



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2013-0064264
(43) 공개일자 2013년06월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04J 11/00 (2006.01) H04B 7/26 (2006.01)
H04W 88/02 (2009.01)
(21) 출원번호 10-2011-0130797
(22) 출원일자 2011년12월08일
심사청구일자 2011년12월08일

(71) 출원인
서울대학교산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
인하대학교 산학협력단
인천광역시 남구 인하로 100, 인하대학교 (용현동)
(72) 발명자
고수민
서울특별시 동대문구 회기동 신현대아파트 9동 1406호
박대영
인천광역시 남동구 구월2동 롯데캐슬 2406-1302
이병기
서울특별시 서초구 잠원동 신반포 한신7차아파트 301동 911호
(74) 대리인
한양특허법인

전체 청구항 수 : 총 10 항

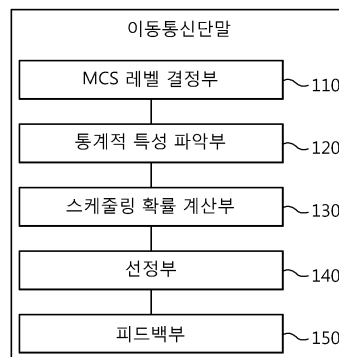
(54) 발명의 명칭 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말 및 방법

(57) 요약

기회적 스케줄링에 있어서, 채널들의 통계적 특성이 상이한 환경에서 유효 수율을 높일 수 있는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 기술이 개시된다. 이를 위해, 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말은 직교주파수분할 다중접속 시스템의 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말에 있어서, 보유한 복수개의 부채널들 각각의 MCS(Modulation and Coding Scheme) 레벨을 결정하는 MCS 레벨 결정부; 복수개의 부채널들 각각의 히스토리를 기반으로 복수개의 부채널들 각각의 통계적 채널 특성을 파악하는 통계적 특성 파악부; 복수개의 부채널들의 통계적 채널 특성 및 매 순간의 채널 상태를 이용하여, 복수개의 부채널들 각각을 기지국에 피드백 했을 때 기지국에서 스케줄링 할 확률을 계산하는 스케줄링 확률 계산부; 스케줄링 확률 계산부에서 계산된 스케줄링 확률이 높은 순서대로 소정 개수의 부채널들을 선정하는 선정부; 및 선정부에서 선정된 상기 부채널들의 MCS 레벨을 기지국에 피드백하는 피드백부를 포함하는 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도3

100



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	08913-04003
부처명	한국방송통신전파진흥원
연구사업명	차세대통신네트워크 원천기술개발사업
연구과제명	3차원 환경에서의 지능형 무선통신 시스템
주관기관	서울대학교
연구기간	2011.03.01 ~ 2012.02.28

특허청구의 범위

청구항 1

직교주파수분할 다중접속 시스템의 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말에 있어서,
 보유한 복수개의 부채널들 각각의 MCS(Modulation and Coding Scheme) 레벨을 결정하는 MCS 레벨 결정부;
 상기 복수개의 부채널들 각각의 히스토리를 기반으로 상기 복수개의 부채널들 각각의 통계적 채널 특성을 파악하는 통계적 특성 파악부;
 상기 복수개의 부채널들의 상기 통계적 채널 특성 및 매 순간의 채널 상태를 이용하여, 상기 복수개의 부채널들 각각을 기지국에 피드백 했을 때 상기 기지국에서 스케줄링 할 확률을 계산하는 스케줄링 확률 계산부;
 상기 스케줄링 확률 계산부에서 계산된 스케줄링 확률이 높은 순서대로 소정 개수의 부채널들을 선정하는 선정부; 및
 상기 선정부에서 선정된 상기 부채널들의 MCS 레벨을 상기 기지국에 피드백하는 피드백부를 포함하는 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말.

청구항 2

청구항 1에 있어서,
 상기 통계적 채널 특성은,
 상기 MCS 레벨의 누적 질량 함수(CMF; Cumulative Mass Function)에 기초하여 결정되는 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말.

청구항 3

청구항 1에 있어서,
 상기 선정부에서 선정되는 상기 부채널들의 소정 개수는 피드백 오버헤드를 고려한 유효 수율이 최대가 되도록, 상기 기지국에서 결정한 값인 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말.

청구항 4

청구항 3에 있어서,
 상기 소정 개수는 상기 통계적 채널 특성을 이용하여 모든 가능한 개수에 대하여 유효 수율을 계산하여 결정된 값인 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말.

청구항 5

청구항 1에 있어서,
 상기 피드백부는
 상기 기지국에 상기 선정부에서 선정된 상기 부채널들의 MCS 레벨과 함께, 채널 인덱스 정보를 피드백하는 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말.

청구항 6

직교주파수분할 다중접속 시스템의 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말에 있어서,
 보유한 복수개의 부채널들 각각의 MCS 레벨을 결정하는 단계;
 상기 복수개의 부채널들 각각의 히스토리를 기반으로 상기 복수개의 부채널들 각각의 통계적 채널 특성을 파악하는 단계;
 상기 복수개의 부채널들의 상기 통계적 채널 특성 및 매 순간의 채널 상태를 이용하여, 상기 복수개의 부채널들

각각을 기지국에 피드백 했을 때 상기 기지국에서 스케줄링 할 확률을 계산하는 단계;

상기 계산된 스케줄링 확률이 높은 순서대로 소정 개수의 부채널들을 선정하는 단계; 및

상기 선정된 부채널들의 MCS 레벨을 상기 기지국에 피드백하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 통계적 채널 특성은,

상기 MCS 레벨의 누적 질량 함수(CMF; Cumulative Mass Function)에 기초하여 결정되는 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법.

