



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년12월14일
(11) 등록번호 10-2613982
(24) 등록일자 2023년12월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04B 7/06 (2017.01) H04B 7/0456 (2017.01)
(52) CPC특허분류
H04B 7/0617 (2013.01)
H04B 7/0456 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-0077634
(22) 출원일자 2022년06월24일
심사청구일자 2022년06월24일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020090066198 A*
KR1020110036374 A*
KR1020120033340 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
고려대학교산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
이인규
서울시 강남구 영동대로 640(아이파크삼성) 웨스트동 3303호
김민석
서울특별시 노원구 노원로 564 (상계동 상계주공10단지아파트) 1006동 1509호
주 웬타오
서울특별시 동대문구 제기로23길 51-2 (청량리동) 102호
(74) 대리인
특허법인위솔

전체 청구항 수 : 총 12 항

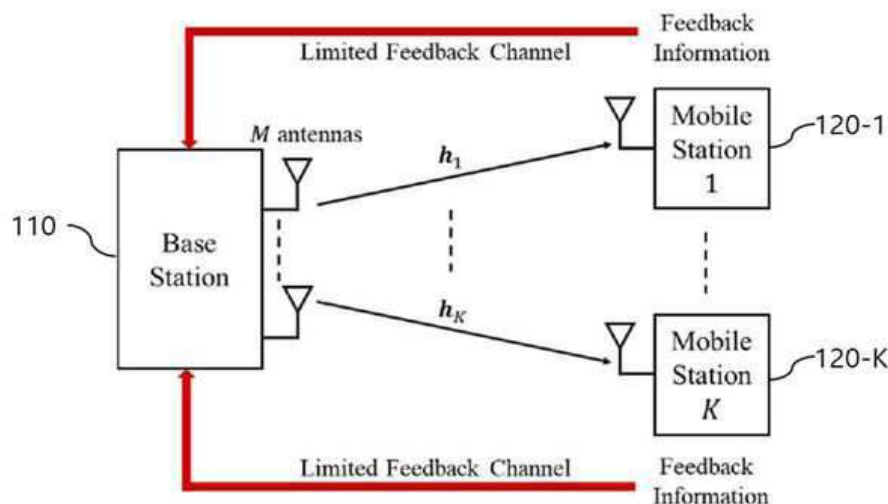
심사관 : 구영희

(54) 발명의 명칭 MU-MISO 시스템을 위한 것으로서 채널 오류에 강인한 WMMSE 빔포밍 매트릭스 설계 방법 및 장치

(57) 요약

본 발명은 MU-MISO 시스템을 위한 것으로 채널 오류에 강인한 WMMSE 빔포밍 매트릭스 설계 방법 및 장치에 관한 것이다. 본 발명의 일 실시 예에 따른 통신 시스템에서 기지국이 신호를 전송하는 방법은, 상기 기지국과 이동국 사이의 채널을 기초로 생성된 채널 피드백 정보를 상기 이동국으로부터 수신하는 단계, 상기 채널 피드백 정보를 이용하여 WSR(weighted sum rate)을 최대화하는 빔포밍 매트릭스를 결정하는 단계, 및 상기 빔포밍 매트릭스를 기반으로 상기 이동국으로 신호를 전송하는 단계를 포함하고, 상기 기지국과 이동국 사이의 채널은, 상기 채널 피드백 정보에 대응되는 제1 성분 및 양자화 오류(quantization error)에 대응되는 제2 성분으로 구성되고, 상기 빔포밍 매트릭스는 상기 양자화 오류에 대응되는 제2 성분을 기반으로 결정될 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H04B 7/0626 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711172980
과제번호	2022R1A5A1027646
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공학분야(S/ERC)
연구과제명	인지증강 메타통신 연구센터
기 여 율	1/1
과제수행기관명	고려대학교 산학협력단
연구기간	2022.06.01 ~ 2029.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

통신 시스템에서 기지국이 신호를 전송하는 방법에 있어서,
 상기 기지국과 이동국 사이의 채널을 기초로 생성된 채널 피드백 정보를 상기 이동국으로부터 수신하는 단계;
 상기 채널 피드백 정보를 이용하여 WSR(weighted sum rate)을 최대화하는 빔포밍 매트릭스를 결정하는 단계; 및
 상기 빔포밍 매트릭스를 기반으로 상기 이동국으로 신호를 전송하는 단계를 포함하고,
 상기 기지국과 이동국 사이의 채널은, 상기 채널 피드백 정보에 대응되는 제1 성분 및 양자화 오류(quantization error)에 대응되는 제2 성분으로 구성되고,
 상기 빔포밍 매트릭스는 상기 양자화 오류에 대응되는 제2 성분을 기반으로 결정되는 것을 특징으로 하는 방법
 에 있어서,
 상기 채널 피드백 정보는 상기 기지국과 상기 이동국 사이에서 미리 정의된 코드북을 기반으로 수신되며,
 상기 코드북은 랜덤 벡터 양자화(random vector quantization, RVQ)를 기초로 정의되어 상기 이동국이 채널 피드백을 위해 사용할 수 있는 비트 수 B 에 따라서 단위 길이를 가지는 2^B 개의 코드워드 $c_1, \dots, c_{2^B}$ 가 랜덤하게 생성되어 코드북을 구성하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 빔포밍 매트릭스를 결정하는 단계는,
 상기 기지국이 전송하는 신호 d_k 와 상기 d_k 에 대해 이동국에 의해 추정하는 신호 $\hat{d}_k$ 사이의 평균 제곱 오차(mean square error, MSE) $\mathcal{M}_k$ 를 계산하는 단계;
 상기 d_k 와 $\hat{d}_k$ 사이의 MSE를 최소화하는 수신 필터 파라미터 g_k^{MMSE} 를 계산하는 단계;
 상기 수신 필터 g_k^{MMSE} 를 기초로 d_k 와 $\hat{d}_k$ 사이의 최소 평균 제곱 오차(minimum mean square error, MMSE) $\mathcal{M}_k^{MMSE}$ 를 계산하는 단계; 및
 상기 $\mathcal{M}_k^{MMSE}$ 를 기초로 상기 빔포밍 매트릭스를 결정하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,
 상기 $\mathcal{M}_k$ 는 상기 채널 피드백 정보에 대응되는 제1 성분 및 상기 양자화 오류에 대응되는 제2 성분과 관련된 통계적 특징을 기반으로 계산되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 4

삭제

청구항 5

삭제

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 제1 성분의 진폭의 기대값 및 상기 제2 성분의 진폭의 기대값은, 상기 기지국의 안테나 개수 및 상기 채널 피드백 정보의 비트 수를 기초로 결정되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 제2 성분의 공분산 행렬은 상기 기지국의 안테나 개수를 기초로 결정되는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 기지국은 복수 개의 안테나를 가지고, 상기 이동국은 단일 안테나를 가지는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 9

통신 시스템에서 신호를 전송하는 기지국 장치에 있어서,

상기 기지국과 이동국 사이의 채널을 기초로 생성된 채널 피드백 정보를 상기 이동국으로부터 수신하는 수신부;

상기 채널 피드백 정보를 이용하여 WSR(weighted sum rate)을 최대화하는 빔포밍 매트릭스를 결정하는 제어부; 및

상기 빔포밍 매트릭스를 기반으로 상기 이동국으로 신호를 전송하는 송신부를 포함하고,

상기 기지국과 이동국 사이의 채널은, 상기 채널 피드백 정보에 대응되는 제1 성분 및 양자화 오류(quantization error)에 대응되는 제2 성분으로 구성되고,

상기 빔포밍 매트릭스는 상기 양자화 오류에 대응되는 제2 성분을 기반으로 결정되는 것을 특징으로 하는 기지국 장치에 있어서,

상기 채널 피드백 정보는 상기 기지국과 상기 이동국 사이에서 미리 정의된 코드북을 기반으로 수신되며,

상기 코드북은 랜덤 벡터 양자화(random vector quantization, RVQ)를 기초로 정의되어 상기 이동국이 채널 피드백을 위해 사용할 수 있는 비트 수 B 에 따라서 단위 길이를 가지는 2^B 개의 코드워드 $c_1, \dots, c_{2^B}$ 가 랜덤하게 생성되어 코드북을 구성하는 것을 특징으로 하는 기지국 장치.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 제어부는,

상기 기지국이 전송하는 신호 d_k 와 상기 d_k 에 대해 이동국에 의해 추정하는 신호 $\hat{d}_k$ 사이의 평균 제곱 오차(mean square error, MSE) $\mathcal{M}_k$ 를 계산하고,

상기 d_k 와 $\hat{d}_k$ 사이의 MSE를 최소화하는 수신 필터 파라미터 g_k^{MMSE} 를 계산하고,

상기 수신 필터 g_k^{MMSE} 를 기초로 d_k 와 $\hat{d}_k$ 사이의 최소 평균 제곱 오차(minimum mean square error, MMSE) $\mathcal{M}_k^{MMSE}$ 를 계산하고,

상기 $\mathcal{M}_k^{MMSE}$ 를 기초로 상기 빔포밍 매트릭스를 결정하는 것을 특징으로 하는 기지국 장치.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 $\mathcal{M}_k$ 는 상기 채널 피드백 정보에 대응되는 제1 성분 및 상기 양자화 오류에 대응되는 제2 성분과 관련된 통계적 특징을 기반으로 계산되는 것을 특징으로 하는 기지국 장치.

