(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0078254
(43) 공개일자 2025년06월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04L 25/02 (2006.01) *H04B 7/0417* (2017.01)
H04B 7/06 (2017.01)
(52) CPC특허분류
H04L 25/023 (2013.01)
H04B 7/0417 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2024-0002908
(22) 출원일자 2024년01월08일
심사청구일자 2024년01월08일
(30) 우선권주장
1020230166045 2023년11월24일 대한민국(KR)

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
이남윤
서울특별시 성동구 금호로 110, 110동 1104호
김정연
서울특별시 동대문구 무학로 49길 33 에벤에셀 203호
(74) 대리인
윤귀상

전체 청구항 수 : 총 10 항

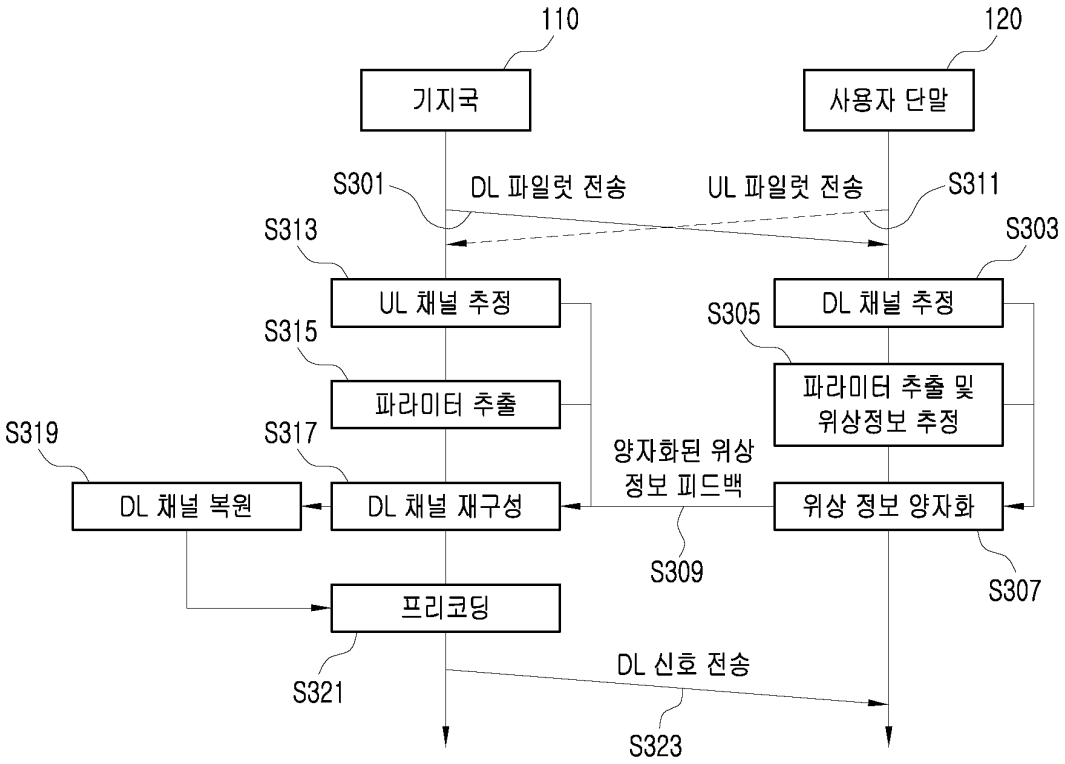
(54) 발명의 명칭 **다중 입력 다중 출력 통신 시스템에서 DL 채널 복원 방법 및 이를 위한 시스템**

(57) 요 약

본 발명은 기지국과 사용자 단말을 포함하는 다중 입력 다중 출력(MIMO: Multiple-Input-Multiple-Output) 통신 시스템에서 DL(downlink) 채널을 복원하는 방법에 대한 것으로, 상기 기지국이 상기 사용자 단말로부터 수신된 UL(uplink) 파일럿(pilot) 신호를 기반으로 UL 채널 정보를 추정하는 단계; 상기 기지국이 상기 추정된 UL 채널

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도4



정보로부터 상기 UL 채널과 상기 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터를 추출하는 단계; 상기 사용자 단말이 상기 기지국으로부터 수신된 DL 파일럿 신호를 기반으로 DL 채널 정보를 추정하는 단계; 상기 사용자 단말이 상기 추정된 DL 채널 정보를 통해 DL 채널 경로의 위상 정보를 추정하는 단계; 상기 사용자 단말이 상기 추정된 DL 채널 경로의 위상 정보를 양자화하는 단계; 상기 사용자 단말이 상기 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 상기 UL 채널을 통해 피드백 하는 단계; 상기 기지국이 상기 사용자 단말로부터 피드백 되는 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 수신하는 단계; 상기 기지국이 상기 UL 채널 정보, 상기 적어도 하나의 주요 파라미터 및 상기 DL 채널 경로의 위상 정보를 이용하여 DL 채널을 재구성하는 단계; 및 상기 기지국이 상기 재구성된 DL 채널과 실제 DL 채널 간의 오차를 보정하여 상기 DL 채널을 복원하는 단계;를 포함한다.

(52) CPC특허분류

H04B 7/0626 (2013.01)
H04L 25/0222 (2013.01)
H04L 25/0242 (2013.01)
H04L 25/0256 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711193529
과제번호	2021-0-00161-003
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	정보통신기획평가원
연구사업명	방송통신산업기술개발
연구과제명	초연결 초대역 MIMO 송수신 기술 연구
과제수행기관명	고려대학교산학협력단
연구기간	2021.04.01 ~ 2025.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711194552
과제번호	00208552
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	광대역 초거대 안테나 통신 시스템 연구
과제수행기관명	고려대학교산학협력단
연구기간	2023.03.01 ~ 2026.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

기지국과 사용자 단말을 포함하는 다중 입력 다중 출력(MIMO: Multiple-Input-Multiple-Output) 통신 시스템에서 DL(downlink) 채널을 복원하는 방법으로서,

상기 기지국이 상기 사용자 단말로부터 수신된 UL(uplink) 파일럿(pilot) 신호를 기반으로 UL 채널 정보를 추정하는 단계;

상기 기지국이 상기 추정된 UL 채널 정보로부터 상기 UL 채널과 상기 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터를 추출하는 단계;

상기 사용자 단말이 상기 기지국으로부터 수신된 DL 파일럿 신호를 기반으로 DL 채널 정보를 추정하는 단계;

상기 사용자 단말이 상기 추정된 DL 채널 정보를 통해 DL 채널 경로의 위상 정보를 추정하는 단계;

상기 사용자 단말이 상기 추정된 DL 채널 경로의 위상 정보를 양자화하는 단계;

상기 사용자 단말이 상기 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 상기 UL 채널을 통해 피드백 하는 단계;

상기 기지국이 상기 사용자 단말로부터 피드백 되는 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 수신하는 단계;

상기 기지국이 상기 UL 채널 정보, 상기 적어도 하나의 주요 파라미터 및 상기 DL 채널 경로의 위상 정보를 이용하여 DL 채널을 재구성하는 단계; 및

상기 기지국이 상기 재구성된 DL 채널과 실제 DL 채널 간의 오차를 보정하여 상기 DL 채널을 복원하는 단계;를 포함하는, DL 채널 복원 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 적어도 하나의 주요 파라미터는 주파수에 독립적인 특성을 갖는 출발각(AoD: Angle of Departure)/도착각(AoA: Angle of Arrival) 파라미터와 채널 경로 감쇠 파라미터를 포함하며,

상기 기지국이 상기 DL 채널을 재구성하는 단계는,

상기 UL 채널 정보, 상기 출발각/도착각 파라미터, 상기 채널 경로 감쇠 파라미터 및 상기 DL 채널 경로의 위상 정보를 이용하는 최소 평균 제곱 오차(MMSE: Minimum Mean Square Error) 방식을 적용하여 상기 DL 채널을 재구성하는 것인, DL 채널 복원 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 DL 채널 경로의 위상 정보는 균등 양자화(uniform quantizing) 기법, 비균일(uniform) 양자화 기법 및 적응형 양자화 기법 중 적어도 하나의 기법에 의해 양자화됨을 특징으로 하는, DL 채널 복원 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 DL 채널은 상기 도착각 파라미터를 기반으로 한 DL 채널의 어레이 응답 행렬, 대각 성분이 상기 채널 경로

감쇠 파라미터인 대각 행렬, 대각 성분이 상기 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보인 대각 행렬 및 할당 비트에 따른 양자화 에러의 기대 값으로 구성되는 열 벡터 중 적어도 하나를 기반으로 재구성됨을 특징으로 하는, DL 채널 복원 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 DL 채널 경로의 위상 정보의 피드백에 사용되는 비트는 상기 추정된 DL 채널과 상기 실제 DL 채널의 평균 제곱 오차(MSE: Mean Square Error)가 최소화되도록 할당됨을 특징으로 하는, DL 채널 복원 방법.