청구항 8

청구항 6에 있어서,

피드백 오버헤드를 고려한 유효 수율이 최대가 되도록 상기 부채널들의 소정 개수를 결정하는 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 소정 개수는 상기 통계적 채널 특성을 이용하여 모든 가능한 개수에 대하여 유효 수율을 계산하여 결정된 값인 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법.

청구항 10

청구항 6에 있어서,

상기 피드백하는 단계는,

상기 기지국에 상기 선정된 상기 부채널들의 MCS 레벨과 함께, 채널 인덱스 정보를 피드백하는 것을 특징으로 하는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말 및 방법에 관한 것이다. 더욱 상세하게, 본 발명은 기 회적 스케줄링에 있어서, 채널들의 통계적 특성이 상이한 환경에서 유효 수율을 높일 수 있는 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말 및 방법에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 하향링크 무선 통신 시스템의 성능을 향상시키기 위해, 매 순간 채널 상태가 가장 좋은 사용자에게 자원을 할당 하는 기회적 스케줄링이 널리 사용되고 있다. 이를 위해서는 단말이 기지국에 채널 상태를 주기적으로 피드백해 야 한다. 다중 채널을 사용하는 직교주파수분할다중접속(OFDMA; Orthogonal Frequency Dividion Multiple Access, 이하, 'OFDMA') 시스템의 하향링크에 기회적 스케줄링을 적용하면 부채널의 숫자에 비례하여 피드백에 소요되는 자원의 양이 늘어나서 오히려 처리 효율이 떨어질 수 있다. 즉, 전체 자원은 제한되어 있기 때문에, 피드백 부하가 증가함으로써 데이터 트래픽에 소요되는 주파수 자원의 양이 감소한다.

[0003] 피드백 양을 줄이려는 기존의 선택적 피드백(SF; selective feedback) 기법은 전체 복수개의 부채널 중에 변조 및 코딩 기법(MCS; Modulation and Coding Scheme, 이하, 'MCS') 레벨이 높은 순서대로 소정 개수의 부채널의 상태만을 선택적으로 피드백 하는 것이다. MCS 레벨이 높은 상위 소정 개수의 부채널들을 피드백하는 이유는 해당 부채널들이 다른 부채널들보다 기지국에 의해 스케줄링 될 확률이 높을 것이라 예상하기 때문이다.

- [0004] 하지만, 통계적 특성이 상이한 경우에는 단순히 MCS 레벨이 높은 부채널이 반드시 스케줄링 될 확률이 높다고 보기는 힘들다. 즉, 통계적 특성이 상이한 경우에는 낮은 MCS 레벨을 갖는 부채널이 높은 스케줄링 확률을 가질 수 있다.
- [0005] 예를 들어, 부분 주파수 재사용(FFR ; Fractional Frequency Reuse) 기법이 적용되어 재사용 팩터(reuse factor)가 1인 부채널(이하 Reuse1 부채널)과 재사용 팩터가 3인 부채널(이하 Reuse3 부채널)이 공존하는 경우를 생각해보자. Reuse3 부채널에서 겪는 인접 셀로부터의 간섭량은 Reuse1 부채널에서의 그 것보다 작기 때문에, 대부분의 단말들은 Reuse1 부채널보다 Reuse3 부채널에서 MCS 레벨이 더 높다. 스케줄링의 관점에서 보면, 이는 Reuse3 부채널이 Reuse1 부채널보다 경쟁의 정도가 심함을 의미하고, 더불어 단말이 Reuse1 부채널보다 Reuse3 부채널에서 스케줄링 경쟁에서 이길 확률이 적다는 것을 의미한다. 결과적으로, 단말에 있어서, MCS 레벨이 Reuse1 부채널이 Reuse3 부채널보다 낮은 경우에도, Reuse3 부채널보다 Reuse1 부채널에서 더 높은 스케줄링 확률을 갖는 것이다.
- [0006] 즉, 부채널들마다 통계적 특성이 상이한 환경에서는 특정 부채널이 다른 부채널보다 '절대적인 채널 상태가 좋다'라는 것이, '스케줄링 될 확률이 높다'라는 것을 의미하지는 않는다. 따라서, 부채널들의 통계적 특성이 상이한 환경에서도 유효 수율을 향상시킬 수 있는 기술의 개발이 요구되는 실정이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0007] 본 발명의 목적은 기회적 스케줄링을 위한 효율적인 채널 상태 피드백 기법을 제공하는 것이다.
- [0008] 그리고, 본 발명은 부채널들의 스케줄링 확률을 계산하고, 계산된 스케줄링 확률을 기초로 피드백할 부채널을 선택하기 때문에, 부채널들의 통계적 특성이 상이한 환경에서 유효 수율을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 즉, 본 발명은 불필요한 피드백 오버헤드를 줄여, 데이터 전송 구간의 길이를 늘리고, 실제로 스케줄링 될 확률이 높은 부채널들을 피드백하여 피드백의 효율을 높임으로써 유효 수율을 향상시키는 것을 목적으로 한다.
- [0009] 또한, 본 발명은 채널 피드백의 양을 효율적으로 제어함과 동시에 피드백의 질을 향상시키는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

