



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0074593
(43) 공개일자 2025년05월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04L 5/00 (2006.01) H04B 7/0413 (2017.01)
H04W 72/121 (2023.01) H04W 72/53 (2023.01)
(52) CPC특허분류
H04L 5/0048 (2025.01)
H04B 7/0413 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2024-0154894
(22) 출원일자 2024년11월05일
심사청구일자 2024년11월05일
(30) 우선권주장
1020230161414 2023년11월20일 대한민국(KR)

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
이상현
서울특별시 동대문구 답십리로56길 105, 104동 1302호(답십리동, 답십리파크자이)
이육진
경기도 과천시 회망4길 37-19 (중앙동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
송인호, 윤형근, 최관락

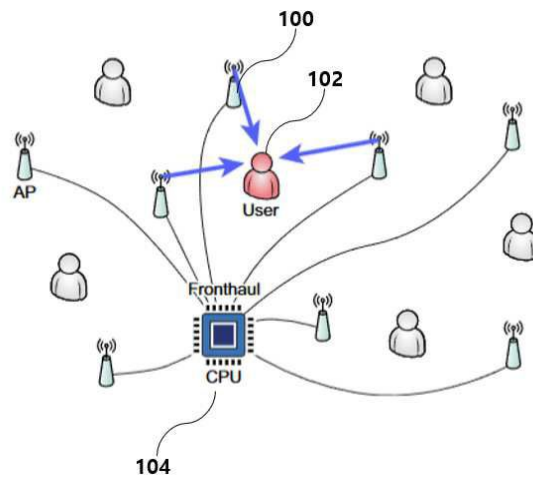
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 Cell-free massive MIMO 네트워크에서의 분산적 파일럿 할당 최적화 방법 및 시스템

(57) 요약

본 발명은 Cell-free Massive MIMO 시스템의 분산적 파일럿 할당 최적화 방법 및 시스템을 개시한다. 본 발명에 따르면, Cell-free massive MIMO 네트워크에서 복수의 디바이스 간 통신을 통해 분산적으로 파일럿 할당을 최적화하는 방법으로서, 복수의 파일럿 각각에 대해 상기 복수의 디바이스 중 일부를 제1 대표 노드들로 설정하여 각 파일럿을 고정하는 단계; 파일럿이 고정되지 않은 미리 설정된 개수의 디바이스를 묶어 복수의 후보 그룹을 생성하는 단계; 각 후보 그룹 별로 각 파일럿에 고정된 제1 대표 노드들과 메시지를 주고받기 위한 제2 대표 노드들을 설정하는 단계; 및 상기 제1 대표 노드들과 상기 제2 대표 노드들 간 반복적으로 메시지를 송수신하여 미리 설정된 제한조건을 만족하면서 네트워크 총 데이터 전송량을 최대화하는 각 후보 그룹에 속해야 하는 디바이스들의 조합을 결정하는 단계를 포함하는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법이 제공된다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H04L 5/0067 (2013.01)

H04W 72/121 (2023.01)

H04W 72/53 (2023.01)

(72) 발명자

김홍기

경기도 광주시 신현로 65-24, 205동 1301호(신현동, 신현리1차현대모닝사이드)

이윤구

서울특별시 서초구 잠원로 166-17, 3동 1002호(잠원동, 강변아파트)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2710006775
과제번호	II210467
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	정보통신기획평가원
연구사업명	6G핵심기술개발
연구과제명	지능형 6G 무선 액세스 시스템
과제수행기관명	고려대학교산학협력단
연구기간	2024.01.01 ~ 2024.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

Cell-free massive MIMO 네트워크에서 복수의 디바이스 간 통신을 통해 분산적으로 파일럿 할당을 최적화하는 방법으로서,

복수의 파일럿 각각에 대해 상기 복수의 디바이스 중 일부를 제1 대표 노드들로 설정하여 각 파일럿을 고정하는 단계;

파일럿이 고정되지 않은 미리 설정된 개수의 디바이스를 묶어 복수의 후보 그룹을 생성하는 단계;

각 후보 그룹 별로 각 파일럿에 고정된 제1 대표 노드들과 메시지를 주고받기 위한 제2 대표 노드들을 설정하는 단계; 및

상기 제1 대표 노드들과 상기 제2 대표 노드들 간 반복적으로 메시지를 송수신하여 미리 설정된 제한조건을 만족하면서 네트워크 총 데이터 전송량을 최대화하는 각 후보 그룹에 속해야 하는 디바이스들의 조합을 결정하는 단계를 포함하는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제1 대표 노드들은 가장 데이터 전송률이 높은 디바이스들로 설정되는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 제1 대표 노드들은 산업 현장에서 제1 대표 노드는 이동하지 않고 고정된 상태로 유지되어 있는 디바이스들로 설정되는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 제한조건은, 각 파일럿에 하나의 후보 그룹만이 할당될 수 있음을 의미하는 제1 제한조건 및 하나의 디바이스가 하나의 파일럿에만 할당되어야 한다는 제2 제한조건을 포함하는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 결정하는 단계는,

미리 설정된 제한조건을 만족하면서 네트워크 총 데이터 전송량을 최대화하기 위한 목적함수와 제한조건을 팩터함수로 정의하는 단계; 및

상기 제1 대표 노드들과 상기 제2 대표 노드들의 반복적 메시지 교환을 통해 상기 팩터함수를 그래프화한 팩터 그래프상에서 각 후보 그룹에 속해야 하는 디바이스들의 조합을 결정하는 단계를 포함하는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 메시지는, 상기 제2 대표 노드들이 상기 제1 대표 노드들에 전송하는 i 번째 후보 그룹이 a 번째 파일럿을 선택하거나/선택하지 않을 경향성에 대한 정보를 포함하는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법.