청구항 6

다중 입력 다중 출력(MIMO: Multiple-Input-Multiple-Output) 통신 시스템에서 DL(downlink) 채널 복원을 위한 시스템으로서,

사용자 단말로부터 수신된 UL(uplink) 파일럿(pilot) 신호를 기반으로 UL 채널 정보를 추정하고, 상기 추정된 UL 채널 정보로부터 상기 UL 채널과 상기 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터를 추출하는 기지국; 및

상기 기지국으로부터 수신된 DL 파일럿 신호를 기반으로 DL 채널 정보를 추정하고, 상기 추정된 DL 채널 정보를 통해 DL 채널 경로의 위상 정보를 추정하고, 상기 추정된 DL 채널 경로의 위상 정보를 양자화하고, 상기 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 상기 UL 채널을 통해 피드백 하는 상기 사용자 단말;을 포함하고,

상기 기지국은 상기 사용자 단말로부터 피드백 되는 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 수신하고, 상기 UL 채널 정보, 상기 적어도 하나의 주요 파라미터 및 상기 DL 채널 경로의 위상 정보를 이용하여 DL 채널을 재구성하고, 상기 재구성된 DL 채널과 실제 DL 채널 간의 오차를 보정하여 상기 DL 채널을 복원함을 특징으로 하는, DL 채널 복원 시스템.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 적어도 하나의 주요 파라미터는 주파수에 독립적인 특성을 갖는 출발각(AoD: Angle of Departure)/도착각(AoA: Angle of Arrival) 파라미터와 채널 경로 감쇠 파라미터를 포함하며,

상기 기지국은 상기 UL 채널 정보, 상기 출발각/도착각 파라미터, 상기 채널 경로 감쇠 파라미터 및 상기 DL 채널 경로의 위상 정보를 이용하는 최소 평균 제곱 오차(MMSE: Minimum Mean Square Error) 방식을 적용하여 상기 DL 채널을 재구성함을 특징으로 하는, DL 채널 복원 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 DL 채널 경로의 위상 정보는 균등 양자화(uniform quantizing) 기법, 비균일(uniform) 양자화 기법 및 적응형 양자화 기법 중 적어도 하나의 기법에 의해 양자화됨을 특징으로 하는, DL 채널 복원 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 DL 채널은 상기 도착각 파라미터를 기반으로 한 DL 채널의 어레이 응답 행렬, 대각 성분이 상기 채널 경로 감쇠 파라미터인 대각 행렬, 대각 성분이 상기 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보인 대각 행렬 및 할당 비트에

따른 양자화 에러의 기대 값으로 구성되는 열 벡터 중 적어도 하나를 기반으로 재구성됨을 특징으로 하는, DL 채널 복원 시스템.

청구항 10

제6항에 있어서,

상기 DL 채널 경로의 위상 정보의 피드백에 사용되는 비트는 상기 추정된 DL 채널과 상기 실제 DL 채널의 평균 제곱 오차(MSE: Mean Square Error)가 최소화되도록 할당됨을 특징으로 하는, DL 채널 복원 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 DL(Downlink) 채널 복원에 관한 것으로, 보다 상세하게는 다중 입력 다중 출력(MIMO: Multiple-Input-Multiple-Output) 통신 시스템에서 UL(Uplink) 신호와 DL 채널 경로의 위상(phase) 정보 피드백을 이용하여 DL 채널을 복원하는 방법 및 이를 위한 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 대규모(massive) MIMO 통신 기술은 미래 셀룰러 네트워크의 고 주파수 효율을 달성하기 위한 유망한 기술 중 하나이다. 시분할 이중화(TDD: Time-Division-Duplexing) 시스템의 주요한 특징인 채널 상호성(channel reciprocity)은 채널 추정을 위한 추가 훈련이나 피드백 과정 없이 기지국에서 DL 채널 정보를 획득할 수 있으므로 에너지 및 주파수 효율성에서 상당한 이득을 얻을 수 있다. 그러나 주파수 분할 이중화(FDD: Frequency-Division-Duplexing) 시스템에서는 DL 채널과 UL 채널의 비호환적 특성으로 인하여 채널 추정을 위해서는 추가적인 훈련과 피드백 과정이 반드시 필요하다. 이는 FDD 방식 기반의 거대 MIMO 시스템에서의 주파수 효율성이 제한되는 문제를 야기한다.

[0004] 이에 따라 이러한 채널 피드백으로 인한 오버헤드 증가 문제를 해결하기 위하여 다방면의 연구가 진행중에 있다. 압축 감지(CS: Compressive Sensing) 기법, 채널 공간 상관관계를 이용한 두 단계 프리코딩(precoding) 기법, 딥 러닝(deep learning)을 이용한 데이터 기반 엔드 투 엔드 매핑(end-to-end mapping), UL 채널을 이용한 DL 채널 정보 외삽법(extropolation)이 대표적이다. 이중 DL 채널 정보 외삽법은 UL 파일럿(pilot) 신호를 사용하여 DL 채널 정보를 추정하는 것으로, DL 채널 훈련 및 피드백과 관련된 상당한 양의 오버헤드를 완전히 제거할 수 있는 유망한 기법으로 각광받고 있다. 그러나 FDD 시스템 환경에서는 채널 상호성이 부족하므로, UL 파일럿을 이용하여 DL 채널 정보를 정확하게 추정하는 것이 매우 어렵다는 문제가 있다.

[0005] 한편, 송신기 채널 상태 정보(CSIT: Channel State Information at Transmitter)는 대규모 MIMO 통신 시스템이 제공하는 주파수 효율 향상에 필수적인 요소이다. FDD 시스템에서 CSIT는 일반적으로 단말이 DL 채널을 추정하고 추정된 채널 정보를 기지국으로 피드백 함으로써 획득된다.

[0006] 하지만 대규모 MIMO 통신 시스템에서는 기지국단의 안테나 개수가 급격하게 증가함에 따라, 사용자당 채널 추정 및 피드백을 위해 필요한 오버헤드가 증가하여 주파수 효율의 저하가 발생된다.

[0007] 이에 따라 안테나 수가 무한히 증가할 때, 완벽한 DL 채널 정보를 이용하는 경우 얻을 수 있는 주파수 효율성을 근사적으로 달성하고 적은 비트 수의 피드백으로 DL 채널 복원 성능을 향상시킬 수 있는 방안이 필요하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) 한국 등록특허공보 제10-2365347호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명은 상기와 같은 문제를 해결하기 위해 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 MIMO 통신 시스템에서 UL 파일럿 신호와 DL 채널 경로의 위상 정보 피드백을 이용하여 DL 채널을 복원하는 방법 및 이를 위한 시스템을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0012] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 기지국과 사용자 단말을 포함하는 다중 입력 다중 출력(MIMO) 통신 시스템에서 DL 채널을 복원하는 방법은, 상기 기지국이 상기 사용자 단말로부터 수신된 UL 파일럿 신호를 기반으로 UL 채널 정보를 추정하는 단계; 상기 기지국이 상기 추정된 UL 채널 정보로부터 상기 UL 채널과 상기 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터를 추출하는 단계; 상기 사용자 단말이 상기 기지국으로부터 수신된 DL 파일럿 신호를 기반으로 DL 채널 정보를 추정하는 단계; 상기 사용자 단말이 상기 추정된 DL 채널 정보를 통해 DL 채널 경로의 위상 정보를 추정하는 단계; 상기 사용자 단말이 상기 추정된 DL 채널 경로의 위상 정보를 양자화하는 단계;상기 사용자 단말이 상기 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 상기 UL 채널을 통해 피드백 하는 단계; 상기 기지국이 상기 사용자 단말로부터 피드백 되는 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 수신하는 단계; 상기 기지국이 상기 UL 채널 정보, 상기 적어도 하나의 주요 파라미터 및 상기 DL 채널 경로의 위상 정보를 이용하여 DL 채널을 재구성하는 단계; 및 상기 기지국이 상기 재구성된 DL 채널과 실제 DL 채널 간의 오차를 보정하여 상기 DL 채널을 복원하는 단계;를 포함한다.

[0013] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 다중 입력 다중 출력(MIMO) 통신 시스템에서 DL 채널 복원을 위한 시스템은, 사용자 단말로부터 수신된 UL 파일럿 신호를 기반으로 UL 채널 정보를 추정하고, 상기 추정된 UL 채널 정보로부터 상기 UL 채널과 상기 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터를 추출하는 기지국; 및 상기 기지국으로부터 수신된 DL 파일럿 신호를 기반으로 DL 채널 정보를 추정하고, 상기 추정된 DL 채널 정보를 통해 DL 채널 경로의 위상 정보를 추정하고, 상기 추정된 DL 채널 경로의 위상 정보를 양자화하고, 상기 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 상기 UL 채널을 통해 피드백 하는 상기 사용자 단말;을 포함하고, 상기 기지국은 상기 사용자 단말로부터 피드백 되는 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 수신하고, 상기 UL 채널 정보, 상기 적어도 하나의 주요 파라미터 및 상기 DL 채널 경로의 위상 정보를 이용하여 DL 채널을 재구성하고, 상기 재구성된 DL 채널과 실제 DL 채널 간의 오차를 보정하여 상기 DL 채널을 복원한다.