- [0010] 상기한 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말은 직교주파수분할 다중접속 시스템의 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말에 있어서, 보유한 복수개의 부채널들 각각의 MCS(Modulation and Coding Scheme) 레벨을 결정하는 MCS 레벨 결정부; 상기 복수개의 부채널들 각각의 히스토리를 기반으로 상기 복수개의 부채널들 각각의 통계적 채널 특성을 파악하는 통계적 특성 파악부; 상기 복수개의 부채널들의 상기 통계적 채널 특성 및 매 순간의 채널 상태를 이용하여, 상기 복수개의 부채널들 각각을 기지국에 피드백 했을 때 상기 기지국에서 스케줄링 할 확률을 계산하는 스케줄링 확률 계산부; 상기 스케줄링 확률 계산부에서 계산된 스케줄링 확률이 높은 순서대로 소정 개수의 부채널들을 선정하는 선정부; 및 상기 선정부에서 선정된 상기 부채널들의 MCS 레벨을 상기 기지국에 피드백하는 피드백부를 포함한다.
- [0011] 이 때, 상기 통계적 채널 특성은, 상기 MCS 레벨의 누적 질량 함수(CMF; Cumulative Mass Function)에 기초하여 결정될 수 있다.
- [0012] 이 때, 상기 선정부에서 선정되는 상기 부채널들의 소정 개수는 피드백 오버헤드를 고려한 유효 수율이 최대가 되도록, 상기 기지국에서 결정한 값일 수 있다.
- [0013] 이 때, 상기 소정 개수는 상기 통계적 채널 특성을 이용하여 모든 가능한 개수에 대하여 유효 수율을 계산하여 결정된 값일 수 있다.
- [0014] 이 때, 상기 피드백부는 상기 기지국에 상기 선정부에서 선정된 상기 부채널들의 MCS 레벨과 함께, 채널 인덱스 정보를 피드백할 수 있다.

- [0015] 한편, 상기한 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법은 직교주파수분할 다중접속 시스템의 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말에 있어서, 보유한 복수개의 부채널들 각각의 MCS 레벨을 결정하는 단계; 상기 복수개의 부채널들 각각의 히스토리를 기반으로 상기 복수개의 부채널들 각각의 통계적 채널 특성을 파악하는 단계; 상기 복수개의 부채널들의 상기 통계적 채널 특성 및 매 순간의 채널 상태를 이용하여, 상기 복수개의 부채널들 각각을 기지국에 피드백 했을 때 상기 기지국에서 스케줄링 할 확률을 계산하는 단계; 상기 계산된 스케줄링 확률이 높은 순서대로 소정 개수의 부채널들을 선정하는 단계; 및 상기 선정된 부채널들의 MCS 레벨을 상기 기지국에 피드백하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0016] 이 때, 상기 통계적 채널 특성은, 상기 MCS 레벨의 누적 질량 함수(CMF; Cumulative Mass Function)에 기초하여 결정될 수 있다.
- [0017] 이 때, 피드백 오버헤드를 고려한 유효 수율이 최대가 되도록 상기 부채널들의 소정 개수를 결정할 수 있다.
- [0018] 이 때, 상기 소정 개수는 상기 통계적 채널 특성을 이용하여 모든 가능한 개수에 대하여 유효 수율을 계산하여 결정된 값일 수 있다.
- [0019] 이 때, 상기 피드백하는 단계는, 상기 기지국에 상기 선정된 상기 부채널들의 MCS 레벨과 함께, 채널 인덱스 정보를 피드백할 수 있다.

발명의 효과

- [0020] 본 발명에 따르면, 기회적 스케줄링을 위한 효율적인 채널 상태 피드백 기법을 제공할 수 있다.
- [0021] 그리고, 본 발명은 부채널들의 스케줄링 확률을 계산하고, 계산된 스케줄링 확률을 기초로 피드백할 부채널을 선택하기 때문에, 부채널들의 통계적 특성이 상이한 환경에서 유효 수율을 향상시킬 수 있다. 즉, 본 발명은 불필요한 피드백 오버헤드를 줄여, 데이터 전송 구간의 길이를 늘리고, 실제로 스케줄링 될 확률이 높은 부채널들을 피드백하여 피드백의 효율을 높임으로써 유효 수율을 향상시킨다.
- [0022] 또한, 본 발명은 채널 피드백의 양을 효율적으로 제어함과 동시에 피드백의 질을 향상시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0023] 도 1은 타임 슬롯의 구조 및 타임 슬롯에 포함되는 특정 단말에 할당된 피드백 구간의 구조를 도시한 것이다.
- 도 2는 MCS 레벨의 개수가 16인 경우에 대하여, MCS 레벨, SINR 임계치 및 통신 속도의 관계를 보여주는 도면이다.
- 도 3은 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말의 구성을 설명하기 위한 블록도이다.
- 도 4는 OFDMA 하향링크 시스템에서, 본 발명에 따른 이동 통신 단말의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하기 위한 시뮬레이션 파라미터이다.
- 도 5는 다중 셀 구조 및 셀에 위치하는 단말의 위치의 예시를 도시한 것이다.
- 도 6은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말 개수의 변화에 따른 유효 전체 수율(Effective total Throughput)의 변화를 나타내는 그래프이다.
- 도 7은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말의 개수의 변화에 따른 기지국에 피드백 할 부채널의 개수를 보여주는 테이블이다.
- 도 8은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 부채널 인덱스의 개수의 변화에 따른 부채널의 MCS 레벨을 보고한 단말들의 개수의 실험적 평균의 변화를 나타내는 그래프이다.
- 도 9는 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말의 개수의 변화에 따른 데이터 전송 구간 동안의 전체 수율의 변화를 나타내는 그래프이다.
- 도 10은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말의 개수의 변화에 따른 타임 슬롯에 대한 데이터 전송 구간의 길이의 비의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 11은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말 인덱스에 따른 각 단말의 유효 수율을 나타내는 그래프이다.

