범위를 부여하려는 것이다.

(57) 청구의 범위

청구항 1.

무선 통신 시스템에서 복수의 송신 채널을 통해 데이터를 송신하는 방법으로서,

통신 시스템의 동작 상태를 결정하는 단계;

상기 결정된 동작 상태에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 선택된 특정의 송신 방식을 식별하는 단계;

상기 선택된 송신 방식에 기초하여, 송신될 하나 이상의 데이터 스트림을 결정하는 단계; 및

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 하나 이상의 데이터 스트림을 프로세싱하는 단계를 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 2.

제 1 항에 있어서,

상기 특정의 송신 방식은 상기 복수의 가능한 송신 방식 각각의 성능을 평가함으로써 선택되는, 데이터 송신 방법.

청구항 3.

제 1 항에 있어서,

상기 특정의 송신 방식은 동작 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 에 기초하여 선택되는, 데이터 송신 방법.

청구항 4.
제 1 항에 있어서,

상기 하나 이상의 데이터 스트림은 채널 상태 정보에 기초하여 더 프로세싱되는, 데이터 송신 방법.

청구항 5.
제 4 항에 있어서,

상기 복수의 송신 방식은 부분 채널-상태 정보 (CSI) 송신 방식을 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 6.
제 5 항에 있어서,

상기 부분-CSI 송신 방식에 대한 채널 상태 정보는 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 를 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 7.
제 4 항에 있어서,

상기 복수의 송신 방식은 빔-형성 송신 방식을 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 8.
제 7 항에 있어서,

단일 송신 채널이 상기 빔-형성 송신 방식에 사용하기 위해 선택되고, 빔-형성은 단일 선택된 송신 채널을 통한 데이터 송신에 사용되는, 데이터 송신 방법.

청구항 9.
제 7 항에 있어서,

상기 빔-형성 송신 방식에 대한 채널-상태 정보는 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 및 단일 선택된 송신 채널에 대한 특이 벡터를 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 10.
제 9 항에 있어서,

상기 특이 벡터의 각 성분은 크기 당 5 비트 이하로 양자화되는, 데이터 송신 방법.

청구항 11.
제 4 항에 있어서,

상기 복수의 송신 방식은 빔-스티어링 (steering) 송신 방식을 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 12.
제 11 항에 있어서,

상기 빔-스티어링 송신 방식에 대한 채널-상태 정보는 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR), 및 데이터 송신에 사용된 복수의 송신 안테나에 대한 위상값의 벡터를 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 13.
제 12 항에 있어서,

상기 위상 값의 벡터는 주요 고유모드에 대한 특이 벡터에 기초하는, 데이터 송신 방법.

청구항 14.
제 1 항에 있어서,

상기 동작 상태는 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 에 의해 양자화되고, 부분-CSI 송신 방식은 통신 시스템의 동작 SNR이 임계 SNR 이상인 경우일 때 사용하기 위해 선택되고, 빔-형성 송신 방식은 동작 SNR이 임계 SNR 이하일 때 사용하기 위해 선택되는, 데이터 송신 방법.

청구항 15.
제 1 항에 있어서,

데이터 스트림에 대해 달성 가능한 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 에 기초하여 각 데이터 스트림에 대한 레이트를 선택하는 단계를 더 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 16.
제 1 항에 있어서,

상기 무선 통신 시스템은 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신 시스템이고, 상기 복수의 송신 채널은 MIMO 통신 시스템의 복수의 공간 서브채널에 대응하는, 데이터 송신 방법.

청구항 17.
제 1 항에 있어서,

상기 무선 통신 시스템은 광대역 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신 시스템이고, 상기 복수의 송신 채널은 복수의 주파수 대역의 복수의 공간 서브채널에 대응하는, 데이터 송신 방법.

청구항 18.
제 17 항에 있어서,

하나의 송신 방식이 모든 주파수 대역에 대해 사용하기 위해 선택되고, 하나 이상의 데이터 스트림이 각 주파수 대역을 통해 송신되고 상기 선택된 송신 방식에 기초하여 프로세싱되는, 데이터 송신 방법.