발명의 효과

[0015] 상술한 본 발명의 일측면에 따르면, 본 발명은 UL 파일럿 신호와 DL 채널 경로의 위상 정보 피드백을 이용하여 DL 채널을 복원하는 기지국 및 이를 통한 DL 채널 복원 방법을 제공함으로써, 소량의 피드백을 통해 완벽한 DL 채널을 이용하는 경우 얻을 수 있는 주파수 효율을 점진적으로 달성할 수 있으며, 현실적인 개수의 안테나 환경에서 피드백 없는 채널 복원 기법 대비 더 높은 주파수 효율을 달성할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 MIMO 통신 시스템의 예를 나타낸 시스템도,

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 MIMO 통신 시스템에서 DL 채널 복원을 위한 기지국 내부 블록을 나타낸 장치도,

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 MIMO 통신 시스템에서 DL 채널 복원을 위한 사용자 단말 내부 블록을 나타낸 장치도,

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 MIMO 통신 시스템에서 기지국과 사용자 단말이 DL 채널을 복원하는 절차를 설명하기 위한 도면,

도 5는 수학식 15의 내부 함수가 볼록성(convexity)을 가지며 항상 감소하는 함수로 완화한 결과를 나타낸 그래프,

도 6은 CSIT 지식과 프리코딩 전략에 따른 에르고딕 합-주파수 효율을 나타낸 그래프,

도 7은 DL 채널 경로 위상 정보 피드백의 비트 수에 따른 에르고딕 합-주파수 효율을 나타낸 그래프,

그리고, 도 8은 채널 경로 수 증가에 따른 에르고딕 합-주파수 효율을 나타낸 그래프.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018] 후술하는 본 발명에 대한 상세한 설명은, 본 발명이 실시될 수 있는 특정 실시예를 예시로서 도시하는 첨부 도면을 참조한다. 이들 실시예는 당업자가 본 발명을 실시할 수 있기에 충분하도록 상세히 설명된다. 본 발명의 다양한 실시예는 서로 다르지만 상호 배타적일 필요는 없음이 이해되어야 한다. 예를 들어, 여기에 기재되어 있는 특정 형상, 구조 및 특성은 일 실시예와 관련하여 본 발명의 정신 및 범위를 벗어나지 않으면서 다른 실시예로 구현될 수 있다. 또한, 각각의 개시된 실시예 내의 개별 구성요소의 위치 또는 배치는 본 발명의 정신 및 범위를 벗어나지 않으면서 변경될 수 있음이 이해되어야 한다. 따라서, 후술하는 상세한 설명은 한정적인 의미로서 취하려는 것이 아니며, 본 발명의 범위는, 적절하게 설명된다면, 그 청구항들이 주장하는 것과 균등한 모든 범위와 더불어 첨부된 청구항에 의해서만 한정된다. 도면에서 유사한 참조부호는 여러 측면에 걸쳐서 동일하거나 유사한 기능을 지칭한다.

[0019] 본 발명에 따른 구성요소들은 물리적인 구분이 아니라 기능적인 구분에 의해서 정의되는 구성요소들로써 각각이 수행하는 기능들에 의해서 정의될 수 있다. 각각의 구성요소들은 하드웨어 또는 각각의 기능을 수행하는 프로그램 코드 및 프로세싱 유닛으로 구현될 수 있을 것이며, 두 개 이상의 구성요소의 기능이 하나의 구성요소에 포함되어 구현될 수도 있을 것이다. 따라서 이하의 실시예에서 구성요소에 부여되는 명칭은 각각의 구성요소를 물리적으로 구분하기 위한 것이 아니라 각각의 구성요소가 수행되는 대표적인 기능을 암시하기 위해서 부여된 것이며, 구성요소의 명칭에 의해서 본 발명의 기술적 사상이 한정되지 않는 것임에 유의하여야 한다.

[0020] 이하에서는 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 보다 상세하게 설명하기로 한다.

[0021] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 MIMO 통신 시스템의 예를 나타낸 시스템도이다.

[0022] 도 1을 참조하면, 도시된 MIMO 통신 시스템(100)은 기지국(110)과 사용자 단말(UE: User Equipment)(120)을 포함한다.

[0023] UE(120)는 UL 파일럿 신호를 기지국(110)으로 전송하고, 기지국(110)은 상기 UL 파일럿을 수신하여 UL 채널 정보를 추정한다.

[0024] 기지국(110)은 상기 추정한 UL 채널 정보로부터 UL 및 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터를 추출하고, 사용자 단말(120)로부터 피드백 되는 DL 채널 경로의 위상 정보를 수신한다.

[0025] 이후 기지국(110)은 상기 UL 채널 정보, 상기 적어도 하나의 주요 파라미터 및 DL 채널 경로의 위상 정보를 이용해서 DL 채널 정보를 추정한다.

[0026] 그런 다음 기지국(110)은 상기 추정된 DL 채널 정보와 실제 DL 채널 정보 간의 오차를 보정하여 DL 채널 정보를 복원한다.

[0027] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 MIMO 통신 시스템에서 DL 채널 복원을 위한 기지국 내부 블록을 나타낸 장치도이다.

[0028] 도 2를 참조하면, 도시된 기지국(110)은 수신부(111), UL 채널 정보 추정부(112), 파라미터 추출부(113), DL 채널 재구성부(114), DL 채널 복원부(115) 및 송신부(116)로 구성된다.

[0029] 기지국(110)의 수신부(111)는 사용자 단말(120)로부터 전송되는 UL 파일럿 신호를 수신하고, 상기 사용자 단말(120)로부터 피드백 되는 DL 채널 경로의 위상 정보(q_k)를 수신한다.

[0030] UL 채널 정보 추정부(112)는 상기 수신된 UL 파일럿 신호를 기반으로 UL 채널 정보($\hat{h}_k^{UL}$)를 추정한다.

[0031] 파라미터 추출부(113)는 UL 채널 정보 추정부(112)가 추정한 UL 채널 정보로부터 UL 및 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터, 일례로 출발각(AoD: Angle of Departure)/도착각(AoA: Angle of Arrival)

파라미터(Θ_k)와 채널 경로 감쇠 파라미터(p_k)를 추출한다.

[0032] DL 채널 재구성부(114)는 UL 채널 정보 추정부(112)를 통해 추정한 UL 채널 정보($\hat{h}_k^{UL}$)와, 파라미터 추출부(113)를 통해 추출한 출발각/도착각 파라미터(Θ_k) 및 채널 경로 감쇠 파라미터(p_k)와, 수신부(111)를 통해 수신한 DL 채널 경로의 위상 정보(q_k)를 이용하여 DL 채널을 재구성한다. 이때 DL 채널 재구성부(114)는 최소 평균 제곱 오차(MMSE: Minimum Mean Square Error) 방식을 적용하여 상기 DL 채널을 재구성할 수 있다.

[0033] 그런 다음 DL 채널 복원부(115)는 DL 채널 재구성부(114)를 통해 재구성된 DL 채널과 실제 DL 채널 간의 오차를 보정하여 DL 채널을 복원하고, 송신부(116)는 DL 채널 복원부(115)를 통해 복원된 DL 채널의 정보를 기반으로 DL 프리코딩을 수행하여 DL 신호를 전송한다.

[0034] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 MIMO 통신 시스템에서 DL 채널 복원을 위한 사용자 단말 내부 블록을 나타낸 장치도이다.

[0035] 도 3을 참조하면, 도시된 사용자 단말(120)은 수신부(121), DL 채널 정보 추정부(122), 파라미터 추출부(123), 위상 정보 추정부(124), 양자화부(125) 및 송신부(126)로 구성된다.

[0036] 사용자 단말(120)의 수신부(121)는 기지국(110)으로부터 전송되는 DL 파일럿 신호를 수신하고, DL 채널 정보 추정부(122)는 상기 수신된 DL 파일럿 신호를 기반으로 DL 채널 정보($\hat{h}_k^{DL}$)를 추정한다.

[0037] 파라미터 추출부(123)는 DL 채널 정보 추정부(122)가 추정한 DL 채널 정보로부터 UL 및 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터, 일례로 출발각/도착각 파라미터(Θ_k), 채널 경로 감쇠 파라미터(p_k)를 추출하고, 위상 정보 추정부(124)는 상기 추출된 파라미터를 기반으로 DL 채널 경로의 위상 정보(q_k)를 추정한다.

[0038] 양자화부(125)는 위상 정보 추정부(124)가 추정한 DL 채널 경로의 위상 정보를 양자화(q_k)하고, 송신부(126)는 양자화부(125)를 통해 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 UL 채널을 통해 기지국(110)으로 피드백한다.