도 12는 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말의 개수의 변화에 따른 유효 전체 수율의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 13은 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법을 설명하기 위한 플로우차트이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 본 발명을 첨부된 도면을 참조하여 상세히 설명하면 다음과 같다. 여기서, 반복되는 설명, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능, 및 구성에 대한 상세한 설명은 생략한다. 본 발명의 실시형태는 당 업계에서 평균적인 지식을 가진 자에게 본 발명을 보다 완전하게 설명하기 위해서 제공되는 것이다. 따라서, 도면에서의 요소들의 형상 및 크기 등은 보다 명확한 설명을 위해 과장될 수 있다.

[0025] 이하에서는 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말의 구성 및 동작에 대하여 설명하도록 한다.

[0026] 도 1은 타임 슬롯의 구조 및 타임 슬롯에 포함되는 특정 단말에 할당된 피드백 구간의 구조를 도시한 것이다. 도 2는 MCS 레벨의 개수가 16인 경우에 대하여, MCS 레벨, SINR 임계치 및 통신 속도의 관계를 보여주는 도면이다. 도 3은 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말의 구성을 설명하기 위한 블록도이다.

[0027] 먼저, 본 발명에 따른 이동 통신 단말(100)이 적용되는 통신 시스템의 모델에 대하여 설명한다. 한 기지국에서 K 개의 단말을 서비스하는 OFDMA 하향링크 시스템을 고려한다. 전체 단말의 집합을 $\mathcal{K} \equiv \{1, 2, \dots, K\}$ 로 나타낸다. 전체 대역폭 β 가 N 개의 부채널들로 나뉘어 있다고 가정한다. 그리고, 전체 부채널들의 집합을 $\mathcal{N} \equiv \{1, 2, \dots, N\}$ 로 나타낸다. 부채널들의 상태는 한 타임 슬롯 내에서는 일정하고, 매 슬롯마다 변화한다.

[0028] 하나의 타임 슬롯은 단말로부터 기지국에 피드백 메시지를 보내기 위한 피드백 구간(Feedback period) 및 기지국으로부터 단말에 데이터를 전송하기 위한 데이터 전송 구간(Data transmission period)으로 구성된다. 도 1의 첫 번째 줄은 타임 슬롯 구조를 도시한 것이다. 이 때, τ 는 타임슬롯의 길이를, τ^{feed} 는 피드백 구간의 길이를, τ^{data} 는 데이터 전송 구간의 길이를 나타낸다.

[0029] 단말은 매 타임 슬롯마다 하향 링크 채널의 신호 대 간섭 및 잡음비(SINR; Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio, 이하, 'SINR')를 측정하고, 각 부채널이 서포트할 수 있는 MCS 레벨을 결정한다. 그리고, 단말 k 의 부채널 n 에서의 SINR을 가리키는 랜덤 변수를 $G_{k,n}$ 으로 나타낸다. $G_{k,n}$ 은 다른 n 의 값에 대하여 독립적이다. 또한, 단말 k 의 부채널 n 에서의 MCS 레벨을 가리키는 랜덤 변수를 다음의 수학적 식 1과 같이 정의되는 $L_{k,n}$ 으로 나타낸다.

수학적 식 1

$$L_{k,n} = l, \quad \text{if } t(l-1) \leq G_{k,n} < t(l)$$

[0030] 이 때, $t(l)$, $l = 1, 2, \dots, L$ 은 l 에 대하여 단조 증가하는 SINR 임계치(Threshold)이다. $g_{k,n}$ 과 $l_{k,n}$ 은 각각 랜덤변수 $G_{k,n}$ 및 $L_{k,n}$ 의 실현(Realization) 값을 나타낸다. 도 2에 도시된 표는 MCS 레벨의 개수 $L = 16$ 일 때에, MCS 레벨 l , SINR 임계치 $t(l)$, 및 통신 속도(Data rate) $r(l)$ 사이의 관계의 예시를 보여준다. 여기서, 통신 속도 $r(l)$ 은 다음의 수학적 식 2에 의하여 결정되며, 이 때 비트 에러율(BER; Bit Error Rate)은 10^{-3} 으로 정하여진다.

