(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2010-0130312
(43) 공개일자 2010년12월13일

(51) Int. Cl.
H04B 7/04 (2006.01) *H04B 7/26* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2009-0048924
(22) 출원일자 2009년06월03일
심사청구일자 없음

(71) 출원인
삼성전자주식회사
경기도 수원시 영통구 매탄동 416
서강대학교산학협력단
서울 마포구 신수동 1-1 서강대학교
(72) 발명자
박성우
경기 수원시 권선구 곡반정동 5블럭 2롯트 201호
황근철
경기도 용인시 수지구 죽전동 꽃메마을 현대홈타운 521동 902호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
권혁록, 이정순

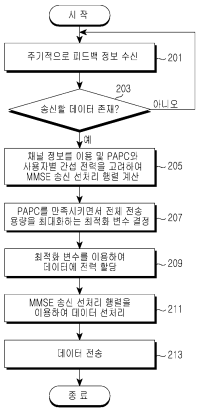
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 분산 다중 입출력 시스템에서 최적의 선형적 전송 장치 및 방법

(57) 요 약

본 발명은 분산 다중 입출력(Multiple Input Multiple Output : 이하 'MIMO'라 칭함) 시스템에서 최적의 선형적 전송 장치 및 방법에 관한 것이다. 본 발명에 따른 지리적으로 분산 배치된 기지국들이 유선 또는 전용회선으로 연결되어 있는 분산 MIMO 시스템에서 기지국의 데이터 전송을 위한 방법은, 채널 정보와 사용자별 간섭 전력을 고려하여 MMSE(Minumum Mean Square Error) 송신 선처리 행렬을 계산하는 과정과, 기지국 당 전력 제약 조건을 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 전력 제어 변수를 계산하는 과정과, 상기 계산된 전력 제어 변수를 이용하여 송신할 데이터에 전력을 할당하는 과정과, 상기 계산된 MMSE 송신 선처리 행렬을 이용하여 상기 전력이 할당된 데이터에 대해 선처리를 수행하고, 상기 선처리된 송신 데이터를 전송하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 한다.

대 표 도 - 도2



(72) 발명자

강승원

서울특별시 구로구 온수동 1 ~34 7-5 두암빌라 나동 202호

윤순영

서울 송파구 잠실7동 아시아선수촌아파트 9동 106호

성원진

서울특별시 서초구 잠원동 60-7 녹원한신A 101-505

이병석

서울특별시 마포구 연남동 390-27

박종현

서울특별시 서초구 서초동 1629-9

특허청구의 범위

청구항 1

지리적으로 분산 배치된 기지국들이 유선 또는 전용회선으로 연결되어 있는 분산 다중 입출력(Multiple Input Multiple Output : MIMO) 시스템에서 기지국의 데이터 전송을 위한 방법에 있어서,

채널 정보와 사용자별 간섭 전력을 고려하여 MMSE(Minumum Mean Square Error) 송신 선처리 행렬을 계산하는 과정과,

기지국 당 전력 제약 조건을 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 전력 제어 변수를 계산하는 과정과,

상기 계산된 전력 제어 변수를 이용하여 송신할 데이터에 전력을 할당하는 과정과,

상기 계산된 MMSE 송신 선처리 행렬을 이용하여 상기 전력이 할당된 데이터에 대해 선처리를 수행하고, 상기 선처리된 송신 데이터를 전송하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 MMSE 송신 선처리 행렬은 하기 <수학식 16>과 같이 계산하는 것을 특징으로 하는 방법.

수학식 16

$$G=R_{xy}R_{yy}^{-1}=H^{H}\left(HH^{H}+diag(\rho_1,\cdots,\rho_K)\right)^{-1},\ where\ \rho_k:=\sigma_k^2/E[P_m]$$

여기서, 상기 x는 송신 신호를 나타내고, 상기 y는 수신 신호를 나타낸다. 또한, 상기 R_{xy}는 송신 신호 x와 수신 신호 y 간의 상호 상관 행렬을 나타내고, 상기 R_{yy}는 수신 신호 y의 자기 상관 행렬을 나타낸다. 상기 H는 송수신 안테나 사이에 형성되는 네트워크 채널 행렬이고, 상기 σ_k^2는 k번째 사용자의 간섭 전력이며, 상기 P_m은 m번째 기지국의 송신 전력을 나타냄.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 전력 제어 변수는 하기 <수학식 17>을 이용하여, 전체 전송 용량을 최대화하는 최적화 문제의 해를 탐색함으로써 계산하는 것을 특징으로 하는 방법.

수학식 17

$$\underset{p_k}{maximize}\quad \sum_{k=1}^{K}\log_2\left(1+\frac{a_{kk}p_k}{\sigma_k^2+\sum_{l\neq k}a_{kl}p_l}\right),\ where\ \ a_{km}:=\left|\sum_{l=1}^{M}h_{kl}g_{lm}\right|^2$$

$$subject\ to\quad p_k\geq 0,\ k=1,\cdots,M$$

$$\sum_{k=1}^{K} p_k |g_{mk}|^2 \le P_{\max}, \quad m=1,\cdots,M$$

여기서, 상기 M은 단일 송신안테나를 가지는 기지국의 수를 나타내고, 상기 K는 단일 수신안테나를 가지는 단말의 수를 나타낸다. 상기 σ_k^2는 k번째 사용자의 간섭 전력이고, 상기 h_{km}는 k번째 단말과 m번째 기지국 사이의 채널 이득이며, 상기 g_{km}는 MMSE 송신 선처리 행렬의 원소로서, k번째 단말과 m번째 기지국 사이의 원소이다. 상기 p_k는 k번째 단말에 대한 전력 제어 변수이고, 상기 $P_{\max}$는 상기 기지국이 최대 전력임.

청구항 4

제 3 항에 있어서,

모든 단말에 대한 상기 전력 제어 변수를 같은 하나의 값으로 할당하고, 전체 기지국들의 전력 중 가장 큰 기지국 전력이 최대 전력 $P_{\max}$에 도달하도록 상기 하나의 값을 계산하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 5

제 3 항에 있어서,

상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 현재 상태값을 초기 설정하는 과정과,

상기 현재 상태값으로, 상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 최적해를 초기 설정하는 과정과,

상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태값을 설정하는 과정과,

상기 전송 용량의 다음 상태값이 상기 전송 용량의 최적해보다 클 시, 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 다음 상태값으로 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 최적해을 갱신하는 과정과,

상기 전송 용량의 다음 상태값이 상기 전송 용량의 현재 상태 값보다 클 시, 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 다음 상태값으로 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 현재 상태 값을 갱신하는 과정과,

상기 전송 용량의 최적해가 일정 반복 횟수 이상 갱신되지 않을 시, 상기 전송 용량의 최적해를, 상기 전체 전송 용량을 최대화하는 최적화 문제의 해로 결정하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 현재 상태 값은 하기 <수학식 18>을 이용하여 초기 설정하는 것을 특징으로 하는 방법.

수학식 18

$$p_k = p = \frac{P_{\max}}{\max_m \left(\sum_{k=1}^{K} |g_{mk}| \right)^2}$$

$$R = f(p_k) := \sum_{k=1}^{K} \log_2 \left(1 + \frac{a_{kk} p_k}{\sigma_k^2 + \sum_{l \neq k} a_{kl} p_l} \right)$$

청구항 7

제 5 항에 있어서,

상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태값은 하기 <수학식 19>를 이용하여 설정하는 것을 특징으로 하는 방법.

수학식 19

$$\hat{p_k} = neighbor(p_k) := p_k + p \cdot s_i \cdot random(-1,1)$$

$$\hat{R} = f(\hat{p_k})$$

여기서, $random(a,b)$는 구간 [a, b]에서 균등 분포를 따르는 임의의 값을 랜덤하게 발생함을 의미하고, 상기 i는 반복 인덱스이며, 상기 s_i는 가중치임.

청구항 8

제 5 항에 있어서,

상기 전송 용량의 다음 상태값이 상기 전송 용량의 현재 상태 값보다 크지 않을 시, 상기 다음 상태값과 현재 상태 값의 차이에 따라 확률적으로, 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 다음 상태값으로 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 현재 상태 값을 갱신하는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 9

제 1 항에 있어서,

단말로부터 주기적으로 상기 채널 정보를 피드백 수신 받는 과정을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 방법.

청구항 10

지리적으로 분산 배치된 기지국들이 유선 또는 전용회선으로 연결되어 있는 분산 다중 입출력(Multiple Input Multiple Output : MIMO) 시스템에서 기지국의 데이터 전송을 위한 장치에 있어서,

채널 정보와 사용자별 간섭 전력을 고려하여 MMSE(Minumum Mean Square Error) 송신 선처리 행렬을 계산하는 MMSE 송신 선처리 행렬 계산부와,

기지국 당 전력 제약 조건을 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 전력 제어 변수를 계산하는 최적화 변수 결정부와,

상기 계산된 전력 제어 변수를 이용하여 송신할 데이터에 전력을 할당하는 전력 할당부와,

상기 계산된 MMSE 송신 선처리 행렬을 이용하여 상기 전력이 할당된 데이터에 대해 선처리를 수행하고, 상기 선처리된 송신 데이터를 전송하는 선처리부를 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 MMSE 송신 선처리 행렬은 하기 <수학식 20>과 같이 계산하는 것을 특징으로 하는 장치.

수학식 20

$$G=R_{xy}R_{yy}^{-1}=H^{H}\left(HH^{H}+diag(\rho_1,\cdots,\rho_K)\right)^{-1},\ where\ \rho_k:=\sigma_k^2/E[P_m]$$

여기서, 상기 x는 송신 신호를 나타내고, 상기 y는 수신 신호를 나타낸다. 또한, 상기 R_{xy}는 송신 신호 x와 수신 신호 y 간의 상호 상관 행렬을 나타내고, 상기 R_{yy}는 수신 신호 y의 자기 상관 행렬을 나타낸다. 상기 H는 송수신 안테나 사이에 형성되는 네트워크 채널 행렬이고, 상기 σ_k^2는 k번째 사용자의 간섭 전력이며, 상기 P_m은 m번째 기지국의 송신 전력을 나타냄.