청구항 12

삭제

청구항 13

삭제

청구항 14

제9항에 있어서,

상기 제1 성분의 진폭의 기대값 및 상기 제2 성분의 진폭의 기대값은, 상기 기지국의 안테나 개수 및 상기 채널 피드백 정보의 비트 수를 기초로 결정되는 것을 특징으로 하는 기지국 장치.

청구항 15

제9항에 있어서,

상기 제2 성분의 공분산 행렬은 상기 기지국의 안테나 개수를 기초로 결정되는 것을 특징으로 하는 기지국 장치.

청구항 16

제9항에 있어서,

상기 기지국은 복수 개의 안테나를 가지고, 상기 이동국은 단일 안테나를 가지는 것을 특징으로 하는 기지국 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 무선 통신 시스템에서 빔포밍 매트릭스 설계 방법 및 장치에 관한 것이며, 보다 상세하게는 MU-MISO(Multiuser multiple-input single-output) 시스템을 위한 것으로서 채널 오류에 강인한 WMMSE(Weighted Minimum Mean Square Error) 빔포밍 매트릭스 설계 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 무선 통신 시스템의 시스템 처리량 성능 개선을 위해 다중 사용자(Multiuser, MU) MIMO(multiple-input multiple-output) 또는 다중 사용자 MISO(multiple-input single-output) 기법이 논의되어 왔다. 만약 송신단에서 송신단과 수신단 간의 채널 상태를 나타내는 채널 상태 정보(channel state information, CSI)를 완벽하게 파악할 수 있는 경우, 적절히 설계된 빔포밍 기법에 의해서 시스템의 sum rate는 최대화될 수 있다. 특히 가중 최소 평균 제곱 오차(Weighted Minimum Mean Square Error, WMMSE) 빔포밍은 다중 사용자 시스템의 sum rate에 대한 국소 최적 솔루션을 제공할 수 있는 우수한 알고리즘으로 알려져 있다. 그러나 실제 무선 통신에 있어서 빔포밍 설계의 성능은 채널 불확실성이 존재할 때, 심각하게 저하된다. 따라서, 실제 무선 통신을 구현함에 있어서는 채널 불확실성이 존재하는 상황에서 우수한 성능을 보장할 수 있도록 빔포밍 알고리즘을 설계하는 것이 필요하다. 특히, 주파수 분할 듀플렉스(frequency division duplex, FDD) 기반 다중 사용자 시스템의 경우 채널 불확실성은 주로 제한된 피드백 절차의 정량화 오류에서 비롯된다. 따라서, 이러한 제한된 피드백 절차의 정량화 오류에서 비롯되는 채널 불확실성을 보상할 수 있도록 빔포밍 기법이 설계될 필요가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0003] (특허문헌 0001) 한국공개특허공보 10-2022-0029039 (2022.03.08. 공개)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명은 다중 사용자(Multi-User) MISO (multiple-input single-output) 시스템에서 sum rate를 최대화하기 위해 제한된 피드백 절차의 정량화 오류에서 비롯되는 채널 불확실성을 보상할 수 있는 채널 오류에 강인한 WMMSE 빔포밍 매트릭스 설계 방법을 제안한다.

과제의 해결 수단

[0005] 전술한 기술적 과제를 달성하기 위한 본 발명의 일 실시 예에 따른 통신 시스템에서 기지국이 신호를 전송하는 방법은, 상기 기지국과 이동국 사이의 채널을 기초로 생성된 채널 피드백 정보를 상기 이동국으로부터 수신하는 단계, 상기 채널 피드백 정보를 이용하여 WSR(weighted sum rate)을 최대화하는 빔포밍 매트릭스를 결정하는 단계, 및 상기 빔포밍 매트릭스를 기반으로 상기 이동국으로 신호를 전송하는 단계를 포함하고, 상기 기지국과 이동국 사이의 채널은, 상기 채널 피드백 정보에 대응되는 제1 성분 및 양자화 오류(quantization error)에 대응되는 제2 성분으로 구성되고, 상기 빔포밍 매트릭스는 상기 양자화 오류에 대응되는 제2 성분을 기반으로 결정된다.

[0006] 또한, 본 발명의 일 실시 예에 따른 통신 시스템에서 신호를 전송하는 기지국 장치는, 상기 기지국과 이동국 사이의 채널을 기초로 생성된 채널 피드백 정보를 상기 이동국으로부터 수신하는 수신부, 상기 채널 피드백 정보를 이용하여 WSR(weighted sum rate)을 최대화하는 빔포밍 매트릭스를 결정하는 제어부, 및 상기 빔포밍 매트릭스를 기반으로 상기 이동국으로 신호를 전송하는 송신부를 포함하고, 상기 기지국과 이동국 사이의 채널은, 상기 채널 피드백 정보에 대응되는 제1 성분 및 양자화 오류(quantization error)에 대응되는 제2 성분으로 구성되고, 상기 빔포밍 매트릭스는 상기 양자화 오류에 대응되는 제2 성분을 기반으로 결정된다.

발명의 효과

[0007] 본 발명은 제한된 피드백 통신 시스템에서 사용되는 기존의 빔포밍 기법과 비교해서 높은 Sum-rate 성능을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0008] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 따른 다중 사용자 MISO(Multiuser multiple-input single-output, MU-MISO) 기반의 무선 통신 시스템을 나타낸 도면이다.

도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 제한된 피드백 시스템에서 실제 채널과 피드백 되는 채널 사이의 양자화 오류(quantization error)를 나타내는 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 기지국의 동작을 나타낸 순서도이다.

도 4는 본 발명의 일 실시 예에 따른 기지국이 빔포밍 매트릭스를 결정하는 방법을 나타낸 순서도이다.

도 5는 본 발명의 일 실시 예에 따른 기지국 장치의 구성을 나타낸 도면이다.

도 6은 본 발명의 일 실시 예에 따른 WMMSE 빔포밍 알고리즘의 에르고딕 수렴(ergodic convergence)을 나타낸 도면이다.

도 7은 본 발명의 일 실시 예에 따른 RWMSE 빔포밍 알고리즘과 기존 빔포밍 알고리즘의 sum rate 성능 비교의 일 예시를 나타낸 도면이다.

도 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 RWMSE 빔포밍 알고리즘과 기존 빔포밍 알고리즘의 sum rate 성능 비교의 다른 일 예시를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0009] 이하, 본 발명의 실시 예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