수학식 2

[0032]
$$r(l) = \log_2(1 + 10^{\frac{t(l-1)}{10}} \cdot (-1.5/\ln(5\text{BER})))$$

[0033] 채널들의 MCS 레벨이 결정된 후, 각 단말은 본 발명에 따른 스케줄링 확률 예측 기반 선별적 피드백(SPP-SF; Scheduling Probability Prediction-based Selective Feedback, 이하, 'SPP-SF') 기법을 사용하여 해당 MCS 레벨을 기지국으로 피드백 구간 동안에 전송한다. 그리고, 피드백 메시지의 전송은 에러-프리(Error free)하다고 가정한다. 그러나, 에러-프리의 경우에도, 기지국에서 피드백 정보를 통하여 관찰한 단말의 부채널 상태와 실제 MCS 레벨은 다를 수 있다. 이는 피드백 정보의 정확성을 떨어트릴 수 있는 피드백 감소(Feedback reduction) 기법을 사용함에 의하여 부채널 상태를 보고하였기 때문이다.

[0034] 이를 고려하여, SPP-SF 기법을 사용하여 단말 k 에 의하여 피드백 된 부채널 n 의 MCS 레벨을 $\tilde{l}_{k,n} \in \{1, 2, \dots, L\}$ 로 나타내고, $\tilde{L}_{k,n}$ 은 $\tilde{l}_{k,n}$ 의 랜덤 변수를 나타낸다. 이러한 피드백 정보에 기초하여 기지국은 각 타임 슬롯에서 서비스할 단말을 결정하고, 데이터 전송 구간 동안 해당 단말에 패킷을 전송한다.

[0035] 단말 스케줄링을 위하여 누적 질량 함수 기반의 스케줄링(CS; Cumulative mass function-based Scheduling) 알고리즘(이하, 'CS 알고리즘')을 채택한다. CS 알고리즘은 단말 자신의 분포 이내에 있어서 확률적으로 가장 높은 전송률을 갖는 단말에 자원을 할당한다. 구체적으로, CS 알고리즘은 $\tilde{L}_{k,n}$ 의 누적 질량 함수(CMF; Cumulative Mass Function)에 기초하여 단말 k 를 위한 스케줄링 메트릭을 만든다. $\tilde{L}_{k,n}$ 의 CMF를 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 이라 나타내며, $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 은 다음의 수학식 3과 같이 정의된다.

수학식 3

[0036]
$$\tilde{F}_{k,n}(l) \equiv \Pr[\tilde{L}_{k,n} \leq l] = \sum_{l'=1}^l \Pr[\tilde{L}_{k,n} = l'], \quad l = 1, 2, \dots, L$$

[0037] 채널 n 에 대하여, CS 알고리즘은 다음의 절차에 의하여 단말 스케줄링을 수행한다. 첫 번째로, 단말 k 는 부채널 n 의 MCS 레벨 $\tilde{l}_{k,n}$ 을 피드백한다. 두 번째로, 기지국은 $[\tilde{F}_{k,n}(\tilde{l}_{k,n} - 1), \tilde{F}_{k,n}(\tilde{l}_{k,n})]$ 사이에서 균등 랜덤 변수(Uniform random variable) $U_{k,n}$ 을 생성하고, $U_{k,n}$ 을 스케줄링 메트릭 $U_{k,n}^{1/w_{k,n}}$ 으로 변환한다. (이 때, 표기의 편의를 위하여 $\tilde{F}_{k,n}(0) \equiv 0$ 이 정의된다.) 여기서, $w_{k,n}$ 은 $\sum_{k=1}^K w_{k,n} = 1$ 을 만족하는 단말 k 의 부채널 n 에 할당된 비음 가중 팩터(Nonnegative weighting factor)이다. 세 번째로, 기지국은 다음의 수학식 4와 같이, 부채널 n 을 스케줄링 메트릭 $U_{k,n}^{1/w_{k,n}}$ 이 가장 큰 단말 k_n^* 에 할당한다.

수학식 4

[0038]
$$k_n^* = \arg \max_{k \in \mathcal{K}} U_{k,n}^{1/w_{k,n}}$$

[0039] 네 번째로, 기지국은 부채널 n 을 통하여 $r(\tilde{l}_{k_n^*,n})$ 의 전송률로 단말 k_n^* 에 데이터를 전송한다. 다섯 번째로, 기지국은 다음의 수학식 5와 같이 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 을 업데이트한다.

수학식 5

$$\begin{aligned} \Pr[\tilde{L}_{k,n} = l] &\leftarrow \lambda \Pr[\tilde{L}_{k,n} = l] + (1 - \lambda) I[\tilde{l}_{k,n} = l] \\ \tilde{F}_{k,n}(l) &\leftarrow \sum_{l'=1}^l \Pr[\tilde{L}_{k,n} = l'], \end{aligned}$$

[0040]

[0041] (여기서, $\lambda \in (0, 1)$ 은 망각 인자(forgetting factor)이고, $I[A]$ 는 조건 A 를 만족하는 경우 1이고, 다른 경우는 0인 지표 함수(Indicator function)이다.)

[0042] 그리고, 단말 k 의 부채널 n 에서의 데이터 전송 구간 동안의 전송률(Throughput)을 $T_{k,n}^{\text{data}}$ 로 정의하고, 데이터 전송 구간 동안의 총 전송률(Total throughput)을 T^{data} 로 정의하고, 피드백에 의하여 야기된 감소된 데이터 전송 시간이 고려된 유효 총 전송률(Effective total throughput)을 T 로 정의한다. CS 알고리즘은 다른 스케줄링 알고리즘보다 주요한 이점인 전송률에 대한 밀폐형 표현(Closed form expression)을 형성한다. 이러한, T , T^{data} 및 $T_{k,n}^{\text{data}}$ 는 다음의 수학식 6과 같이 표현될 수 있다.