청구항 12

제 10 항에 있어서,

상기 전력 제어 변수는 하기 <수학식 21>을 이용하여, 전체 전송 용량을 최대화하는 최적화 문제의 해를 탐색함으로써 계산하는 것을 특징으로 하는 장치.

수학식 21

$$\underset{p_k}{maximize}\quad \sum_{k=1}^{K}\log_2\left(1+\frac{a_{kk}p_k}{\sigma_k^2+\sum_{l\neq k}a_{kl}p_l}\right),\ where\ \ a_{km}:=\left|\sum_{l=1}^{M}h_{kl}g_{lm}\right|^2$$

$$subject\ to\quad p_k\geq 0,\ k=1,\cdots,M$$

$$\sum_{k=1}^{K}p_k|g_{mk}|^2\leq P_{\max},\ m=1,\cdots,M$$

여기서, 상기 M은 단일 송신안테나를 가지는 기지국의 수를 나타내고, 상기 K는 단일 수신안테나를 가지는 단말

의 수를 나타낸다. 상기 σ_k^2는 k번째 사용자의 간섭 전력이고, 상기 h_{km}는 k번째 단말과 m번째 기지국 사이의 채널 이득이며, 상기 g_{km}는 MMSE 송신 선처리 행렬의 원소로서, k번째 단말과 m번째 기지국 사이의 원소이다. 상기 p_k는 k번째 단말에 대한 전력 제어 변수이고, 상기 $P_{\max}$는 상기 기지국이 최대 전력임.

청구항 13

제 12 항에 있어서,

모든 단말에 대한 상기 전력 제어 변수를 같은 하나의 값으로 할당하고, 전체 기지국들의 전력 중 가장 큰 기지국 전력이 최대 전력 $P_{\max}$에 도달하도록 상기 하나의 값을 계산하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 14

제 12 항에 있어서, 상기 전력 할당부는,

상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 현재 상태값을 초기 설정하는 수단과,

상기 현재 상태값으로, 상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 최적해를 초기 설정하는 수단과,

상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태값을 설정하는 수단과,

상기 전송 용량의 다음 상태값이 상기 전송 용량의 최적해보다 클 시, 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 다음 상태값으로 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 최적해을 갱신하는 수단과,

상기 전송 용량의 다음 상태값이 상기 전송 용량의 현재 상태 값보다 클 시, 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 다음 상태값으로 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 현재 상태 값을 갱신하는 수단과,

상기 전송 용량의 최적해가 일정 반복 횟수 이상 갱신되지 않을 시, 상기 전송 용량의 최적해를, 상기 전체 전송 용량을 최대화하는 최적화 문제의 해로 결정하는 수단을 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 15

제 14 항에 있어서,

상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 현재 상태 값은 하기 <수학식 22>를 이용하여 초기 설정하는 것을 특징으로 하는 장치.

수학식 22

$$p_k = p = \frac{P_{\max}}{\max_m \sum_{k=1}^{K} |g_{mk}|^2}$$

$$R=f(p_k):=\sum_{k=1}^{K}\log_2\left(1+\frac{a_{kk}p_k}{\sigma_k^2+\sum_{l\neq k}a_{kl}p_l}\right)$$

청구항 16

제 14 항에 있어서,

상기 전력 제어 변수와, 상기 전력 제어 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태값은 하기 <수학식 23>을 이용하여 설정하는 것을 특징으로 하는 장치.

수학식 23

$$\hat{p_k}=neighbor(p_k):=p_k+p\cdot s_i\cdot random(-1,1)$$

$$\hat{R}=f(\hat{p_k})$$

여기서, $random(a,b)$는 구간 [a, b]에서 균등 분포를 따르는 임의의 값을 랜덤하게 발생함을 의미하고, 상기 i는 반복 인덱스이며, 상기 s_i는 가중치임.

청구항 17

제 14 항에 있어서,

상기 전송 용량의 다음 상태값이 상기 전송 용량의 현재 상태 값보다 크지 않을 시, 상기 다음 상태값과 현재 상태 값의 차이에 따라 확률적으로, 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 다음 상태값으로 상기 전력 제어 변수와 전송 용량의 현재 상태 값을 갱신하는 수단을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

청구항 18

제 10 항에 있어서,

단말로부터 주기적으로 상기 채널 정보를 피드백 수신 받는 피드백 수신부를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 장치.

명 세 서

발명의 상세한 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 분산 MIMO 시스템에서 하향링크 전송 시, 다중 사용자에 대한 전체 전송 용량을 증대시키기 위한 전송 장치 및 방법에 관한 것으로서, 특히 지리적으로 분산 배치된 기지국 각각에 대한 독립적인 최대 전력 제약 조건을 고려하여, 최소평균제곱오차(Minumum Mean Square Error : MMSE) 조건에 따라 최적화된 선형적인 다중 사용자 신호를 전송함으로써, 이론적인 성능의 상한으로 알려진 최적의 비선형 더티 페이퍼 코딩(Dirty Paper Coding : DPC)의 성능에 근접하는 전송 장치 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 최근 고속 및 고품질의 데이터 전송에 대한 요구가 증대됨에 따라, 이를 만족시키기 위한 기술 중의 하나로 다수의 송수신 안테나들을 사용하는 다중 입출력(Multiple Input Multiple Output : 이하 'MIMO'라 칭함) 기술이 크게 주목되고 있다. 상기 MIMO 기술은 다수의 안테나들로 인한 다수의 채널들을 이용하여 통신을 수행함으로써, 단일 안테나를 사용하는 경우보다 최대 전송 용량을 크게 개선시킬 수 있는 기술이다.

[0003] 상기 MIMO 기술이 적용된 시스템 중, 분산 배치된 유닛(Unit)들을 활용하는 분산 MIMO 시스템은, 지리적으로 분산 배치된 다수의 유닛들이 유선 또는 전용 회선으로 연결되어 단말의 정보를 공유하며 모두 같은 주파수 대역을 사용하여 데이터를 전송하는 시스템을 말한다. 여기서, 상기 유닛은 기지국(Base station), 중계국(Relay station), 분리되어 있는 증폭기(Amplifier) 중 하나가 될 수 있으며, 이하 설명에서는 기지국을 예로 들어 설명하기로 한다.

[0004] 상기 분산 MIMO 시스템의 하향링크 전송 시 가능한 전송 방식으로, 주어진 전송 구간 동안 하나의 기지국이 하나의 단말에 대해 신호를 전송하는 단일 안테나 전송(Single-Antenna Transmission : 이하 'SAT'라 칭함) 방식과, 다수의 기지국이 다수의 단말에 대해 동시에 신호를 전송하는 방식이 모두 가능하다. 이때, 후자의 방식에 대한 최대 전송 용량의 계산은 그 과정이 복잡하고, 단말별 전송 신호의 전력 제어(Power Control)를 포함하는 일련의 최적화 과정이 필요하다.

[0005] 상기 분산 MIMO 시스템이 기존의 집중형 MIMO 시스템과 차별되는 가장 큰 특징은, 상기 집중형 MIMO 시스템의 경우 하나의 기지국에 다수의 송신 안테나가 존재하고 다수의 단말이 모두 기지국으로부터 평균적으로 같은 거리만큼 떨어져 있다고 가정함으로써 각 단말이 수신하는 평균 수신 전력 및 평균 간섭 전력이 모두 동일한 반면, 상기 분산 MIMO 시스템의 경우 지리적으로 분산된 기지국으로부터 셀 내에 자유롭게 배치된 단말들에 대한 평균 수신 전력 및 평균 간섭 전력이 모두 다르다는 점이다. 이는 기존의 집중형 MIMO 시스템의 구조 하에서 유도된 이론적인 전송 용량이 분산 MIMO 시스템의 구조에 그대로 적용될 수 없고 부분적인 변형 또는 다른 접근 방법으로 유도되어야 함을 의미한다.

[0006] 상기 분산 MIMO 시스템의 또 다른 큰 특징은, 각 기지국마다 고유의 최대 전송 가능 전력 제약 조건이 있다는 것이다. 기존의 집중형 MIMO 시스템에서는 송신 안테나마다 전송하는 평균 신호 전력의 합산값이 전체 전력 $P_{\max}$를 넘지 않아야한다는 전체 전력 제약(Total Power Constraint : 이하 'TPC'라 칭함) 조건이 있었으나, 분산 MIMO 시스템을 포함하여 셀룰러 시스템의 송신 안테나마다 존재하는 고유한 전력증폭기 특성을 감안할 때, 송신 안테나당 전력 제약(Per-Antenna Power Constraint : 이하 'PAPC'라 칭함) 조건이 있음을 가정하는 것이 보다 현실적이고 중요한 요소라는 견해가 지배적이다. 상기 분산 MIMO 시스템의 경우, 지리적으로 분산된 기지국마다 독립적인 PAPC 조건이 적용되는 것이 타당하며, 이러한 PAPC 조건 하에서의 다중 사용자 전송 시 최대 전송 용량에 관한 연구 결과는 미미한 실정이다.

[0007] 상기 언급된 두 가지 주요 특성을 모두 반영하여 분산 MIMO 시스템의 최대 전송 용량을 분석하고 제시한 연구 결과는 현재까지 존재하지 않는다. 따라서, 기지국마다 적용되는 PAPC 조건 및 단말마다 상이한 간섭 전력이 존재하는 셀룰러 시스템에서, 다중 사용자에 대한 전체 전송 용량을 증대시킬 수 있는 전송 방안의 제시가 필요하다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

[0008] 본 발명의 목적은 분산 MIMO 시스템에서 최적의 선형적 전송 장치 및 방법을 제공함에 있다.