[0039] 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 MIMO 통신 시스템에서 기지국과 사용자 단말이 DL 채널을 복원하는 절차를 설명하기 위한 도면이다.

[0040] 기지국(110)은 사용자 단말(120)에게 DL 파일럿 신호를 전송하고,(S301) 사용자 단말(120)은 상기 DL 파일럿 신호를 기반으로 DL 채널 정보($\hat{h}_k^{DL}$)를 추정한다.(S303)

[0041] 사용자 단말(120)은 상기 추정한 DL 채널 정보로부터 UL 및 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터, 일례로 출발각/도착각 파라미터(Θ_k), 채널 경로 감쇠 파라미터(p_k)를 추출하고, 상기 추출된 파라미터를 기반으로 DL 채널 경로의 위상 정보(q_k)를 추정한다.(S305) 그런 다음 사용자 단말(120)는 상기 추정한 DL 채널 경로의 위상 정보를 양자화(q_k)하고,(S307) 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 기지국(110)으로 피드백한다.(S309) 이때 사용자 단말(120)은 균등 양자화(uniform quantizing) 기법, 비균일(uniform) 양자화 기법 및 적응형 양자화 기법 중 적어도 하나의 기법을 통해 상기 DL 채널 경로의 위상 정보를 양자화한다.

[0042] 한편, 사용자 단말(120)은 기지국(110)으로 UL 파일럿 신호를 전송하고,(S311) 기지국(110)은 상기 UL 파일럿 신호를 기반으로 UL 채널 정보($\hat{h}_k^{UL}$)를 추정한다.(S313)

[0043] 기지국(110)은 상기 추정한 UL 채널 정보로부터 UL 및 DL 채널의 공통 파라미터 중 적어도 하나의 주요 파라미터, 일례로 출발각/도착각 파라미터(Θ_k)와 채널 경로 감쇠 파라미터(p_k)를 추출하고,(S315) 상기 추출한 출발각/도착각 파라미터(Θ_k) 및 채널 경로 감쇠 파라미터(p_k)와, S309에서 수신한 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보(q_k)를 이용하여 DL 채널을 재구성한다.(S317)

[0044] 그런 다음 기지국(110)은 상기 재구성된 DL 채널과 실제 DL 채널 간의 오차를 보정하여 상기 DL 채널을 복원하고,(S319) 상기 복원된 DL 채널 정보를 이용하여 송신할 신호에 DL 프리코딩을 수행하고,(S321) DL 프리코딩이 수행된 DL 신호를 사용자 단말(120)에게 전송한다.(S323)

[0045] 이하에서는 도 2 내지 도 4에서 설명한 DL 채널 복원 동작에 대하여 수학식을 통해 보다 상세히 설명하도록 한

다.

[0046] 사용자 k∈[K]에서 기지국으로의 UL 채널을 살펴보면 다음과 같다. h_k^{ul}를 배열 응답 벡터의 합으로 정의된 UL 채널이라고 가정하고 기지국에서 균일한 선형 배열(ULA: Uniform Linear Array) 안테나 요소를 가정하면, 협대역(narrowband) UL 채널은 하기 수학식 1과 같이 정의할 수 있다.

수학식 1

[0047]
$$\mathbf{h}_k^{\mathrm{ul}} = \sum_{\ell=1}^{L_k^{\mathrm{ul}}} g_{k,\ell}^{\mathrm{ul}} \mathbf{a}\left(\theta_{k,\ell}^{\mathrm{ul}}, \lambda^{\mathrm{ul}}\right)$$

[0048] 여기서 $L_k^{\mathrm{ul}} \in \mathbb{Z}^+$ 및 $g_{k,\ell}^{\mathrm{ul}} \in \mathbb{C}$ 는 사용자별 채널의 다중 경로의 수와 채널의 복소 계수를 나타낸다. 원거리(far-field) 가정하에서, 어레이 응답 벡터는 도착각 $\theta_{k,l}^{ul}$에 의해 하기 수학식 2와 같이 정의할 수 있다.

수학식 2

[0049]
$$\mathbf{a}\left(\theta_{k,\ell}^{\mathrm{ul}}, \lambda^{\mathrm{ul}}\right) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{ul}}} d \sin\theta_{k,\ell}^{\mathrm{ul}}}, \cdots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{ul}}}(N-1) d \sin\theta_{k,\ell}^{\mathrm{ul}}}\right]$$

[0050] 여기서 λ^{ul}은 UL에 해당하는 파장을 나타내고, d는 안테나 간 간격을 나타낸다. 이때 ℓ번째 경로를 이동하는 협대역 채널 상수는 하기 수학식 3과 같이 정의할 수 있다.

수학식 3

[0051]
$$g_{k,\ell}^{\mathrm{ul}} = p_{k,\ell}^{\mathrm{ul}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{ul}}} r_{k,\ell} + \phi^{\mathrm{ul}}}$$

[0052] 여기서 $p_{\ell,k}^{\mathrm{ul}} \in \mathbb{R}^+$ 는 사용자 k에서 기지국까지의 UL 채널의 ℓ번째 경로 감쇠를 나타내고, $r_{k,\ell}$은 경로 거리를 나타내고, $\phi_{l,k}^{ul}$는 파장에 관계없는 임의의 위상 변화를 나타낸다. 이때 $\phi_{l,k}^{ul}$ 는 경로 반사에 의한 소규모 페이딩 효과를 포착하기 위해 [0.2π]에 걸쳐 균일하게 분포되어 있다.

[0053] 기지국에서 사용자 k까지의 DL 채널은 수학식 1에 나타낸 UL 채널과 유사하게, 어레이 위상 프로파일을 나타내는 복소 채널 계수 $g_{k,l}^{dl}$과 출발각 $\theta_{k,l}^{dl}$에 해당하는 어레이 응답 벡터 a($\theta_{k,l}^{dl}$, λ^{dl})의 합에 의해 하기 수학식 4와 같이 모델링된다.

수학식 4

[0054] $$\mathbf{h}_k^{\mathrm{dl}} = \sum_{\ell=1}^{\mathrm{L}_k^{\mathrm{dl}}} \mathrm{g}_{\mathrm{k},\ell}^{\mathrm{dl}} \mathbf{a}\left(\theta_{k,\ell}^{\mathrm{dl}}, \lambda^{\mathrm{dl}}\right)$$

[0055] 여기서 $L_k^{\mathrm{dl}} \in \mathbb{Z}^+$ 는 각 페이딩에 대한 다중 경로의 수를 나타내고, $g_{k,\ell}^{\mathrm{dl}} \in \mathbb{C}$ 는 채널의 복소 계수를 나타낸다. 원거리 가정하에서, 어레이 응답 벡터는 출발각 $\theta_{k,l}^{dl}$ 에 의해 하기 수학식 5와 같이 정의된다.

수학식 5

[0056] $$\mathbf{a}\left(\theta_{k,\ell}^{\mathrm{dl}}, \lambda^{\mathrm{dl}}\right) = \left[1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{dl}}} d \sin\theta_{k,\ell}^{\mathrm{dl}}}, \cdots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{dl}}}(N-1) d \sin\theta_{k,\ell}^{\mathrm{dl}}}\right]$$

[0057] 여기서 λ^{dl} 은 DL에 해당하는 파장을 의미한다. ℓ번째 경로를 이동하는 협대역 채널 상수는 하기 수학식 6과 같이 주어진다.

수학식 6

[0058] $$g_{k,\ell}^{\mathrm{dl}} = p_{k,\ell}^{\mathrm{dl}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{dl}}} r_{k,\ell} + \phi^{\mathrm{dl}}}$$

[0059] 여기서 $p_{\ell,k}^{\mathrm{dl}} \in \mathbb{R}^+$ 는 기지국에서 사용자 k까지의 DL 채널의 ℓ 번째 경로 감쇠를 나타내고, $\mathrm{r}_{\mathrm{k},\ell}$ 은 경로 거리를 나타내고, $\phi_{l,k}^{dl}$ 는 파장에 관계없이 임의의 위상을 나타내며, 경로 반사에 의한 소규모 페이딩 효과를 포착하기 위해 [0.2π]에 걸쳐 균일하게 분포되어 있다.

[0060] 수학식 1 및 수학식 4에 표현된 단순화된 단일 클러스터 채널 모델은 여러 경로를 통해 클러스터 내 확산 반사의 산란 효과를 포착한다. 본 발명에서 제안하는 채널 모델은 각 경로에서 각도 스프레드가 출발각과 도착각에 집중되어 매크로 레벨 채널 전파 효과를 나타내는 여러 우세 경로를 클러스터가 가지고 있다고 가정한다. 특히 본 발명에서 제안하는 채널 모델은 확산 반사로부터의 산란이 덜 두드러지는 고주파에서 경험적으로 정확하다는 것이 입증되었다.