- [0010] 실시 예를 설명함에 있어서 본 발명이 속하는 기술 분야에 익히 알려져 있고 본 발명과 직접적으로 관련이 없는 기술 내용에 대해서는 설명을 생략한다. 이는 불필요한 설명을 생략함으로써 본 발명의 요지를 흐리지 않고 더욱 명확히 전달하기 위함이다.
- [0011] 마찬가지로 이유로 첨부된 도면에 있어서 일부 구성요소는 과장되거나 생략되거나 개략적으로 도시되었다. 또한, 각 구성요소의 크기는 실제 크기를 전적으로 반영하는 것이 아니다. 각 도면에서 동일한 또는 대응하는 구성 요소에는 동일한 참조 번호를 부여하였다.
- [0012] 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시 예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시 예들에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 단지 본 실시 예들은 본 발명의 개시가 완전하도록 하고, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 개시의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다. 명세서 전체에 걸쳐 동일 참조 부호는 동일 구성 요소를 지칭한다. 또한 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단된 경우 그 상세한 설명은 생략한다. 그리고 후술되는 용어들은 본 발명에서의 기능을 고려하여 정의된 용어들로서 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 그 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.
- [0013] 이하, 기지국은 이동국의 자원할당을 수행하는 주체로서, gNode B (gNB), eNode B (eNB), Node B, BS (Base Station), 무선 접속 유닛, 기지국 제어기, 또는 네트워크 상의 노드 중 적어도 하나일 수 있다. 이동국은 사용자 단말(UE: User Equipment), MS (Mobile Station), 셀룰러폰, 스마트폰, 컴퓨터, 또는 통신기능을 수행할 수 있는 멀티미디어시스템을 포함할 수 있다. 본 발명에서 하향링크(DL: Downlink)는 기지국이 이동국에게 전송하는 신호의 무선 전송경로이고, 상향링크는(UL: Uplink)는 이동국이 기국에게 전송하는 신호의 무선 전송경로를 의미한다. 또한, 이하에서 LTE (Long-Term Evolution) 또는 LTE-A (LTE-advanced) 시스템을 일례로서 설명할 수도 있지만, 유사한 기술적 배경 또는 채널형태를 갖는 여타의 통신시스템에도 본 발명의 실시 예가 적용될 수 있다. 예를 들어 LTE-A 이후에 개발되는 5세대 이동통신 기술(5G, new radio, NR)이 이에 포함될 수 있으며, 이하의 5G는 기존의 LTE, LTE-A 및 유사한 다른 서비스를 포함하는 개념일 수도 있다. 또한, 본 발명은 숙련된 기술적 지식을 가진 자의 판단으로써 본 발명의 범위를 크게 벗어나지 아니하는 범위에서 일부 변형을 통해 다른 통신시스템에도 적용될 수 있다.
- [0014] 이때, 처리 흐름도 도면들의 각 블록과 흐름도 도면들의 조합들은 컴퓨터 프로그램 인스트럭션들에 의해 수행될 수 있음을 이해할 수 있을 것이다. 이들 컴퓨터 프로그램 인스트럭션들은 범용 컴퓨터, 특수용 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비의 프로세서에 탑재될 수 있으므로, 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비의 프로세서를 통해 수행되는 그 인스트럭션들이 흐름도 블록(들)에서 설명된 기능들을 수행하는 수단을 생성하게 된다. 이들 컴퓨터 프로그램 인스트럭션들은 특정 방식으로 기능을 구현하기 위해 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비를 지향할 수 있는 컴퓨터 이용 가능 또는 컴퓨터 판독 가능 메모리에 저장되는 것도 가능하므로, 그 컴퓨터 이용가능 또는 컴퓨터 판독 가능 메모리에 저장된 인스트럭션들은 흐름도 블록(들)에서 설명된 기능을 수행하는 인스트럭션 수단을 내포하는 제조 품목을 생산하는 것도 가능하다. 컴퓨터 프로그램 인스트럭션들은 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비 상에 탑재되는 것도 가능하므로, 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비 상에서 일련의 동작 단계들이 수행되어 컴퓨터로 실행되는 프로세스를 생성해서 컴퓨터 또는 기타 프로그램 가능한 데이터 프로세싱 장비를 수행하는 인스트럭션들은 흐름도 블록(들)에서 설명된 기능들을 실행하기 위한 단계들을 제공하는 것도 가능하다.
- [0015] 또한, 각 블록은 특정된 논리적 기능(들)을 실행하기 위한 하나 이상의 실행 가능한 인스트럭션들을 포함하는 모듈, 세그먼트 또는 코드의 일부를 나타낼 수 있다. 또, 몇 가지 대체 실행 예들에서는 블록들에서 언급된 기능들이 순서를 벗어나서 발생하는 것도 가능함을 주목해야 한다. 예를 들면, 잇달아 도시되어 있는 두 개의 블록들은 사실 실질적으로 동시에 수행되는 것도 가능하고 또는 그 블록들이 때때로 해당하는 기능에 따라 역순으로 수행되는 것도 가능하다.
- [0016] 이때, 본 실시 예에서 사용되는 '~부'라는 용어는 소프트웨어 또는 FPGA(field Programmable Gate Array) 또는 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)과 같은 하드웨어 구성요소를 의미하며, '~부'는 어떤 역할들을 수행한다. 그렇지만 '~부'는 소프트웨어 또는 하드웨어에 한정되는 의미는 아니다. '~부'는 어드레싱할 수 있는 저장 매체에 있도록 구성될 수도 있고 하나 또는 그 이상의 프로세서들을 재생시키도록 구성될 수도 있다.

따라서, 일 예로서 '~부'는 소프트웨어 구성요소들, 객체지향 소프트웨어 구성요소들, 클래스 구성요소들 및 태스크 구성요소들과 같은 구성요소들과, 프로세스들, 함수들, 속성들, 프로시저들, 서브루틴들, 프로그램 코드의 세그먼트들, 드라이버들, 펌웨어, 마이크로코드, 회로, 데이터, 데이터베이스, 데이터 구조들, 테이블들, 어레이들, 및 변수들을 포함한다. 구성요소들과 '~부'들 안에서 제공되는 기능은 더 작은 수의 구성요소들 및 '~부'들로 결합되거나 추가적인 구성요소들과 '~부'들로 더 분리될 수 있다. 뿐만 아니라, 구성요소들 및 '~부'들은 디바이스 또는 보안 멀티미디어카드 내의 하나 또는 그 이상의 CPU (central processing unit)들을 재생시키도록 구현될 수도 있다. 또한 실시 예에서 '~부'는 하나 이상의 프로세서를 포함할 수 있다.

[0018] 이하에서는 본 발명의 실시 예들에 대해 도면들을 참고하여 설명하기로 한다.

[0019] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 따른 다중 사용자 MISO(Multiuser multiple-input single-output, MU-MISO) 기반의 무선 통신 시스템을 나타낸 도면이다.

[0020] 도 1을 참조하면 본 발명의 일 실시 예에 따른 MU-MISO 시스템은 M 개의 안테나를 가지는 기지국(base station, BS)(110), 그리고 단일 안테나를 가지는 K($\leq M$) 개의 이동국(mobile station, MS)(120-1, ..., 120-K)을 포함할 수 있다. 기지국(110)과 k 번째 이동국 사이의 플랫 페이딩 채널은 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 로 나타낼 수 있다. $\mathbb{C}$ 는 복소수 집합을 나타내며, 도 1의 예시에서 M 개의 안테나를 가지는 기지국(110)과 단일 안테나를 가지는 이동국 사이의 채널은 각각의 엘리먼트가 복소수 값을 가지는 $M \times 1$ 벡터로 표현될 수 있다.

[0021] 이하 본 발명을 설명함에 있어서 별도로 정의하지 않는 경우 "기지국"은 M 개의 안테나를 가지고 단일 안테나를 가지는 K 개의 이동국(120-1, ..., 120-K)과 통신을 수행하는 기지국(110)을 의미한다. 또한, 이하 본 발명을 설명함에 있어서 별도로 정의하지 않는 경우 "이동국"은 k 번째 이동국을 전제로 해당 k 번째 이동국과 관련된 파라미터를 이용하여 설명할 것이나, 일반성을 잃지 않고 k=1, 2, ..., K에 해당하는 시스템 내 임의의 이동국에 대하여 본 발명의 설명이 동일하게 적용될 수 있음에 유의한다.

[0022] 도 1에 도시된 통신 시스템에서, 기지국은 K개의 이동국(120-1, ..., 120-K)에게 전송하고자 하는 신호에 빔포밍 기법을 적용하여 신호를 전송할 수 있다. 이하 본 발명의 설명에서 기지국이 전송하고자 하는 신호를 $\mathbf{d} = [\mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_K]^T$ 로 나타내고, 빔포밍 기법을 적용하기 위한 빔포밍 매트릭스를 $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_K]$ 로 나타낸다. 이 경우 실제 기지국(110)이 전송하는 신호 $\mathbf{x}$ 는 [수학식 1]과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 1

$$\mathbf{x} = \sum_{j=1}^K \mathbf{p}_j \mathbf{d}_j$$

[0023]

[0024] [수학식 1]을 통해 실제 기지국이 전송한 신호 $\mathbf{x}$ 는, 기지국과 이동국 사이의 채널 $\mathbf{h}_k$ 를 거쳐 노이즈(noise) $\mathbf{n}_k$ 와 함께 각 이동국에서 수신될 수 있다. 따라서, k 번째 이동국에서 수신되는 신호 $\mathbf{y}_k$ 는 아래 [수학식 2]와 같이 나타낼 수 있다. [수학식 2]에서 $\mathbf{h}_k^H$ 는 채널 $\mathbf{h}_k$ 의 에르미트 행렬(Hermitian matrix)을 나타내며, $\mathbf{h}_k$ 에서 행과 열의 성분을 교환하여 얻어지는 전치 행렬(transpose matrix)을 취한 뒤 성분 별 켄레(conjugate) 복소수를 취하여 얻어지는 행렬을 나타낸다. 이하 본 발명의 설명에서 별도로 정의하지 않는 한 임의의 행렬 또는 벡터 $\mathbf{A}$ 에 대해 $\mathbf{A}^H$ 는 $\mathbf{A}$ 의 에르미트 행렬(Hermitian matrix)을 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}_k^H \sum_{j=1}^K \mathbf{p}_j \mathbf{d}_j + \mathbf{n}_k$$

[0025]

[0026] 이동국은 수신된 신호 y_k 에 수신 필터 g_k 를 적용하여 실제 기지국이 전송하고자 했던 신호를 추정할 수 있다. 따라서, 기지국이 이동국에게 전송하고자 하는 신호 d_k 에 대해 이동국에 의해 추정되는 신호 $\hat{d}_k$ 는 아래 [수학식 3]과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 3

[0027]

$$\hat{d}_k = g_k(h_k^H \sum_{j=1}^K p_j d_j + n_k)$$

[0028] 한편 기지국이 전송한 신호에 대한 k 번째 이동국의 데이터 레이트(data rate) R_k 는 아래 [수학식 4]과 같이 정의될 수 있다. [수학식 4]에서 σ_n^2 은 노이즈 성분의 제곱값을 나타낸다.