청구항 7

제5항에 있어서,

상기 메시지는, 상기 제1 대표 노드들이 상기 제2 대표 노드들에 전송하는 i 번째 후보 그룹의 제2 대표 노드가 a 번째 파일럿을 선택하는 것에 대한 적절성에 관한 정보를 포함하는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법.

청구항 8

제1항에 따른 방법을 수행하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

청구항 9

Cell-free massive MIMO 네트워크에서 복수의 디바이스 간 통신을 통해 분산적으로 파일럿 할당을 최적화하는 시스템으로서,

상향링크와 하향링크에서 동일한 주파수대역을 사용하는 시분할 이중화(Time Division Duplex, TDD) 모드에서, 코히어런스 인터벌의 파일럿 트레이닝 구간에서 파일럿을 할당 받는 복수의 디바이스; 및

파일럿 신호를 이용하여 상기 복수의 디바이스 중 일부의 채널상태정보를 추정하는 복수의 AP를 포함하되,

상기 복수의 디바이스는, 복수의 파일럿 각각에 대해 상기 복수의 디바이스 중 일부를 제1 대표 노드들로 설정하여 각 파일럿을 고정하고, 파일럿이 고정되지 않은 미리 설정된 개수의 디바이스를 묶어 복수의 후보 그룹을 생성하고, 각 후보 그룹 별로 각 파일럿에 고정된 제1 대표 노드들과 메시지를 주고받기 위한 제2 대표 노드들을 설정하고, 상기 제1 대표 노드들과 상기 제2 대표 노드들 간 반복적으로 메시지를 송수신하여 미리 설정된 제한조건을 만족하면서 네트워크 총 데이터 전송량을 최대화하는 각 후보 그룹에 속해야 하는 디바이스들의 조합을 결정하는 분산적 파일럿 할당 최적화 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 제한조건은, 각 파일럿에 하나의 후보 그룹만이 할당될 수 있음을 의미하는 제1 제한조건 및 하나의 디바이스가 하나의 파일럿에만 할당되어야 한다는 제2 제한조건을 포함하는 분산적 파일럿 할당 최적화 시스템.

발명의 설명**기술 분야**

[0001] 본 발명은 CFmMIMO(Cell-free massive MIMO) 네트워크에서의 분산적 파일럿 할당 최적화 방법 및 시스템에 관한 것으로서, 보다 상세하게는, 시간-주파수 통신자원의 제약으로 직교하는 파일럿의 수가 제한되었을 때, 파일럿을 디바이스에 최적으로 할당하여 네트워크의 총 주파수 효율성을 최적화하는 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 무선통신 기술의 진화는 사용자 단말들이 네트워크에 더 쉽고 간편하게 액세스하는 것을 가능하게 하며, 높은 수준의 서비스를 제공하는 동시에 점점 더 실생활에 밀접하게 무선으로 사물들을 연결하는 것을 목표로 하고 있다.

[0003] 서로 연결된 통신 노드들은 전체 시스템의 정상 작동을 보장하기 위해 통신 시 엄격한 시간 정확성이 요구된다. 따라서 기존 셀룰러 네트워크의 초고신뢰 및 저지연 통신(Ultra-reliable low latency communication, URLLC)은 중요하게 고려되어야 하는 문제이다.

[0004] 미래 무선통신 네트워크 기술인 CFmMIMO는 네트워크 구성 디바이스 간의 많은 링크 사이의 초고신뢰 및 저지연 통신을 가능하게 해준다. CFmMIMO는 넓은 범위에 걸쳐 많은 AP(Access point)가 배포되어 있으며 이 AP들이 동일한 시간-주파수 통신자원을 공유하여 사용하게 된다.

[0005] 해당 모델에서는 AP를 지리적으로 분산시켜 평균 AP-사용자 노드(디바이스) 간 거리를 단축시켜 통신 지연 시간을 줄일 수 있다. 또한, 통신에 있어 셀의 구역을 강제하지 않기에 셀간 간섭 및 핸드오버 과정에서 생기는 오

버헤드와 같은 셀 주변부에서 생기는 통신적 문제를 해결할 수 있다. 따라서 CFmMIMO의 이러한 저지연적 특성은 무선 네트워크에 있어 URLLC를 지원하는 데 적합한 체계라고 간주할 수 있다.

[0006] 또한, 많은 AP가 배치되어 있어 무선 통신 커버리지가 크게 늘어나고, 좋은 통신채널을 이용할 수 있는 확률이 커진다는 장점이 있다.

[0007] CFmMIMO를 사용하여 사용자 노드를 감지하는 통신 초기과정에 있어, 파일럿(pilot)의 전송과 수신을 통해 말단 사용자 노드의 채널상태정보(Channel State Information, CSI)를 추정하게 된다. 파일럿은 직교하는 통신자원을 사용하게 되는데, 네트워크 내 통신을 요하는 많은 장치가 존재함에 따라 그 수가 직교하는 자원의 수를 훨씬 뛰어넘는다.