[0061] 한편, 서로 다른 파장, 즉 λ^{ul}과 λ^{dl}에서 작동하는 UL 및 DL 채널은 채널 계수 $g_{k,l}^{ul}$ 및 $g_{k,l}^{dl}$, 그리고 배열 응답 벡터 $\mathrm{a}(\theta_{k,l}^{ul}, \lambda^{ul})$ 및 $\mathrm{a}(\theta_{k,l}^{dl}, \lambda^{dl})$가 파장에 따라 변하기 때문에 상호성이 부족하다. 그러나 UL 채널 및 DL 채널에서 공통적으로 사용되는 기하학적 파라미터들(geometric parameters) 중 일부 주요 파라미터는 주파수에 따라 변화하지 않는 주파수에 독립적인 특성을 갖는다. 이러한 주파수 불변 파라미터에 대해 설명하면 다음과 같다.

[0062] - 도착각 파라미터 $\theta_{k,l}^{ul}$ 및 출발각 파라미터 $\theta_{k,l}^{dl}$: 파동 전파의 기본 파라미터이며, 이러한 파라미터는 안테나 경로 기하학의 고유한 대칭성 때문에 동일하다고 가정한다.

[0063] - 채널 경로 감쇠 파라미터 $p_{\ell,k}^{\mathrm{ul}} \in \mathbb{R}^+$ 및 $p_{\ell,k}^{\mathrm{dl}} \in \mathbb{R}^+$: 일반적으로 주파수에 의존하며, 이는 전방향 안테나의 경로 손실로써 하기 수학식 7과 같이 모델링된다.

수학식 7

[0064]
$$-10\log p_{k,\ell}^{\mathrm{ul}} = 20\log\left(\frac{4\pi r_0}{\lambda^{\mathrm{ul}}} + m\log\left(\frac{r_{k,\ell}}{r_0}\right) + X_{k,\ell}\right)$$

[0065] 여기서 파라미터 r_0는 기준 거리를 나타내고, m은 경로 손실 지수를 나타내고, $X_{k,\ell}$은 그림자 효과 (shadowing effect)를 나타낸다. UL 및 DL 채널 사이에 경로 거리 $r_{k,\ell}$이 공유됨에 따라, 지배적인 항인 $m\log\left(\frac{r_{k,l}}{r_n}\right)$이 두 채널 사이에서 동일하게 된다. 따라서 UL와 DL의 경로 감쇠 항은 주파수 불변으로 간주한다.

[0066] - 위상 변동 파라미터 $\phi_{l,k}^{ul}$ 및 $\phi_{l,k}^{dl}$: 반사 및 굴절과 같은 현상에서 발생하며, 결과적으로 이러한 파라미터는 물리적 환경이 변경되지 않는 한 UL 및 DL 사이에서 일관된다.

[0067] 하지만 DL 채널을 더 정확하게 복원하기 위해서는 필수적으로 DL 채널 계수의 위상 정보를 알아야 한다. 이때 채널 계수에서 위상은 하기 수학식 8 및 수학식 9와 같이 표현할 수 있다.

수학식 8

[0068]
$$\angle g_{k,\ell}^{\mathrm{dl}} = -j\frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{dl}}} r_{k,\ell} + \phi^{\mathrm{dl}}$$

수학식 9

[0069]
$$\angle g_{k,\ell}^{\mathrm{ul}} = -j\frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{ul}}} r_{k,\ell} + \phi^{\mathrm{ul}}$$

[0070] 수학식 8 및 수학식 9에서 알 수 있듯이 UL 채널 계수와 DL 채널 계수의 위상은 명확하게 다르므로, 본 발명의 실시예에서는 DL 채널을 구성하는데 필요한 DL 채널 계수의 위상 정보를 사용자 단말에서 추정한 후 기지국으로 피드백 해준다. 이때 사용자 단말은 해당 정보를 피드백하기위해 양자화를 하며 이를 하기 수학식 10과 같이 표현할 수 있다.

수학식 10

[0071]
$$Q(\angle g_{k,\ell}^{\mathrm{dl}}, B_{k,\ell}) = q_{k,\ell}^{\mathrm{dl}}, \quad q_{k,\ell}^{\mathrm{dl}} = \arg\min_{j=1,\cdots,2^{B_{k,\ell}}} |\angle g_{k,\ell}^{\mathrm{dl}} - c_{j,k,\ell}|$$

[0072] 이때 $c_{j,k,l}$은 코드북 $C_{k,\ell} = \{0, 2^{\frac{2\pi}{2^{B_{k,\ell}}}}, \cdots, 2^{\frac{2\pi}{2^{B_{k,\ell}}}(2^{B_{k,\ell}}-1)}\}$ 에서 선택된 코드워드로, 2π를 $B_{k,l}$의 비트로 나누어 표현할 수 있는 양자화된 위상 정보를 의미하고, 상기 $B_{k,l}$은 해당 사용자의 l번째 경로의 위상 정보를 피드백하는데 사용될 비트의 수를 의미한다.

[0073] 이와 같이 본 발명의 실시예에서는 이러한 주파수 불변 채널 파라미터와 피드백 받은 양자화된 채널 경로의 위상 정보를 활용하여 DL 채널을 복원한다. 후술할 본 발명의 실시예에서는 설명의 편의를 위해 각 파라미터에 대

한 UL와 DL에 대한 구분을 생략하도록 한다. 즉 $\theta_{k,l} = \theta_{k,l}^{ul} = \theta_{k,l}^{dl}$ 와 같이 출발각과 도착각을 단순화하고, 경로 감쇠 $p_{k,l} = p_{k,l}^{ul} = p_{k,l}^{dl}$ 및 위상 변동 $\phi_{k,l} = \phi_{k,l}^{ul} = \phi_{k,l}^{dl}$ 에 대해서도 마찬가지로 적용한다. 또한 DL 채널 경로의 양자화된 위상 정보 역시 $q_{k,l}^{dl} = q_{k,l}$ 와 같이 단순화하여 표현하고, $L_k = L_k^{ul} = L_k^{dl}$ 와 같이 UL 및 DL의 채널 경로 수가 같다고 가정한다.

[0074] 다음으로 본 발명의 실시예에서는 UL 채널 h_k^{ul} , 각 사용자에 대한 주파수 불변 채널 파라미터 $\{\theta_{k,l}, p_{k,l}\}_{l=1}^{L_k}$ 및 DL 채널 경로의 위상 정보 피드백을 기반으로 한 실제 DL 채널과 비교하여 평균 제곱 오차(MSE: Mean Square Error) 기반 최적 채널 재구성 알고리즘을 설명하도록 한다.

[0075] DL 채널 경로의 위상이 균일하게 분포되어 있다고 가정할 때, 즉 $\angle g_{k,\ell}^{\mathrm{dl}} = \frac{2\pi}{\lambda^{\mathrm{dl}}} r_{k,\ell} - \phi_{k,\ell} \in [0, 2\pi) \; \forall \, \ell \in L_k$ 이라고 하면, 양자화된 채널 경로 위상과 실제 위상과의 차이는 하기 수학식 11과 같이 정의된다. 여기서 채널 경로 위상 정보($\angle g_{k,l}^{dl}$)는 사용자 단말이 기지국으로부터 수신한 DL 파일럿을 통해 추정한 DL 채널을 바탕으로 추정되며, 하기 수학식 11에서 $q_{k,l}$은 양자화된 채널 경로 위상 정보를 나타낸다.

수학식 11

[0076] $$\angle g_{k,\ell}^{\mathrm{dl}} = q_{k,\ell} + \delta_{k,\ell}$$

[0077] 이 때, 양자화 에러인 $\delta_{k,l}$은 $[-\frac{2\pi}{2^{B_{k,\ell}+1}}, \frac{2\pi}{2^{B_{k,\ell}+1}}]$ 사이에 균일하게 분포하게 되고, 이를 기반으로 하여 MSE 관점에서 최적의 DL 채널 추정 값은 하기 수학식 12와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 12

[0078] $$\hat{\mathbf{h}}_k^{\mathrm{dl,MMSE}} = \mathrm{E}[\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{dl}} | \boldsymbol{h}_k^{\mathrm{ul}}, \boldsymbol{q}_k, \boldsymbol{\theta}_k, \boldsymbol{p}_k]$$

[0079] 여기서 q_k는 양자화된 DL 채널 경로의 위상 정보를 경로별로 쌓은 벡터를 나타내고, Θ_k는 도착각을 경로별로 쌓은 벡터를 나타내고, p_k는 경로 감쇠로 인한 이득을 경로별로 쌓은 벡터를 나타낸다. 이때 수학식 12를 닫힌 형태로 풀이하면 하기 수학식 13을 도출할 수 있다.