수학식 4

[0029]

$$R_k = \log_2 \left(1 + \frac{|h_k^H p_k|^2}{\sum_{j \neq k}^K |h_k^H p_j|^2 + \sigma_n^2} \right)$$

[0030] k 번째 이동국에 대한 가중치를 μ_k 로 나타냈을 때, 시스템을 구성하는 K 개의 이동국의 데이터 레이트의 가중합(weighted sum-rate, WSR)은 아래 [수학식 5]와 같이 정의될 수 있다.

수학식 5

[0031]

$$\max_p \sum_{k=1}^K \mu_k R_k$$

[0032]

$$\text{s. t } \text{Tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq \rho$$

[0033] [수학식 5]에서 $\text{Tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq \rho$ 는 기지국의 전송 전력의 제한을 고려한 제약 조건을 나타낸다. μ_k 는 k 번째 이동국에 대한 가중치이며, R_k 는 [수학식 4]를 통해 정의되는 k 번째 이동국의 데이터 레이트(data rate)를 나타낸다. $\text{Tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H)$ 는 $\mathbf{P}\mathbf{P}^H$ 의 주 대각선(main diagonal) 성분의 합으로 정의되는 함수이다. 이하 본 발명의 설명에서 별도로 정의하지 않는 한 임의의 행렬 또는 벡터 $\mathbf{A}$ 에 대하여 $\text{Tr}(\mathbf{A})$ 는 $\mathbf{A}$ 의 주 대각선 성분의 합으로 정의되는 함수를 나타낸다.

[0034] 이하 본 발명의 설명에서는, [수학식 5]를 통해 정의되는 시스템을 구성하는 이동국들의 WSR을 최대화하는 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_K]$ 를 결정하는 방법이 개시된다. 이 때, [수학식 5]를 이용하여 WSR을 최대화하는 최적해(optimal solution)의 조건인 $\mathbf{P}$ 를 찾는 최적화 문제는 NP-난해(NP-hard) 문제인데, [수학식 5]를 통해 정의되는 목적 함수는 아래 [수학식 6]을 통해 정의되는 목적 함수와 $\mathbf{P}$ 에 대한 기울기(gradient)가 동일하며, 따라서 동일한 조건에서 최적해를 가지는 것이 알려져 있다.

수학식 6

[0035]

$$\min_p \text{Tr}(\mathbf{W}\mathbf{M})$$

- [0036] $s. t \text{ Tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq \rho$
- [0037] [수학식 6]에서 $\mathcal{M}$ 은 최소 평균 제곱 오차(Minimum Mean Square Error, MMSE) 매트릭스로, $\mathcal{M} = \text{diag}\{\mathcal{M}_1^{\text{MMSE}}, \dots, \mathcal{M}_K^{\text{MMSE}}\}$ 와 같이 정의되며 각 $\mathcal{M}_k^{\text{MMSE}}$ 는 기지국이 k 번째 이동국에게 전송하고자 하는 신호 $\mathbf{d}_k$ 와 k 번째 이동국이 추정하는 신호 $\hat{\mathbf{d}}_k$ 사이의 평균 제곱 오차(Mean Square Error, MSE) $\mathcal{M}_k = \mathbb{E}\{(\mathbf{d}_k - \hat{\mathbf{d}}_k)(\mathbf{d}_k - \hat{\mathbf{d}}_k)^H\}$ 의 최소값을 나타낸다. $\mathbf{W} = \text{diag}\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K\}, \mathbf{w}_k = \mu_k / \mathcal{M}_k^{\text{MMSE}}$ 는 이동국 별 가중치 μ_k 가 반영된 가중치 매트릭스(weight matrix)이다.
- [0038] 앞서 설명한 바와 같이 [수학식 6]은 [수학식 5]와 동일한 조건에서 최적해를 가지는 것이 알려져 있으며, 따라서 [수학식 5]에서 WSR을 최대화하는 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 를 찾는 것은, $\mathbf{d}$ 와 $\hat{\mathbf{d}}$ 사이의 가중 MMSE(weighted MMSE, WMMSE)를 통해 정의되는 [수학식 6]에서 최적해를 가지는 조건인 $\mathbf{P}$ 를 찾는으로써 달성될 수 있다.
- [0039] 기지국이 전송하고자 하는 신호 $\mathbf{d}_k$ 에 대해 이동국에서 추정하는 신호 $\hat{\mathbf{d}}_k$ 는 [수학식 3]과 같이 기지국과 이동국 사이의 채널 $\mathbf{h}_k$ 에 의존한다. [수학식 6]은 $\mathbf{d}$ 와 $\hat{\mathbf{d}}$ 사이의 WMMSE를 통해 정의되며, 따라서 [수학식 6]의 최적해를 가지는 $\mathbf{P}$ 를 찾기 위해서, 기지국은 기지국과 이동국 사이의 채널 상태를 가능한 정확하게 파악할 필요가 있다.
- [0040] 그러나 일반적으로 기지국이 이동국으로 신호를 전송하는 채널에 대한 정확한 채널 상태는 기지국으로부터 신호를 수신하여 실제 채널을 측정하는 이동국에서만 파악할 수 있다. 이동국은 채널을 측정한 후 채널 상태 정보(channel state information)를 통해 기지국으로 채널 상태를 피드백 하며, 기지국은 이동국으로부터 피드백 되는 채널 상태 정보를 기초로 기지국과 이동국 사이의 채널을 파악할 수 있다. 그런데 실제 기지국과 이동국 사이에서 존재 가능한 채널 상태는 무수히 많은 반면, 이동국이 기지국으로 채널 상태를 피드백하기 위해 사용할 수 있는 비트 수는 제한되어 있기 때문에, 이동국이 기지국과 이동국 사이에서 존재 가능한 모든 채널 상태를 고려하여 정확한 채널 상태 정보를 피드백 하기에는 한계가 있다.
- [0041] 따라서, 본 발명에서는 이동국과 기지국 사이에서 미리 유한한 개수의 채널 상태를 정의해두고, 해당 미리 정의된 채널 상태들 중에서 하나를 선택하여 피드백하는 코드북 기반의 채널 피드백을 고려한다. 이를 제한된 피드백이라고 한다.
- [0042] 본 발명의 설명에서 이동국과 기지국 사이에서 미리 정의된 유한한 개수의 채널 상태 각각을 코드워드(codeword)라고 하며, 코드북(codebook)은 미리 정의된 코드워드들의 집합을 의미한다. 제한된 피드백 기반 시스템에서, 기지국과 이동국은 코드북 및 해당 코드북을 구성하는 코드워드를 미리 약속해두고, 이동국은 미리 정의된 코드워드들 중에서 실제 측정된 채널 상태와 가장 유사한 채널 상태를 나타내는 코드워드를 선택하여 기지국으로 피드백 할 수 있다. 이처럼 채널 상태를 피드백하기 위해 미리 약속된 코드워드들 중 하나를 선택하는 과정을 양자화(quantization)라고 한다.
- [0043] 이동국과 기지국은 미리 정의된 코드북 $\mathbf{C} = \{\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_{2^B}\}$ 을 알고 있다고 가정한다. 본 발명의 설명에서 코드북을 구성하는 코드워드 $\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_{2^B}$ 각각은 채널 상태를 나타내기 위한 단위 길이(unit norm)를 가지는 벡터로 정의된다. $\mathbf{B}$ 는 이동국이 기지국으로 채널 상태를 피드백하기 위해 사용하는 비트 수를 나타내며, 이동국은 $\mathbf{B}$ 비트를 이용해 2^B 개의 코드워드 중 하나를 선택하여 기지국에 피드백 할 수 있다. 일 예로, $\mathbf{B}$ 의 값이 3인 경우(즉, 이동국이 3 비트를 이용해 기지국에 채널 상태를 피드백하는 경우), 비트 값 "000"은 $\mathbf{c}_1$ 에 대응되고, 비트 값 "001"은 $\mathbf{c}_2$ 에 대응되고, ..., 비트 값 111은 $\mathbf{c}_{2^3}$ 에 대응되도록 사전에 정의될 수 있다. 다른 예로, $\mathbf{B}$ 의 값이 5인 경우(즉, 이동국이 5 비트를 이용해 기지국에 채널 상태를 피드백하는 경우), 비트 값 "00000"은 $\mathbf{c}_1$ 에 대응되고, 비트 값 "00001"은 $\mathbf{c}_2$ 에 대응되고, ..., 비트 값 11111은 $\mathbf{c}_{2^5}$ 에 대응되도록 사전에 정의될 수 있다.