[0009] 본 발명의 다른 목적은 분산 MIMO 시스템에서 하향링크 전송 시, 다중 사용자에 대한 전체 전송 용량을 증대시키기 위한 전송 장치 및 방법을 제공함에 있다.

[0010] 본 발명의 다른 목적은 지리적으로 분산 배치된 기지국 각각에 대한 독립적인 최대 전력 제약 조건을 고려하여, 최소평균제곱오차(Minumum Mean Square Error : MMSE) 조건에 따라 최적화된 선형적인 다중 사용자 신호를 전송함으로써, 이론적인 성능의 상한으로 알려진 최적의 비선형 더티 페이퍼 코딩(Dirty Paper Coding : DPC)의 성능에 근접하는 전송 장치 및 방법을 제공함에 있다.

[0011] 본 발명의 다른 목적은 분산 MIMO 시스템에서 하향링크 전송 시, MMSE 조건식을 PAPC 및 사용자마다 다른 간섭 전력이 있는 환경에서 유도하고 이를 송신 선처리 행렬로 사용하는 첫 번째 단계 및, 추가로 사용자마다 전력 제어 변수를 두어 이에 대한 최적화를 수행하여 최대 전송 용량을 계산하는 두 번째 단계로 구분되는, MMSE 기반의 2단계 전송 방법을 제공함에 있다.

[0012] 본 발명의 다른 목적은 분산 MIMO 시스템에서 하향링크 전송 시, 최적화 문제에 대한 전력 제어 방안으로 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing : SA) 알고리듬을 사용하는 방법을 제공함에 있다.

과제 해결수단

[0013] 상기 목적들을 달성하기 위한 본 발명의 일 견지에 따르면, 지리적으로 분산 배치된 기지국들이 유선 또는 전용회선으로 연결되어 있는 분산 MIMO 시스템에서 기지국의 데이터 전송을 위한 방법은, 채널 정보와 사용자별 간섭 전력을 고려하여 MMSE(Minumum Mean Square Error) 송신 선처리 행렬을 계산하는 과정과, 기지국 당 전력 제약 조건을 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 전력 제어 변수를 계산하는 과정과, 상기 계산된 전력 제어 변수를 이용하여 송신할 데이터에 전력을 할당하는 과정과, 상기 계산된 MMSE 송신 선처리 행렬을 이용하여 상기 전력이 할당된 데이터에 대해 선처리를 수행하고, 상기 선처리된 송신 데이터를 전송하는 과정을 포함하는 것을 특징으로 한다.

[0014] 상기 목적들을 달성하기 위한 본 발명의 일 견지에 따르면, 지리적으로 분산 배치된 기지국들이 유선 또는 전용회선으로 연결되어 있는 분산 다중 입출력(Multiple Input Multiple Output : MIMO) 시스템에서 기지국의 데이터 전송을 위한 장치는, 채널 정보와 사용자별 간섭 전력을 고려하여 MMSE(Minumum Mean Square Error) 송신 선처리 행렬을 계산하는 MMSE 송신 선처리 행렬 계산부와, 기지국 당 전력 제약 조건을 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 전력 제어 변수를 계산하는 최적화 변수 결정부와, 상기 계산된 전력 제어 변수를 이용하여 송신할 데이터에 전력을 할당하는 전력 할당부와, 상기 계산된 MMSE 송신 선처리 행렬을 이용하여 상기 전력이 할당된 데이터에 대해 선처리를 수행하고, 상기 선처리된 송신 데이터를 전송하는 선처리부를 포함하는 것을 특징으로 한다.

효 과

[0015] 상술한 바와 같이 본 발명은 분산 MIMO 시스템의 하향링크 다중 사용자 전송 시, MMSE 기반의 2단계 전송 방식을 적용함으로써, 기지국당 전력 제약 조건 하에서 저복잡도로 높은 전송 용량을 달성할 수 있는 이점이 있다. 즉, 높은 SINR에서는 ZF 필터 형태로, 낮은 SINR에서는 송신 정합 필터 형태로 채널 적응적이고 유일하게 결정되는 MMSE 송신 선처리 행렬을 바탕으로, 전송 방식의 복잡도와 성능 사이의 트레이드 오프(trade-off) 관계에 따라 적절한 수준의 추가적인 전력 제어 기법을 통해 전송 용량을 크게 증대시킬 수 있는 이점이 있다. 또한 비선형의 더티페이퍼 코딩이 적용 가능한 경우 제안 방식에 이를 결합하여 전송 용량을 더욱 높일 수 있는 이점이 있다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

[0016] 이하 본 발명의 바람직한 실시 예를 첨부된 도면의 참조와 함께 상세히 설명한다. 그리고, 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지기능 혹은 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단된 경우, 그 상세한 설명은 생략한다.

[0017] 이하 본 발명은 분산 MIMO 시스템에서 하향링크 전송 시, 다중 사용자에 대한 전체 전송 용량을 증대시키기 위한 전송 장치 및 방법에 관해 설명한다. 특히, 본 발명은 지리적으로 분산 배치된 기지국 각각에 대한 독립적인 최대 전력 제약 조건을 고려하여, 최소평균제곱오차(Minumum Mean Square Error : 이하 'MMSE'라 칭함) 조건에 따라 최적화된 선형적인 다중 사용자 신호를 전송함으로써, 이론적인 성능의 상한으로 알려진 최적의 비선형 더티 페이퍼 코딩(Dirty Paper Coding : 이하 'DPC'라 칭함)의 성능에 근접하는 전송 장치 및 방법에 대해 설명한다.

[0018]

[0019] 이하 본 발명에 따른 분산 MIMO 시스템은 섹터로 분할된 분산 MIMO 시스템을 예로 들어 설명할 것이나, 섹터로 분할되지 않은 분산 MIMO 시스템에도 적용 가능하다.

[0020] 도 1은 본 발명에 따른 섹터로 분할된 분산 MIMO 시스템을 도시한 도면이다.

[0021] 상기 도 1을 참조하면, 상기 분산 MIMO 시스템은, 지리적으로 분산 배치되어 적어도 하나의 단말(101, 102, 103)과 교신 가능한 적어도 하나의 기지국(111, 112, 113)과, 상기 기지국들(111, 112, 113)과 통신하는 적어도 하나의 단말(101, 102, 103)을 포함하여 구성된다. 여기서, 각 기지국(111, 112, 113)을 중심으로하는 육각형은, 해당 기지국(111, 112, 113)에서 독립적으로 신호 전송 시 전송 가능한 커버리지를 예시한 것이다.

[0022] 상기 기지국들(111, 112, 113)은, 서로 유선 또는 전용회선으로 연결되어 상기 단말들(101, 102, 103)의 정보를 공유하고, 모두 같은 주파수 대역(즉, 주파수 재사용 계수가 1)을 사용한다. 상기 기지국들(111, 112, 113)은 각각 세 개의 섹터 안테나를 가지며, 각 섹터 안테나가 해당 섹터 영역에서 독립적으로 신호 전송을 담당한다. 여기서, 각 기지국(111, 112, 113) 내 각 섹터 당 다수 개의 안테나가 설치될 수 있고, 단말들(101, 102, 103) 역시 다수 개의 안테나를 가질 수 있으나, 이하에서는 설명의 편의상 하나의 섹터 당 하나의 안테나가 존재하는 것으로 설명하기로 한다.

[0023] 인접한 세 개의 기지국들(111, 112, 113)은, 서로 인접하고 있는 세 개의 섹터 영역 내의 단말들(101, 102, 103)에 대해 다중 사용자 협력적 전송을 하게 된다. 이때, 각 기지국(111, 112, 113)별로, 상기 서로 인접하고 있는 세 개의 섹터 영역에 대응하는 하나의 섹터 안테나가 상기 단말들(101, 102, 103)을 위한 다중 사용자 협력적 전송에 참여하게 된다. 마찬가지로, 각 기지국(111, 112, 113)별로, 상기 하나의 섹터 안테나를 제외한 나머지 두 개의 섹터 안테나 역시, 다른 방향으로 인접 기지국들과 협력적 전송을 하게 된다. 여기서, 각 단말(101, 102, 103)은 해당 섹터 영역 내에서 균등 분포로 랜덤하게 발생하며, 인접 섹터의 단말들(101, 102, 103)과 함께 주위의 여러 기지국들(111, 112, 113)로부터 다중 사용자 전송을 받게 된다.

[0024] 한편, 기존의 TPC 하에서 하향링크 다중 사용자 전송의 최적 방식으로 알려진 DPC에 대해 살펴보면 다음과 같다. 이론적인 성능의 상한으로 알려진 상기 DPC는 비선형 신호 처리 과정으로서, 실제 적용에는 구현이 적합지 않은 정도로 복잡도가 큰 방식이다. 이와 같은 구현 측면을 고려한 선형적인 다중 사용자 전송 방식에는 영점 강제(Zero-Forcing : ZF) 빔형성 기법, MMSE 기반 전송 기법(또는 송신 위너(Wiener) 필터링) 등이 존재한다. 그 중 상기 MMSE 기반 전송 기법은 TPC 및 사용자마다 동일한 간섭 전력이 있는 환경하에서 최적의 선형적 전송 방식으로 알려져 있다.

[0025] 따라서 본 발명에서는 MMSE 조건식을 PAPC 및 사용자마다 다른 간섭 전력이 있는 환경에서 유도하고 이를 송신 선처리 행렬로 사용하는 첫 번째 단계 및, 추가로 사용자마다 전력 제어 변수를 두어 이에 대한 최적화를 수행하여 최대 전송 용량을 계산하는 두 번째 단계로 구분되는, MMSE 기반의 2단계 전송 방법을 제안하고 성능을 검증한다.