수학식 13

[0080] $$\hat{\mathbf{h}}_k^{\mathrm{dl,MMSE}} = \mathbf{A}_k \mathbf{P}_k \mathbf{Q}_k \boldsymbol{\eta}_k$$

[0081] 여기서 $\mathbf{A}_k = \left[\mathbf{a}\left(\theta_{k,1}, \lambda^{\mathrm{dl}}\right), \cdots, \mathbf{a}\left(\theta_{k,L_k}, \lambda^{\mathrm{dl}}\right)\right] \in \mathbb{C}^{N \times L_k}$ 는 도착각을 기반으로 한 DL 채널의 어레이 응답 벡터를 행렬화 한 어레이 응답 행렬을 의미하고, P_k는 대각 성분이 p_k인 대각 행렬을 의미하고, Q_k는 대각 성분이 q_k인 대각 행렬을 의미하고, η_k는 L_k 길이의 열 벡터로 각 성분은 $\eta_{k,l}$로 할당 비트에 따른 양자화 에러의 기대 값인 하기 수학식 14를 의미한다.

수학식 14

$$\eta_{k,\ell} = \int_{-\frac{2\pi}{2^{B_{k,\ell}+1}}}^{\frac{2\pi}{2^{B_{k,\ell}+1}}} e^{j\delta_{k,\ell}} f(\delta_{k,\ell}|\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{ul}}, q_k, \boldsymbol{\theta}_k, \boldsymbol{p}_k) d\delta_{k,\ell}$$

[0082]

[0083] 수학식 14를 계산하면 하기 수학식 15를 얻을 수 있다.

수학식 15

$$\eta_{k,\ell} = \frac{2^{B_{k,\ell}}}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2^{B_{k,\ell}}}\right)$$

[0084]

[0085] 수학식 15에 나타낸 $\eta_{k,l}$ 값은 채널 경로 위상 피드백에 할당한 비트 수인 $B_{k,l}$에 비례하는 함수로, 할당 비트 수가 적을 때는 그 값이 0에 수렴하여 DL 채널 구성이 제대로 이루어지지 않지만 비트 수가 많을 때에는 그 값이 1에 수렴하여 DL 채널을 정확하게 구성하게 된다는 의미를 갖는다. 이러한 결과는 단순한 직관인 DL 채널 경로의 위상을 더 높은 정밀도로 피드백 할수록 더 정확하게 DL 채널을 예측할 수 있다는 것과 매우 잘 맞아 떨어진다.

[0086] 위 과정과 수학식 13을 통해, UL 파일럿과 DL 채널 경로 위상 피드백을 이용하여 대규모 MIMO 통신 시스템에서 DL 채널의 복원이 가능하게 된다.

[0087] 다음으로는 사용자 별 사용할 수 있는 비트의 총량이 정해진 상황에서 각 경로의 비트 할당을 최적화하는 방법에 대하여 설명하도록 한다. 후술할 본 발명의 실시예에서는 설명의 편의를 위해 사용자와 관련된 인덱스 k를 생략하여 표현하도록 한다.

[0088] 실제 DL 채널과 재구성한 DL 채널의 MSE를 최소화하는 비트 할당 문제는 하기 수학식 16과 같이 표현할 수 있다.

수학식 16

$$\arg\min_{B_1, B_2, \cdots B_L} \mathrm{E}\left[\|\mathbf{h}^{\mathrm{dl}} - \hat{\mathbf{h}}^{\mathrm{dl-MMSE}}\|_2^2 | \mathbf{P}, \mathbf{Q}, B_1, \cdots, B_L\right], \quad s.t. \sum_{l=1}^{L} B_l = B^{\mathrm{tot}}$$

[0089]

[0090] 이 때, 특정 사용자가 총 사용할 수 있는 비트의 수는 B^{tot} 비트이고, 이러한 비트 할당 문제는 하기 수학식 17과 같은 닫힌 형태로 변경이 가능하다.

수학식 17

$$\arg\min_{B_1, B_2, \cdots B_L} \sum_{l=1}^{L} p_l^2 \left(1 - \left(\frac{2^{B_l}}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2^{B_l}}\right)\right)^2\right), \quad s.t. \sum_{l=1}^{L} B_l = B^{\mathrm{tot}}$$

[0091]

[0092] 수학식 17을 최적화하는 B_1, 쪋, B_L을 구함으로써, 총 B^{tot} 비트를 사용할 때 UL 파일럿과 DL 채널 경로 위상 피드백을 통해 DL 채널을 추정하기 위한 MSE 관점에서 최적의 비트 할당의 해답을 구할 수 있다.

[0093] 수학식 17의 최적화 문제를 해결하는 방법은 여러가지가 있으며 이 중 하나의 예시로써 B_1, ..., B_L이 모두 0보다 큰 정수라는 점을 이용하는 정수 프로그래밍을 통한 문제 해결 방법에 대해 설명하면 다음과 같다.

[0094] 도 5는 수학식 15의 내부 함수가 볼록성(convexity)을 가지며 항상 감소하는 함수로 완화한 결과를 나타낸 그래프이다.

[0095] 수학식 17의 $\left(1-\left(\frac{2^{B_l}}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{2^{B_l}}\right)\right)^2\right)$ 는 B_l에 대해 볼록(convex) 함수도 오목(concave) 함수도 아니지만 도 4에서와 같이 B_1, 쩐, B_L이 정수라는 점을 이용하면 볼록성을 가지며 항상 감소하는 함수 $f'(B_l)$로 완화 가능하다. 이러한 함수들의 합을 최소화하는 문제의 해답은 각 함수들의 입력 값인 B_l 값이 1 증가할 때의 함수 출력 값의 감소량을 모든 p_l에 대해 조사하여 구할 수 있다. 해당 함수의 특성으로 인해 B_l 값이 x에서 x+1로 증가할 때 l번째 경로의 MSE 감소량은 항상 x+1에서 x+2로 증가할 때의 감소량보다 크다.

[0096] 따라서 모든 가능한 구간에 대해 $f'(B_l)-f'(B_l-1)$을 계산한 뒤 이 중에서 가장 큰 B^{tot}개를 선택한 결과가, 수학식 15를 최소화하도록 총 B^{tot} 비트를 각 채널 경로에 대해 할당한 결과와 동일하다. 위 과정을 통해 UL 파일럿과 DL 채널 경로의 위상 정보 피드백을 통해 DL 채널을 예측할 때, MSE 관점에서 최적의 비트 할당 문제를 해결할 수 있다.

[0097] 이렇게 예측된 DL 채널은 합-주파수 효율을 최대화하는 프리코딩 기법 등에 사용될 수 있다. 이하에서는 본 발명에서 제안하는 UL 파일럿과 DL 채널 경로의 위상 정보 피드백을 통한 DL 채널 구성과 MSE 관점에서 최적의 비트 할당을 포함하는 제안된 알고리즘에 의해 달성된 에르고딕 합-주파수 효율(Ergodic sum-spectral efficiency)을 시스템 수준 시뮬레이션을 사용하여 기존 프리코딩 기술과 비교하도록 한다. 이때 시뮬레이션 파라미터와 네트워크 토폴로지는 하기 표 1에 자세히 설명되어 있다.

표 1

[0098]

Parameters	Value
BS topology	Single hexagonal cell with ISD 500m
User distribution	Uniform per cell
UL carrier frequency	10 GHz
DL carrier frequency	12 GHz (f_c^{dl}/f_c^{ul} = 1.2)
The number of users K	16
Noise power	-113dB
Path-loss model	Standard model at TR 38.901
BS/UE height	32m/1.5m

[0099] 본 발명의 실시예에서의 시뮬레이션은 각 시나리오에 대해 무작위로 분산된 사용자 위치와 함께 고정된 기지국 위치를 고려한다. 이는 다양한 네트워크 조건에서 알고리즘의 성능에 대한 공정한 평가를 위함이다.

[0100] - CSIT 지식과 프리코딩의 영향

[0101] 도 6은 CSIT 지식과 프리코딩 전략에 따른 에르고딕 합-주파수 효율을 나타낸 그래프이다.

[0102] 도시된 그래프는 완벽한 UL 채널의 지식을 갖춘 ZF(Zero Forcing) 프리코딩이 벤치마크로 표시된 후, UL 채널에서 재구성된 DL 채널을 사용한 ZF 프리코딩이 이어진다. 이때, DL 채널의 재구성에는 UL 파일럿만을 이용한 재구성 결과와, UL 파일럿과 사용자당 10비트의 DL 채널 경로 위상 정보에 대한 피드백 모두를 이용한 재구성 결과를 포함한다

[0103] 다음으로는 10비트의 피드백을 포함한 채널 재구성 결과를 이용한 GPI 기법이 표현되고, 다음으로는 피드백이 없을 때와 있을 때의 채널 재구성 결과와 DL 채널 공분산을 모두 사용할 때의 GPI 알고리즘을 이용한 프리코딩 결과가 표현된다. 이때, ZF 프리코딩 기법과 DL 채널 재구성 결과와 채널 공분산 행렬을 모두 이용하는 GPI 프리코딩 기법 모두, UL 파일럿만을 이용한 DL 채널 재구성보다 UL 파일럿과 DL 채널 경로 위상을 모두 이용한 DL

채널 재구성이 합-주파수 효율이 더 크다는 것을 확인할 수 있으며, 안테나 개수가 증가함에 따라 기존 WMMSE Weighted Minimum Mean Squared Error) 알고리즘과의 성능 격차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

[0104] 이와 같이 본 발명에서 제안하는 UL 파일럿과 DL 채널 경로 위상의 피드백을 함께 이용하는 시스템이 UL 파일럿만을 이용하는 기존 방식보다 어느 상황에서나 더 좋은 에르고딕 합-주파수 효율을 나타냄을 알 수 있다.