[0044] 이동국은 기지국과 이동국 사이 하향링크의 채널 상태를 측정한 이후에, 미리 정의된 코드북 $\mathbf{C}$ 를 구성하는 코드워드 $\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_{2^B}$ 중에서 실제 측정된 채널 $\mathbf{h}_k$ 와 가장 유사한 채널 상태를 나타내는 코드워드 $\mathbf{c}_{i_k}$ 를 결정하고, 결정된 $\mathbf{c}_{i_k}$ 에 대응되는 비트 값을 기지국에 피드백 할 수 있다.

[0045] 본 발명의 실시 예에서 각 코드워드 $\mathbf{c}_j$ 는 단위 길이를 가지며 따라서 방향을 통해서 정의되는 벡터이므로, 이동국은 채널 $\mathbf{h}_k$ 와 가장 유사한 방향을 가지는 $\mathbf{c}_j$ 가 선택되도록 $\mathbf{h}_k$ 와 $\mathbf{c}_j$ 의 내적을 이용하여 [수학식 7]을 통해 i_k 를 결정할 수 있다.

수학식 7

$$[0046] \quad i_k = \underset{j=1, \dots, 2^B}{\operatorname{argmax}} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{c}_j|^2$$

[0047] 한편, 앞서 설명한 바와 같이 실제 기지국과 이동국 사이에서는 무수히 많은 채널 상태가 존재할 수 있는 반면, 이동국에서 기지국으로 피드백하는 정보는 미리 약속된 유한한 개수의 코드워드 중 하나로서 선택된 정보이기 때문에 정확한 채널 상태를 나타내지 못한다. 따라서 실제 채널과 코드워드를 통해 양자화되어 피드백 되는 채널 사이에는 일정 오차가 존재할 수 있다. 이를 양자화 오류(quantization error)라고 한다. 기존에 사용되는 빔포밍 기법의 경우, 이동국으로부터 피드백 되는 채널에 기반하여 빔포밍 매트릭스를 설계하기 때문에, 실제 채널과 피드백 되는 채널 사이에 존재하는 양자화 오류를 충분히 보상해주지 못하는 문제가 있다.

[0048] 도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 제한된 피드백 시스템에서 실제 채널과 피드백 되는 채널 사이의 양자화 오류(quantization error)를 나타내는 도면이다.

[0049] 도 2를 참조하면, 제한된 피드백 기반 시스템에서는 실제 채널 $\mathbf{h}_k$ 와 피드백 되는 채널 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 사이에는 양자화 오류가 존재하며, 따라서 실제 채널 $\mathbf{h}_k$ 는 도 2에 도시된 바와 같이 피드백 되는 코드워드의 방향을 가지는 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 성분과, $\hat{\mathbf{h}}_k$ 와 직교(orthogonal)하는 방향을 가지는 양자화 오류 $\mathbf{s}_k$ 성분으로 분할될 수 있다. 이를 수학식으로 나타내면 [수학식 8]과 같다. [수학식 8]에서 α_k 는 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 성분의 진폭(amplitude)을 나타내며, β_k 는 $\mathbf{s}_k$ 성분의 진폭을 나타낸다.

수학식 8

$$[0050] \quad \mathbf{h}_k = \sqrt{1 - z_k} \hat{\mathbf{h}}_k + \sqrt{z_k} \mathbf{s}_k$$

$$[0051] \quad = \alpha_k \hat{\mathbf{h}}_k + \beta_k \mathbf{s}_k$$

$$[0052] \quad \text{where } z_k = 1 - |\mathbf{h}_k^H \hat{\mathbf{h}}_k|^2$$

[0053] 기존에 사용되는 빔포밍 기법의 경우 이동국으로부터 코드워드를 통해 피드백 되는 채널 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 에 기반하여 빔포밍 매트릭스를 설계함에 따라 양자화 오류 $\mathbf{s}_k$ 성분을 충분히 보상해주지 못하며 따라서 빔포밍 성능에 한계가 존재한다. 본 발명은 양자화 오류 성분 $\mathbf{s}_k$ 를 보상함으로써 기존 기술 대비 개선된 성능을 가지는 채널 오류에 강한 WMMSE 빔포밍 매트릭스 설계 방법을 제안한다.

[0054] 이를 위해, 본 발명은 코드북을 정의하는 방법으로 랜덤 벡터 양자화(random vector quantization, RVQ) 기반의 코드북을 고려한다. RVQ는 코드북을 구성하는 코드워드를 랜덤하게 생성하여 코드북을 정의하는 방법으로, RVQ에 따르면 이동국이 채널 피드백을 위해 사용할 수 있는 비트 수 B 에 따라서 단위 길이를 가지는 2^B 개의 코

트워드 $\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_2^B$ 가 랜덤하게 생성되어 코드북 $\mathbf{C}$ 를 구성할 수 있다.

[0055] 이처럼 RVQ를 기반으로 코드북을 정의할 경우 [수학식 8]에서 $\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}$ 성분의 진폭 $\alpha_{\mathbf{k}}$ 및 $\mathbf{s}_{\mathbf{k}}$ 성분의 진폭 (amplitude) $\beta_{\mathbf{k}}$ 는 아래 [수학식 9]와 같은 통계적 특징을 가진다.

수학식 9

[0056]
$$\alpha = \sqrt{\mathbb{E}\{\alpha_{\mathbf{k}}\}} = \sqrt{M - (M - 1)\delta}$$

[0057]
$$\beta = \sqrt{\mathbb{E}\{\beta_{\mathbf{k}}\}} = \sqrt{(M - 1)\delta}$$

[0058] [수학식 9]에서 δ 는 기지국의 안테나 개수 M 및 채널 피드백 비트 수 B 에 의존하는 파라미터로, $\delta = 2^{-B/(M-1)}$ 와 같이 정의된다.

[0059] 마찬가지로, RVQ를 기반으로 코드북을 정의할 경우 양자화 오류 $\mathbf{s}_{\mathbf{k}}$ 의 공분산 행렬은 아래 [수학식 10]과 같은 통계적 특징을 가진다.

수학식 10

[0060]
$$\mathbb{E}\{\mathbf{s}_{\mathbf{k}}\mathbf{s}_{\mathbf{k}}^H\} = \frac{1}{M - 1} (\mathbf{I}_M - \hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}^H)$$

[0061] RVQ를 기반으로 정의된 코드북의 통계적 특징인 [수학식 9] 및 [수학식 10]을 이용하면, $\mathbf{d}_{\mathbf{k}}$ 와 $\hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{k}}$ 의 평균 제곱 오차(MSE)로 정의되는 $\mathcal{M}_{\mathbf{k}}$ 는 아래 [수학식 11]과 같이 표현할 수 있다.

