(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2011-0138979
(43) 공개일자 2011년12월28일

(51) Int. Cl.
H04B 7/04 (2006.01) *H04W 72/12* (2009.01)
(21) 출원번호 10-2010-0059187
(22) 출원일자 2010년06월22일
심사청구일자 없음

(71) 출원인
삼성전자주식회사
경기도 수원시 영통구 매탄동 416
고려대학교 산학협력단
서울 성북구 안암동5가 1
(72) 발명자
김성진
경기 수원시 팔달구 영통동 청명마을 삼성래미안 아파트 437동 1901호
박창순
충북 충주시 교현2동 381-11호
양 홍-추안
캐나다, 브리티시컬럼비아주, 빅토리아시, 사서함 3055 STN CSC, 빅토리아유니버시티, 디파트먼트 오브 일렉트리칼 앤드 컴퓨터 엔지니어링, 우편번호 V8W 3P6
(74) 대리인
특허법인무한

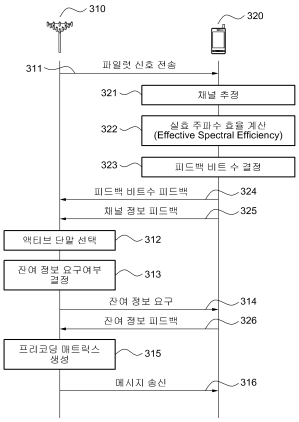
전체 청구항 수 : 총 19 항

(54) 피드백 손실을 고려하는 다중 사용자 MIMO 통신 시스템

(57) 요 약

피드백 손실을 고려하는 MU-MIMO 통신 시스템이 개시된다. 업링크 무선 자원 및 다운링크 무선자원을 포함하는 전체 무선 자원에 대한 실효 주파수 효율(Effective Spectral Efficiency)에 기초하여 채널 정보의 피드백 비트 수를 적절히 결정함으로써 MU-MIMO 통신 시스템의 전체의 성능을 향상할 수 있다. 또한 실효 주파수 효율에 기초한 피드백 정보를 고려하여 사용자 스케줄링을 수행함으로써 보다 향상된 통신 성능을 제공하는 스케줄링이 가능하다.

대 표 도 - 도3



특허청구의 범위

청구항 1

다중 송신 안테나를 구비하는 기지국과 단말이 존재하는 무선 통신 환경에서 다운링크 수신을 위한 상기 단말의 통신 방법에 있어서,

상기 기지국 및 상기 단말 사이의 다운링크 채널을 추정하고 상기 기지국 및 상기 단말 사이의 업링크 채널 상태를 취득하는 단계;

상기 단말이 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 데에 요구되는 피드백 시간의 길이를 기초로 업링크 무선 자원 및 다운링크 무선 자원을 포함하는 전체 무선 자원과 상기 업링크 채널 상태 및 다운링크 채널 상태를 포함하는 전체 채널 상태를 고려한 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)을 계산하는 단계;

상기 실효 주파수 효율을 기초로 상기 다운링크 채널에 관한 정보의 피드백 비트 수를 결정하는 단계; 및

상기 피드백 비트 수에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 단계

를 포함하는 단말의 통신 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 피드백 비트 수에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 단계는

상기 피드백 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보 또는 상기 피드백 비트 수와 다른 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 상기 기지국으로 더 피드백하는 단계인 단말의 통신 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 피드백 비트 수에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 단계는

상기 피드백 비트 수가 임계값보다 큰지 여부에 따라 상기 피드백 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보 또는 상기 피드백 비트 수와 다른 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 상기 기지국으로 더 피드백하는 단계인 단말의 통신 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는

상기 실효 주파수 효율을 최대가 되도록 하는 상기 피드백 시간의 길이를 이용하여 상기 피드백 비트 수를 설정하는 단계

를 포함하는 단말의 통신 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는

상기 피드백 시간의 길이가 제로인 경우의 상기 실효 주파수 효율 또는 상기 피드백 시간의 길이에 대한 상기

실효 주파수 효율의 미분(differentiation)이 제로인 경우의 상기 실효 주파수 효율 중 어느 하나를 상기 실효 주파수 효율의 하한(lower bound)의 최대값으로 설정하는 단계; 및

상기 피드백 비트 수를 결정하기 위하여 상기 실효 주파수 효율의 하한(lower bound)의 최대값을 이용하는 단계

를 포함하는 단말의 통신 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 실효 주파수 효율을 계산하는 단계는

제한된 전체 시간 자원 내에서 상기 피드백 시간의 길이, 상기 기지국의 다운링크 전송을 위한 시간의 길이 및 상기 피드백 시간의 길이의 함수인 상기 기지국의 레이트 합(sum-rate)을 기초로 상기 실효 주파수 효율을 계산하는 단계인 단말의 통신 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는

상기 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)이 최대가 되도록 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계인 단말의 통신 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는

미리 설정된 후보 값들 중 어느 하나로 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계인 단말의 통신 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는

상기 실효 주파수 효율이 최대가 되도록 상기 미리 설정된 후보 값들 중 어느 하나를 선택하는 단계

를 포함하는 단말의 통신 방법.

청구항 10

기지국으로부터 파일럿 신호를 수신하여 상기 기지국 및 단말 사이의 다운링크 채널을 추정하고 상기 기지국 및 상기 단말 사이의 업링크 채널 상태를 취득하는 단계;

상기 다운링크 채널에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 데에 요구되는 피드백 시간의 길이를 기초로 업링크 무선 자원 및 다운링크 무선 자원을 포함하는 전체 무선 자원과 상기 업링크 채널 상태 및 다운링크 채널 상태를 포함하는 전체 채널 상태를 고려한 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)을 계산하는 단계;

상기 실효 주파수 효율을 기초로 상기 다운링크 채널에 관한 정보의 피드백 비트 수를 결정하는 단계; 및

상기 피드백 비트 수에 관한 정보 및 미리 설정된 기준 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 기지

국으로 송신하는 단계

를 포함하는 단말의 통신 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는

상기 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)이 최대가 되도록 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계인 단말의 통신 방법.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는

미리 설정된 후보 값들 중 어느 하나로 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계인 단말의 통신 방법.

청구항 13

제10항에 있어서,

상기 기지국의 요청에 따라 상기 피드백 비트 수와 상기 기준 비트 수의 차의 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 잔여(remained) 정보를 기지국으로 더 피드백하는 단계

를 더 포함하는 단말의 통신 방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 기지국의 요청은 상기 피드백 비트 수가 미리 설정된 임계값보다 큰지 여부에 의존하는 단말의 통신 방법.

청구항 15

기지국의 통신 방법에 있어서,

상기 기지국 및 복수의 단말들 각각 사이의 다운링크 채널에 관한 기준 비트 수를 갖는 제1 정보를 수신하는 단계;

상기 복수의 단말들 각각으로부터 피드백 비트 수에 관한 정보를 수신하는 단계;

상기 제1 정보를 기초로 복수의 단말들 중에서 액티브 단말들을 선택하는 단계; 및

상기 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수에 따라 상기 액티브 단말들에 상기 피드백 비트 수와 상기 기준 비트 수의 차의 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 잔여 정보를 요구하는 단계

를 포함하는 기지국의 통신 방법.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 다운링크 채널에 관한 잔여 정보를 요구하는 단계는

상기 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수가 미리 설정된 임계값 보다 큰지 여부에 의존하여 상기 다운링크 채널에 관한 잔여 정보를 요구하는 단계인 기지국의 통신 방법.

청구항 17

제15항에 있어서,

상기 액티브 단말들을 위한 프리코딩 매트릭스를 생성하는 단계

를 더 포함하는 기지국의 통신 방법.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 프리코딩 매트릭스를 생성하는 단계는

상기 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수 모두가 미리 설정된 임계값보다 작거나 같은 경우, 상기 제1 정보를 기초로 상기 프리코딩 매트릭스를 생성하고,

상기 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수 중 적어도 하나가 미리 설정된 임계값보다 큰 경우, 상기 제1 정보 및 상기 잔여 정보를 기초로 상기 프리코딩 매트릭스를 생성하는 단계인 기지국의 통신 방법.

청구항 19

제1항 내지 제18항 중 어느 한 항의 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 컴퓨터로 판독 가능한 기록 매체.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 아래의 실시예들은 다중 사용자-다중 입출력(Multi User- Multiple Input Multiple Output; MU-MIMO) 통신 시스템에서 프리코딩 및 스케줄링을 수행하는 기법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 다중 사용자-다중 입출력(MU-MIMO) 환경에서는 각 단말은 해당 채널에 대한 정보를 기지국으로 피드백한다. 기지국은 사용자로부터 피드백 받은 정보를 바탕으로 공간 분할 다운링크 빔포밍과 사용자 스케줄링을 통해 사용자들에게 신호를 전송한다. 이때, 피드백 데이터의 양이 많을수록 다운링크(downlink) 빔포밍 및 사용자 스케줄링의 성능은 향상되지만 업링크(uplink) 채널의 용량은 이와 반대로 감소하는 특성을 가진다.