청구항 19.
제 17 항에 있어서,

하나의 송신 방식이 각 주파수 대역에 대해 사용하기 위해 선택되고, 하나 이상의 데이터 스트림이 각 주파수 대역을 통해 송신되고 상기 주파수 대역에 대해 선택된 송신 방식에 기초하여 프로세싱되는, 데이터 송신 방법.

청구항 20.
제 17 항에 있어서,

빔-형성 송신 방식이 복수의 주파수 대역의 각각에 대한 사용을 위해 선택되는, 데이터 송신 방법.

청구항 21.
제 20 항에 있어서,

총 송신 전력은, 복수의 주파수 대역을 통해 송신되는 모든 데이터 스트림에 대해 공통 코딩 및 변조 방식이 사용되도록, 할당되는, 데이터 송신 방법.

청구항 22.
제 17 항에 있어서,

부분-CSI 송신 방식이 복수의 주파수 대역 각각에 대한 사용을 위해 선택되는, 데이터 송신 방법.

청구항 23.
제 22 항에 있어서,

총 송신 전력은, 각 주파수 대역을 통해 송신되는 모든 데이터 스트림에 대해 공통 코딩 및 변조 방식이 사용되도록, 할당되는, 데이터 송신 방법.

청구항 24.

제 22 항에 있어서,

총 송신 전력은, 각 공간 서브채널을 통해 송신되는 모든 데이터 스트림에 대해 공통 코딩 및 변조 방식이 사용되도록, 할당되는, 데이터 송신 방법.

청구항 25.

제 1 항에 있어서,

상기 무선 통신 시스템은 직교 주파수 분할 멀티플렉싱 (OFDM) 통신 시스템이고, 상기 복수의 송신 채널은 복수의 주파수 서브채널에 대응하는, 데이터 송신 방법.

청구항 26.

다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신 시스템에서 복수의 공간 서브채널을 통해 데이터를 송신하는 방법으로서,

상기 MIMO 시스템의 동작 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 를 결정하는 단계;

상기 동작 SNR에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 선택된 특정의 송신 방식을 식별하는 단계로서, 상기 복수의 송신 방식 각각은 동작 SNR의 각각의 범위에 대한 사용을 위해 지정되어 있는, 상기 식별 단계;

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 송신될 하나 이상의 데이터 스트림을 결정하는 단계; 및

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 하나 이상의 데이터 스트림을 프로세싱하는 단계를 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 27.

제 26 항에 있어서,

상기 복수의 송신 방식은 부분-CSI 송신 방식 및 빔-형성 송신 방식을 포함하고, 상기 부분-CSI 송신 방식은 상기 동작 SNR이 임계 SNR 이상일 때 사용하기 위해 선택되고 상기 빔-형성 송신 방식은 상기 동작 SNR이 임계 SNR 이하일 때 사용하기 위해 선택되는, 데이터 송신 방법.

청구항 28.

다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신 시스템에서 데이터를 송신하는 방법으로서,

달성된 성능에 기초하여 복수의 송신 채널 중의 특정의 송신 채널을 식별하는 단계;

상기 선택된 송신 채널에 대응하는 위상값의 벡터를 결정하는 단계로서, 복수의 송신 안테나 각각에 대한 하나의 위상값이 데이터 송신을 위해 사용되는, 상기 결정 단계;

특정의 코딩 및 변조 방식에 기초하여 데이터를 프로세싱하는 단계; 및

특정의 송신 전력에서 복수의 송신 안테나 각각으로부터의 및 상기 송신 안테나와 연관된 위상값에 의해 결정된 위상을 갖는 프로세싱된 데이터를 송신하는 단계를 포함하는, 데이터 송신 방법.

청구항 29.

제 28 항에 있어서,

풀 송신 전력이 각 송신 안테나에 대해 사용되는, 데이터 송신 방법.