[0008] 따라서 실제 CFmMIMO 네트워크에서는 파일럿을 불가피하게 재사용할 수밖에 없다. 파일럿을 공유하여 재사용하는 과정에서 서로 다른 링크 간의 간섭은 노드의 채널 추정 및 통신서비스 품질을 저하시킬 수 있는 요인이다. 그러므로 저지연 통신을 달성하기 위해서는 파일럿 오염(Pilot contamination)이라고 일컬어지는 해당 현상의 영향을 완화하기 위해 지능적으로 파일럿을 할당하는 전략을 수립하여야 한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) KR 등록특허 10-2600491

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 상기한 종래기술의 문제점을 해결하기 위해, 본 발명은 주파수 효율성을 최대화할 수 있는 CFmMIMO 네트워크에서의 분산적 파일럿 할당 최적화 방법 및 장치를 제안하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0011] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 일 실시예에 따르면, Cell-free massive MIMO 네트워크에서 복수의 디바이스 간 통신을 통해 분산적으로 파일럿 할당을 최적화하는 방법으로서, 복수의 파일럿 각각에 대해 상기 복수의 디바이스 중 일부를 제1 대표 노드들로 설정하여 각 파일럿을 고정하는 단계; 파일럿이 고정되지 않은 미리 설정된 개수의 디바이스를 묶어 복수의 후보 그룹을 생성하는 단계; 각 후보 그룹 별로 각 파일럿에 고정된 제1 대표 노드들과 메시지를 주고받기 위한 제2 대표 노드들을 설정하는 단계; 및 상기 제1 대표 노드들과 상기 제2 대표 노드들 간 반복적으로 메시지를 송수신하여 미리 설정된 제한조건을 만족하면서 네트워크 총 데이터 전송량을 최대화하는 각 후보 그룹에 속해야 하는 디바이스들의 조합을 결정하는 단계를 포함하는 분산적 파일럿 할당 최적화 방법이 제공된다.

[0012] 상기 제1 대표 노드들은 가장 데이터 전송률이 높은 디바이스들로 설정될 수 있다.

[0013] 상기 제1 대표 노드들은 산업 현장에서 제1 대표 노드는 이동하지 않고 고정된 상태로 유지되어 있는 디바이스들로 설정될 수 있다.

[0014] 상기 제한조건은, 각 파일럿에 하나의 후보 그룹만이 할당될 수 있음을 의미하는 제1 제한조건 및 하나의 디바이스가 하나의 파일럿에만 할당되어야 한다는 제2 제한조건을 포함할 수 있다.

[0015] 상기 결정하는 단계는, 미리 설정된 제한조건을 만족하면서 네트워크 총 데이터 전송량을 최대화하기 위한 목적함수와 제한조건을 팩터함수로 정의하는 단계; 및 상기 제1 대표 노드들과 상기 제2 대표 노드들의 반복적 메시지 교환을 통해 상기 팩터함수를 그래프화한 팩터 그래프상에서 각 후보 그룹에 속해야 하는 디바이스들의 조합을 결정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0016] 상기 메시지는, 상기 제2 대표 노드들이 상기 제1 대표 노드들에 전송하는 i 번째 후보 그룹이 a 번째 파일럿을 선택하거나/선택하지 않을 경향성에 대한 정보를 포함할 수 있다.

[0017] 상기 메시지는, 상기 제1 대표 노드들이 상기 제2 대표 노드들에 전송하는 i 번째 후보 그룹의 제2 대표 노드가

a번째 파일럿을 선택하는 것에 대한 적절성에 관한 정보를 포함할 수 있다.

[0018] 본 발명에 따른 측면에 따르면, 상기한 방법을 수행하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 저장된 컴퓨터 프로그램 램이 제공된다.

[0019] 본 발명의 또 다른 측면에 따르면, Cell-free massive MIMO 네트워크에서 복수의 디바이스 간 통신을 통해 분산적으로 파일럿 할당을 최적화하는 시스템으로서, 상향링크와 하향링크에서 동일한 주파수대역을 사용하는 시분할 이중화(Time Division Duplex, TDD) 모드에서, 코히어런스 인터벌의 파일럿 트레이닝 구간에서 파일럿을 할당 받는 복수의 디바이스; 및 파일럿 신호를 이용하여 상기 복수의 디바이스 중 일부의 채널상태정보를 추정하는 복수의 AP를 포함하되, 상기 복수의 디바이스는, 복수의 파일럿 각각에 대해 상기 복수의 디바이스 중 일부를 제1 대표 노드들로 설정하여 각 파일럿을 고정하고, 파일럿이 고정되지 않은 미리 설정된 개수의 디바이스를 묶어 복수의 후보 그룹을 생성하고, 각 후보 그룹 별로 각 파일럿에 고정된 제1 대표 노드들과 메시지를 주고받기 위한 제2 대표 노드들을 설정하고, 상기 제1 대표 노드들과 상기 제2 대표 노드들 간 반복적으로 메시지를 송수신하여 미리 설정된 제한조건을 만족하면서 네트워크 총 데이터 전송량을 최대화하는 각 후보 그룹에 속해야 하는 디바이스들의 조합을 결정하는 분산적 파일럿 할당 최적화 시스템이 제공된다.

발명의 효과

[0020] 본 발명에 따르면, CFmMIMO 네트워크에서 발생할 수밖에 없는 파일럿 재사용으로 인한 파일럿 오염 현상을 완화시키는 분산적 알고리즘으로 시스템의 주파수 효율을 높여 초고신뢰 및 저지연 통신을 달성할 수 있는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0021] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 CFmMIMO 네트워크를 도시한 도면이다.

도 2는 파일럿 트레이닝 및 페이로드 전송 구간에서의 수행 과정을 도시한 도면이다.

도 3은 본 실시예에 따른 파일럿과 디바이스 사이의 자원 할당을 나타낸 도면이다.

도 4는 6개의 디바이스가 존재하는 경우의 파일럿 할당을 위한 메시지 전달 과정 팩터 그래프를 도시한 도면이다.

도 5는 본 실시예에 따른 분산적 파일럿 할당 최적화 알고리즘을 도시한 도면이다.

도 6 내지 도 7은 특정 조건에서 본 실시예에 따른 시뮬레이션을 진행한 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0023] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0024] 또한, 각 도면을 참조하여 설명하는 실시예의 구성 요소가 해당 실시예에만 제한적으로 적용되는 것은 아니며, 본 발명의 기술적 사상이 유지되는 범위 내에서 다른 실시예에 포함되도록 구현될 수 있으며, 또한 별도의 설명이 생략될지라도 복수의 실시예가 통합된 하나의 실시예로 다시 구현될 수도 있음은 당연하다.