발명의 내용

과제의 해결 수단

[0003] 본 발명의 일 실시예에 의한 다중 송신 안테나를 구비하는 기지국과 복수의 단말들이 존재하는 무선 통신 환경에서 다운링크 수신을 위한 단말의 통신 방법은 상기 기지국 및 상기 단말 사이의 다운링크 채널을 추정하는 단계; 상기 단말이 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 데에 요구되는 피드백 시간의 길이를 기초로 업링크 무선 자원 및 다운링크 무선 자원을 포함하는 전체무선 자원과 상기 업링크 채널 상태 및 다운링크 채널 상태를 포함하는 전체 채널 상태를 고려한 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)을 계산하는 단계; 상기 전체 무선 자원의 실효 주파수 효율을 기초로 상기 다운링크채널에 관한 정보의 피드백 비트 수를 결정하는 단계; 및 상기 피드백 비트 수에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 단계를 포함한다.

[0004] 상기 피드백 비트 수에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 단계는 상기 피드백 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보 또는 상기 피드백 비트 수와 다른 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 상기 기지국으로 더 피드백하는 단계일 수 있다.

[0005] 상기 피드백 비트 수에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 단계는 상기 피드백 비트 수가 임계값보다 큰지 여부에 따라 상기 피드백 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보 또는 상기 피드백 비트 수와 다른 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 상기 기지국으로 더 피드백하는 단계일 수 있다.

[0006] 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는 상기 실효 주파수 효율을 최대가 되도록 하는 상기 피드백 시간의 길이를 이용하여 상기 피드백 비트 수를 설정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0007] 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는 상기 피드백 시간의 길이가 제로인 경우의 상기 실효 주파수 효율 또는 상기 피드백 시간의 길이에 대한 상기 실효 주파수 효율의 미분(differentiation)이 제로인 경우의 상기 실효 주파수 효율 중 어느 하나를 상기 실효 주파수 효율의 하한(lower bound)의 최대값으로 설정하는 단계; 및 상기 피드백 비트 수를 결정하기 위하여 상기 실효 주파수 효율의 하한(lower bound)의 최대값을 이용하는 단계를 포함할 수 있다.

[0008] 상기 실효 주파수 효율을 계산하는 단계는 제한된 전체 시간 자원 내에서 상기 피드백 시간의 길이, 상기 기지국의 다운링크 전송을 위한 시간의 길이 및 상기 피드백 시간의 길이의 함수인 상기 기지국의 레이트 합(sum-rate)을 기초로 상기 실효 주파수 효율을 계산하는 단계일 수 있다.

[0009] 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는 상기 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)이 최대가 되도록 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계일 수 있다.

[0010] 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는 미리 설정된 후보 값들 중 어느 하나로 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계일 수 있다.

[0011] 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는 상기 실효 주파수 효율이 최대가 되도록 상기 미리 설정된 후보 값들 중 어느 하나를 선택하는 단계를 포함할 수 있다.

[0012] 본 발명의 일 실시예에 의한 단말의 통신 방법은 기지국으로부터 파일럿 신호를 수신하여 상기 기지국 및 단말 사이의 다운링크 채널을 추정하고 상기 기지국 및 상기 단말 사이의 업링크 채널 상태를 취득하는 단계; 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 상기 기지국으로 피드백하는 데에 요구되는 피드백 시간의 길이를 기초로 업링크 무선 자원 및 다운링크 무선 자원을 포함하는 전체 무선 자원과 상기 업링크 채널 상태 및 다운링크 채널 상태를 포함하는 전체 채널 상태를 고려한 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)을 계산하는 단계; 상기 전체 무선 자원의 실효 주파수 효율을 기초로 상기 다운링크 채널에 관한 정보의 피드백 비트 수를 결정하는 단계; 및 상기 피드백 비트 수에 관한 정보 및 미리 설정된 기준 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보를 기지국으로 송신하는 단계를 포함한다.

[0013] 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는 상기 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)이 최대가 되도록 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계일 수 있다.

[0014] 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계는 미리 설정된 후보 값들 중 어느 하나로 상기 피드백 비트 수를 결정하는 단계일 수 있다.

[0015] 상기 기지국의 요청에 따라 상기 피드백 비트 수와 상기 기준 비트 수의 차의 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 잔여(remained) 정보를 기지국으로 더 피드백하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0016] 상기 기지국의 요청은 상기 피드백 비트 수가 미리 설정된 임계값보다 큰지 여부에 의존할 수 있다.

[0017] 본 발명의 일 실시예에 따른 기지국의 통신 방법에 있어서, 상기 기지국 및 복수의 단말들 각각 사이의 다운링크 채널에 관한 기준 비트 수를 갖는 제1 정보를 수신하는 단계; 상기 복수의 단말들 각각으로부터 피드백 비트 수에 관한 정보를 수신하는 단계; 상기 제1 정보를 기초로 복수의 단말들 중에서 액티브 단말들을 선택하는 단계; 및 상기 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수에 따라 상기 액티브 단말들에 상기 피드백 비트 수와 상기 기준 비트 수의 차의 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 잔여 정보를 요구하는 단계를 포함한다.

[0018] 상기 다운링크 채널에 관한 잔여 정보를 요구하는 단계는 상기 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수가 미리 설정된 임계값보다 큰지 여부에 의존하여 상기 다운링크 채널에 관한 잔여 정보를 요구하는 단계일 수 있다.

[0019] 상기 기지국의 통신 방법은 상기 액티브 단말들을 위한 프리코딩 매트릭스를 생성하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0020] 상기 프리코딩 매트릭스를 생성하는 단계는 상기 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수 모두가 미리 설정

된 임계값보다 작거나 같은 경우, 상기 제1 정보를 기초로 상기 프리코딩 매트릭스를 생성하고, 상기 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수 중 적어도 하나가 미리 설정된 임계값보다 큰 경우, 상기 제1 정보 및 상기 잔여 정보를 기초로 상기 프리코딩 매트릭스를 생성하는 단계일 수 있다.

[0021] 본 발명의 일 실시예에 의한 컴퓨터로 판독 가능한 기록 매체는 상기 단말의 통신 방법 또는 상기 기지국의 통신 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록될 수 있다.

발명의 효과

[0022] 본 발명의 일 실시예들에 따르면 단말이 기지국으로 채널에 관한 정보를 피드백 하는데 요구되는 시간의 길이를 고려한 업링크 및 다운링크 전체 무선 자원에 대한 실효 주파수 효율을 기초로 채널 정보에 대한 피드백 비트 수를 결정함으로써 업링크 피드백 손실과 다운링크 용량 증대 모두를 고려한 최적의 피드백 비트 수를 결정할 수 있다. 이를 통해 MU-MIMO 통신 시스템 전체의 성능을 향상할 수 있다.

[0023] 본 발명의 일 실시예들에 따르면 기지국 및 단말은 전체 무선 자원에 대한 실효 주파수 효율에 기초한 피드백 비트 수를 고려하여 다운링크 빔포밍 기반 사용자 스케줄링을 수행할 수 있다. 이처럼 스케줄링 과정에서도 피드백 손실을 고려할 수 있어 스케줄링 과정에서 발생하는 피드백 손실을 최소화할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0024] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 M개의 송신 안테나를 가진 기지국(Base Station; BS)과 복수개의 단일 안테나(single-antenna) 단말(Mobile Station; MS)들로 구성된 단일 셀(single-cell) 공간 분할 다중 접속(Space-Division Multiple Access; SDMA) 시스템을 도시한 도면이다.

도 2는 디지털 피드백 시그날링을 위한 ZFBF 시스템의 프레임 구조의 예를 도시한 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 의한 피드백 손실을 고려한 스케줄링 방법을 도시한 플로우차트이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] 이하, 본 발명의 실시예를 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다.

[0026] 본 발명의 실시예를 설명함에 있어서, 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략할 것이다. 그리고, 본 명세서에서 사용되는 용어(terminology)들은 본 발명의 바람직한 실시예를 적절히 표현하기 위해 사용된 용어들로서, 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 본 발명이 속하는 분야의 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 본 용어들에 대한 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0027] 다중 사용자-다중 입출력(Multi User- Multiple Input Multiple Output; MU-MIMO) 송신 시스템은 채널 상태 정보(Channel State Information; CSI)가 전송 시간 슬롯의 시작점에서 즉각적으로 기지국(Base Station; BS)으로 피드백된다고 가정하며 지금까지는 다운링크 채널의 주파수 효율(Spectrum Efficiency) 향상에 초점을 두어 왔다. 뿐만 아니라 피드백 시그날링에 의한 전송 용량(throughput) 손실은 주파수 효율 향상을 위한 동작에서 고려 대상이 되지 않았다.