수학식 11

[0062]
$$\mathcal{M}_{\mathbf{k}} = \mathbb{E}\{(\mathbf{d}_{\mathbf{k}} - \hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{k}})(\mathbf{d}_{\mathbf{k}} - \hat{\mathbf{d}}_{\mathbf{k}})^H\}$$

[0063]
$$= \alpha^2 \mathbb{E}\{\mathbf{g}_{\mathbf{k}}\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}^H\mathbf{P}\mathbf{P}^H\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^H\} + \beta^2\{\mathbf{g}_{\mathbf{k}}\mathbf{s}_{\mathbf{k}}^H\mathbf{P}\mathbf{P}^H\mathbf{s}_{\mathbf{k}}\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^H\} - \alpha\mathbf{p}_{\mathbf{k}}^H\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^H - \alpha\mathbf{g}_{\mathbf{k}}\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}\mathbf{p}_{\mathbf{k}} + \sigma_n^2\mathbf{g}_{\mathbf{k}}\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^H + 1$$

[0064]
$$= M(1 - \delta)\mathbf{g}_{\mathbf{k}}\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}^H\mathbf{P}\mathbf{P}^H\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^H - \alpha\mathbf{p}_{\mathbf{k}}^H\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^H - \alpha\mathbf{g}_{\mathbf{k}}\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}\mathbf{p}_{\mathbf{k}} + (\delta\rho + \sigma_n^2)\mathbf{g}_{\mathbf{k}}\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^H + 1$$

[0065] $\mathcal{M}_{\mathbf{k}}$ 를 최소화하는 수신 필터 $\mathbf{g}_{\mathbf{k}}$ 값을 찾기 위해 [수학식 11]을 $\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^*$ 로 미분하여 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{g}_{\mathbf{k}}^*}\mathcal{M}_{\mathbf{k}} = 0$ 을 만족하는 $\mathbf{g}_{\mathbf{k}}$ 값을 계산하면, $\mathcal{M}_{\mathbf{k}}$ 를 최소화하는 수신 필터 $\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^{\text{MMSE}}$ 는 [수학식 12]와 같이 계산될 수 있다.

수학식 12

[0066]
$$\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^{\text{MMSE}} = \alpha\mathbf{p}_{\mathbf{k}}^H\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}(M(1 - \delta)\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}}^H\mathbf{P}\mathbf{P}^H\hat{\mathbf{h}}_{\mathbf{k}} + \delta\rho + \sigma_n^2)^{-1}$$

[0067] [수학식 12]를 통해 계산된 수신 필터 $\mathbf{g}_{\mathbf{k}}^{\text{MMSE}}$ 를 [수학식 11]에 대입하면 $\mathcal{M}_{\mathbf{k}}$ 의 최소값 $\mathcal{M}_{\mathbf{k}}^{\text{MMSE}}$ 는 [수학식 13]과 같이 계산될 수 있다.

수학식 13

[0068]
$$\mathcal{M}_k^{\text{MMSE}} = 1 - \alpha^2 \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{P} \mathbf{P}^H \hat{\mathbf{h}}_k (M(1 - \delta) \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{P} \mathbf{P}^H \hat{\mathbf{h}}_k + \delta \rho + \sigma_n^2)^{-1}$$

[0069] 이 때 [수학식 11]에 나타난 바와 같이 $\mathbf{d}_k$ 와 $\hat{\mathbf{d}}_k$ 의 MSE를 나타내는 $\mathcal{M}_k$ 는 양자화 오류 $\mathbf{s}_k$ 성분을 포함하며, $\mathcal{M}_k$ 계산 및 그에 따른 $\mathbf{g}_k^{\text{MMSE}}$, $\mathcal{M}_k^{\text{MMSE}}$ 계산에 있어서 [수학식 10]을 통해 설명한 $\mathbf{s}_k$ 의 공분산 행렬에 대한 통계적 특징이 반영된 것을 알 수 있다. 즉, 본 발명에서 제안하는 채널 오류에 강인한 WMMSE(이하에서는 RWMMS로 약칭함) 기법에 따르면, 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 를 찾기 위해 사용하는 파라미터는 양자화 오류 $\mathbf{s}_k$ 성분을 보상할 수 있도록 설계되었으며, 따라서 기존 빔포밍 기법과 비교할 때 개선된 빔포밍 성능을 가질 수 있도록 설계되었음을 알 수 있다.

[0070] 이상 설명을 통해 [수학식 6]을 구성하는 파라미터 $\mathcal{M} = \text{diag}\{\mathcal{M}_1^{\text{MMSE}}, \dots, \mathcal{M}_K^{\text{MMSE}}\}$ 및 $\mathbf{W} = \text{diag}\{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K\}$, $\mathbf{w}_k = \mu_k / \mathcal{M}_k^{\text{MMSE}}$ 가 정의되었으며, 이를 기반으로 본 발명은 [수학식 6]의 최적해를 가지는 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 를 찾기 위해 [수학식 6]의 목적 함수 $\text{Tr}(\mathbf{W}\mathcal{M})$ 및 제약 조건 $\text{Tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq \rho$ 을 이용한 라그랑주 승수법(Lagrange multiplier method)을 사용한다. [수학식 6]의 목적 함수 및 제약 조건을 이용하면, 라그랑주 함수 $\mathbf{L}(\mathbf{P}, \mathbf{G}, \lambda)$ 는 아래 [수학식 14]와 같이 정의될 수 있다.

수학식 14

[0071]
$$\mathbf{L}(\mathbf{P}, \mathbf{G}, \lambda) = \text{Tr}(\mathbf{W}\mathcal{M}) + \lambda(\text{Tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) - \rho)$$

[0072] [수학식 14]를 통해 정의된 라그랑주 함수 $\mathbf{L}(\mathbf{P}, \mathbf{G}, \lambda)$ 를 이용하면, [수학식 6]의 최적해를 갖는 $\mathbf{P}$ 는 아래 [수학식 15]와 계산될 수 있다.

수학식 15

[0073]
$$\mathbf{P} = \gamma \bar{\mathbf{P}}$$

[0074] where:
$$\bar{\mathbf{P}} = \left(\hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{G}^H \mathbf{W} \mathbf{G} \hat{\mathbf{H}} + \frac{(\delta \rho + \sigma_n^2) \text{Tr}(\mathbf{W} \mathbf{G} \mathbf{G}^H)}{M(1 - \delta) \rho} \mathbf{I}_M \right)^{-1} \hat{\mathbf{H}}^H \mathbf{G}^H \mathbf{W}$$

$$\mathbf{G} = \text{diag}\{\mathbf{g}_1^{\text{MMSE}}, \dots, \mathbf{g}_K^{\text{MMSE}}\},$$

$$\gamma = \sqrt{\rho / \text{Tr}(\bar{\mathbf{P}} \mathbf{P}^H) \bar{\mathbf{P}}}$$

[0075] 앞서 설명한 바와 같이 WMMSE를 기반으로 정의된 [수학식 6]은 WSR을 기반으로 정의되는 [수학식 5]와 동일한 조건에서 최적해를 가지며, 따라서 [수학식 6]의 최적해를 가지도록 결정된 [수학식 15]의 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 는 시스템의 WSR을 최대화할 수 있는 빔포밍 매트릭스에 해당한다. 또한, [수학식 15]의 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 는, 본 발명에서 제안한 RWMMS 기법에 따라 제한된 피드백 환경에서 발생하는 양자화 오류 성분을 보상할 수 있도록 설계된 파라미터를 이용하여 계산된 결과이므로 양자화 오류가 고려되지 않았던 기존 빔포밍 기법과 비교할 때 대비 높은 sum-rate 성능을 가질 수 있다.

[0076] 도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 기지국의 동작을 나타낸 순서도이다.

[0077] 도 3을 참조하면, 310 단계에서 기지국은 이동국으로부터 채널 피드백 정보를 수신할 수 있다. 이동국으로부터 수신되는 채널 피드백 정보는 제한된 피드백 기반의 시스템에서 수신되며, 기지국과 이동국 사이에서 미리 정의된 코드북 및 코드워드를 기반으로 생성된 정보일 수 있다. 이 때 기지국과 이동국 사이에서 미리 정의되는 코

트북 및 코드워드는 랜덤 벡터 양자화(random vector quantization, RVQ)를 기초로 정의될 수 있다.