[0026] 우선 최적의 DPC 성능을 산출하기 위해, 단일 송신안테나를 가지는 M 개의 기지국이 단일 수신안테나를 가지는 K 개의 단말에게 하향링크 다중 사용자 전송을 수행하기 위한 수신 신호 모델은 하기 <수학식 1>과 같이 표현할 수 있다.

수학식 1

[0027]
$$y = HBd + n = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{K1} & \cdots & h_{KM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{M1} & \cdots & b_{MK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_K \end{bmatrix}$$

[0028] 여기서, 모든 행렬 및 벡터들은 복소 심볼을 원소로 갖는다. 상기 y는 수신 신호 벡터이고, 상기 $H=[h_{km}]$는 송수신 안테나 사이에 형성되는 네트워크 채널 행렬로서, 원소 h_{km}는 k번째 단말과 m번째 기지국 사이의 채널 이득을 의미한다. 상기 B는 송신 선처리 행렬로서 최적화의 대상이 된다. 상기 d_k는 k번째 단말로 전송하고자 하는 복소 심볼이며, 상기 n_k는 k번째 단말이 수신하게 되는, 열잡음을 포함하는 외부의 복소 간섭 신호이다.

[0029] 여기서, 각 기지국 당 전송 가능한 최대 전력을 $P_{\max}$라 하면, 기지국 당 최대 전송 가능한 전력 제약(per-BS power constraint) 조건식, 즉 PAPC에 의한 제약 조건식은 하기 <수학식 2>와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$P_m := \sum_{k=1}^{K} |b_{mk}|^2 \le P_{\max}, \quad m=1,\cdots,M$$

[0030]

[0031] 여기서, 상기 <수학식 2>를 만족하는 임의의 송신 선처리 행렬 B에 대한 전송 용량 최대화를 목적으로 하는 최적화 문제는 하기 <수학식 3>과 같이 형성된다.

수학식 3

$$\underset{B}{maximize} \quad \sum_{k=1}^{K} \log_2\left(1+\frac{u_{kk}}{\sigma_k^2+\sum_{l>k} u_{kl}}\right), \quad where \quad u_{km} := \left|\sum_{l=1}^{M} h_{kl} b_{lm}\right|^2$$

[0032]

$$subject\ to \quad \sum_{k=1}^{K} |b_{mk}|^2 \le P_{\max}, \quad m=1,\cdots,M$$

[0033]

[0034] 여기서, 상기 σ_k^2은 n_k의 분산으로서 k번째 단말에서의 간섭 신호 전력값이다. 상기 <수학식 3>을 이용하여 전체 탐색을 통해, 단말마다의 쉐넌(Shannon) 전송 용량을 합산한 전체 전송 용량을 최대화하는 B를 결정하면, 상기 <수학식 1>의 수신 신호 모델 하에서의 최적의 DPC 성능을 얻을 수 있다. 여기서, 로그 항의 분모의 합산 부분에서 $l>k$인 부분만 간섭 전력 성분으로 적용되는 것이 DPC에 의해 얻을 수 있는 이득이다. 이와 같이, DPC는 주어진 채널 행렬 H의 행 간의 정렬 순서에 따라 그 성능이 영향을 받으므로, H의 행들간의 위치를 서로 바꾸는 총 K!(= K(K-1)…1) 가지 수의 사용자 정렬에 따른 상기 <수학식 1>을 이용하여, 사실상 동일한 K! 가지 수의 다른 최적화 문제를 풀고, 그 중 가장 최대의 목적 함수 값을 선택하면, 주어진 채널 정보 하에서의 최적의 DPC 성능이 계산된다. 예를 들어, H의 행들 중 행 1과 2가 교환되면, 그에 따라 B의 열 1과 2가, 그리고 σ_1^2과 σ_2^2가 서로 교환되어 상기 <수학식 3>에 적용된다.

[0035] 상기의 비선형 전송 방식 대신, 현실적인 구현 복잡도를 고려하여, 사용자 전체의 전송 용량을 최대화하는 최적의 선형적 전송 방식을 적용하면, 상기 <수학식 3>은 하기 <수학식 4>와 같이 형성될 수 있다.

수학식 4

[0036] $$\underset{B}{maximize} \quad \sum_{k=1}^{K} \log_2\left(1+\frac{u_{kk}}{\sigma_k^2+\sum_{l\neq k} u_{kl}}\right), \quad where \quad u_{km}:=\left|\sum_{l=1}^{M} h_{kl} b_{lm}\right|^2$$

[0037] $$subject\ to \quad \sum_{k=1}^{K} |b_{mk}|^2 \leq P_{\max}, \quad m=1,\cdots,M$$

[0038] 즉, 상기 <수학식 3>과 비교하였을 때, 상기 <수학식 4>는 로그 항의 분모의 합산 부분에서 합산 조건이 $l\neq k$로만 바뀌었음을 확인할 수 있으며, 이는 DPC에 의한 효과만을 제거하고 마찬가지의 방법으로 선처리 행렬 B에 대한 전체 탐색을 수행함을 의미한다. 최적화 변수의 개수는, 상기 <수학식 3>과 <수학식 4> 모두 행렬 B의 원소 개수에 각 원소의 실수부 및 허수부 각각이 최적화 변수가 되므로, 2MK이고, 상기 <수학식 3>의 경우 사용자 정렬 가지수 K!만큼 최적화 과정을 반복한다는 차이가 있다. 상기 <수학식 3>과 <수학식 4>에서 선처리 행렬 B에 대한 효과적인 탐색 방안으로 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing : SA) 알고리듬이 적용 가능하다.

[0039] 여기서, 상기 <수학식 4>와 같이, 사용자 전체의 전송 용량을 최대화하는 최적의 선형적 전송 방식을 적용하여, 송신 선처리 행렬 B에 대한 최적화 문제를 풀고, 그 중 가장 최대의 목적 함수 값을 선택하면, 상기 <수학식 1>의 수신 신호 모델 하에서의 최적의 성능이 계산될 수 있다. 하지만, 실제적으로 상기 <수학식 1>의 수신 신호 모델 하에서 상기 송신 선처리 행렬 B를 최적화하기란 어려운 문제점이 있다.

[0040] 따라서, 본 발명에서는 상기 <수학식 1>의 수신 신호 모델에서의 송신 선처리 행렬 B를, MMSE 송신 선처리 행렬 G와 전력 제어를 위한 대각 행렬 P로 분할하여 최적화를 수행하기로 한다.

[0041] 즉, 본 발명에서는 $B=GP$로 변형된 수신 신호 모델을 고려하며, 이는 하기 <수학식 5>와 같이 표현할 수 있다.

수학식 5

[0042] $$y=HGPd+n=\begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{K1} & \cdots & h_{KM} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{M1} & \cdots & g_{MK} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \sqrt{p_1}d_1 \\ \vdots \\ \sqrt{p_K}d_K \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_K \end{bmatrix}$$

[0043] $$where \quad P:=diag(\sqrt{p_1},\cdots,\sqrt{p_K})$$

[0044] 여기서, 상기 G는 MMSE 송신 선처리 행렬로서, PAPC 및 사용자별 간섭 전력을 고려하여 계산된다. 상기

MMSE 송신 선처리 행렬은 채널 정보를 송수신단에서 모두 알고 있는 경우 송신부에서 선처리 하는 것으로서, 특히 하향링크 다중 사용자 전송과 같이 수신 단말 간의 협력적 신호 처리가 불가능한 경우에 효과적으로 사용될 수 있다. 상기 p_k는 전력 제어를 위한 최적화 변수로서, PAPC 및 전체 전송 용량을 최대화를 고려하여 결정된다.

[0045] 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 분산 MIMO 시스템의 기지국에서 다중 사용자를 위한 MMSE 기반의 선형적 전송 방법을 도시한 흐름도이다.

[0046] 상기 도 2를 참조하면, 기지국은 201단계에서 주기적으로 단말들로부터 피드백 정보를 수신한다. 여기서, 상기 피드백 정보는 채널 정보를 의미한다.

[0047] 이후, 상기 기지국은 203단계에서 송신할 데이터가 존재하는지 여부를 검사한다. 상기 송신할 데이터가 존재하지 않을 시, 상기 기지국은 상기 201단계로 돌아가 이하 단계를 반복 수행한다. 반면, 상기 송신할 데이터가 존재할 시, 상기 기지국은 205단계에서 상기 채널 정보를 이용하여 MMSE 송신 선처리 행렬을 계산하며, 이때 상기 MMSE 송신 선처리 행렬은 PAPC 및 사용자별 간섭 전력을 고려하여 계산한다.

[0048] 먼저, 상기 MMSE 송신 선처리 행렬은 가우스 마르코프(Gauss-Markoff) 정리의 MMSE 조건식을 사용하여 하기 <수학식 6>과 같이 유도할 수 있다.

수학식 6

[0049] $$G = R_{xy} R_{yy}^{-1}$$

[0050] 여기서, 상기 x는 송신 신호를 나타내고, 상기 y는 수신 신호를 나타낸다. 또한, 상기 R_{xy}는 송신 신호 x와 수신 신호 y 간의 상호 상관 행렬을 나타내고, 상기 R_{yy}는 수신 신호 y의 자기 상관 행렬을 나타내며, 각각 하기 <수학식 7>과 같이 유도할 수 있다.