[0028] 본 발명의 실시예들은 채널 상태 정보(CSI)의 피드백 시그날링에 사용되는 시간 및 주파수 자원을 고려한 전체 시스템의 전송 용량을 평가하기 위하여 실효 주파수 효율(Effective Spectral Efficiency)의 개념을 이용한다. 실효 주파수 효율은 단일 또는 멀티 수신 안테나의 MU-MIMO 다운링크 송신에서 제로포싱(Zero-Forcing) 빔포밍(Beamforming)을 설계하고 분석하는데 이용될 수 있다. 이를 통해 최대의 실효 주파수 효율을 얻기 위한 최적의 피드백 시그날링의 양(예를 들면 피드백 비트 수)이 결정될 수 있다.

[0029] 본 발명의 일 실시예에 따른 피드백 시그날링에 의한 손실을 고려하는 단말의 통신 방법은 다음과 같다. 우선, 각 단말의 안테나가 1개인 경우부터 설명한다.

[0030] <u>시스템 모델(System Models)</u>

[0031] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 M개의 송신 안테나를 가진 기지국(Base Station; BS)과 복수개의 단일 안테나(single-antenna) 단말(Mobile Station; MS)들로 구성된 단일 셀(single-cell) 공간 분할 다중 접속(Space-Division Multiple Access; SDMA) 시스템을 도시한 도면이다.

[0032] 도 1을 참조하면, 본 발명에 의한 통신 시스템은 기지국(110) 및 복수의 단말(121,122,123)을 포함한다.

[0033] 기지국(110)이 동시 다운링크 전송할(simultaneous downlink transmission) M개의 단말을 랜덤으로 선택한 것으로 가정한다. 그리고 각 단말(121,122,123)에 대한 채널은 느리고 고른 페이딩 채널(slow and frequency flat homogenous fading channel)이라 가정한다. 그러면 m번째 선택된 단말(122)의 수신 신호는 하기 [수학식 1]과 같다.

[0034] [수학식 1]

[0035] $$y_m = \mathbf{h}_m^H \mathbf{x} + n_m, m = 1, 2, \cdot, M$$

[0036] 여기서 h_m은 m번째 단말(122)의 복소 채널 벡터이다. 각 단말(121,122,123)의 복소 채널 벡터들은 평균이 0이고, 분산이 1인 독립 동일 분포(independent and identically-distributed)를 이룬다고 가정한다. n_m은 평균이 0이고 분산이 1인 독립 복소 가우시안 잡음을 나타낸다. **x**는 전체 파워가 P인 송신된 심볼 벡터를 나타낸다.

[0037] <u>제로포싱 빔포밍과 공간 분할 다중 접속(SDMA with Zero-forcing Beamforming)</u>

[0038] 제로포싱 빔포밍(Zero-forcing beamforming; ZFBF)은 MU-MIMO 환경에서 공간 멀티플렉싱을 얻기 위한 선형 프로세싱 기법이다. 제로포싱 빔포밍에 의하면, 기지국(110)이 송신하는 심볼 벡터는 하기 [수학식 2]와 같이 표현될 수 있다.

[0039] [수학식 2]

[0040] $$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^{M} \mathbf{w}_i^o s_i$$

[0041] 여기서 s_i는 i번째 단말을 위한 정보 심볼이다. W_i^o는 상기 정보 심볼에 대응되는 빔포밍 벡터이며 다른 단말들의 채널 벡터와 직교(orthogonal)한다. 만약, 기지국(110)이 채널 상태 정보(Channel State Information at the Transmitter side; CSIT)를 완벽하게 안다고 가정하면, 빔포밍 벡터는 채널 매트릭스 [$\mathbf{h}_1$, $\mathbf{h}_2$, $\mathbf{h}_3$,...,$\mathbf{h}_M$]의 역행렬의 정규화된 행(normalized rows)이 될 수 있다. 이 경우 m번째 단말(122)이 수신하는 신호는 하기 [수학식 3]과 같다.

[0042] [수학식 3]

[0043]
$$y_m = \mathbf{h}_m^H \sum_{i=1}^{M} \mathbf{w}_i^o s_i + n_m = \mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_m^o s_m + n_m$$

[0044] i?m인 경우에 $\mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_i^o = 0$ 이 되므로 모든 간섭 성분들은 사라진다. 따라서 완벽한 CSIT를 가정할 때, ZFBF의 즉각적인 레이트 합(instantaneous sum-rate)은 [수학식 6]과 같다.

[0045] [수학식 6]

[0046]
$$R_{\mathrm{CSIT}} = \sum_{m=1}^{M} \log_2 \left(1 + \frac{P}{M} |\mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_m^o|^2 \right)$$

[0047] <u>제한된 피드백 시그날링(Limited Feedback Signaling)</u>

[0048] 기지국(110)은 다운링크 채널 상태 정보를 피드백 시그날링을 통해 얻을 수 있다.

[0049] 도 2는 디지털 피드백 시그날링을 위한 ZFBF 시스템의 프레임 구조의 예를 도시한 도면이다.

[0050] 도 2를 참조하면, 각 단말은 T_{OS}(220)/M의 피드백 시간 길이를 갖는다. 기지국은 다중 사용자 데이터 스트림을 T_{DL}(230)의 시간 동안 송신한다. 제한된 피드백 채널의 용량으로 인해, 기지국은 빔포밍 벡터를 생성할 때 정확한 채널 벡터가 아닌 양자화된 채널 벡터들을 이용할 수 있다. 빔포밍 코드북은 $\mathcal{C}(2^B) \triangleq \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \ldots, \mathbf{v}_{2^B}\}$로 표현될 수 있다. 여기서 vi는 M-차원의 단위 정규 벡터(M-dimensional unit norm vectors)이고, B는 피드백 비트 수이고, 2^B는 코드북의 사이즈이다. m번째 단말(122)은 해당 단말의 정규화된 채널 $\tilde{\mathbf{h}}_m = \mathbf{h}_m / ||\mathbf{h}_m||$을 다음 [수학식 7]과 같이 양자화 할 수 있다.

[0051] [수학식 7]

[0052]
$$\hat{\mathbf{h}}_m = \arg \min_{\mathbf{v} \in \mathcal{C}(2^B)} \sin^2(\angle(\tilde{\mathbf{h}}_m, \mathbf{v}))$$

[0053] 여기서 $\sin(\angle(\mathbf{x}, \mathbf{y})) = \sqrt{1 - |\mathbf{x}^H \mathbf{y}|^2 / (||\mathbf{x}||^2 ||\mathbf{y}||^2)}$이다. 각 단말은 양자화 된 채널 $\hat{\mathbf{h}}_m$의 인덱스를 기지국으로 피드백한다. 이때 각 단말은 B 비트의 피드백 로드를 가진다. 단말들이 랜덤으로 선택된 것을 가정하였기 때문에, 채널 벡터의 크기(magnitude)는 피드백되지 않을 수 있다.

[0054] 제한된 피드백 환경에서, 빔포밍 벡터들은 양자화된 채널 매트릭스 $[\hat{\mathbf{h}}_1, \hat{\mathbf{h}}_2, \cdots, \hat{\mathbf{h}}_M]$의 역행렬의 정규화된 행들이 된다. 따라서 m번째 단말이 수신하는 신호(y_m)는 하기 [수학식 8]과 같이 표현될 수 있다.

[0055] [수학식 8]

[0056]
$$y_m = \mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_m s_m + \sum_{i=1, i \neq m}^{M} \mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_i s_i + n_m$$

[0057] 여기서 y_m에는 잔여 간섭이 존재하는데, 이는 제한된 피드백 때문이다. 제한된 피드백 환경에서의 ZFBF 시스템의 예상되는 즉각적인 레이트 합(expected instantaneous sum-rate)(또는 평균 주파수 효율)은 하기 [수학식 9]와 같다.

[0058] [수학식 9]

[0059]
$$R_{\mathrm{LF}} = E_C \left[\sum_{m=1}^{M} \log_2(1 + \rho_m) \right]$$

[0060] 그리고 하기 [수학식 10]의 ρ_m은 m번째 단말의 신호 대 잡음 및 간섭 비(Signal to Interference plus Noise Ratio; SINR)를 나타낸다.

[0061] [수학식 10]

[0062]
$$\rho_m = \frac{\frac{P}{M} |\mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_m|^2}{1 + \frac{P}{M} \sum_{i=1, i \neq m}^{M} |\mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_i|^2}$$

[0063] 위 SINR(ρ_m)에도 양자화 에러(quantization error)에 의한 영향이 계속 남아 있다. 역시 이는 제한된 피드백 때문이다.