수학식 6

$$\begin{aligned} T &= \frac{\tau^{\text{data}}}{\tau} \cdot T^{\text{data}}, \\ T^{\text{data}} &= \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N T_{k,n}^{\text{data}}, \\ T_{k,n}^{\text{data}} &= \frac{\beta w_{k,n}}{N} \sum_{l=1}^L r(l) \cdot \left(\tilde{F}_{k,n}(l)^{1/w_{k,n}} - \tilde{F}_{k,n}(l-1)^{1/w_{k,n}} \right) \end{aligned}$$

[0043]

[0044] 이의 통신 시스템 모델에서, 도 3을 참조하면, 본 발명에 따른 이동 통신 단말(100)은 MCS 레벨 결정부(110), 통계적 특성 파악부(120), 스케줄링 확률 계산부(130), 선정부(140) 및 피드백부(150)를 포함하여 구성된다.

[0045] MCS 레벨 결정부(110)는 이동 통신 단말(100)이 보유한 복수개의 부채널들 각각의 MCS 레벨을 결정한다.

[0046] 통계적 특성 파악부(120)는 상기 복수개의 부채널들 각각의 히스토리를 기록하고, 이를 기반으로 각 부채널들의 통계적 채널 특성을 파악한다. 이 때, 통계적 채널 특성은 MCS 레벨 결정부(110)에서 결정된 각 부채널들의 MCS 레벨의 누적 질량 함수(CMF)에 기초하여 결정될 수 있다.

[0047] 스케줄링 확률 계산부(130)는 복수개의 부채널들의 통계적 채널 특성 및 매 순간의 채널 상태를 이용하여, 복수개의 부채널들 각각을 피드백 하였을 때 기지국에서 스케줄링 할 확률을 계산한다.

[0048] 선정부(140)는 스케줄링 확률 계산부(130)에서 계산된 스케줄링 확률이 높은 순서대로 소정 개수의 부채널들을 선정한다. 이 때, 선정부(140)에서 선정되는 부채널들의 소정 개수는 피드백 오버헤드를 고려한 유효 수율이 최대가 되도록, 기지국에서 결정한 값일 수 있다. 또한, 소정 개수는 통계적 채널 특성을 이용하여 모든 가능한 개수에 대하여 유효 수율을 계산하여 결정된 값일 수 있다.

[0049] 피드백부(150)는 선정부(140)에서 선정된 부채널들의 MCS 레벨을 기지국에 피드백한다. 이 때, 피드백부(150)는 선정부(140)에서 선정된 부채널들의 채널 인덱스 정보를 함께 피드백한다.

[0050] 이하에서는, 본 발명에 따른 SPP-SF 기법에 대하여 보다 자세히 설명하도록 한다.

[0051] SPP-SF 기법은 다음의 과정에 의하여 동작한다. 각각의 단말은 부채널들을 스케줄링 확률에 관하여 내림차순으로 분류하고, 상위 M 개의 부채널들 각각의 채널 인덱스 및 MCS 레벨을 보고한다. 즉, 일반적인 SF 기법과 다르게 MCS 레벨이 아닌 스케줄링 확률로 부채널들을 분류한다. CS 알고리즘은 상기 수학식 4에 의하여 주어지는 스케줄링 메트릭을 사용하여 어떠한 단말에 각 부채널을 서비스할 것인지를 결정한다. 그리고, $L_{k,n} = l$ 일 때, 부채널 n 에서 단말 k 가 선택될 확률 $x_{k,n}$ 은 다음의 수학식 7과 같이 표현된다.

수학식 7

$$x_{k,n} = w_{k,n} \frac{\tilde{F}_{k,n}(l)^{1/w_{k,n}} - \tilde{F}_{k,n}(l-1)^{1/w_{k,n}}}{\tilde{F}_{k,n}(l) - \tilde{F}_{k,n}(l-1)}$$

[0052]

[0053] 여기서, $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 은 수학식 5와 같은 절차로 단말 k 에 의하여 얻어진다. 이 후, 단말 k 는 계산된 $x_{k,n}$ 을 부채널 n 의 피드백 메트릭(Feedback metric)으로 삼고, 피드백 메트릭이 큰 순서대로 상위 M 개의 부채널을 피드백 메시지로 전송한다. 구체적으로, 부채널들을 $x_{k,n}$ 의 크기 순으로 다음의 수학식 8과 같이 정렬되는 순열 $\pi_k \equiv [\pi_k^{(1)}, \pi_k^{(2)}, \dots, \pi_k^{(N)}]$ 을 정의한다.

수학식 8

$$x_{k,\pi_k^{(1)}} \geq x_{k,\pi_k^{(2)}} \geq \dots \geq x_{k,\pi_k^{(N)}}$$

[0054]

[0055] 그리고, 상위 M 개의 부채널의 집합 $\mathcal{N}_k$ 는 다음의 수학식 9와 같이 표현된다.

수학식 9

$$\mathcal{N}_k \equiv \{\pi_k^{(1)}, \pi_k^{(2)}, \dots, \pi_k^{(M)}\}$$

[0056]

[0057] 단말 k 는 $\mathcal{N}_k$ 에 속하는 부채널들의 채널 인덱스와 MCS 레벨을 보고한다. 따라서, 기지국에 의하여 관찰되는 MCS 레벨 $\tilde{l}_{k,n}$ 은 다음의 수학식 9와 같다.