- [0078] 320 단계에서, 기지국은 시스템을 구성하는 이동국들의 데이터 레이트의 가중 합(weighted sum-rate, WSR)을 최대화하는 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 를 결정할 수 있다. 앞서 설명한 본 발명의 다양한 실시 예에 따라, WSR을 최대화하는 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 는 제한된 피드백 환경에서의 양자화 오류 성분을 고려한 가중 최소 평균 제곱 오차(weighted minimum mean square error, WMMSE)의 최적화를 통해 결정될 수 있다.
- [0079] 330 단계에서, 기지국은 전송하고자 하는 신호에 결정된 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 를 적용하여 시스템을 구성하는 이동국에게 신호를 전송할 수 있다.
- [0080] 도 4는 본 발명의 일 실시 예에 따른 기지국이 빔포밍 매트릭스 결정하는 방법을 나타낸 순서도이다.
- [0081] 도 4를 참조하면, 410 단계에서 기지국은 기지국이 전송하고자 하는 신호 $\mathbf{d}_k$ 와 이동국에 의해 추정되는 신호 $\hat{\mathbf{d}}_k$ 사이의 평균 제곱 오차(mean square error, MSE) $\mathcal{M}_k$ 를 계산할 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에서, $\mathcal{M}_k$ 는 RVQ를 기반으로 생성된 코드북의 통계적 특징에 따라서 제한된 피드백 환경에서의 양자화 오류 성분이 반영되도록 계산될 수 있다.
- [0082] 420 단계에서, 기지국은 $\mathcal{M}_k$ 를 최소화하는 수신 필터 파라미터 $\mathbf{g}_k^{\text{MMSE}}$ 를 계산할 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에서, $\mathbf{g}_k^{\text{MMSE}}$ 는 410 단계를 통해 계산된 $\mathcal{M}_k$ 에 대해 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{g}_k^*} \mathcal{M}_k = 0$ 을 만족하는 $\mathbf{g}_k$ 값으로 계산될 수 있다.
- [0083] 430 단계에서, 기지국은 $\mathbf{g}_k^{\text{MMSE}}$ 를 기초로 $\mathcal{M}_k$ 의 최소값인 $\mathcal{M}_k^{\text{MMSE}}$ 를 계산할 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에서, $\mathcal{M}_k^{\text{MMSE}}$ 는 410 단계에서 계산된 $\mathcal{M}_k$ 에 $\mathcal{M}_k$ 를 최소화하는 수신 필터 파라미터인 $\mathbf{g}_k^{\text{MMSE}}$ 를 대입함으로써 계산될 수 있다.
- [0084] 440 단계에서, 기지국은 각 k 에 대한 $\mathcal{M}_k^{\text{MMSE}}$ 를 기반으로 본 발명의 실시 예에 따라 최종 빔포밍 매트릭스 $\mathbf{P}$ 를 결정할 수 있다.
- [0085] 도 5는 본 발명의 일 실시 예에 따른 기지국 장치의 구성을 나타낸 도면이다.
- [0086] 도 5를 참조하면, 본 발명의 일 실시 예에 따른 기지국 장치(500)는 수신부(510), 제어부(520) 및 송신부(530)를 포함할 수 있다. 다만, 기지국의 구성 요소가 전술한 예에 한정되는 것은 아니다. 예를 들어, 기지국은 전술한 구성 요소들 보다 더 많은 구성 요소(예를 들어, 메모리 등)를 포함하거나 더 적은 구성 요소를 포함할 수도 있다.
- [0087] 수신부(510)는 시스템을 구성하는 이동국으로부터 다양한 신호 또는 정보를 수신할 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에서, 수신부(510)는 이동국에서 전송하는 채널 피드백 정보를 수신하며, 수신된 채널 피드백 정보를 제어부로 전달하도록 구성될 수 있다.
- [0088] 제어부(520)는 전술한 본 발명의 다양한 실시 예에 따라 기지국이 동작하도록 수신부(510), 송신부(530)를 포함한 기지국의 구성 전반을 제어할 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에서, 제어부(520)는 수신부(510)로부터 전달된 채널 피드백 정보를 이용하여 WSR(weighted sum-rate)를 최대화하는 빔포밍 매트릭스를 결정할 수 있다. 또한 제어부(520)는 전술한 본 발명의 다양한 실시 예에 따라, WSR을 최대화하는 빔포밍 매트릭스를 결정하기 위해 필요한 연산들을 수행할 수 있다.
- [0089] 송신부(530)는 시스템을 구성하는 이동국으로 다양한 신호 또는 정보를 전송할 수 있다. 본 발명의 일 실시 예에서, 송신부(530)는 WSR를 최대화하는 빔포밍 매트릭스가 적용된 신호를 시스템을 구성하는 이동국으로 전송할 수 있다.
- [0090] 앞서 설명한 내용에 기초한 본 발명의 채널 오류에 강인한 WMMSE 빔포밍 알고리즘(RWMMSE)은 다음 [표 1]과 같이 나타낼 수 있다.

표 1

[0091]

Robust Weighted MMSE Beamforming Algorithm
Set $n = 1$ and initialize $P_n = P^0$
repeat
Compute $G_n P_n$
Compute $W_n P_n$
Compute $P_n G_n, W_n$
Set $n \leftarrow n + 1$
Until convergence

[0092]

이하 도 6 내지 도 8은 시뮬레이션을 기초로 본 발명의 일 실시 예에 따른 RWMSE 빔포밍 알고리즘의 수렴성 및 다른 빔포밍 알고리즘과의 비교 결과를 나타낸 도면이다. 시뮬레이션에서 기지국의 안테나 수 $M=4$ 로 설정되었고 이동국의 수 $K=4$ 로 설정되었으며, 채널 피드백 정보의 비트 수에 있어서 두 가지 다른 정량화 수준, 즉 $B=5$ 및 $B=10$ 이 고려된다. 일반성을 잃지 않고, 초기 빔포밍 매트릭스가 matched 필터로 선택되고 알고리즘 중지 기준은 설정된 반복 횟수(예: 20)으로 설정하였다. 도 6은 본 발명의 일 실시 예에 따른 RWMSE 빔포밍 알고리즘의 에르고딕 수렴을 나타낸 도면이다.

[0093]

구체적으로, 도 6은 SNR(signal noise ratio)이 10dB인 경우 기존 WMMSE 빔포밍 알고리즘과 본 발명에서 제안된 RWMSE 빔포밍 알고리즘의 에르고딕 수렴(ergodic convergence)을 나타낸다. 도 6을 참조하면, 본 발명에서 제안한 RWMSE 빔포밍 알고리즘은 기존 WMMSE 빔포밍 알고리즘과 기존 WMMSE와 비교할 때 $B=5$ 및 $B=10$ 에서 유사한 수렴성을 보여주는 것을 확인할 수 있다.

[0094]

도 7은 본 발명의 일 실시 예에 따른 RWMSE 빔포밍 알고리즘과 기존 빔포밍 알고리즘의 sum rate 성능 비교의 일 예시를 나타낸 도면이다.

[0095]

구체적으로, 도 7은 채널 피드백 비트 수 $B=5$ 인 경우 여러 가지 빔포밍 방식의 sum rate 성능을 나타낸다. 몬테 카를로(monte carlo) 방법을 채택하였으며 각 알고리즘을 5000회 시뮬레이션 한 결과이다. 도 7에 도시된 바와 같이, $B=5$ 인 경우 본 발명에서 제안한 RWMSE 빔포밍 알고리즘은 기존 정규화된 제로 포싱(Regularized zero-forcing, RZF) 빔포밍 알고리즘, 로버스트 MMSE (robust MMSE, RMMSE) 빔포밍 알고리즘 및 가중 MMSE (weighted MMSE, WMMSE) 빔포밍 알고리즘과 비교하여 높은 sum-rate 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

[0096]

도 8은 본 발명의 일 실시 예에 따른 RWMSE 빔포밍 알고리즘과 기존 빔포밍 알고리즘의 Sum-rate 성능 비교의 다른 일 예시를 나타낸 도면이다.

[0097]

구체적으로, 도 8은 채널 피드백 비트 수 $B=10$ 인 경우 여러 가지 빔포밍 방식의 sum rate 성능을 나타낸다. 몬테카를로(monte carlo) 방법을 채택하였으며 각 알고리즘을 5000회 시뮬레이션 한 결과이다. 도 8에 도시된 바와 같이, $B=10$ 인 경우, 본 발명에서 제안한 RWMSE 빔포밍 알고리즘은 기존 정규화된 제로 포싱(Regularized zero-forcing, RZF) 빔포밍 알고리즘, 로버스트 MMSE (robust MMSE, RMMSE) 빔포밍 알고리즘 및 가중 MMSE (weighted MMSE, WMMSE) 빔포밍 알고리즘과 비교하여 높은 sum-rate 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

[0098]

상술한 본 개시의 구체적인 실시 예들에서, 개시에 포함되는 구성 요소는 제시된 구체적인 실시 예에 따라 단수 또는 복수로 표현되었다. 그러나, 단수 또는 복수의 표현은 설명의 편의를 위해 제시한 상황에 적합하게 선택된 것으로서, 본 개시가 단수 또는 복수의 구성 요소에 제한되는 것은 아니며, 복수로 표현된 구성 요소라 하더라도 단수로 구성되거나, 단수로 표현된 구성 요소라 하더라도 복수로 구성될 수 있다.