[0064] <u>실효 주파수 효율(Effective Spectral Efficiency)</u>

[0065] ZFBF MU-MIMO를 포함하는 피드백 시스템에서, 피드백 시스템의 전송량은 피드백 시그날링의 양을 늘림으로써 증가할 수 있다. 그러면 다운링크의 SINR 성능도 향상된다. 그러나 피드백 시그널링의 양이 지나치게 늘어나면 데이터가 전송되는 정규화된 실효 다운링크 전송 시간의 길이(T_{DL}; 230)가 감소하여 전체 성능은 저하될 수 있다. 실효 다운링크 전송 시간의 길이는 다운링크 전송에 사용 가능한 시간 자원을 의미한다. 실효 다운링크 전송 시간의 길이(T_{DL}; 230)는 T - T_{os}이고, T는 전체 전송 시간의 길이(210)를, T_{os}는 피드백 시간의 길이(220)를 나타낸다. 따라서 업링크 손실을 고려한 전체 성능은 하기 [수학식 12]와 같이 **실효 주파수 효율(Effective Spectral Efficiency; ESE, R_{eff})**을 사용하여 나타낼 수 있다. 실효 주파수 효율(R_{eff})의 수식은 피드백 손실을 고려하기 위한 주파수 효율을 나타내는 한 예시이다.

[0066] [수학식 12]

[0067] $R_{eff} = (1-T_{os}/T) * R_{LF}(T_{OS})$

[0068] $R_{LF}(T_{OS})$는 피드백 시간 T_{os}를 갖는 제한된 피드백 환경의 ZFBF 시스템의 평균 주파수 효율(spectral efficiency)이다.

[0069] 단말은 업링크 무선 자원 및 다운링크 무선 자원을 포함하는 전체 무선 자원과 업링크 채널 상태 및 다운링크 채널 상태를 포함하는 전체 채널 상태를 고려한 **실효 주파수 효율**(effective spectral efficiency)을 계산할 수 있다. 실효 주파수 효율은 단말이 기지국으로 기지국 및 단말 사이의 다운링크 채널에 관한 정보를 피드백하는 데에 요구되는 피드백 시간의 길이 T_{os}(220)를 기초로 하여 결정될 수 있다. 그리고 피드백 시간의 길이는 피드백 비트 수에 비례한다.

[0070] 그리고 단말은 실효 주파수 효율을 기초로 기지국 및 단말 사이의 다운링크 채널에 관한 정보를 기지국으로 피드백 하는 데에 사용할 **피드백 비트 수**를 결정한다.

[0071] 피드백 비트 수는 다음과 같은 과정에 의해 정해질 수 있다.

[0072] 먼저, 단말은 상기 실효 주파수 효율을 최대가 되도록 하는 피드백 시간의 길이를 설정할 수 있다. 실효 주파수 효율은 제한된 전체 시간 자원 내에서 피드백 시간의 길이, 기지국의 다운링크 전송을 위한 시간의 길이 및 피드백 시간의 길이의 함수인 기지국의 레이트 합(sum-rate)을 기초로 계산될 수 있다. 단말은 실효 주파수 효율이 최대가 되도록 피드백 비트 수를 결정할 수 있다.

[0073] 그리고 단말은 피드백 비트 수를 결정할 때, 미리 설정된 후보 값들 중 어느 하나를 피드백 비트 수로 결정할 수 있다. 즉, 실제 구현에 있어서 단말이 피드백 비트 수의 모든 후보 값들에 대해 실효 주파수 효율을 계산하고, 실효 주파수 효율의 최대가 되게 하는 후보 값을 찾아낼 수도 있다. 하지만 단말이 미리 정해진 피드백 비트 수의 후보 값들(예를 들어 10개의 후보 값들)에 대해서만 실효 주파수 효율을 계산하여, 실효 주파수 효율이 최대가 되도록 하는 후보 값을 피드백 비트 수로 선택하면 피드백 비트 수를 구하는 시스템의 복잡도를 더 낮출 수 있다.

[0074] 다음으로 단말은 피드백 시간의 길이가 제로인 경우의 실효 주파수 효율 또는 피드백 시간의 길이에 대한 실효 주파수 효율의 미분(differentiation)이 제로인 경우의 실효 주파수 효율 중 어느 하나를 실효 주파수 효율의 하한(lower bound)의 최대값으로 설정할 수 있다. 그리고 단말은 실효 주파수 효율의 하한(lower bound)의 최대값을 피드백 비트 수를 결정하기 위하여 이용할 수 있다. 즉, 실효 주파수 효율이 최대가 되도록 하는 T_{OS}는 근사적으로 실효 주파수 효율의 하한을 최대가 되도록 하는 T_{OS}일 수 있고, T_{OS}가 정해지면 단말이 피드백 비트 수를 정할 수 있다. 이에 대한 상세한 수학적인 설명은 후술한다.

[0075] 단말은 피드백 비트 수에 관한 정보를 기지국으로 피드백한다. 그리고 단말은 피드백 비트 수가 임계값보다 큰지 여부에 따라 피드백 비트 수를 갖는 다운링크 채널에 관한 정보 또는 피드백 비트 수와 다른 비트 수를 갖는 다운링크 채널에 관한 정보를 기지국으로 피드백할 수 있다. 여기서 임계값은 미리 설정된 값일 수 있다. 그리고 피드백 비트 수가 임계값보다 작거나 같으면 피드백 비트 수를 갖는 다운링크 채널에 관한 정보를 피드백하고, 임계값보다 크면 다른 비트 수를 갖는 다운링크 채널에 관한 정보를 피드백할 수 있다. 여기서 다른 비트 수는 미리 설정된 기준 비트 수일 수 있다. 그리고 기준 비트 수는 임계값과 같을 수 있다.

[0076] 이하에서 상술한 실효 주파수 효율의 최대값 및 피드백 비트 수를 구하는 방법을 수학적으로 설명한다. 실효 주파수 효율은 피드백 시간의 길이에 대한 함수이고, 피드백 비트 수는 피드백 시간의 길이와 비례관계에 있으므로 실효 주파수 효율을 최대화 하기 위한 피드백 시간의 길이(T_{os}; 220)를 결정하는 방법에 대해 설명한다.

[0077] 우선, 다운링크 전송은 블록-바이-블록(block-by-block) 방식으로 수행된다고 가정한다. 각 블록 주기가 지속되는 시간은 T(210)로 고정된다. 전송 주기의 시작에 있어서, 각 단말은 기지국 및 각 단말 사이의 다운링크 채널을 추정한다. 단말들은 기지국으로부터 수신하는 파일럿 신호를 통하여 다운링크 채널을 추정할 수 있다. 단말들은 단말들의 양자화된 다운링크 채널 정보를 기지국으로 피드백한다. 피드백 시간의 길이(T_{os})는 각 단말별 피드백 비트 수(B), 단말의 수(M), 및 피드백 채널의 데이터 레이트에 의존한다. 따라서 실효 주파수 효율이 최대가 되게 하는 피드백 시간의 길이(T_{os})가 정해지면 피드백 비트 수(B)도 정해질 수 있다.

[0078] 피드백 시그날링 이후, 기지국은 양자화된 채널 벡터에 기반하여 생성된 빔포밍 벡터를 이용한 ZFBF 기법을 이용하여 다운링크 전송을 시작할 수 있다. 따라서 기지국이 실효 다운링크 전송 시간의 길이(T_{DL}(230))는 T_{DL}=T-

T_{os}가 된다. 피드백 채널은 다운링크 채널과 동일한 대역폭을 가진다고 가정한다. 상기와 같은 전송 모델을 기초로, 시스템의 실효 주파수 효율을 하기 [수학식 13]과 같이 나타낼 수 있다.

[0079] [수학식 13]

[0080]
$$\mathcal{R}_{\text{eff}} = \frac{T - T_{\text{OS}}}{T} R_{\text{LF}}$$

[0081] 실효 주파수 효율은 평균 주파수 효율이 스케일링된 것이다. 즉, 실효 주파수 효율은 전체 전송 시간의 길이(T)와 피드백 시간의 길이(T_{os})의 차를 전체 전송 시간의 길이(T)로 나눈 값을 평균 주파수 효율(R_{LF})에 곱한 값이 될 수 있다.