청구항 30.

통신 시스템의 동작 상태를 결정하고;

상기 결정된 동작 상태에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 특정의 송신 방식을 선택하고;

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 송신될 하나 이상의 데이터 스트림을 결정하고; 그리고

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 하나 이상의 데이터 스트림을 프로세싱하기 위해, 디지털 정보를 해석할 수 있는 디지털 신호 프로세싱 디바이스 (DSPD) 에 통신 가능하게 연결된 메모리.

청구항 31.
무선 통신 시스템에서 복수의 송신 채널을 통한 데이터 송신을 용이하게 하는 컴퓨터 프로그램 제품으로서,

상기 통신 시스템의 동작 상태를 결정하는 코드;

상기 결정된 동작 상태에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 특정의 송신 방식을 선택하는 코드;

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 송신될 하나 이상의 데이터 스트림을 결정하는 코드;

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 하나 이상의 데이터 스트림을 직접 프로세싱하는 코드; 및

상기 코드들을 저장하는 컴퓨터 사용 가능한 매체를 구비하는, 컴퓨터 프로그램 제품.

청구항 32.
무선 통신 시스템에서의 장치로서,

상기 통신 시스템의 동작 상태를 결정하는 수단;

상기 결정된 동작 상태에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 특정의 송신 방식을 식별하는 수단;

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 송신될 하나 이상의 데이터 스트림을 결정하는 수단; 및

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 하나 이상의 데이터 스트림을 프로세싱하는 수단을 구비하는, 장치.

청구항 33.
제 32 항에 있어서,

상기 무선 통신 시스템은 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신 시스템이고, 복 수의 송신 채널은 상기 MIMO 통신 시스템의 복수의 공간 서브채널에 대응하는, 장치.

청구항 34.
제 32 항에 있어서,

상기 특정의 송신 방식은 상기 통신 시스템의 동작 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 에 기초하여 선택되고, 상기 복수의 송신 방식 각각은 동작 SNR의 각각의 범위에 대해 사용하기 위해 지정되는, 장치.

청구항 35.
제 34 항에 있어서,

상기 복수의 송신 방식은 부분-CSI 송신 방식 및 빔-형성 송신 방식을 포함하고, 상기 부분-CSI 송신 방식은 상기 동작 SNR이 임계 SNR 이상일 때 사용하기 위해 선택되고 상기 빔-형성 송신 방식은 상기 동작 SNR이 임계 SNR 이하일 때 사용하기 위해 선택되는, 장치.

청구항 36.
제 32 항에 있어서,

상기 데이터 스트림에 의해 달성 가능한 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 에 기초하여 각 데이터 스트림에 대한 레이트를 선택하는 수단을 더 구비하는, 장치.

청구항 37.
다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신 시스템에서의 장치로서,

상기 MIMO 시스템의 동작 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 를 결정하는 수단;

상기 동작 SNR에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 특정의 송신 방식을 식별하는 수단으로서, 상기 복수의 송신 방식 각각은 동작 SNR의 각각의 범위에 대해 사용하기 위해 지정되는, 상기 식별 수단;

상기 선택된 송신 방식에 기초하여, 송신될 하나 이상의 데이터 스트림을 결정하는 수단; 및

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 하나 이상의 데이터 스트림을 프로세싱하는 수단을 구비하는, 장치.

청구항 38.
무선 통신 시스템에서의 제어기로서,

상기 통신 시스템의 동작 상태를 수신하는 수단;

결정된 동작 상태에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 특정의 송신 방식을 식별하는 수단;

선택된 송신 방식에 기초하여, 송신될 하나 이상의 데이터 스트림을 결정하는 수단; 및

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 하나 이상의 데이터 스트림을 직접 프로세싱하는 수단을 구비하는, 제어기.

청구항 39.
제 38 항에 있어서,

상기 데이터 스트림에 의해 달성 가능한 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 에 기초하여 각 데이터 스트림에 대한 레이트를 선택하는 수단을 더 구비하는, 제어 기.