[0025] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성 요소는 동일하거나 관련된 참조 부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

- [0027] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 CFmMIMO 네트워크를 도시한 도면이다.
- [0028] 도 1에 도시된 바와 같이, 본 실시예에 따른 CFmMIMO 네트워크는 M개의 AP(100)와 K개의 디바이스(102)를 포함한다.
- [0029] 여기서, 디바이스(102)는 통상적인 스마트폰을 포함하는 사용자 단말과 산업현장의 다양한 기기를 포함할 수 있으며, 사용자 노드로 정의된다.
- [0030] 각 디바이스(102)는 무선 자원을 공유하는 복수의 AP(100)를 통해 동시에 서비스를 제공받을 수 있다.
- [0031] 각 AP(100)와 디바이스(102)는 하나의 안테나를 구비하며, CFmMIMO 네트워크의 전체 AP(100)는 하나의 제어장치(CPU, 104)가 제어한다.
- [0032] 또한, 일반적인 CFmMIMO 네트워크는 $M \geq K$ 로 디바이스(102)보다 AP(100)가 많은 상황을 가정한다.
- [0033] 상향링크와 하향링크에서 동일한 주파수대역을 사용하는 시분할 이중화(Time Division Duplex, TDD) 모드에서, 코히어런스 인터벌(coherence interval)의 길이는 파일럿 트레이닝 및 페이로드 전송 두 개의 구분된 구간으로 분리된다.
- [0034] 도 2는 파일럿 트레이닝 및 페이로드 전송 구간에서의 수행 과정을 도시한 도면이다.
- [0035] 도 2를 참조하면, 트레이닝 구간에서 각 디바이스(102)는 파일럿 신호(시퀀스)를 AP(100)로 전송하고, AP(100)는 디바이스(102)의 채널상태정보를 추정하기 위해 파일럿 신호를 사용한다.
- [0036] m번째 AP(100)와 k번째 디바이스(102) 사이의 추정된 채널상태정보 $\hat{g}_{mk}$ 의 평균제곱오차(mean-square)인 γ_{mk} 는 다음과 같다.

수학식 1

$$\gamma_{mk} \triangleq \mathbb{E} \left\{ |\hat{g}_{mk}|^2 \right\} = \frac{N_p \beta_{mk}^2}{N_p \sum_{k'=1}^K \beta_{mk'} |\varphi_k^H \varphi_{k'}|^2 + 1/\omega}$$

[0037]

- [0038] $\varphi_k \in \mathbb{C}^{N_p \times 1}$ 는 디바이스 k가 사용하는 파일럿 신호를 의미하고, β_{mk} 는 m번째 AP(100)와 k번째 디바이스(102)의 거리에 따른 신호 감쇄를 나타내는 대규모 페이딩(large-scale fading) 상수이고, N_p 는 직교 파일럿 신호의 수이고, ω 는 파일럿 전송의 정규화된 신호 대 잡음 비(signal to interference and noise ratio, SNR)이다.

- [0039] 디바이스 k와 디바이스 k'가 사용하는 파일럿이 서로 직교할 경우 $|\varphi_k^H \varphi_{k'}|^2 = 0$ 이어서 분모의 간섭 항이 사라진다. 하지만, 지원하고자 하는 디바이스의 수가 보통 직교하는 파일럿의 수보다 많으므로 파일럿의 재사용으로 인한 파일럿 오염 현상은 불가피하다. 이 때, 디바이스 k와 디바이스 k'가 사용하는 파일럿이 서로 직교하지 않는 경우 $|\varphi_k^H \varphi_{k'}|^2 = 1$ 로 표현할 수 있다.

- [0040] 본 실시예에 따르면, 제어장치(104)가 수신하는 신호는 다음과 같이 네 가지 종류로 나눌 수 있다.

- [0041] 이는 디바이스 k에 대한 목표 시그널(desired signal, DS), 빔포밍 불확정성(beamforming uncertainty, BU), 사용자 간 간섭(user interference, UI), 그리고 잡음이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학식 2

$$\begin{aligned} r_k &= \sqrt{\omega} \sum_{m=1}^M \sum_{k'=1}^K \sqrt{\eta_{k'}} \hat{g}_{mk}^* g_{mk'} s_{k'} + \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* n_m \\ &= \text{DS}_k s_k + \text{BU}_k s_k + \sum_{k' \neq k}^K \text{MI}_{kk'} s_{k'} + \sum_{m=1}^M \hat{g}_{mk}^* n_m \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{DS}_k &= \sqrt{\omega \eta_k} \mathbb{E} \left\{ \sum_{m=1}^M g_{mk} \hat{g}_{mk}^* \right\}, \\ \text{BU}_k &= \sqrt{\omega \eta_k} \sum_{m=1}^M g_{mk} \hat{g}_{mk}^* - \text{DS}_k, \\ \text{MI}_{kk'} &= \sqrt{\omega \eta_{k'}} \sum_{m=1}^M g_{mk} \hat{g}_{mk'}^*, \quad \forall k' \neq k. \end{aligned}$$

여기서, η_k 는 디바이스 k의 파워 세기 상수이다. ω 가 파일럿 신호의 SNR일 때, 상향링크 SNR은 ω 와 같다고 가정한다.

파일럿 오염 현상에 기인한 간섭을 고려하여, 디바이스 k의 SINR과 데이터 전송률을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 3

$$\text{SINR}_k = \frac{|\text{DS}_k|^2}{\mathbb{E}\{|\text{BU}_k|^2\} + \sum_{k' \neq k}^K \mathbb{E}\{|\text{MI}_{kk'}|^2\} + \sum_{m=1}^M \gamma_{mk}}$$

$$R_k = \left(1 - \frac{N_p}{N_c}\right) \log_2 (1 + \text{SINR}_k)$$

도 3은 본 실시예에 따른 파일럿과 디바이스 사이의 자원 할당을 나타낸 도면이다.