[0082] T_{os}가 증가하면 각 단말에 할당되는 피드백 정보의 양이 증가할 수 있다. 즉, 피드백 비트 수(B)가 커질 수 있다. 그리고 각 단말의 피드백 정보의 양이 증가하면 다운링크 주파수 효율도 증가한다. 반면, T_{os}가 증가하면 실효 다운링크 전송 시간의 길이(T_{DL}(230))는 줄어든다. 따라서 최대의 실효 레이트 합(effective sum-rate; R^*_{eff})은 하기 [수학식 14]와 같이 피드백 시간의 길이(T_{os}(220))의 최적의(optimal) 값(T^*_{os}) 을 선택함으로써 얻을 수 있다. 실효 레이트 합은 실효 주파수 효율과 같은 개념으로써 명세서 내에서 혼용될 수 있다.

[0083] [수학식 14]

[0084]
$$\mathcal{R}^*_{\text{eff}} = \max_{T_{\text{OS}} < T} \mathcal{R}_{\text{eff}}$$

[0085] 상기 [수학식 14]의 R^*_{eff}가 T_{os}(220)에 관한 단조 증가 함수(이는 가정함)(monotonically increasing)와 단조 감소 함수(monotonically decreasing)(이는 명백함)의 곱이라면, T^*_{os}는 [수학식 14]를 최대화하는 값으로 구할 수 있다. 수학적으로 T^*_{os}는 [수학식 14]의 1차 미분(first order derivation)과 상하한 값을 이용하여 얻어질 수 있다. 그러면, 실효 주파수 효율의 하한의 최대값은 하기 [수학식 15]와 같이 표현될 수 있다.

[0086] [수학식 15]

[0087]
$$R^*_{\text{eff}} = \max\{R_{\text{eff}}(0), R_{\text{eff}}(T^*_{\text{OS}})\}$$

[0088] 여기서 T^*_{os}는 $d\,R_{eff}(T^*_{os})\ /\ d\,T_{os} = 0$을 만족한다.

[0089] 즉, 실효 주파수 효율의 하한(lower bound)의 최대값은 피드백 시간의 길이(T_{os}(220))가 제로인 경우의 실효 주파수 효율 또는 피드백 시간의 길이(220)에 대한 실효 주파수 효율의 미분(differentiation)이 제로인 경우의 상기 실효 주파수 효율 중 어느 하나로 정해질 수 있다.

[0090] <u>제한된 피드백 환경에서의 ZFBF 시스템 (ZFBF System with Limited Feedback)</u>

[0091] 도 2에 도시된 일반적인 다중 사용자 빔포밍 프레임 구조를 이용하는 제한된 피드백 환경에서의 ZFBF 시스템의

성능을 평가하는 데에 실효 주파수 효율의 개념이 사용될 수 있다. 상기 시스템에서 기지국은 각 단말로부터 피드백 정보를 받자마자 복수의 스트림들을 스케줄링된 단말들로 송신한다. 이하 논의에서 피드백 채널은 임의적이고 작은 에러 확률을 가지는 데이터 레이트(R_{FB})를 지원할 수 있다고 가정한다. 그리고 R_{FB}는 상수로 가정한다. 따라서 단말 별 피드백 비트 수 B는 오버헤드 시그날링 주기 T_{OS}(220)와 하기 [수학식 16]의 관계를 갖는다.

[0092] [수학식 16]

[0093] $T_{os} = M B / R_{FB}$

[0094] 제한된 피드백 환경에서의 ZFBF 시스템의 평균 주파수 효율의 하한은 하기 [수학식 17]과 같이 근사적으로 구해질 수 있다.

[0095] [수학식 17]

[0096]
$$\begin{aligned} R_{\mathrm{LF}} &\geq R_{\mathrm{CSIT}} - \log_2\left(1 + \frac{P}{M} E[\sin^2(\tilde{\mathbf{h}}_i, \hat{\mathbf{h}}_i)]\right) \\ &\approx R_{\mathrm{CSIT}} - \log_2\left(1 + \frac{P}{M} 2^{-\frac{B}{M-1}}\right) \end{aligned}$$

[0097] 상기 근사 결과들로부터, ZFBF 시스템의 실효 주파수 효율의 하한은 T_{OS}에 관한 하기 [수학식 18]과 같이 표현될 수 있다.

[0098] [수학식 18]

[0099]
$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\mathrm{eff}}(T_{\mathrm{OS}}) &\geq \mathcal{R}_{\mathrm{eff}}^{-}(T_{\mathrm{OS}}) \\ &= \frac{T - T_{\mathrm{OS}}}{T}\left(R_{\mathrm{CSIT}} - \log_2(1 + \frac{P}{M} 2^{-\frac{T_{\mathrm{OS}} R_{FB}}{M(M-1)}})\right) \end{aligned}$$

[0100] <u>피드백 시그날링을 위한 자원 최적화(Resource Optimization for Feedback Signaling)</u>

[0101] 시스템의 실효 주파수 효율을 최대가 되도록 하는 최적의 오버헤드 시그날링 주기 T_{OS}(220)를 선택하는 방법은 다음과 같다.

[0102] T_{OS}가 증가하면 단말은 더 높은 다운링크 주파수 효율을 얻을 수 있게 하는 더 많은 피드백 비트 수 B를 피드백할 수 있다. 하지만 T_{OS}(220)의 증가는 실효 다운링크 전송 시간의 길이(T_{DL}(230))를 줄어들게 한다. 근사적으로 T_{OS}(220)의 최적의 값은 하기 [수학식 19]와 같이 실효 주파수 효율의 하한인 $\bar{R}_{eff}$를 최대가 되도록 하는 값이 될 수 있다.

[0103] [수학식 19]

[0104] $$T_{\mathrm{OS}}^{*} = \arg \max_{T_{\mathrm{OS}}<T} \mathcal{R}_{\mathrm{eff}}^{-}(T_{\mathrm{OS}})$$

[0105] 높은 SNR을 가정할 때, 실효 주파수 효율의 하한인 R^{-}_{eff}는 근사적으로 하기 [수학식 20]과 같이 주어진다.

[0106] [수학식 20]

[0107] $$\mathcal{R}_{\mathrm{eff}}^{-}(T_{\mathrm{OS}}) \approx \frac{T - T_{\mathrm{OS}}}{T}\left(R_{\mathrm{CSIT}} - \log_2 \frac{P}{M} - \frac{T_{\mathrm{OS}} R_{FB}}{M(M-1)}\right)$$

[0108] [수학식 20]은 $T_{OS}(220)$에 관한 2차 함수이다. 따라서 **실효 주파수 효율을 최대로 하는 피드백 시간의 길이** $T_{OS}(220)$의 최적의 값은 [수학식 21]과 같이 주어진다.

[0109] [수학식 21]

[0110] $$T_{\mathrm{OS}}^{*} = \frac{R_{\mathrm{CSIT}} - \log_2 \frac{P}{M} + \frac{T R_{FB}}{M(M-1)}}{2\frac{R_{FB}}{M(M-1)}}$$

[0111] 따라서, 실효 주파수 효율의 하한을 이용하여 구해진 근사적인 **최대 실효 주파수 효율**은 하기 [수학식 22]와 같다.

[0112] [수학식 22]

[0113] $$\mathcal{R}_{\mathrm{eff}}^{*} = \mathcal{R}_{\mathrm{eff}}^{-}(T_{\mathrm{OS}}^{*})$$

[0114] 따라서 단말은 실효 주파수 효율을 최대가 되게 하는 T^{*}_{os}에 대응하는 피드백 비트 수 B를 선택할 수 있다.

[0115] <u>수신 안테나가 복수개인 경우(Multiple Receive Antenna Scenario)</u>

[0116] 지금까지, 각 단말의 안테나가 1개인 경우에 대해 살펴보았다. 각 단말의 안테나의 개수가 복수개인 경우도 위와 같은 원리가 적용될 수 있다. 각 단말의 수신 안테나가 N개(N은 2 이상)인 경우, 각 단말은 각 단말의 N개의 안테나로부터 수신되는 신호를 벡터 채널이 정확하게 양자화되어 단말간 간섭을 감소시키는 양자화 기반 결합(quantization based combining; QBC) 방법으로 선형 결합한다. 수학적으로, i번째 단말의 N*M 채널 매트릭스를 H_i라 하면, 양자화 기반 결합이 적용된 실효 채널은 하기 [수학식 23]과 같이 표현될 수 있다.

[0117] [수학식 23]

[0118] $$\mathbf{h}_i^{\text{eff}} = \alpha_i \mathbf{H}_i$$

[0119] α_i는 단위 정규 가중치 벡터(unit norm weighting vector)이다. α_i는 h_i^{eff} 및 h_i^{eff}에 대응하는 양자화 벡터 $\hat{\mathbf{h}}_i$ 사이의 차이가 최소가 되도록 선택된다. $\hat{\mathbf{h}}_i$는 [수학식 24]와 같이 결정된다.