청구항 40.
제 38 항의 제어기를 구비하는 기지국.

청구항 41.
무선 통신 시스템에서의 송신기 유닛으로서,

상기 통신 시스템의 동작 상태의 표시를 수신하고,

상기 동작 상태에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 특정의 송신 방식을 식별하고,

선택된 송신 방식에 기초하여, 송신될 하나 이상의 데이터 스트림을 결정하고,

상기 데이터 스트림에 할당된 송신 전력량에 부분 기초하여 각 데이터 스트림에 대한 레이트를 선택하고, 그리고

상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 하나 이상의 데이터 스트림을 직접 프로세싱함으로써 복수의 송신 채널을 통한 데이터 송신을 지시하도록 동작하는 제어기;

각각의 심볼 스트림을 제공하기 위해, 선택된 레이트에 기초하여 각 데이터 스트림을 프로세싱하도록 동작하는 송신 (TX) 데이터 프로세서; 및

통신 채널을 통한 송신에 적합한 하나 이상의 변조된 신호를 제공하기 위해 하나 이상의 심볼 스트림을 프로세싱하도록 동작하는 하나 이상의 송신기를 구비하는, 송신기 유닛.

청구항 42.
제 41 항에 있어서,

상기 복수의 송신 방식은 부분-CSI 송신 방식 및 빔-형성 송신 방식을 포함하는, 송신기 유닛.

청구항 43.
제 42 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 통신 시스템의 동작 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 가 임계 SNR 이상일 때 상기 부분-CSI 송신 방식을 선택하고 상기 동작 SNR이 상기 임계 SNR 이하일 때 상기 빔-형성 송신 방식을 선택하도록 동작하는, 송신

기 유닛.

청구항 44.
제 42 항에 있어서,

상기 제어기는, 상기 부분-CSI 송신 방식에 대해서는 각 데이터 스트림에 대한 피크 송신 전력을 이용하고 상기 빔-형성 송신 방식에 대해서는 단일 데이터 스트림에 모든 송신 전력을 할당하도록, 더 동작하는, 송신기 유닛.

청구항 45.
제 42 항에 있어서,

상기 빔-형성 송신 방식에 대한 특이 벡터에 기초하여 단일 데이터 스트림에 대한 심볼 스트림을 사전 조절하도록 동작하는 TX MIMO 프로세서를 더 구비하는, 송신기 유닛.

청구항 46.
제 41 항의 송신기 유닛을 구비하는, 기지국.

청구항 47.
무선 통신 시스템에서의 수신기 유닛으로서,

복구된 심볼의 적어도 하나의 스트림을 제공하고, 각 복구된 심볼 스트림에 대한 채널-상태 정보를 유도하기 위해 특정의 수신기 프로세싱 방식에 따라 복수의 수신된 심볼의 스트림을 수신 및 프로세싱하도록 동작하는 수신 (RX) MIMO 프로세서;

디코딩된 데이터를 제공하기 위해 적어도 하나의 복조 및 디코딩 방식에 따라 적어도 하나의 복구된 심볼 스트림을 프로세싱하도록 동작하는 RX 데이터 프로세서; 및

송신기 유닛으로의 역 송신을 위해 상기 CSI를 프로세싱하도록 동작하는 TX 데이터 프로세서를 구비하며,

특정의 송신 방식은 상기 CSI에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 선택되고, 하나 이상의 데이터 스트림은 상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 수신기 유닛으로 송신되며, 총 사용 가능한 송신 전력은 상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 하나 이상의 데이터 스트림에 할당되는, 수신기 유닛.

청구항 48.
제 47 항에 있어서,

상기 복수의 송신 방식은 부분-CSI 송신 방식 및 빔-형성 송신 방식을 포함하며, 상기 부분-CSI 송신 방식은 동작 신호 대 잡음 및 간섭비 (SNR) 가 임계 SNR 이상일 때 선택되고 상기 빔-형성 송신 방식은 상기 동작 SNR이 임계 SNR 이하일 때 선택되는, 수신기 유닛.