수학식 10

$$\tilde{l}_{k,n} = \begin{cases} l_{k,n}, & \text{if } n \in \mathcal{N}_k \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0058]

[0059] 도 1의 두 번째 줄은 단말 k 에 할당된 피드백 구간의 구조를 도시한 것이다. 이 때, $B_{\text{MCS}} \equiv \lceil \log_2 L \rceil$ 는 MCS 레벨을 표현하기 위하여 필요한 bit 수이며, $B_{\text{CH}} \equiv \lceil \log_2 N \rceil$ 는 채널 인덱스를 표현하기 위하여 필요한 bit 수이다. 피드백 구간 동안의 총 피드백의 양은 $KM(B_{\text{MCS}} + B_{\text{CH}})$ bit이다. 따라서, 피드백 구간의 길이 τ^{feed}

및 데이터 전송 구간의 길이 τ^{data} 는 다음의 수학식 11과 표현될 수 있다.

수학식 11

$$\tau^{\text{feed}} = \frac{KM(B_{\text{MCS}} + B_{\text{CH}})}{R^{\text{feed}}}$$

$$\tau^{\text{data}} = \tau - \tau^{\text{feed}}$$

[0060]

[0061] 여기서, R^{feed} (bits/s)는 피드백 메시지의 전송률을 나타낸다. M 이 증가하면, 스케줄러(Scheduler)는 더 큰 피드백 오버헤드를 소요하여 높은 전송률을 산출한다. 이 것은, T^{data} 및 τ^{data} 가 각각 M 의 값에 의한 증감 함수에 해당한다는 것을 시사한다. 수학식 6에 의하여 $T = \tau^{\text{data}} T^{\text{data}} / \tau$ 이므로, 최적의 M 의 값이 가장 큰 유효 총 전송률 T 를 산출하게 된다. 기지국은 M 의 모든 가능한 값(즉, $M = 1, 2, \dots, N$)에 대하여 T 를 계산하고, T 를 최대화하는 M 을 설정한다.

[0062] 유효 전송률 T 를 결정하기 위한 방법은 다음과 같다. 먼저, 실제 MCS 레벨의 누적 질량 함수(CMF) $F_{k,n}(l)$ 의 관점에서, 유효 총 전송률 T 를 얻을 수 있다. T 를 계산하는 것은 특히 N 의 값이 큰 경우 매우 복잡하기 때문에, 더 적은 계산 복잡성으로 T 의 하계(Lower bound)를 얻는다.

[0063] A. T 의 산출

[0064] T 는 수학식 6에서 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 에 의하여 표현된다. 그리고, $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 은 M 의 값 및 실제 MCS 레벨의 누적 질량 함수 $F_{k,n}(l)$ 에 의존한다. 본 항목에서는 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 이 연역적으로 주어진다는 가정하에, 기지국이 어떻게 $F_{k,n}(l)$ 을 사용하여 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 을 계산하는지에 대하여 설명한다. 이 때, 계산된 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 은 최적의 M 의 값을 결정하기 위하여만 사용되고, 단말 스케줄링은 수학식 5에 의하여 실시간 갱신되는 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 에 기초하여 수행된다. 하기의 섹션 C에서 이러한 정보가 연역적이지 않을 때의 케이스를 설명한다.

[0065] $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 을 얻기 위하여 먼저, 수학식 3에 주어진 바와 같이, 합계가 누적 질량 함수(CMF) $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 을 구성하는 $\Pr[\tilde{L}_{k,n} = l]$ 을 구한다. 수학식 10에 의하여 다음의 수학식 12를 구한다.

수학식 12

$$\Pr[\tilde{L}_{k,n} = l] = \Pr[L_{k,n} = l, n \in \mathcal{N}_k] = \Pr[L_{k,n} = l] \Pr[n \in \mathcal{N}_k | L_{k,n} = l], 2 \leq l \leq L,$$

$$\Pr[\tilde{L}_{k,n} = 1] = 1 - \sum_{l'=2}^L \Pr[\tilde{L}_{k,n} = l'].$$

[0066]

[0067] 수학식 12에서 $\Pr[n \in \mathcal{N}_k | L_{k,n} = l]$ 은 부채널 n 의 피드백 메트릭 $x_{k,n}$ 에 의존한다. $x_{k,n}$ 이 수학식 7에 의하여 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 에 의존하기 때문에, $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 을 계산하는 과정에 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 자신이 참조된다. 자기 참조(Self-

referencing)로 인한 문제를 피하기 위하여 다음의 수학적 식 13과 같이 근사화하고, 근사화된 $x_{k,n}$ 을 이용하여 분석을 수행한다.