[0120] [수학식 24]

[0121] $$\hat{\mathbf{h}}_i = \arg \min_{\mathbf{v} \in \mathcal{C}(2^B)} \sin^2(\angle(\text{span}(\mathbf{H}_i), \mathbf{v}))$$

[0122] 양자화 기반 결합(quantization based combining; QBC)이 적용되는 ZFBF 시스템의 평균 주파수 효율은 근사적으로 하기 [수학식 25]와 같다.

[0123] [수학식 25]

[0124] $$R_{\text{LF}} \approx R_{\text{CSIT}} - \log_2\left(1 + P \cdot C_1 \cdot 2^{-\frac{B}{M-N}}\right) - C_2$$

[0125] 여기서 $C_1 = \left(\frac{(N-1)!(M-N+1)!}{M!}\right)^{1/(M-N)}$ 이고 $C_2 = (\log_2 e) \sum_{l=M-N+1}^{M-1} \frac{1}{l}$ 이다. 위에서 설명한 블록 전송 구조에 기초하여, 양자화 기반 결합(quantization based combining; QBC)을 이용한 복수 개의 안테나를 가지는 ZFBF 시스템의 근사적인 실효 주파수 효율은 하기 [수학식 26]과 같이 T_{OS}(220)에 관한 식으로 표현될 수 있다.

[0126] [수학식 26]

[0127] $$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\text{eff}}(T_{\text{OS}}) &\approx \frac{T - T_{\text{OS}}}{T} \\ &\times \left(R_{\text{CSIT}} - C_2 - \log_2(1 + P \cdot C_1 \cdot 2^{-\frac{T_{\text{OS}} R_{FB}}{M(M-N)}})\right) \end{aligned}$$

[0128] 전술한 단일 수신 안테나의 경우와 유사하게, 피드백 시그날링 주기 T_{OS}(220)의 최적의 값은 하기 [수학식 27]과 같은 높은 SNR 영역에서의 실효 주파수 효율의 근사치를 이용하여 구해질 수 있다.

[0129] [수학식 27]

[0130] $$\begin{aligned} \mathcal{R}_{\text{eff}}(T_{\text{OS}}) &\approx \frac{T - T_{\text{OS}}}{T} \\ &\times \left(R_{\text{CSIT}} - C_2 - \log_2(P \cdot C_1) - \frac{T_{\text{OS}} R_{FB}}{M(M-N)}\right) \end{aligned}$$

[0131] 따라서, 최적의 피드백 시간의 길이(T^*_{OS})는 [수학식 28]과 같다.

[0132] [수학식 28]

[0133]
$$T^*_{\mathrm{OS}} = \frac{R_{\mathrm{CSIT}} - C_2 - \log_2(P \cdot C_1) + \frac{TR_{FB}}{M(M-N)}}{2^{\frac{R_{FB}}{M(M-N)}}}$$

[0134] 이에 대응하는 최대의 실효 주파수 효율은 근사적으로 [수학식 29]와 같이 구해질 수 있다.

[0135] [수학식 29]

[0136] $R^*_{eff} = R_{eff}(T^*_{OS})$

[0137] 즉, 단말의 안테나가 N으로 늘어남에 따라 수식에 N이 들어감의 차이가 있을 뿐, 기본적으로 피드백 비트 수를 정하는 원리는 안테나의 개수가 1개일 때와 동일하다.

[0138] <u>다수 사용자의 경우 (Many User Scenario)</u>

[0139] 기지국의 송신 안테나의 수보다 스케줄링된 사용자의 수가 더 많은 경우에 피드백 시그날링을 고려한 최적의 피드백 비트 수를 결정하는 방법은 다음과 같다. 다중 사용자 스케줄링 및 제한된 피드백 환경에서의 ZFBF 시스템의 평균 주파수 효율의 하한은 [수학식 30]과 같다.

[0140] [수학식 30]

[0141]
$$R_{\mathrm{LF}}(K) \approx R_{\mathrm{CSIT}} - \log_2\left(1 + \frac{P}{M}2^{-\frac{B+\log_2 K}{M-1}}\right)$$

[0142] K는 해당 스케줄링 주기 안의 사용자의 수이다. 따라서 다중 사용자 스케줄링 시스템에서의 $T_{OS}(220)$의 최적의 값은 [수학식 21]에서 적용된 단일 사용자 시스템의 해석 방법을 확장하여 [수학식 31]과 같이 표현할 수 있다.

[0143] [수학식 31]

[0144]
$$T^*_{\mathrm{OS}}(K) = \frac{R_{\mathrm{CSIT}} - \log_2\frac{P}{M} + \frac{TR_{FB}}{M(M-1)}}{2^{\frac{R_{FB}}{M(M-1)}}} - \frac{R_{FB}}{M}\log_2 K$$

[0145] 상기 [수학식 31]에서 볼 수 있듯이 스케줄링된 단말 수(K)가 기지국 안테나 수(M)보다 많은 경우도 T^*_{os}가 결정될 수 있다. 따라서 사용자 수가 많아 사용자 스케줄링이 고려되는 경우에 대해서도 단말은 T_{OS}와의 수학적 관계를 활용하면 최적 피드백 비트 수 B를 결정할 수 있다.

[0146] 다중 사용자의 경우에 본 방식을 통해 피드백을 최적화할 경우 각 단말은 채널 성능 정보(Channel Quality Information; CQI)나 채널 방향 정보(Channel Direction Information; CDI) 뿐만이 아니라 위와 같은 방법으로 구해진 피드백 비트 수도 피드백하도록 구성할 수 있다. 채널 방향 정보는 선호되는 매트릭스 정보(Preferred Matrix Information; PMI) 및 선호 벡터 정보(Preferred Vector Information; PVI)를 포함하도록 구성할 수 있다.

[0147] <u>다중 사용자 스케줄링을 위한 구현상의 접근</u>

[0148] 실제 구현에 있어서, 각 단말은 다른 단말의 채널 벡터를 알 수 없기 때문에 각 단말은 기대 신호 대 잡음 및 간섭 비(Expected Signal to Interference and Noise Ratio; ESINR)를 이용하여 피드백 비트 수 B를 결정할 수도 있다. ESINR을 이용한 이상적인 사용자 스케줄링 기준은 [수학식 32]와 같을 수 있다.

[0149] [수학식 32]

[0150]
$$\{S^*, \mathbf{W}^*, \Upsilon^*_{\mathrm{OS}}\} = \arg \max_{S,\mathbf{W},\Upsilon_{\mathrm{OS}}} \left(\frac{T - \sum_{k \in S} T_{\mathrm{OS},k}}{T} \right) \sum_{k \in S} \log_2(1 + \mathrm{ESINR}_k(T_{\mathrm{OS},k}))$$

[0151] 여기서, S는 단말 집합(user set)이고, w는 빔포밍 벡터이다. $\Upsilon_{\mathrm{OS}} = \{T_{\mathrm{OS},k} | k \in S\}$이고, 실효 신호대 잡음비를 나타내는 $\mathrm{ESINR}_k(T_{\mathrm{OS},k})$은 $T_{\mathrm{OS},k}$에 관한 함수이다. 따라서 [수학식 32]를 만족하기 위한 피드백 정보는 $T_{\mathrm{OS},k}$, 채널 방향 정보(CDI)로서의 채널 벡터 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 및 채널 성능 정보(CQI)로서 ESINR_k를 포함할 수 있다.

[0152] 실제 구현에 있어서, 각 단말은 다른 단말의 채널 상태를 모를 수 있기 때문에, ESINR을 이용하여 나타낸 단말별 실효 주파수 효율($\mathcal{R}^{\mathrm{UE}}_{\mathrm{eff},k}$)은 [수학식 33]과 같을 수 있다.

[0153] [수학식 33]

[0154]
$$\mathcal{R}^{\mathrm{UE}}_{\mathrm{eff},k} = \left(\frac{T - M * T_{\mathrm{OS},k}}{T} \right) \log_2(1 + \mathrm{ESINR}_k(T_{\mathrm{OS},k}))$$

[0155] 여기서 $\mathrm{ESINR}_k(T_{\mathrm{OS},k})$의 값은 $T_{\mathrm{OS},k}$에 관한 식이므로 코드북 사이즈에 의존한다. 만약 피드백 시간의 길이 $T_{\mathrm{OS},k}$가 증가하면 $\mathrm{ESINR}_k(T_{\mathrm{OS},k})$도 증가한다. 이는 코드워드(codeword)의 길이가 $B = T_{\mathrm{OS}}(\sum_{m=1}^{M} 1/R_{\mathrm{FB},k})^{-1}$인 코드북 사이즈($2^B$) 때문이다. 그리고 ESINR 값과 반대로, 실효 다운링크 전송 시간($1-M*T_{\mathrm{OS},k}/T$)은 감소한다. 따라서 최적의 실효 주파수 효율 $\mathcal{R}^{\mathrm{UE}}_{\mathrm{eff},k}$을 구하는 과정은 다음 [수학식 34]와 같이 코드북 사이즈에 관한 피드백 시간의 길이의 최적화로 대체될 수 있다.