청구항 49.
제 48 항에 있어서,

상기 빔-형성 송신 방식에 대해, 상기 RX MIMO 프로세서는 단일 복구된 심볼 스트림을 제공하기 위해 특이 벡터를 사용하여 상기 복수의 수신 심볼 스트림을 사전-조절하도록 더 동작하는, 수신기 유닛.

청구항 50.
제 48 항에 있어서,

상기 부분-CSI 송신 방식에 대해, 상기 RX MIMO 프로세서는 복수의 복구된 심볼 스트림을 제공하기 위해 연속 소거를 갖는 최소 평균 제곱 에러 (MMSE-SC) 수신기 프로세싱 기술에 기초하여 상기 복수의 수신된 심볼 스트림을 프로세싱하도록 더 동작하는, 수신기 유닛.

청구항 51.
무선 통신 시스템에서의 수신기 장치로서,

적어도 하나의 복구된 심볼의 스트림을 제공하고 각 복구된 심볼 스트림에 대한 채널-상태 정보 (CSI) 를 유도하기 위해 특정의 수신기 프로세싱 방식에 따라 복수의 수신된 심볼의 스트림을 프로세싱하는 수단;

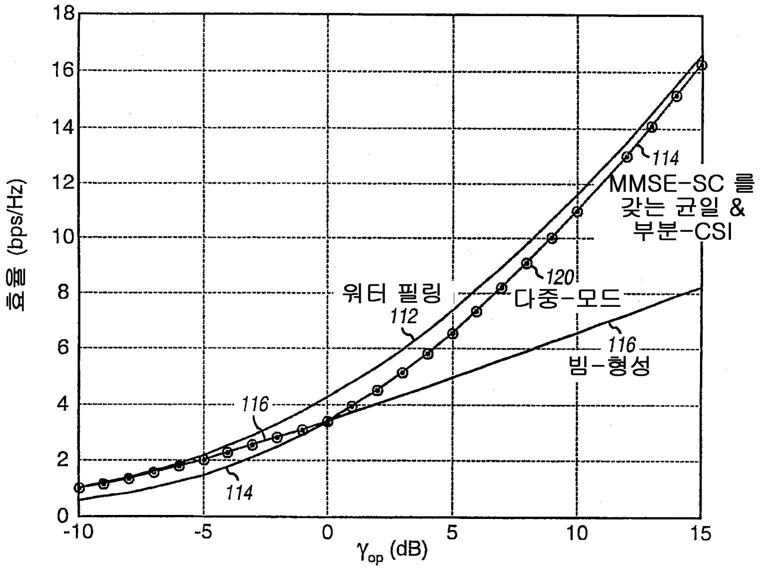
디코딩된 데이터를 제공하기 위해 적어도 하나의 복조 및 디코딩 방식에 따라 상기 적어도 하나의 복구된 심볼 스트림을 프로세싱하는 수단; 및