수학식 7

[0051] $$R_{xy} = E[x(Hx+n)^H] = E[xx^H H^H + xn^H] = R_{xx} H^H = E[P_m] H^H$$

[0052] $$R_{yy} = E[(Hx+n)(Hx+n)^H] = E[Hxx^H H^H + Hxn^H + nx^H H^H + nn^H]$$

[0053] $$= HR_{xx} H^H + diag(\sigma_1^2, \cdots, \sigma_K^2)$$

[0054] $$= E[P_m]\left\{ HH^H + diag\left(\frac{\sigma_1^2}{E[P_m]}, \cdots, \frac{\sigma_K^2}{E[P_m]} \right) \right\}$$

[0055] 여기서, 상기 <수학식 7>을 상기 <수학식 6>에 대입하면, 하기 <수학식 8>과 같은 최적의 MMSE 송신 선처리 행렬 G를 계산할 수 있다.

수학식 8

[0056] $$G = R_{xy} R_{yy}^{-1} = H^H \left(HH^H + diag(\rho_1, \cdots, \rho_K) \right)^{-1}, \ where \ \rho_k := \sigma_k^2 / E[P_m]$$

[0057] 여기서, 상기 MMSE 송신 선처리 행렬의 역행렬 부분의 $diag(\rho_1,\cdots,\rho_K)$는 지금까지 잘 알려진 최적 MMSE 송신 선처리 행렬의 다중 단위행렬 합산 형태가 아님을 알 수 있다. 즉, 기존에 사용자마다 동일한 간섭량을 가정하는 MIMO 시스템에서는 이 부분을 αI 형태로, 스칼라 α만큼 곱해진 단위행렬을 더해줌으로써, 채널 행렬 H의 의사역행렬 $H^H(HH^H)^{-1}$ 대신 정규화된 역행렬(regularized inverse matrix)을 사용하여 왔다. 그러나 분산 MIMO 시스템과 같이 사용자마다 상이한 간섭 전력이 존재하는 경우, 상기 <수학식 8>과 같은 MMSE 송신 선처리 행렬을 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있고, 그 효과는 기존의 정규화된 역행렬과 같이, 해당 MMSE 송신 선처리 행렬을 사용하는 필터가 높은 신호 대 간섭 및 잡음 비(Signal to Interference plus Noise Ratio : 이하 'SINR'이라 칭함)에서는 $G=H^H(HH^H)^{-1}$ 형태의 ZF 필터로 동작하며, 낮은 SINR에서는 $G=H^H$ 형태의 송신 정합 필터로 동작하게 된다. 상기 <수학식 8>의 최적 MMSE 송신 선처리 행렬을 사용하는 필터는, 분산 MIMO 구조와 같이 각 단말에 수신되는 외부 간섭 신호들이 독립-비동일 분포(idependent but non-identically distributed : i.n.d.)를 따르는 환경을 정확히 반영하는 송신 필터로서, 집중형 MIMO 구조의 독립-동일 분포(independent and identically distributed : i.i.d.) 환경에서의 송신 필터와 차별화된다.

[0058] 이후, 상기 기지국은 상기 채널 행렬 H 및 사용자별 간섭 전력 σ_k^2에 대해 유일하게 결정되는 MMSE 송신 선처리 행렬을 사용할 때, PAPC에 의한 제약 조건식을 만족시키기 위한 전력 제어 과정이 필요하다. 여기서, 상기 PAPC에 의한 제약 조건식은 하기 <수학식 9>와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 9

[0059] $$P_m := \sum_{k=1}^{K} p_k |g_{mk}|^2 \le P_{\max},\ m=1,\cdots,M$$

[0060] 여기서, 상기 전력 제어 과정은, K개의 최적화 변수 p_k를 조절함에 따라 상기 <수학식 9>의 PAPC에 의한 제약 조건식을 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 p_k들을 결정하는 과정이다. 따라서, 상기 기지국은 207단계에서, 상기 PAPC에 의한 제약 조건식을 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 최적화 변수 p_k들을 결정하며, 이를 위한 최적화 문제는 하기 <수학식 10>과 같이 형성된다.

수학식 10

[0061] $$\underset{p_k}{maximize} \quad \sum_{k=1}^{K} \log_2\left(1+\frac{a_{kk}p_k}{\sigma_k^2+\sum_{l\neq k} a_{kl}p_l}\right),\ where\ \ a_{km} := \left|\sum_{l=1}^{M} h_{kl}g_{lm}\right|^2$$

[0062] $$subject\ to \quad p_k \ge 0,\ k=1,\cdots,M$$

$$\sum_{k=1}^{K} p_k |g_{mk}|^2 \le P_{\max}, \quad m=1,\cdots,M$$

[0063]

[0064] 여기서, 상기 <수학식 10>은 상기 <수학식 4>와 비교할 때, 선형적인 선처리 행렬 B를 G와 P의 두 가지 행렬로 분리하여 각각을 최적화하는 문제로 분할함으로써, 상기 <수학식 4>에서의 총 2MK 개의 최적화 변수에 대한 최적화를 상기 <수학식 10>에서의 오직 K 개의 최적화 변수 p_k에 대한 최적화로 간략화하였다. 즉, 탐색 복잡도를 반영하는 최적화 변수의 개수가 2M 배 만큼 감소됨을 알 수 있다. 여기서, 상기 <수학식 10>의 최적화 문제에 대한 최적화 변수 p_k 결정 방안은 이후 도 3의 전력 제어 알고리듬을 통해 자세히 설명하기로 한다.

[0065] 이후, 상기 기지국은 209단계에서 상기 결정된 최적화 변수를 이용하여 상기 송신할 데이터에 전력을 할당한다.

[0066] 이후, 상기 기지국은 211단계에서 상기 계산된 MMSE 송신 선처리 행렬을 이용하여, 상기 전력이 할당된 데이터를 선처리하고, 213단계에서 상기 선처리된 데이터를 전송한다.

[0067] 이후, 상기 기지국은 본 발명에 따른 알고리즘을 종료한다.

[0068] 한편, 상기 <수학식 10>의 최적화 문제에 대한 비최적의 전력 제어 방안으로서 매우 간단한 최적화 변수 p_k 결정 방법은, 하기 <수학식 11>과 같이, 모든 전력 제어 변수들, 즉 p_k들을 같은 값 p로 할당하되, M 개의 기지국 인덱스에 대한 각각의 PAPC 중 가장 큰 P_m이 최대 전력 $P_{\max}$에 도달하도록 p를 맞춰주는 방식이다.

수학식 11

$$p_k = p = \frac{P_{\max}}{\max_m \sum_{k=1}^{K} |g_{mk}|^2}$$

[0069]

[0070] 상기 방식은 가장 기본적인 MMSE 전송 방식이라고 할 수 있으며, 본 발명에서 제안하는 최적의 전력 제어 알고리듬의 초기값으로 사용될 수 있다.

[0071] 상기 <수학식 10>의 최적화 문제에 대한 전력 제어 방안으로는 다양한 전력 제어 방법이 존재할 수 있으나, 본 발명에서는 복잡도는 높은 편이지만 최적의 전력 제어를 보장하는 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing : SA) 알고리듬을 상기 <수학식 10>의 최적화 문제에 적합하게 변형하여 제시한다. 여기서, 상기 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬은 해공간의 전 영역에서 탐색이 가능한 확률적 탐색 알고리즘으로써, 현재의 해에서 새로운 해를 확률적으로 생성하여 평가하고 이 해를 받아들일 것인지를 확률적으로 결정하는 과정을 반복하여 전역 최적화를 수행한다.

[0072] 도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 분산 MIMO 시스템의 기지국에서 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬을 이용한 최적의 전력 제어 방법을 도시한 흐름도이다.

[0073] 상기 도 3을 참조하면, 기지국은 301단계에서 최적의 전력 제어를 위한 초기 파라미터를 설정한다. 여기서, 상

기 파라미터는 반복 인덱스 i, 가중치 s_i, 온도 함수(temperature function) T_i, 가중치 c를 포함하며, 각각 1, 1, 10, 0.99의 값으로 초기 설정한다. 상기 s_i는 다음 상태값을 계산함에 있어 적용되는 가중치이고, 상기 c는 복잡도 및 전송 용량 간의 트레이드 오프 관계를 고려하여 적용되는 가중치로서, 상기 c를 높게하여 오랜 시간이 소요되더라도 좀 더 정확한 전력 제어를 수행할 수 있고, 상기 c를 낮게하여 다소 부정확하더라도 짧은 시간 내에 전력 제어를 수행할 수 있다.

[0074] 이후, 상기 기지국은 303단계에서 최적화 변수 및 최적화 변수에 따른 전송 용량의 현재 상태 값을 설정한다. 여기서, 상기 최적화 변수 및 최적화 변수에 따른 전송 용량의 현재 상태 값은 하기 <수학식 12>와 같이 설정한다.

수학식 12

[0075]
$$p_k = p = \frac{P_{\max}}{\max\limits_{m} \sum\limits_{k=1}^{K} |g_{mk}|^2}$$

[0076]
$$R = f(p_k) := \sum_{k=1}^{K} \log_2 \left(1 + \frac{a_{kk} p_k}{\sigma_k^2 + \sum\limits_{l \neq k} a_{kl} p_l} \right)$$

[0077] 이후, 상기 기지국은 305단계에서 최적화 변수 및 최적화 변수에 따른 전송 용량에 대한 초기의 최적해를 설정한다. 여기서, 상기 초기의 최적해는 하기 <수학식 13>과 같이 설정한다.

수학식 13

[0078]
$$p_k^* = p_k, \quad R^* = R$$

[0079] 이후, 상기 기지국은 307단계에서 상기 최적화 변수 및 최적화 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태 값을 설정한다. 여기서, 상기 최적화 변수 및 최적화 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태 값은 하기 <수학식 14>와 같이 설정한다.

수학식 14

[0080]
$$\hat{p_k} = neighbor(p_k) := p_k + p \cdot s_i \cdot random(-1,1)$$

[0081]
$$\hat{R} = f(\hat{p_k})$$

[0082] 여기서, $random(a,b)$는 구간 [a, b]에서 균등 분포를 따르는 임의의 값을 랜덤하게 발생함을 의미한다.