[0156] [수학식 34]

[0157] $$T_{\mathrm{OS},k}(C^*) = \arg \max_{\{C_i\}_{i=1}^{L}} \mathcal{R}_{\mathrm{eff},k}^{\mathrm{UE}}(C_i)$$

[0158] L은 시스템에서 지원되는 다른 사이즈의 코드북의 수이다. 그리고 $T_{\mathrm{OS},k}(C) = \sum_{m=1}^{M} B(C) R_{\mathrm{FB},k}$ 이다. $2^{B(C)}$는 코드북 C의 코드워드의 길이이다. 단말은 수학식 33을 이용하여 최적의 피드백 파라미터들($T_{OS,k}$, $\mathrm{ESINR}_k(T_{\mathrm{OS},k})$, $\mathbf{w}_{tx,k}$) 을 위한 최적의 코드북 사이즈를 결정할 수 있다.

[0159] 그리고 B 비트의 피드백 비트 수와 K개의 사용자(단말)를 갖는 다중 사용자 시스템의 ESINR은 하기 [수학식 35]와 같이 근사될 수 있다.

[0160] [수학식 35]

[0161] $$\mathrm{ESINR}_k \approx P||\mathbf{w}_{\mathrm{rx},k}^H \mathrm{H}_k||^2 (1 - 2^{\frac{B+\log_2 K}{M-N}})$$

[0162] 여기서 $B = T_{\mathrm{OS}}(\sum_{m=1}^{M} 1/R_{\mathrm{FB},k})^{-1}$ 이고, $\mathbf{w}_{Rx,k}$-는 수신 결합 웨이트(receive combining weight)이다.

[0163] <u>사용자 스케줄링 알고리즘(User Scheduling Algorithm)</u>

[0164] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 의한 피드백 손실을 고려한 스케줄링 방법을 도시한 플로우차트이다.

[0165] 도3을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 의한 스케줄링 과정은 크게 두 단계로 나뉠 수 있다. 우선 제1 단계에 대해서 설명한다.

[0166] 기지국(310)은 각 단말(320)에 파일럿 신호를 전송한다(311). 그러면 각 단말(320)은 기지국(310)으로부터 파일럿 신호를 수신하여 기지국(310) 및 각 단말 사이의 다운링크 채널(예를 들어 채널 방향 정보)을 추정한다. 그리고 각 단말(320)은 업링크 채널 상태를 취득한다(321). 여기서 채널은 측정된 채널 정보 자체를 의미하며, 채널 상태는 채널이 측정된 이후 채널이 좋다 나쁘다 등과 같이 신호 처리를 통해 가공된 2차 정보를 의미한다.

[0167] 그리고 각 단말(320)은 추정된 다운링크 채널에 관한 정보를 기지국(310)으로 피드백하는 데에 요구되는 피드백 시간의 길이를 기초로 업링크 무선 자원 및 다운링크 무선 자원을 포함하는 전체 무선 자원과 업링크 채널 상태 및 다운링크 채널 상태를 포함하는 전체 채널 상태를 고려한 실효 주파수 효율(effective spectral efficiency)을 계산한다(322). 실효 주파수 효율의 계산에 관하여는 자세히 상술한 바 있다.

[0168] 그리고 각 단말(320)은 실효 주파수 효율을 기초로 상기 추정된 다운링크 채널에 관한 정보의 피드백 비트 수를 결정한다(323). 각 단말(320)은 실효 주파수 효율이 최대가 되도록 피드백 비트 수를 결정한다. 각 단말(320)은 피드백 비트 수를 결정할 때 복수개의 후보 피드백 비트 수 중에서 어느 하나를 선택하는 형태로 피드백 비트 수를 결정할 수 있고, 복수개의 후보 피드백 비트 수 중에서 실효 주파수 효율이 최대가 되게 하는 피드백 비트 수를 선택할 수 있다. 후보 피드백 비트 수들은 상술한 바와 같이 미리 설정된 후보 값들일 수 있다.

[0169] 각 단말(320)은 피드백 비트 수에 관한 정보 및 미리 설정된 기준 비트 수를 갖는 상기 다운링크 채널에 관한 정보(제1 정보)를 기지국으로 송신한다(324,325). 그리고 각 단말은 실효 주파수 효율 또는 기대 신호 대 잡음 및 간섭 비(Expected Signal to Interference and Noise Ratio; ESINR)을 기지국으로 송신할 수 있다.

[0170] 기지국(310)은 기지국(310) 및 복수의 단말(320)들 각각 사이의 다운링크 채널에 관한 기준 비트 수를 갖는 제1 정보를 수신한다.

[0171] 그리고 기지국(310)은 상기 복수의 단말(320)들 각각으로부터 피드백 비트 수에 관한 정보를 수신한다.

[0172] 기지국(310)은 제1 정보를 기초로 복수의 단말들 중에서 액티브 단말들을 선택한다(312). 액티브 단말이란, 해당 주기에서 기지국(310)이 메시지를 송신할 단말을 말한다.

[0173] 그리고 기지국(310)은 액티브 단말들 중 잔여 정보를 요구할 단말을 결정한다(313). 잔여 정보는 액티브 단말 각각의 피드백 비트 수와 기준 비트 수의 차의 비트 수를 갖는 다운링크 채널에 관한 정보이다. 즉, 잔여 정보는 피드백 비트 수를 갖는 다운링크 채널에 관한 정보 중에서 기준 비트 수만큼의 제1정보를 제외한 다운링크 채널에 관한 나머지 정보를 말한다. 잔여 정보를 요구할 단말의 결정은 액티브 단말들 각각의 피드백 비트 수와 임계값과의 비교를 통해 이루어질 수 있다. 즉, 기지국은 미리 설정된 임계값보다 큰 피드백 비트 수를 갖는 액티브 단말을 잔여 정보를 요구할 단말로 결정할 수 있다. 이때, 임계값은 기준 비트 수와 동일한 값일 수 있다.

[0174] 기지국이 액티브 단말을 선택하고, 잔여 정보를 요구할 단말을 결정하는 지금까지의 과정이 스케줄링의 두 단계 중 제1 단계이다. 스케줄링의 제2 단계는 다음과 같은 과정으로 이루어진다.

[0175] 기지국(310)은 액티브 단말들 각각의 피드백 비트 수에 따라 액티브 단말들에 액티브 단말 각각의 피드백 비트 수와 상기 기준 비트 수의 차의 비트 수를 갖는 다운링크 채널에 관한 잔여 정보를 요구한다(313, 314).

[0176] 기지국(310)의 요구에 따라, 해당 단말들은 잔여 정보를 기지국으로 더 피드백 할 수 있다(326).

[0177] 이렇게 두 단계에 걸쳐서 기지국이 액티브 단말로 선택된 단말들에만 잔여 정보를 요구하면, 처음부터 모든 단말들이 피드백 비트 수를 갖는 채널 정보를 보내는 경우보다 총 피드백 시간(혹은 총 피드백 정보의 양)이 줄어들 수 있다. 다시 말해, 첫 단계에서 피드백할 정보량을 제한함으로써 액티브 단말로 선택되지 않을 단말들도 불필요하게 기준 비트보다 큰 피드백 비트 수의 채널 정보를 기지국(310)으로 피드백하는 것을 막을 수 있다. 따라서 전체 전송 효율이 향상될 수 있다.

[0178] 그리고 기지국(310)은 액티브 단말들을 위한 프리코딩 매트릭스를 생성할 수 있다(315). 이때, 기지국(310)은 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수 모두가 미리 설정된 임계값보다 작거나 같은 경우, 제1 정보를 기초로 상기 프리코딩 매트릭스를 생성할 수 있다. 그리고 액티브 단말들 각각의 상기 피드백 비트 수 중 적어도 하나가 미리 설정된 임계값보다 큰 경우, 상기 제1 정보 및 상기 잔여 정보를 기초로 상기 프리코딩 매트릭스를 생성할 수 있다.

[0179] 그리고 기지국(310)은 생성된 프리코딩 매트릭스를 이용하여 각 액티브 단말들로 메시지를 송신할 수 있다(316).

[0180] 지금까지 본 발명에 따른 피드백 손실을 고려하는 기지국 및 단말의 통신 방법 및 기지국의 스케줄링 방법에 대해 설명하였다. 본 피드백 손실을 고려하는 기지국 및 단말의 통신 방법 및 기지국의 스케줄링 방법에는 앞서 도 1내지 도 3과 관련하여 다양한 실시예를 통하여 상술한 내용이 그대로 적용될 수 있으므로, 더 이상의 상세한 설명은 생략하도록 한다.