도 3을 참조하면, 파일럿에 대한 디바이스의 할당을 업데이트하는데, 각 파일럿에서 가장 데이터 전송률이 높은 디바이스를 파일럿 대표 노드(제1 대표 노드)로 설정하여 각 파일럿에 할당한 채로 고정한다.

이하에서, 산업 현장에서 제1 대표 노드는 이동하지 않고 고정된 상태로 유지되어 있는 디바이스로 설정될 수 있으며, 이하에서는 기본 장치(primary device)로도 정의된다.

남은 디바이스들의 파일럿 할당을 결정하기 위해 다음 알고리즘을 제안한다.

디바이스들의 파일럿 할당 결과를 나타내기 위해 정수 변수 x_i 를 정의한다.

파일럿이 고정되지 않은 디바이스는 후보 그룹(Candidate group)으로 묶이게 되며, 만약 i번째 후보 그룹($\mathcal{K}_i$)에 속한 디바이스들이 a번째 파일럿을 사용하게 된다면 $x_i = a$ 이다. 해당조건을 만족하지 않는다면 $x_i = 0$ 이다. 각 후보 그룹별로 파일럿이 할당되지 않은 하나의 노드가 대표 노드(제2 대표 노드)로 선정되며, 제2 대표 노드는 각 후보 그룹을 대표하여 파일럿의 대표 노드인 제1 대표 노드와 메시지를 주고받는 역할을 한다.

i번째 후보 그룹에 속한 디바이스들이 a번째 파일럿을 사용할 때의 데이터 전송량 합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 4

$$R_{ia} \triangleq \sum_{l \in \mathcal{P}_a} R_l + \sum_{k \in \mathcal{K}_i} R_k$$

R_{ia} 는 부분 데이터 전송량 합이며, $\mathcal{P}_a$ 는 기본 장치의 인덱스 집합으로 이전 코히어런스 인터벌에서 a번째 파일럿을 유지하는 디바이스를 나타낸다.

이때, 네트워크의 총 데이터 전송량을 최대화하기 위한 문제 P1을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 5

$$\begin{aligned} \text{(P1)} \quad & \max_{\mathbf{x}} \sum_{a=1}^{N_p} \sum_i R_{ia} \mathbb{I}(x_i = a) \\ \text{subject to} \quad & x_i \in \{0, \dots, N_p\}, \forall i, \\ & \mathbb{I}(x_i \neq 0) \wedge \mathbb{I}(x_{i'} \neq 0) = 0, \forall i' \in \mathcal{C}(i) \\ & \sum_i \mathbb{I}(x_i = a) \leq 1, \forall a, \end{aligned}$$

$\mathbb{I}(\cdot)$ 은 indicator function으로 괄호안의 조건이 만족될 경우 1, 아닐 경우 0의 값을 갖는다. x_i 는 파일럿의 인덱스를 나타내며, 수학식 5는 각 파일럿에 하나의 후보 그룹만이 할당될 수 있음을 의미하는 제한조건(제1 제한조건), 하나의 디바이스가 하나의 파일럿에만 할당되어야 한다는 제한조건(제2 제한조건)이다.

본 실시예에 따르면, 해당 문제를 분산적 메시지 전달 알고리즘으로 해결하기 위해 새로운 방식을 제안한다.

그래픽 모델링 접근방식을 메시지 전달 알고리즘에 기초한 관련 최적화 기법과 함께 적용한다. 목적함수와 제한 함수를 적절히 나타내기 위해 팩터(factor) 함수를 정의한다.

팩터함수 표현으로 인해 네트워크 제한조건들을 각 파일럿, 디바이스 단위로 쪼갤 수 있게 되어 분산적인 네트워크 최적화를 가능케 한다.

AP(100)와 디바이스(102)가 분산적으로 나누어져 있는 CFmMIMO 네트워크 특성 상 CPU(104)에 의한 중앙 집중적인 최적화는 데이터 처리 과정에 데이터 오버헤드(overhead)와 지연을 감수해야 한다.

그러나, 본 실시예에 따른 각 AP(100)와 디바이스(102)를 중심으로 한 분산적인 최적화는 이를 크게 경감시킬 수 있다.

수학식 6

$$\mathcal{F}_a(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\infty & \text{if (Case 1) or (Case 2),} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

(Case 1): $\forall i, x_i = a, \exists i' \in \mathcal{C}(i)$ s.t. $x_{i'} \neq 0$,
 (Case 2): $\forall i, x_i = a, \exists i'' \in \mathcal{D}(i)$ s.t. $x_{i''} = a$.

[0067] 수학식 6에서, $\mathcal{F}_a(\mathbf{x})$ 는 a번째 파일럿에 대해 수학식 5의 제약조건에 대응하는 팩터함수이다. 만약 파일럿 a와 관련하여 제1 제약조건을 위반하면 Case 1에 대응하고, 제2 제약조건을 위반하면 Case 2에 대응하여 $\mathcal{F}_a(\mathbf{x})$ 가 $-\infty$ 의 값을 갖게 된다.

수학식 7

$$\mathcal{R}_i(x_i) \triangleq \begin{cases} R_{ia} & \text{if } x_i = a \text{ and } a \in \{1, \dots, N_p\}, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

[0068]

[0069] $\mathcal{R}_i(x_i)$ 는 $x_i \in \{0, \dots, N_p\}$, $\forall i$, 를 만족하면 R_{ia} 값을 갖게 되는 팩터함수이다.

[0070] 두 종류의 팩터함수를 전부 더하면 이전에 구성했던 maximize, subject to 형식과 동일한 문제를 다음과 같이 다르게 표현할 수 있다.