[0083] 이후, 상기 기지국은 309단계에서 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 상기 설정된 최적해 R^*보다 큰지 여부를 검사한다. 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 상기 설정된 최적해 R^*보다 크지

않을 시, 상기 기지국은 313단계로 바로 진행한다. 반면, 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 상기 설정된 최적해 R^{*}보다 클 시, 상기 기지국은 311단계에서 상기 설정된 최적화 변수의 다음 상태 값 $\hat{p}_k$과 상기 최적화 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$으로, 상기 최적해 p^{*}_k와 R^{*}로 각각 갱신한 후, 상기 313단계로 진행한다.

[0084] 이후, 상기 기지국은 상기 313단계에서 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 상기 설정된 전송 용량의 현재 상태 값 R보다 큰지 여부를 검사한다.

[0085] 상기 313단계에서, 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 상기 설정된 전송 용량의 현재 상태 값 R보다 클 시, 상기 기지국은 317단계에서 상기 설정된 최적화 변수의 다음 상태 값 $\hat{p}_k$과 상기 최적화 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$으로, 상기 설정된 최적화 변수의 현재 상태 값 p_k과 최적화 변수에 따른 전송 용량의 현재 상태 값 R을 각각 갱신한 후, 319단계로 진행한다.

[0086] 반면, 상기 313단계에서, 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 상기 설정된 전송 용량의 현재 상태 값 R보다 크지 않을 시, 상기 기지국은 315단계에서 비록 다음 상태의 전송 용량이 현재 상태의 전송 용량보다 낮은 값을 가지더라도 상기 두 전송 용량 값의 차이에 따라 확률적으로 다음 상태의 최적화 변수 및 전송 용량 값을 현재 상태의 최적화 변수 및 전송 용량 값으로 갱신한다. 즉, 상기 기지국은 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 하기 <수학식 15>를 만족하는지 여부를 검사하고, 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 하기 <수학식 15>를 만족할 시, 상기 317단계로 진행하여 이하 단계를 반복 수행한다. 반면, 상기 설정된 전송 용량의 다음 상태 값 $\hat{R}$이 하기 <수학식 15>를 만족하지 않을 시, 상기 기지국은 상기 319단계로 바로 진행한다.

수학식 15

[0087]
$$\exp\left(\frac{\hat{R}-R}{T_i}\right) > random(0,1)$$

[0088] 즉, 상기 기지국은 상기 <수학식 15>에서 지수함수 형태로 계산되는 부분이 0과 1사이의 랜덤한 값보다 큰 경우 다음 상태의 최적화 변수 및 전송 용량 값을 현재 상태의 최적화 변수 및 전송 용량 값으로 강제로 갱신한다. 이를 통해, 최적화 과정에서 처음 발견되는 하나의 지역적 최적점(local optimum)에 수렴하는 것을 방지하고, 전체 탐색과 같은 효과로서 전역적 최적점(global optimum)으로 수렴하도록 탐색을 일반화시킬 수 있다. 이때, 상기 온도 함수 T_i가 반복 인덱스 i의 증가에 따라 서서히 감소하기 때문에, 반복 과정 초기에는 현재 상태 값의 갱신이 빈번히 발생하게 되고, 반복 인덱스 i가 증가함에 따라 현재 상태 값을 강제로 갱신하는 확률이

계속 낮아지게 된다. 따라서 결국에는 하나의 지역적 최적점으로 수렴하게 되며, 점근적 분석(asymptotic analysis)에 의하면 c가 1에 점근할수록 그 최적값이 전역적 최적점과 일치하게 된다.

[0089] 이후, 상기 기지국은 상기 319단계에서 상기 전송 용량의 최적해 R^*이 수렴되었는지 여부를 검사한다. 여기서, 상기 전송 용량의 최적해 R^*이 수렴되었는지 여부는 반복 인덱스 i가 정해진 횟수까지 증가하였음에도 불구하고, 상기 전송 용량의 최적해 R^*이 갱신되지 않았는지 여부를 확인함으로써 검사할 수 있다.

[0090] 상기 319단계에서, 상기 전송 용량의 최적해 R^*이 수렴되지 않았을 시, 상기 기지국은 321단계에서 상기 파라미터를 갱신하고, 상기 307단계로 돌아가 이하 단계를 반복 수행한다. 즉, 상기 반복 인덱스 i를 $i+1$로 갱신하고, 이에 따라 상기 s_i와 T_i를 각각 $s_{i+1}=c \cdot s_i$, $T_{i+1}=c \cdot T_i$로 갱신한다.

[0091] 반면, 상기 319단계에서, 상기 전송 용량의 최적해 R^*이 수렴되었을 시, 상기 기지국은 본 발명에 따른 알고리즘을 종료한다.

[0092] 한편, 상기 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬에서, 복잡도 및 전송 용량 간의 트레이드 오프(trade-off) 관계를 고려하여 c 값을 적절한 수준으로 낮추면서 저복잡도 준최적의 전력 제어를 수행하는 것이 가능하다.

[0093] 또한, 복잡도를 최대로 낮추고자 한다면, 제안 방식의 1단계인 최적 MMSE 송신 선처리 행렬을 구한 후, 이에 따라 유일하게 결정되는 행렬 $A:=[a_{km}]$의 열 별 원소 간 전력 비에 따라 미리 정해 놓은 탐색표(Look-Up Table : LUT)를 참조하여, PAPC 제약 조건식 하에서 초기치 p 로부터의 증감 $\triangle p_k$를 일대일 대응 형태로 결정하는 방식도 가능하다.

[0094] 도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 분산 MIMO 시스템에서 기지국의 전송 장치를 도시한 블럭도이다.

[0095] 도시된 바와 같이, 기지국은 전력 할당부(402), 선처리부(404), 최적화 변수 결정부(406), MMSE 송신 선처리 행렬 계산부(408), 피드백 수신부(410)를 포함하여 구성된다.

[0096] 상기 도 4를 참조하면, 전력 할당부(402)는 최적화 변수 결정부(406)로부터 최적화 변수를 제공받고, 상기 최적화 변수를 이용하여 송신할 데이터에 전력을 할당한 후, 상기 전력이 할당된 데이터를 선처리부(404)로 제공한다.

[0097] 상기 선처리부(404)는 MMSE 송신 선처리 행렬 계산부(408)로부터 MMSE 송신 선처리 행렬을 제공받고, 상기 MMSE 송신 선처리 행렬을 이용하여 상기 전력이 할당된 데이터를 선처리한 후, 상기 선처리된 데이터를 안테나를 통해 단말로 전송한다.

[0098] 상기 최적화 변수 결정부(406)는 피드백 수신부(410)로부터 단말들의 채널 정보를 제공받고, 상기 MMSE 송신 선처리 행렬 계산부(408)로부터 MMSE 송신 선처리 행렬을 제공받아, PAPC에 의한 제약 조건식을 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 최적화 변수를 결정하며, 상기 결정된 최적화 변수를 상기 전력 할당부(402)로 제공한다.

[0099] 상기 MMSE 송신 선처리 행렬 계산부(408)는 상기 피드백 수신부(410)로부터 단말들의 채널 정보를 제공받고, 이를 이용하여 MMSE 송신 선처리 행렬을 계산하며, 상기 계산된 MMSE 송신 선처리 행렬을 상기 선처리부(404) 및 최적화 변수 결정부(406)로 제공한다. 이때 상기 MMSE 송신 선처리 행렬은 PAPC 및 사용자별 간섭 전력을 고려

하여 계산한다.

[0100] 상기 피드백 수신부(410)는 주기적으로 단말들로부터 피드백 정보를 수신하여 상기 최적화 변수 결정부(406) 및 MMSE 송신 선처리 행렬 계산부(408)로 제공한다. 여기서, 상기 피드백 정보는 채널 정보를 의미한다.

[0101] 한편, 이하 설명에서 본 발명에서 제안하는 MMSE 기반의 2 단계 전송 방법의 성능 평가를 위해 하기 <표 1>과 같은 모의 실험 환경을 정의한다.

표 1

[0102]

주요 파라미터	값
총 기지국 수	61
동시 전송 기지국 수	3
간섭 기지국 수	58
기지국 섹터 당 송신 안테나 수	1
동시 전송 단말 수	3
단말당 수신 안테나 수	1
전송 링크	Downlink
채널 모델	Flat Rayleigh fading
채널 코딩	No coding
채널 추정	Perfect channel information
변조 방식	N/A (capacity formula used)
기지국 한계 전력 $P_{\max}$	43[dBm]
기지국간 최소 거리	500[m]
경로 손실 지수	3.76 (w/o shadowing)
시스템 대역폭	10[MHz]
열잡음	-104[dBm]

[0103] 도 5는 본 발명에서 제안하는 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬을 이용한 최적의 전력 제어 방법에서 전송 용량을 반복 인덱스에 대해 나타낸 그래프이다.

[0104] 상기 도 5를 참조하면, 현재 상태의 전송 용량이, 반복 과정 초기에는 자주 변화하나, 약 200회의 반복 과정 후에 전송 용량이 최적값으로 수렴함을 확인할 수 있다.

[0105] 도 6은 본 발명에서 제안하는 다중 사용자를 위한 MMSE 기반의 선형적 전송 방법과 종래 기술에 따른 선형적 전송 방법 간 전송 용량의 성능을 기지국 당 전송 용량의 누적 분포 함수로서 비교 도시한 그래프이다.