[0181] 상술한 방법들은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. (상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨

터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 본 발명의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.)

[0182] 이상과 같이 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다.

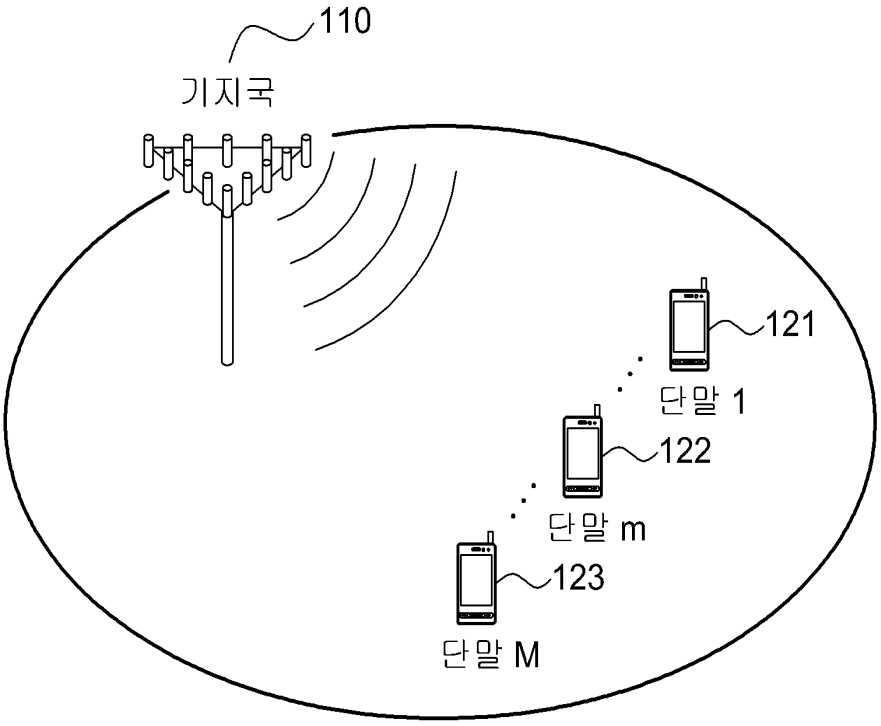
[0183] 그러므로, 본 발명의 범위는 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

부호의 설명

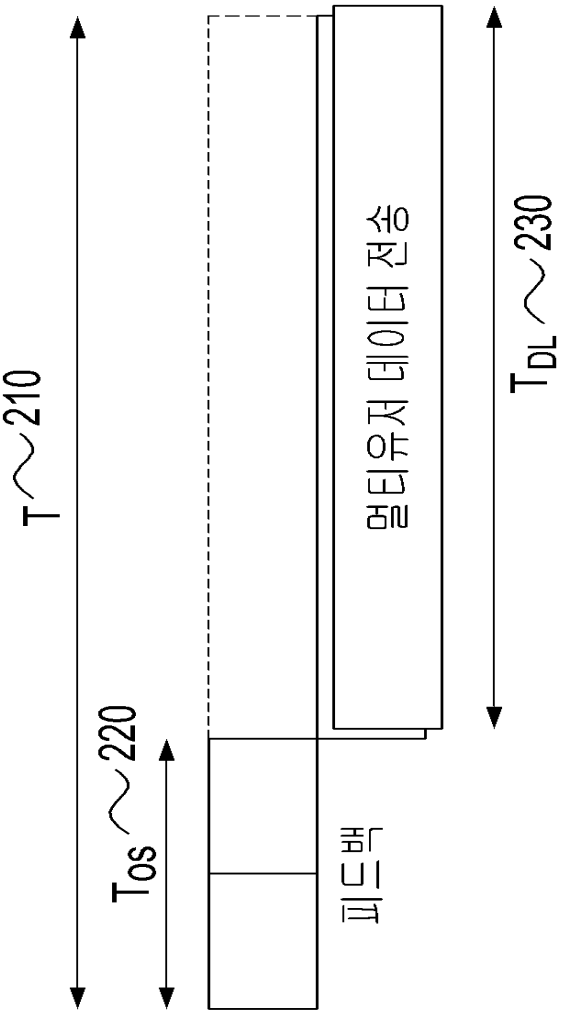
[0184] 110: 기지국

도면

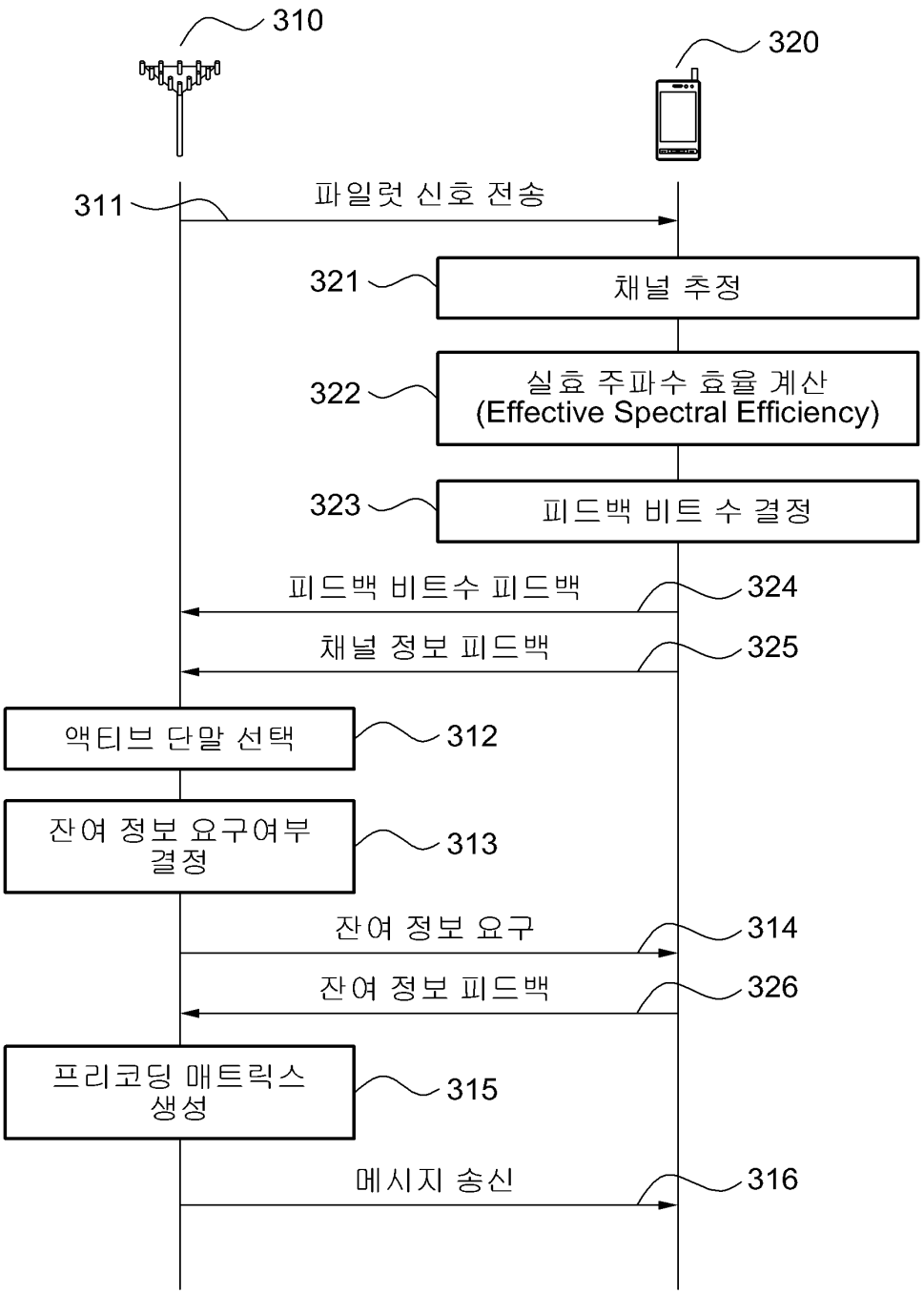
도면1



도면2



도면3


310
320
311
파일럿 신호 전송
321
채널 추정
322
실효 주파수 효율 계산
(Effective Spectral Efficiency)
323
피드백 비트 수 결정
피드백 비트수 피드백
324
채널 정보 피드백
325
액티브 단말 선택
312
잔여 정보 요구여부
결정
313
잔여 정보 요구
314
잔여 정보 피드백
326
프리코딩 매트릭스
생성
315
메시지 송신
316