[0071] 또한 도 4는 해당 문제를 그래프 형식으로 나타낸 것으로서, 6개의 디바이스가 존재하는 경우의 파일럿 할당을 위한 메시지 전달 과정 팩터 그래프를 도시한 도면이다.

수학식 8

$$(P2) \max_{\mathbf{x}} \sum_i \mathcal{R}_i(x_i) + \sum_{a=1}^{N_p} \mathcal{F}_a(\mathbf{x}).$$

[0072]

[0073] 할당 결과가 주어진 팩터함수의 제약조건을 위배한다면 함수가 음의 무한대 값을 갖게 되어 해당 문제를 최대화할 수 없다.

[0074] 제약조건과 관련된 팩터함수와 그에 따른 변수는 각각 도 4와 같이 사각 노드와 원 노드에 표시된다. 메시지는 max-sum 기반 계산 규칙을 사용하여 도출된다. 메시지 전달 방식은 디바이스 사이에 충분히 많은 횟수만큼 반복적으로 메시지를 교환하여 팩터함수를 그래프화 한 시스템의 최적 조건을 찾아내는 것이다.

수학식 9

$$\begin{aligned} \rho_{ia}^{(a)} &= R_{ia} + \sum_{b \neq a} \alpha_{ib}^{(*)}, \\ \rho_{ia}^{(0)} &= \sum_{b \neq a} \alpha_{ib}^{(0)}, \\ \rho_{ia}^{(*)} &= \max_{b \notin \{0, a\}} \left(R_{ib} + \alpha_{ib}^{(b)} + \sum_{c \notin \{a, b\}} \alpha_{ic}^{(*)} \right), \\ \alpha_{ia}^{(a)} &= \sum_{i' \in \mathcal{C}(i)} \rho_{i'a}^{(0)} + \sum_{i'' \in \mathcal{D}(i)} \max \left(\rho_{i''a}^{(0)}, \rho_{i''a}^{(*)} \right). \end{aligned}$$

[0075]

$$\alpha_{ia}^{(0)} = \max \left(\max_{j \neq i} \left(\rho_{ja}^{(a)} + \sum_{j' \in \mathcal{C}(j) \setminus \{i\}} \rho_{j'a}^{(0)} + \sum_{j'' \in \mathcal{D}(j) \setminus \{i\}} \max(\rho_{j'a}^{(0)}, \rho_{j''a}^{(*)}) \right), \sum_{j \neq i} \max(\rho_{ja}^{(0)}, \rho_{ja}^{(*)}) \right),$$

$$\alpha_{ia}^{(*)} = \sum_{i' \in \mathcal{C}(i)} \rho_{i'a}^{(0)} + \max \left(\max_{j \in \mathcal{D}(i)} \left(\rho_{ja}^{(a)} + \sum_{j' \in \mathcal{C}(j) \setminus (\{i\} \cup \mathcal{C}(i))} \rho_{j'a}^{(0)} + \sum_{j'' \in \mathcal{D}(j) \setminus (\{i\} \cup \mathcal{C}(i))} \max(\rho_{j'a}^{(0)}, \rho_{j''a}^{(*)}) \right), \sum_{i'' \in \mathcal{D}(i)} \max(\rho_{i'a}^{(0)}, \rho_{i''a}^{(*)}) \right)$$

[0076]

[0077]

수학식 9의 여섯 개 메시지 업데이트 수식을 반복하여 해당 항들이 수렴한다면 할당 변수를 다음과 같이 결정할 수 있다.

[0078]

ρ_{ia} 메시지들은 i번째 후보 그룹의 제2 대표 노드가 a 파일럿의 고정된 제1 대표 노드에게 전달하며, i번째 후보 그룹이 a 파일럿을 선택하거나/선택하지 않을 경향성에 대한 정보를 담고 있다.

[0079]

반면에 α_{ia} 메시지들은 파일럿의 고정된 제1 대표 노드가 i번째 후보 그룹의 제2 대표 노드에게 전달하며, i번째 후보 그룹의 제2 대표 노드가 a 파일럿을 선택하는 것에 대한 적절성에 관한 정보를 담고 있다. 즉, 앞서 정의한 제한조건을 만족하도록 조합들의 선택을 제한하는 역할을 한다.

[0080]

메시지 우측 상단 각 어깨기호(0,a,*)에 따라서 파일럿에 할당되지 않거나, a 파일럿에 할당되거나, 관계없음(elsewhere)의 상태에 대한 정보를 담고 있다.

[0081]

“관계없음” 상태에 관한 메시지는 i번째 후보 그룹이 a 파일럿이 아닌 다른 파일럿에 할당될 경향성에 대한 정보를 담고 있다.

수학식 10

$$\bar{b}_{ia} \triangleq (\rho_{ia}^{(a)} - \rho_{ia}^{(*)}) + (\alpha_{ia}^{(a)} - \alpha_{ia}^{(*)}) = \bar{\rho}_{ia} - \bar{\alpha}_{ia},$$

$$\tilde{b}_{ia} \triangleq (\rho_{ia}^{(a)} - \rho_{ia}^{(0)}) + (\alpha_{ia}^{(a)} - \alpha_{ia}^{(0)}) = (\bar{\rho}_{ia} - \tilde{\rho}_{ia}) - \tilde{\alpha}_{ia}.$$

[0082]

[0083]

$\max_i \tilde{b}_{ia} > 0$ 의 조건을 만족할 때, i번째 후보 그룹의 디바이스들은 $\arg \max_i \bar{b}_{ia}$ 번째 파일럿에 할당된다.

[0084]

도 5는 본 실시예에 따른 분산적 파일럿 할당 최적화 알고리즘을 도시한 도면이다.

[0085]

도 6와 도 7은 특정 조건에서 본 실시예에 따른 시뮬레이션을 진행한 결과이다.