송신기 장치로의 역 송신을 위해 상기 CSI를 프로세싱하는 수단을 구비하며; 그리고

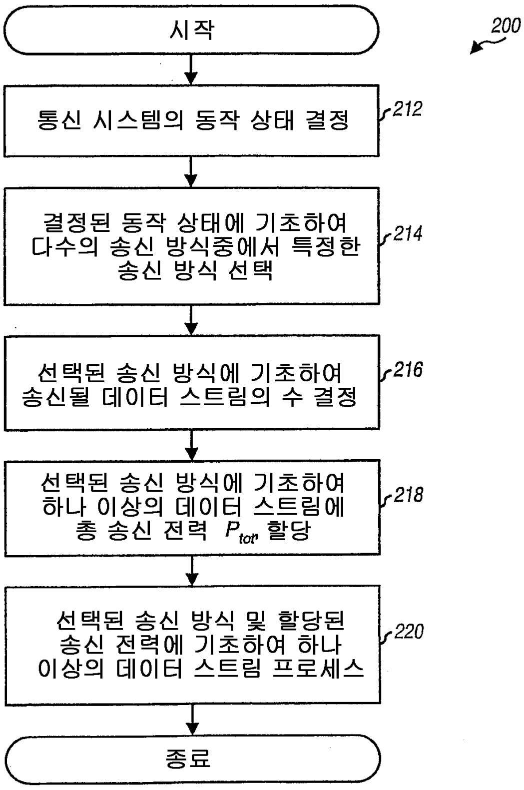
특정의 송신 방식은 상기 CSI에 기초하여 복수의 가능한 송신 방식 중에서 선택되고, 하나 이상의 송신 데이터 스트림은 상기 선택된 송신 방식에 기초하여 상기 수신기 장치로 송신되며, 총 사용 가능한 송신 전력은 상기 선택된 송신 방식에 기초하여 하나 이상의 데이터 스트림에 할당되는, 수신기 장치.

도면

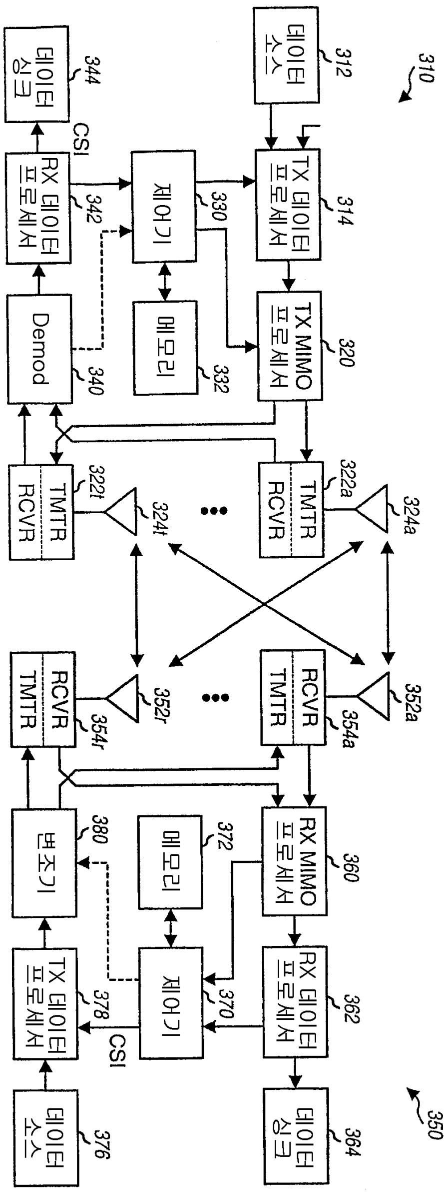
도면1



도면2


200
시작
통신 시스템의 동작 상태 결정
212
결정된 동작 상태에 기초하여 다수의 송신 방식중에서 특정한 송신 방식 선택
214
선택된 송신 방식에 기초하여 송신될 데이터 스트림의 수 결정
216
선택된 송신 방식에 기초하여 하나 이상의 데이터 스트림에 총 송신 전력 P_{tot} 할당
218
선택된 송신 방식 및 할당된 송신 전력에 기초하여 하나 이상의 데이터 스트림 프로세스
220
종료

도면3


310
데이터 소스
312
TX 데이터 프로세서
314
TX MIMO 프로세서
320
TMTR RCVR
322a
324a
TMTR RCVR
322t
324t
제어기
330
메모리
332
Demod
340
RX 데이터 프로세서
342
데이터 싱크
344
CSI
350
352a
352r
RCVR TMTR
354a
RCVR TMTR
354r
RX MIMO 프로세서
360
RX 데이터 프로세서
362
데이터 싱크
364
제어기
370
메모리
372
데이터 소스
376
TX 데이터 프로세서
378
변조기
380
CSI