[0105] - DL 채널 경로 위상 정보 피드백의 비트 수에 따른 영향

[0106] 도 7은 DL 채널 경로 위상 정보 피드백의 비트 수에 따른 에르고딕 합-주파수 효율을 나타낸 그래프이다.

[0107] 도시된 그래프는 UL 파일럿과 DL 채널 경로 위상 정보 피드백을 이용한 DL 채널 재구성과 이를 이용한 프리코딩을 적용한 시스템의 에르고딕 합-주파수 효율을 사용자당 피드백 비트 수의 변화에 대해 표현하였다.

[0108] 이때 시뮬레이션은 $B^{tot}=\{0,5,10,15,20,\infty\}$ 값으로 수행되었으며, 비트 수가 증가함에 따라서 WMMSE의 결과를 달성하는 것을 확인할 수 있다. 또한 안테나 수가 적을 때는 피드백 비트 수가 증가함에 따라 에르고딕 합-주파수 효율이 안테나 수가 많을 때에 비해 더 빠르게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

[0109] - 채널 경로 수에 따른 영향

[0110] 도 8은 채널 경로 수 증가에 따른 에르고딕 합-주파수 효율을 나타낸 그래프이다.

[0111] 도시된 그래프는 채널 경로의 수가 증가함에 따라 에르고딕 합-주파수 효율이 감소하는 것을 보여준다. 이때 시뮬레이션은 채널 경로 수 $L=\{2,4,8,16\}$ 값으로 수행되었다.

[0112] DL 채널 경로 위상 피드백이 있을 때와 없을 때를 비교하면, 피드백이 있을 때 에르고딕 합-주파수 효율의 저하 속도가 더 느리고, 경로의 수가 증가함에 따라 기하학적 파라미터의 추정 오류가 증가하며, 공간 영역의 직교성이 감소하여 프리코딩 이득이 감소하게 된다. 하지만 DL 채널 경로의 위상 피드백을 최적화하면, DL 채널에서 각 경로의 경로 이득의 크기에 따라 강한 경로는 피드백에 많은 비트를 할당하고, 약한 경로는 피드백에 적은 비트를 할당하여, 실제 DL 채널과의 MSE를 최소화 시키도록 DL 채널을 재구성한다.

[0113] 따라서 위와 같은 이유로 에르고딕 합-주파수 효율이 감소할 때에도 더욱 더 정확한 DL 채널 재구성을 통해 효율의 저하 속도를 늦춘다.

[0114] 이와 같은 본 발명에서 제안하는 DL 채널 복원 방법은 다양한 컴퓨터 구성요소를 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령어의 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체는 프로그램 명령어, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다.

[0115] 상기 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체에 기록되는 프로그램 명령어는 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 분야의 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다.

[0116] 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체의 예에는, 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체, CD-ROM, DVD 와 같은 광기록 매체, 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 ROM, RAM, 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령어를 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다.

[0117] 프로그램 명령어의 예에는, 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드도 포함된다. 상기 하드웨어 장치는 본 발명에 따른 처리를 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.

[0118] 이상에서는 본 발명의 다양한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였지만, 본 발명은 상술한 특정의 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 다양한 변형실시가 가능한 것은 물론이고, 이러한 변형실시들은 본 발명의 기술적 사상이나 전망으로부터 개별적으로 이해되어져서는 안될 것이다.