[0099]

한편 본 개시의 상세한 설명에서는 구체적인 실시 예에 관해 설명하였으나, 본 개시의 범위에서 벗어나지 않는 한도 내에서 여러 가지 변형이 가능함은 물론이다. 그러므로 본 개시의 범위는 설명된 실시 예에 국한되어 정해져서는 아니 되며 후술하는 특허청구의 범위 뿐만 아니라 이 특허청구의 범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

부호의 설명

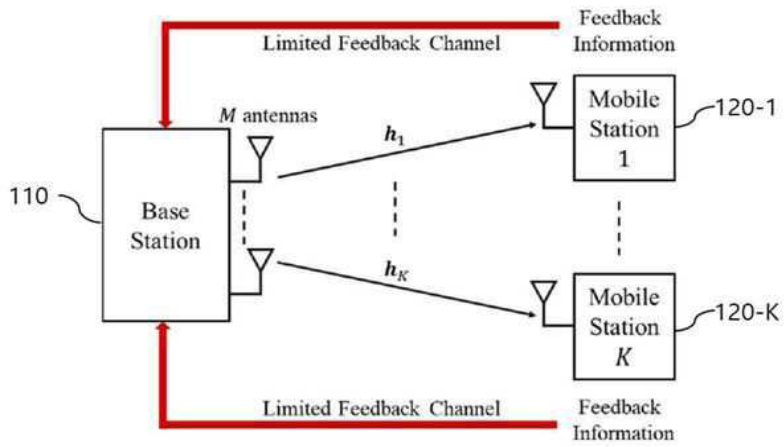
[0100]

110 기지국

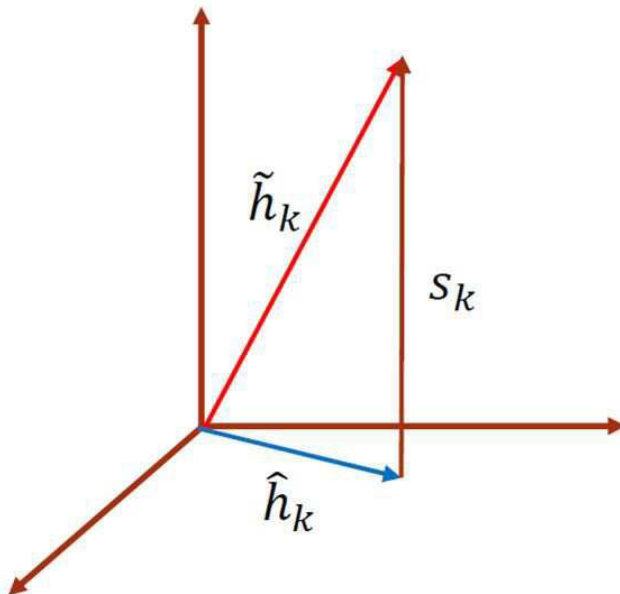
120 이동국
500 기지국 장치
510 수신부
520 제어부
530 송신부

도면

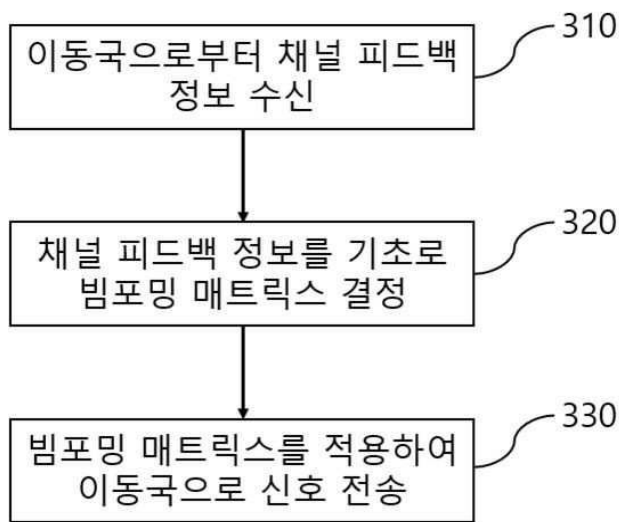
도면1



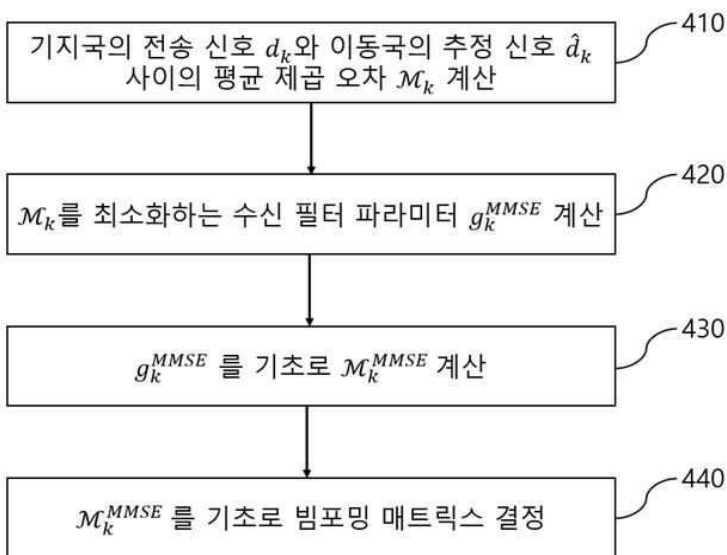
도면2



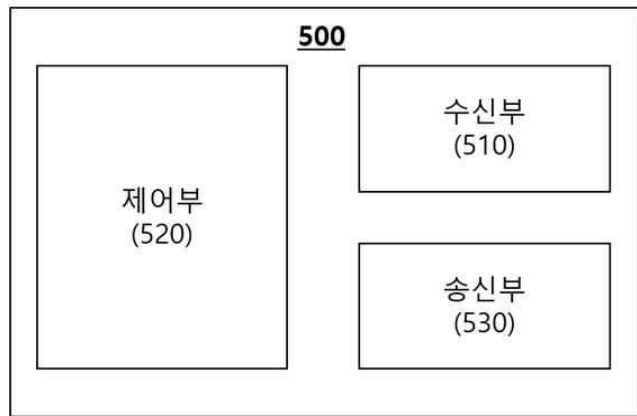
도면3



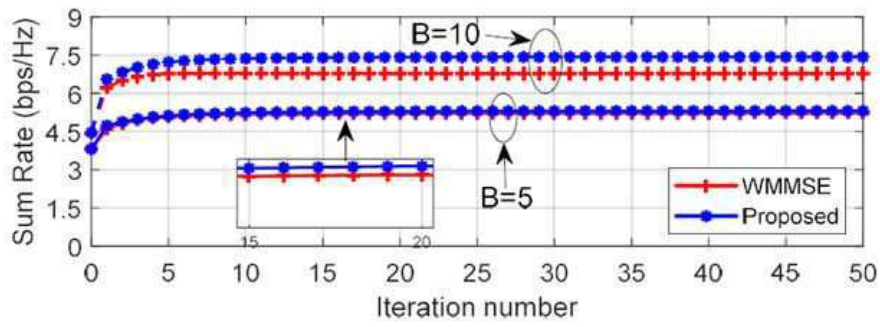
도면4



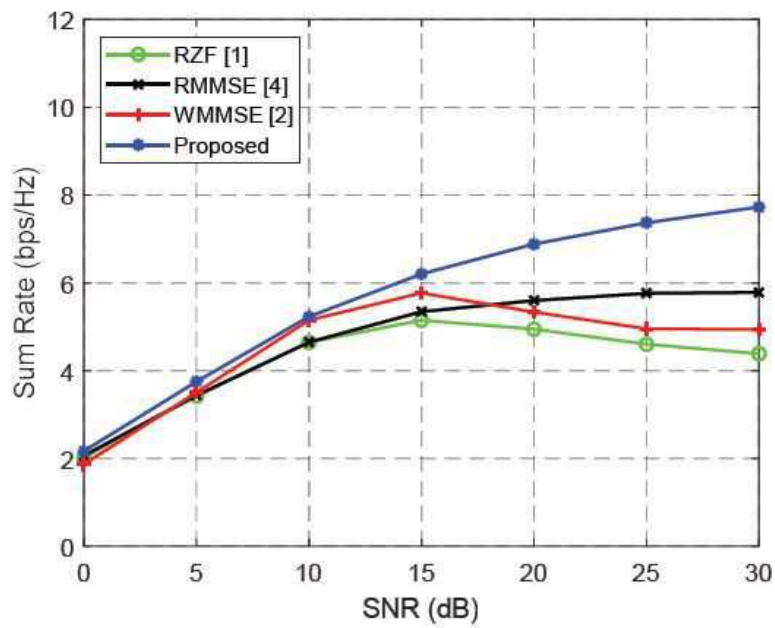
도면5



도면6



도면7



도면8