[0106] 상기 도 6을 참조하면, 'MMSE + PC'로 표기된 방식은 본 발명에서 제안하는 MMSE 기반 2단계 전송 방법으로, 상기 <수학식 4>에서 제시한, 'Optimal linear precoder'로 표기된 최적의 선형적 전송 방식의 성능에 근접하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 'ZF'로 표기된 방식은 송신 선처리 행렬을 $G=H^H(HH^H)^{-1}$ 의 의사역 행렬로 사용하고 전력 제어 행렬 P 를 상기 <수학식 11>과 같이 동일한 전력 P 로 할당한 경우이며, 'MMSE'로 표기된 방식은 전력 제어 행렬 P 를 상기 <수학식 11>과 같이 동일한 전력으로 할당하되 송신 선처리 행렬을 상기 <수학식 8>에서 제안한 최적 MMSE 송신 선처리 행렬로 사용한 경우이다. 'ZF + PC'로 표기된 방식은 상기 'ZF'로 표기된 방식에서 추가로 본 발명에서 제안하는 최적의 전력 제어를 수행한 경우이며, 이때는 ZF의 특성상 전력 제어를 위한 최적화 문제가 표준적인 컨벡스(convex) 문제로 형성되어 서브그래디언트(subgradient) 방식 등 최적성을 보장하는 다양한 컨벡스 최적화 기법이 사용 가능하다. 'SAT'로 표기된 방식은

각각의 기지국이 최대 전력 $P_{\max}$로 해당 섹터에 존재하는 단말에게 전력 제어 과정 없이 독립적인 신호 전송을 하는 경우로서, 서빙 기지국을 제외한 다른 모든 기지국으로부터 단말로 수신되는 신호가 간섭신호가 되는 경우이다. 최적의 전력 제어를 수행하지 않고 사용자마다 동일한 전력으로 할당하는 'ZF' 및 'MMSE' 방식의 경우 SAT 보다 성능이 열화되는 경우가 발생하는데, 이는 SAT의 경우 항상 최대의 송신 전력 $P_{\max}$로 송신하지만, 'ZF' 및 'MMSE' 방식에서는 최대 전력 $P_{\max}$로 송신 가능한 하나의 기지국을 제외하고는 $P_{\max}$이하의 송신 전력으로 전송이 이루어지게 되고 이러한 송신 전력의 손실이 다중 사용자 전송으로부터 얻는 효과보다 더 큰 영향을 주기 때문이다.

[0107] 도 7은 본 발명에서 제안하는 다중 사용자를 위한 MMSE 기반의 선형적 전송 방법과 종래 기술에 따른 DPC 전송 방법 간 전송 용량의 성능을 기지국 당 전송 용량의 누적 분포 함수로서 비교 도시한 그래프이다.

[0108] 상기 도 7을 참조하면, 'MMSE + PC'로 표기된 방식은 본 발명에서 제안하는 MMSE 기반 2단계 전송 방법으로, 누적 분포 함수의 중앙값에서 3.3 bps/Hz/BS의 전송 용량을 보임을 알 수 있다. 이는 제안하는 방식이, 'ZF-DPC'로 표기된 방식, 즉 사용자 정렬 및 QR 분해를 활용하는 준최적의 방식 대비 0.1 bps/Hz/BS 이내의 성능 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 본 발명에서 제안하는 방식이, 'Optimal DPC'로 표기된 방식, 즉 상기 <수학식 3>에서 제시한 최적의 비선형 DPC 방식 대비 0.3 bps/Hz/BS 이내의 성능 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 'MMSE-DPC'로 표기된 방식은, 본 발명에서 제안한 방식에 추가로 비선형 DPC를 적용한 방식으로, 본 발명에서 제안한 방식을 사용자 정렬에 따라 K! 회 반복 수행하고 그 중 최대의 전송 용량을 선택함으로써, 최적의 DPC 방식 대비 0.05 bps/Hz/BS 이내의 성능 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

[0109] 한편 본 발명의 상세한 설명에서는 구체적인 실시 예에 관해 설명하였으나, 본 발명의 범위에서 벗어나지 않는 한도 내에서 여러 가지 변형이 가능함은 물론이다. 그러므로 본 발명의 범위는 설명된 실시 예에 국한되어 정해져서는 아니 되며 후술하는 특허청구의 범위뿐만 아니라 이 특허청구의 범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

도면의 간단한 설명

[0110] 도 1은 본 발명에 따른 섹터로 분할된 분산 MIMO 시스템을 도시한 도면,

[0111] 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 분산 MIMO 시스템의 기지국에서 다중 사용자를 위한 MMSE 기반의 선형적 전송 방법을 도시한 흐름도,

[0112] 도 3은 본 발명의 실시 예에 따른 분산 MIMO 시스템의 기지국에서 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬을 이용한 최적의 전력 제어 방법을 도시한 흐름도,

[0113] 도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 분산 MIMO 시스템에서 기지국의 전송 장치를 도시한 블럭도,

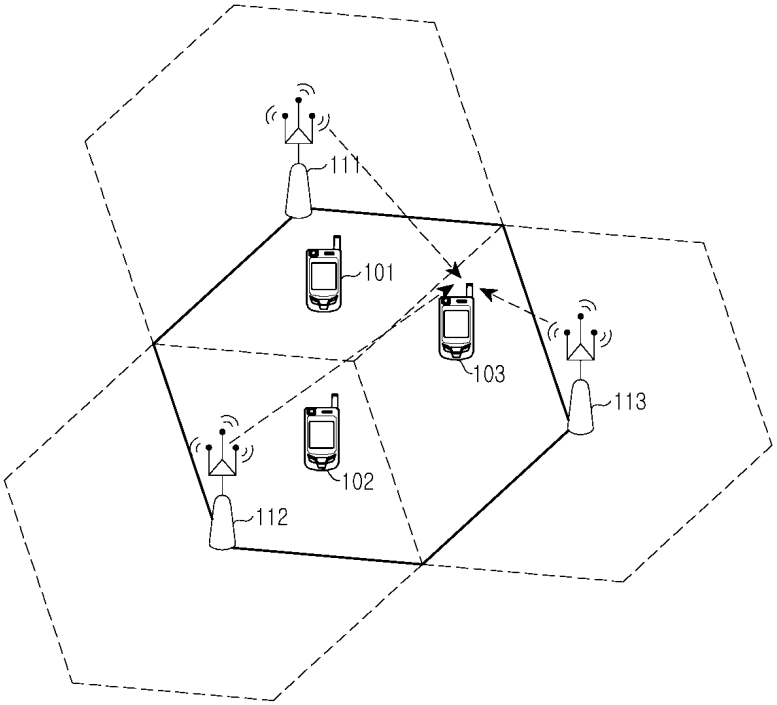
[0114] 도 5는 본 발명에서 제안하는 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬을 이용한 최적의 전력 제어 방법에서 전송 용량을 반복 인덱스에 대해 나타낸 그래프,

[0115] 도 6은 본 발명에서 제안하는 다중 사용자를 위한 MMSE 기반의 선형적 전송 방법과 종래 기술에 따른 선형적 전송 방법 간 전송 용량의 성능을 기지국 당 전송 용량의 누적 분포 함수로서 비교 도시한 그래프, 및

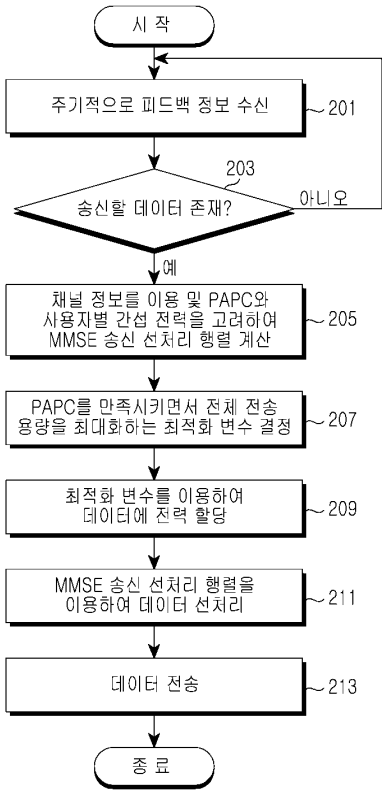
[0116] 도 7은 본 발명에서 제안하는 다중 사용자를 위한 MMSE 기반의 선형적 전송 방법과 종래 기술에 따른 DPC 전송 방법 간 전송 용량의 성능을 기지국 당 전송 용량의 누적 분포 함수로서 비교 도시한 그래프.