부호의 설명

[0120] 100: MIMO 통신 시스템

110: 기지국

120: 사용자 단말

111: 수신부

112: UL 채널 정보 추정부

113: 파라미터 추출부

114: DL 채널 재구성부

115: DL 채널 복원부

116: 송신부

121: 수신부

122: DL 채널 정보 추정부

123: 파라미터 추출부

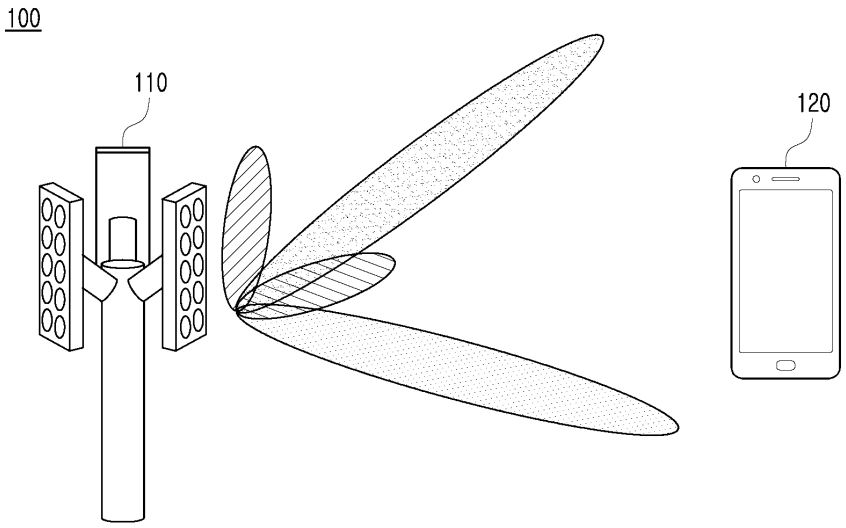
124: 위상 정보 추정부

125: 양자화부

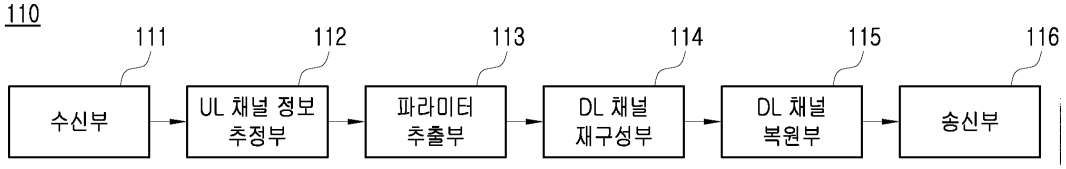
126: 송신부

도면

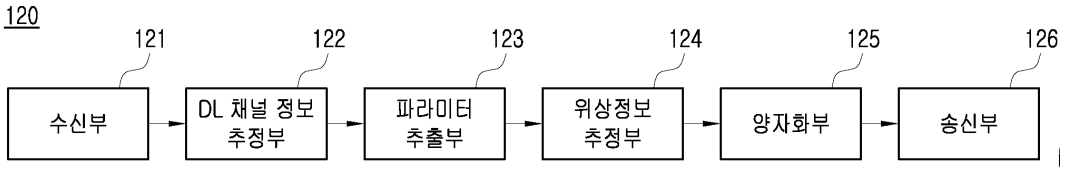
도면1



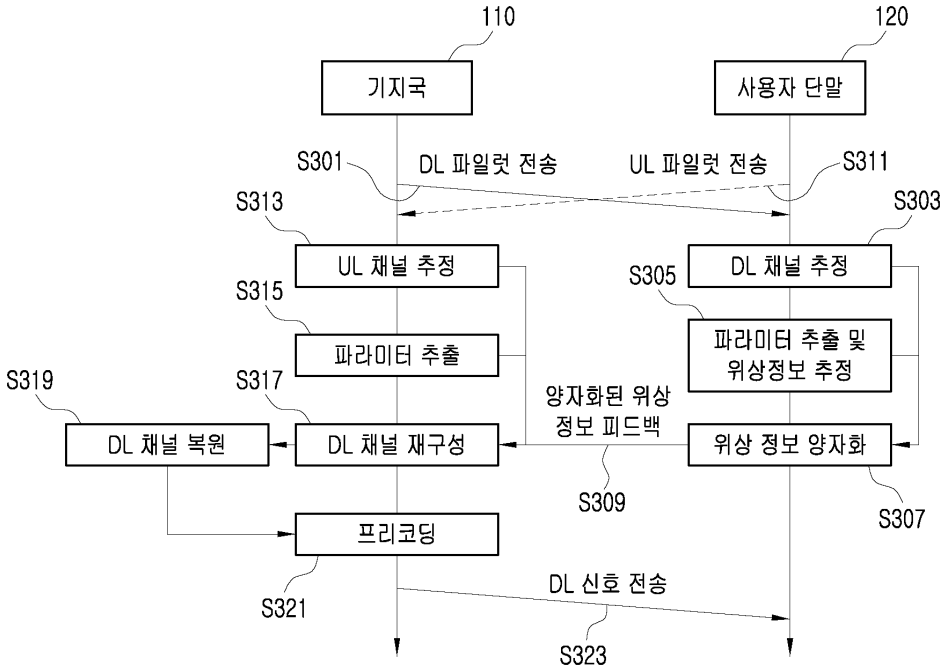
도면2



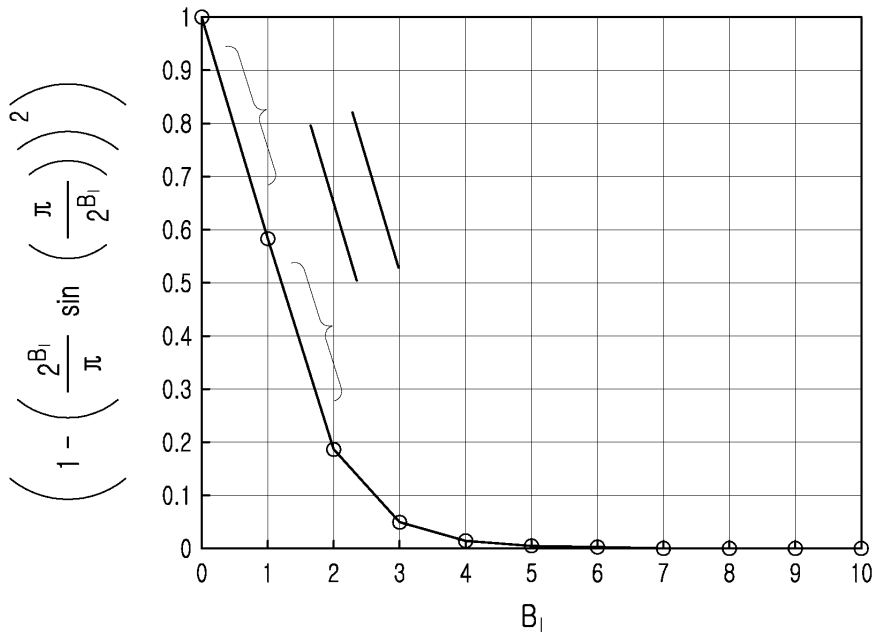
도면3


120
121
수신부
122
DL 채널 정보 추정부
123
파라미터 추출부
124
위상정보 추정부
125
양자화부
126
송신부

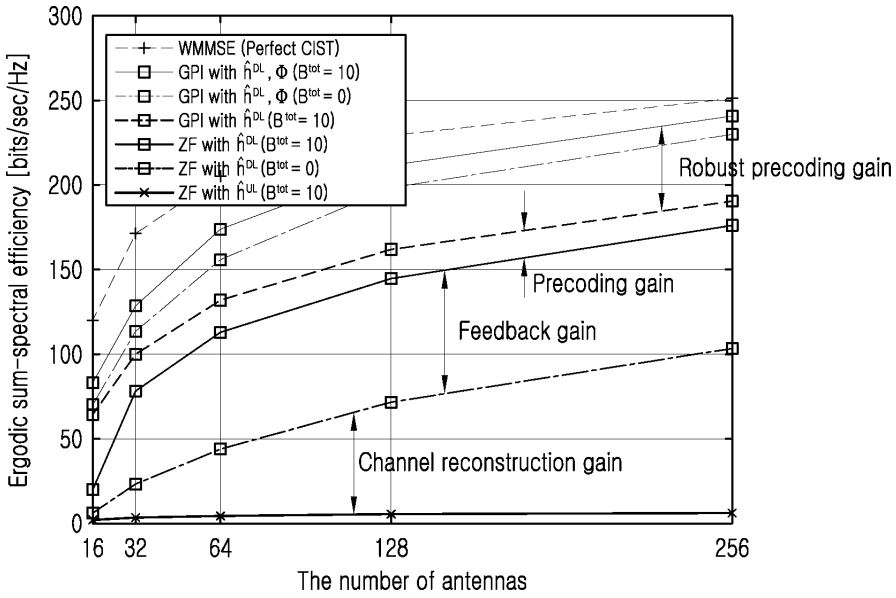
도면4


110
기지국
120
사용자 단말
S301
DL 파일럿 전송
UL 파일럿 전송
S311
S313
S303
UL 채널 추정
DL 채널 추정
S305
S315
파라미터 추출
파라미터 추출 및 위상정보 추정
S319
S317
양자화된 위상 정보 피드백
DL 채널 복원
DL 채널 재구성
위상 정보 양자화
S309
S307
프리코딩
DL 신호 전송
S321
S323

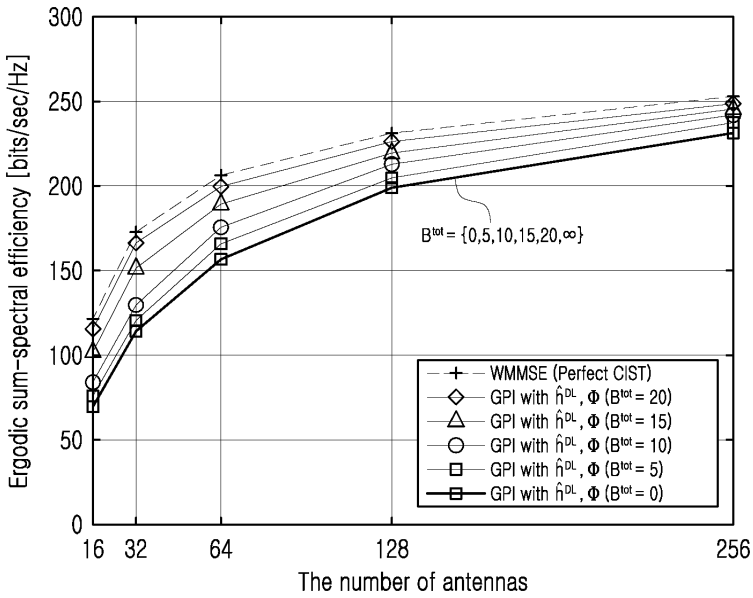
도면5


1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
B_l
$\left(1-\left(\frac{2^{B_l}}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{2^{B_l}}\right)\right)^2\right)$

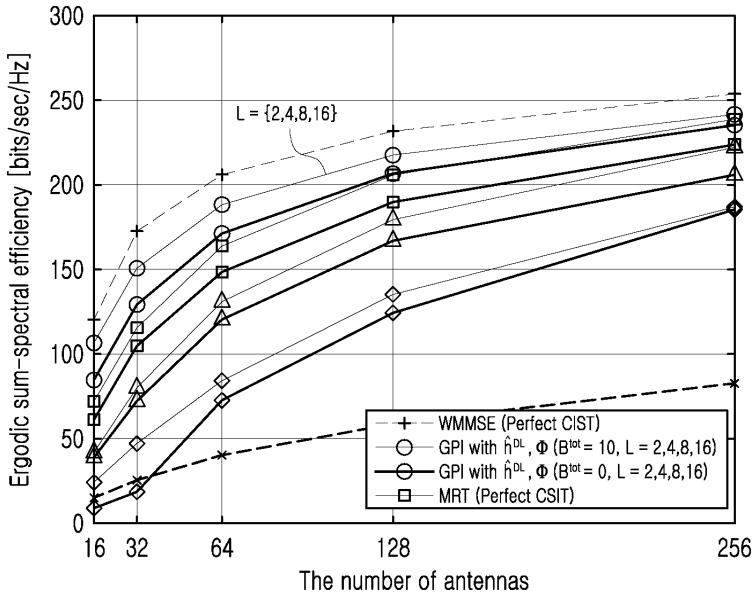
도면6


WMMSE (Perfect CIST)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 10)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 0)
GPI with $\hat{H}^{DL}$ (B^{tot} = 10)
ZF with $\hat{H}^{DL}$ (B^{tot} = 10)
ZF with $\hat{H}^{DL}$ (B^{tot} = 0)
ZF with $\hat{H}^{UL}$ (B^{tot} = 10)
Robust precoding gain
Precoding gain
Feedback gain
Channel reconstruction gain
Ergodic sum-spectral efficiency [bits/sec/Hz]
The number of antennas
300
250
200
150
100
50
0
16
32
64
128
256

도면7


B^{tot} = {0,5,10,15,20,∞}
WMMSE (Perfect CIST)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 20)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 15)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 10)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 5)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 0)
Ergodic sum-spectral efficiency [bits/sec/Hz]
The number of antennas
300
250
200
150
100
50
0
16
32
64
128
256

도면8


300
250
200
150
100
50
0
16
32
64
128
256
Ergodic sum-spectral efficiency [bits/sec/Hz]
The number of antennas
L = {2,4,8,16}
WMMSE (Perfect CIST)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 10, L = 2,4,8,16)
GPI with $\hat{H}^{DL}$, Φ (B^{tot} = 0, L = 2,4,8,16)
MRT (Perfect CSIT)