[0086]

본 실시예에서 제시한 방법과 비교한 방법은 헝가리안 알고리즘, k-means 클러스터링, greedy 정책을 기반으로 한 heuristic 할당 기법이다.

[0087]

기본 설정은 다음과 같다. 200mx200m 공간에 여러 AP와 여러 디바이스가 랜덤으로 배치되어 있고 모두 하나의 안테나를 가지고 있다. AP는 10m 높이에 존재하고 디바이스는 1.5m 높이에 존재한다. AP의 전력 세기는 100mW, 노이즈 전력은 -92dBm이다.

[0088]

도 6은 시스템의 디바이스 수 대비 주파수 효율성을 나타낸 것이다. 디바이스 수는 15부터 90까지 증가시켰다. 시뮬레이션 결과 디바이스의 수가 증가하여 시스템이 복잡해질수록 비교 기법보다 좋은 성능을 낸 것을 확인할 수 있다.

[0089]

도 7은 누적 데이터 전송률을 도시한 그래프이다. 본 실시예에 따른 결과가 비교 기법보다 좋은 성능을 기록하였다. 중간값 기준 성능 비교에서 기존 기법들 대비 39%, 26%, 13% 우위를 보였다.

[0090]

진술한 Cell-free massive MIMO 네트워크에서의 분산적 파일럿 할당 최적화 방법은, 컴퓨터의 프로세서에 의해 실행되는 애플리케이션이나 프로그램 모듈과 같은 컴퓨터에 의해 실행가능하며, 메모리에 저장되는 프로그램 명령어들을 포함하는 기록매체의 형태로도 구현될 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 매체는 컴퓨터에 의해 액세스될 수 있는 임의의 가용 매체일 수 있고, 휘발성 및 비휘발성 매체, 분리형 및 비분리형 매체를 모두 포함한다. 또한, 컴퓨터 판독 가능 매체는 컴퓨터 저장 매체를 포함할 수 있다. 컴퓨터 저장 매체는 컴퓨터 판독 가능 명령어,

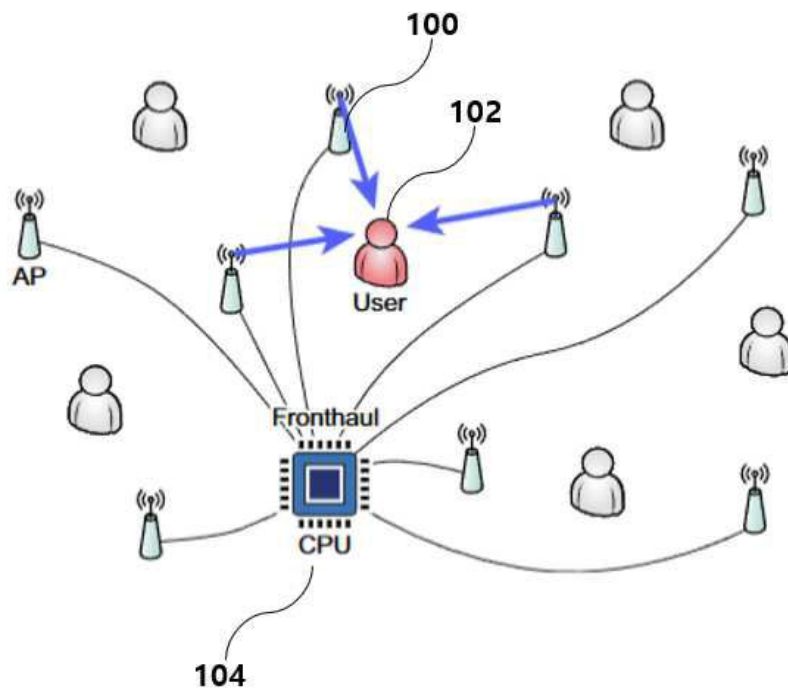
데이터 구조, 프로그램 모듈 또는 기타 데이터와 같은 정보의 저장을 위한 임의의 방법 또는 기술로 구현된 휘발성 및 비휘발성, 분리형 및 비분리형 매체를 모두 포함한다.

[0091]

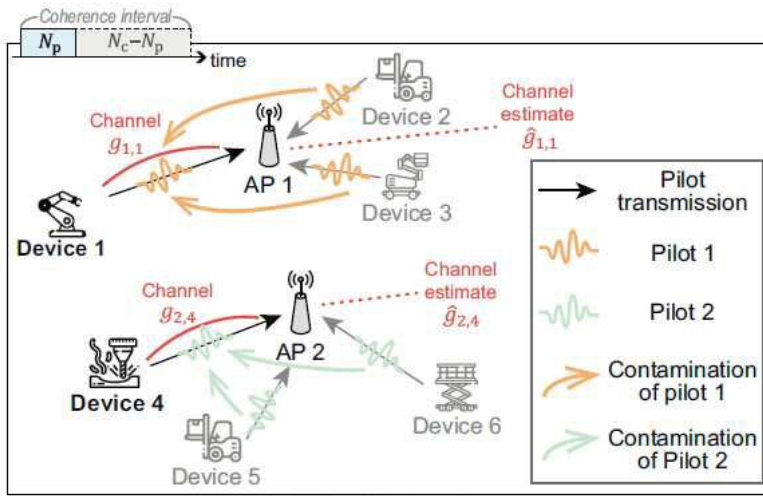
상기한 본 발명의 실시예는 예시의 목적을 위해 개시된 것이고, 본 발명에 대한 통상의 지식을 가지는 당업자라면 본 발명의 사상과 범위 안에서 다양한 수정, 변경, 부가가 가능할 것이며, 이러한 수정, 변경 및 부가는 하기의 특허청구범위에 속하는 것으로 보아야 할 것이다.