도면

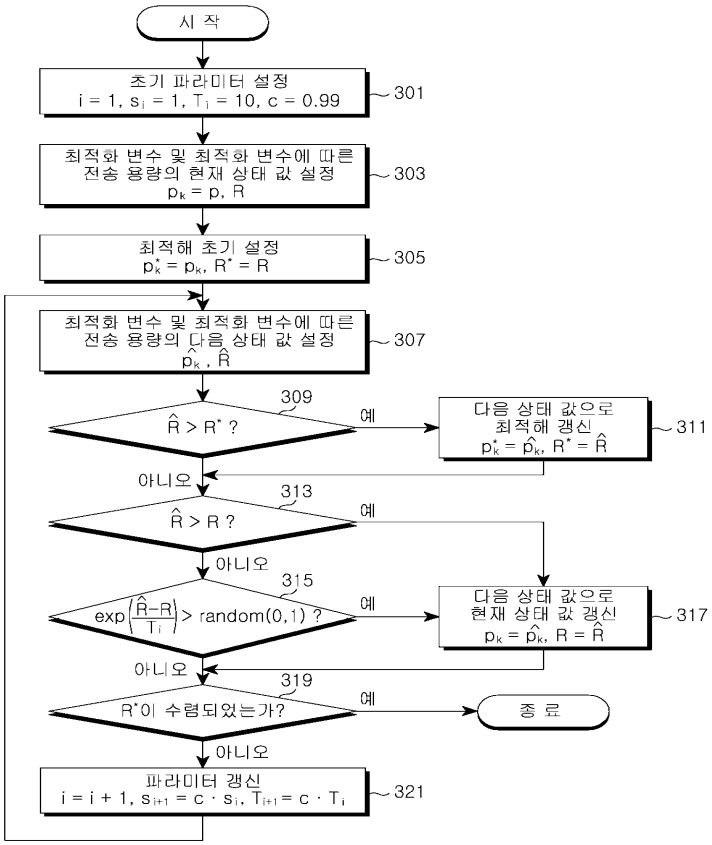
도면1



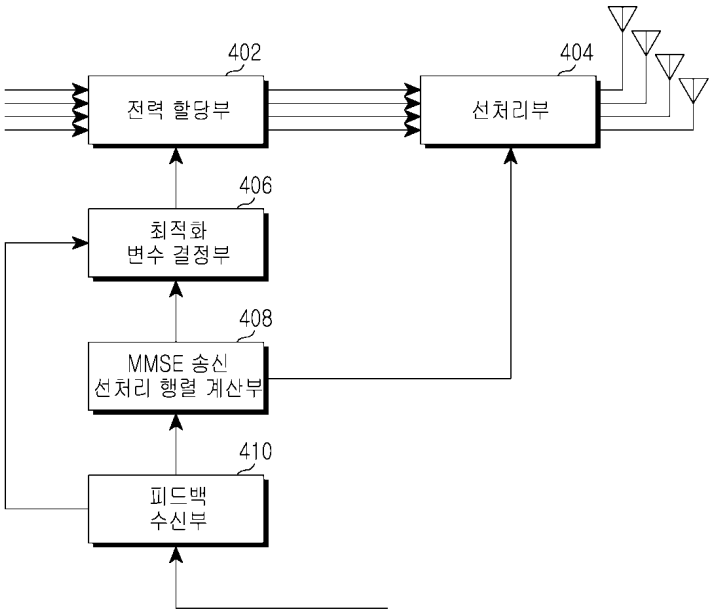
도면2


시 작
주기적으로 피드백 정보 수신
201
203
송신할 데이터 존재?
아니오
예
채널 정보를 이용 및 PAPC와 사용자별 간섭 전력을 고려하여 MMSE 송신 선처리 행렬 계산
205
PAPC를 만족시키면서 전체 전송 용량을 최대화하는 최적화 변수 결정
207
최적화 변수를 이용하여 데이터에 전력 할당
209
MMSE 송신 선처리 행렬을 이용하여 데이터 선처리
211
데이터 전송
213
종 료

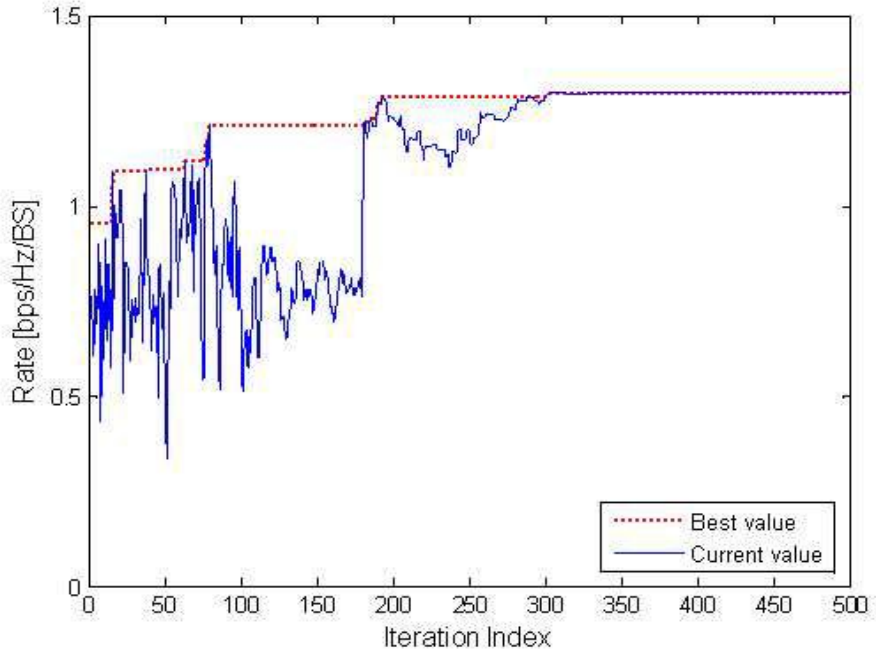
도면3


시 작
초기 파라미터 설정
i = 1, s_i = 1, T_i = 10, c = 0.99
301
최적화 변수 및 최적화 변수에 따른 전송 용량의 현재 상태 값 설정
p_k = p, R
303
최적해 초기 설정
p_k^* = p_k, R^* = R
305
최적화 변수 및 최적화 변수에 따른 전송 용량의 다음 상태 값 설정
$\hat{p}_k$, $\hat{R}$
307
309
$\hat{R} > R^*$?
예
다음 상태 값으로 최적해 갱신
$p_k^* = \hat{p}_k$, $R^* = \hat{R}$
311
아니오
313
$\hat{R} > R$?
예
아니오
315
$\exp\left\{\frac{\hat{R}-R}{T_i}\right\} > random(0,1)$?
예
다음 상태 값으로 현재 상태 값 갱신
$p_k = \hat{p}_k$, $R = \hat{R}$
317
아니오
319
R^*이 수렴되었는가?
예
종 료
아니오
파라미터 갱신
$i = i + 1$, $s_{i+1} = c \cdot s_i$, $T_{i+1} = c \cdot T_i$
321

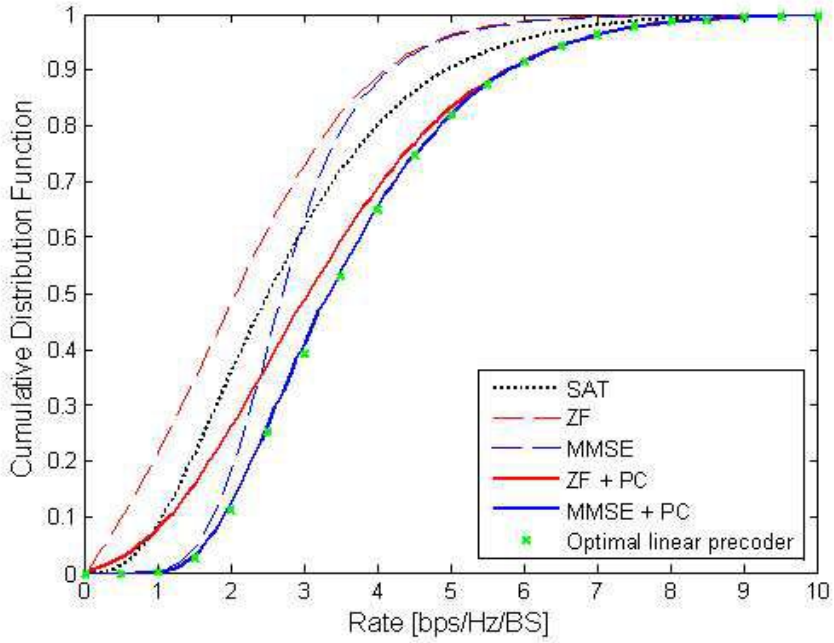
도면4


402
전력 할당부
404
선처리부
406
최적화 변수 결정부
408
MMSE 송신 선처리 행렬 계산부
410
피드백 수신부

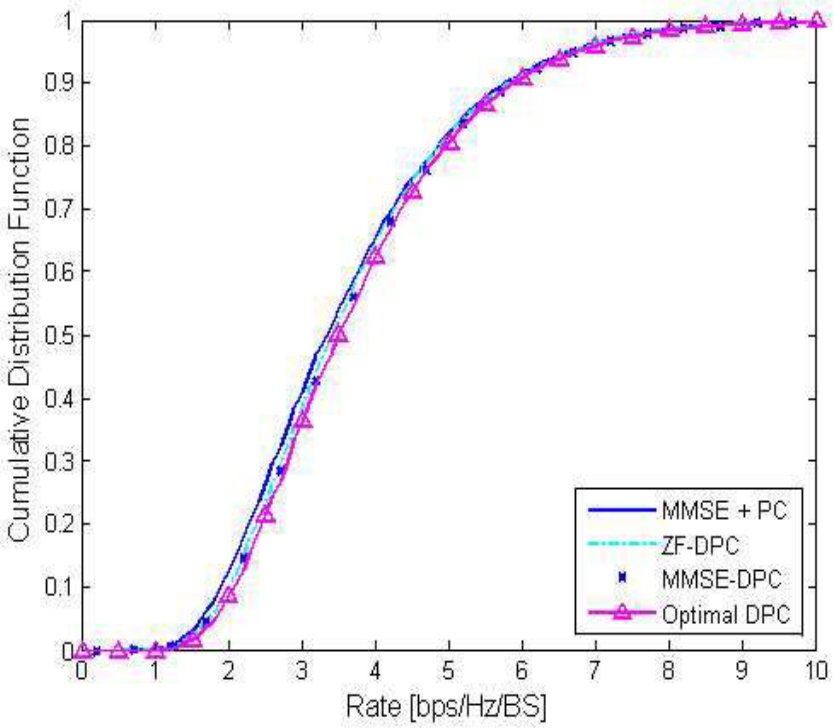
도면5


Rate [bps/Hz/BS]
Iteration Index
Best value
Current value
0
0.5
1
1.5
0
50
100
150
200
250
300
350
400
450
500

도면6


Cumulative Distribution Function
Rate [bps/Hz/BS]
SAT
ZF
MMSE
ZF + PC
MMSE + PC
Optimal linear precoder
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

도면7


Cumulative Distribution Function
Rate [bps/Hz/BS]
MMSE + PC
ZF-DPC
MMSE-DPC
Optimal DPC
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10