도면

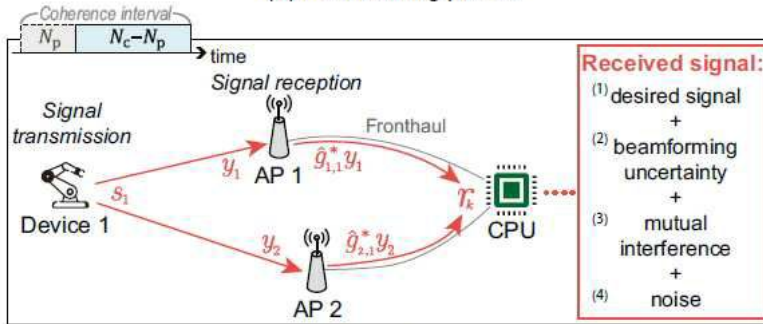
도면1



도면2

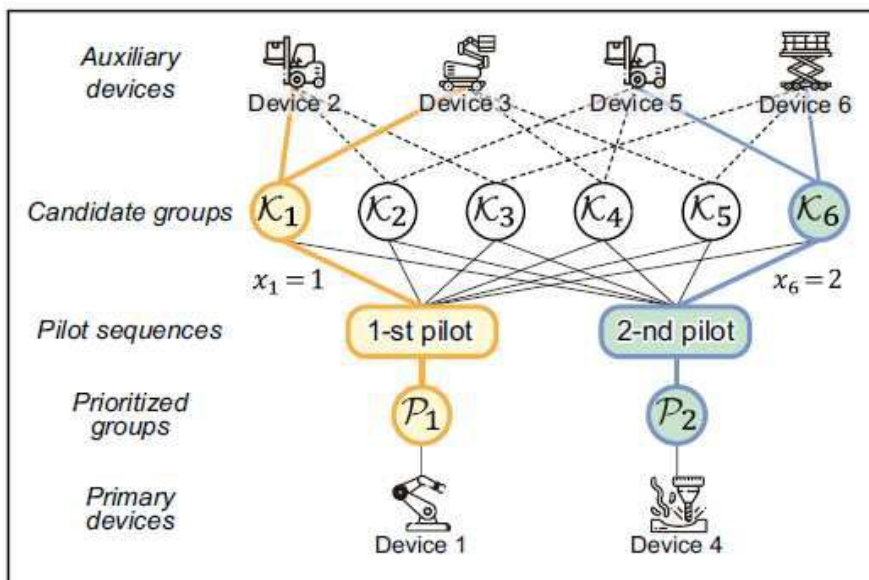


(a) Pilot training phase

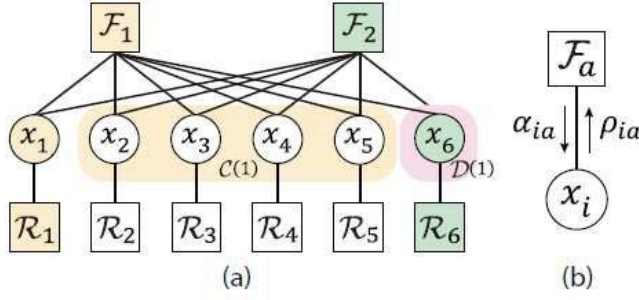


(b) Payload transmission phase

도면3



도면4



도면5

Algorithm 1 Distributed pilot assignment algorithm

Input: Partial sum rate $\{R_{ia}\}$ for all (i, a) in (14).

Output: Pilot indices of device groups $\{x_i\}$.

1: *Initialize:* $t \leftarrow 1$ and set $\bar{\alpha}_{ia}^{[t]} = 0$, $\tilde{\alpha}_{ia}^{[t]} = 0$ for all (i, a) .

repeat

Message updates:

2: Delegate of group i updates $\bar{\rho}_{ia}^{[t]}$, $\tilde{\rho}_{ia}^{[t]}$ using (27)–(28).

3: Primary device a updates $\bar{\alpha}_{ia}^{[t+1]}$, $\tilde{\alpha}_{ia}^{[t+1]}$ using (29)–(30).

4: *Increment:* $t \leftarrow t + 1$.

until convergence of all messages

Pilot assignment:

5: Primary device a evaluates $\bar{b}_{ia}$, $\tilde{b}_{ia}$ using (32)–(31).

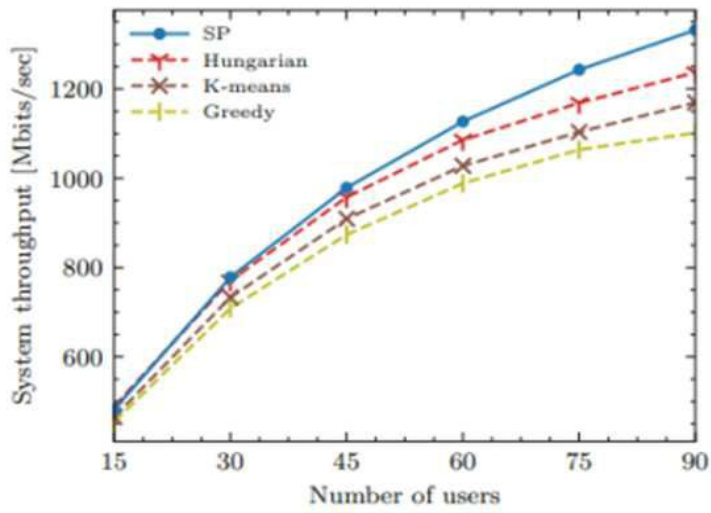
for all primary device a s.t. $\max_i \bar{b}_{ia} > 0$

6: Set $x_i = a$ with $i = \arg \max_i \bar{b}_{ia}$.

end for

7: **return** Devices of candidate group i obtain access to the pilot of primary device x_i .

도면6



도면7