수학적 식 13

$$x_{k,n} \approx w_{k,n} \frac{F_{k,n}(l)^{1/w_{k,n}} - F_{k,n}(l-1)^{1/w_{k,n}}}{F_{k,n}(l) - F_{k,n}(l-1)}$$

[0068]

[0069] 근사화의 정당성은 다음과 같이 설명될 수 있다. 첫 째로, 기회적 스케줄러를 채택한 시스템에서는, 성능은 높은 MCS 레벨(즉, l 의 값이 큰 경우)에서의 동작에 의존한다. 두 번째로, l 의 값이 큰 경우 수학적 식 7과 13 사이의 차이점은 $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 과 $F_{k,n}(l)$ 사이의 차이는 매우 작기 때문에 무시할 수 있다. (극단적으로, $l = L$ 인 경우, $\tilde{F}_{k,n}(L) = 1$ 및 $F_{k,n}(L) = 1$ 이기 때문에, $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 과 $F_{k,n}(l)$ 의 차이는 0이다.) 따라서, 분석에 있어서, 수학적 식 13에서의 근사화에 의하여 야기되는 부정확함은 무시할 수 있을 정도로 작다.

[0070] 더불어 분석을 간단화하기 위하여, '연속' 기법으로 볼리우는 가상 피드백 기법을 채택한다. '연속' 기법은 SPP-SF 기법을 다음과 같이 에뮬레이트한다. $L_{k,n} = l$ 일 때, 단말 k 가 먼저 $[F_{k,n}(l-1), F_{k,n}(l))$ 사이에서 균등 램덤 변수 $Y_{k,n}$ 을 생성하고, $Y_{k,n}$ 을 피드백 메트릭 $Y_{k,n}^{1/w_{k,n}-1}$ 으로 변환한다. 그 후, $Y_{k,n}^{1/w_{k,n}-1}$ 의 관점에서 최고의 부채널 M 개를 선택함에 의하여 $\mathcal{N}_k$ (즉, 단말 k 에 의하여 보고될 부채널의 집합)를 구성한다. 다음의 두 가지 명제는 이의 가상 기법이 SPP-SF 기법의 에뮬레이션이라는 것을 지지한다.

[0071] <명제 1>

[0072] 하기의 가정하에서, $L_{k,n} = l$ 인 경우에, $Y_{k,n}^{1/w_{k,n}-1}$ 는 $L \rightarrow \infty$ 에서 $F_{k,n}(l)^{1/w_{k,n}-1}$ 로 수렴한다.

[0073] i) $G_{k,n}$ 의 누적 밀도 함수(CDF; Cumulative Density Function)인 $H_{k,n}(g) \equiv \Pr[G_{k,n} \leq g]$ 는 미분 가능하다. ii) MCS 레벨의 개수는 충분히 커서, SINR 임계치들이 연속적이다. (즉, $t(l) - t(l-1) \rightarrow 0, \forall l, \text{ as } L \rightarrow \infty$)

[0074] 이를 증명하기 위하여, 먼저, $F_{k,n}(l-1) = a - \Delta a$, $F_{k,n}(l) = a$ 라고 놓으면, 다음의 수학적 식 14를 얻을 수 있다.

수학적 식 14

$$\Delta a = F_{k,n}(l) - F_{k,n}(l-1) = H_{k,n}(t(l)) - H_{k,n}(t(l-1))$$

[0075]

[0076] 여기서, 두 번째 등호는 수학적 식 1에 의하여 구하여 진다. $t(l) - t(l-1) \rightarrow 0$ 이고, $H_{k,n}(g)$ 는 연속 함수이므로, $L \rightarrow \infty$ 에서 $\Delta a \rightarrow 0$ 을 얻을 수 있다.

[0077] 다음으로, $\Delta a \rightarrow 0$ 이면 $Y_{k,n} \rightarrow a$ 를 확률로 증명한다. 동일하게, 임의의 $\epsilon > 0$ 및 $\delta > 0$ 에 대해서도 $\Delta a < \Delta a_{\epsilon,\delta}$ 이기만 하면 $\Pr[|Y_{k,n} - a| > \epsilon] < \delta$ 를 만족하게 하는 $\Delta a_{\epsilon,\delta}$ 가 존재함을 증명하면 된다.

[0078] $Y_{k,n}$ 의 정의에 의하여, 다음의 수학적 식 15를 구할 수 있다.

수학식 15

$$\Pr[|Y_{k,n} - a| > \epsilon] = \begin{cases} 1 - \frac{\epsilon}{\Delta a}, & \text{if } \epsilon < \Delta a \\ 0, & \text{if } \epsilon \geq \Delta a \end{cases}$$

[0079]

[0080] 이와 같이, $\Delta a_{\epsilon, \delta} = \epsilon$ 으로 선택하면, 모든 $\Delta a < \Delta a_{\epsilon, \delta}$ 에서 $\Pr[|Y_{k,n} - a| > \epsilon] < \delta$ 조건을 만족한다. 따라서, $\Delta a \rightarrow 0$ 에서 $Y_{k,n} \rightarrow a$ 이기 때문에, $\Delta a \rightarrow 0$ 에서 $Y_{k,n}^{1/w_{k,n}-1}$ 는 $F_{k,n}(l)^{1/w_{k,n}-1}$ 로 수렴한다.

[0081] <명제 2>

[0082] 명제 1과 같은 가정 하에서, $L_{k,n} = l$ 인 경우에, $x_{k,n}$ 은 $L \rightarrow \infty$ 에서 $F_{k,n}(l)^{1/w_{k,n}-1}$ 로 수렴한다.

[0083] 이를 증명하기 위하여, $F_{k,n}(l-1) = a - \Delta a$, $F_{k,n}(l) = a$ 라고 놓는다. 명제 1의 증명과 같은 방법으로 $\Delta a \rightarrow 0$ 임을 얻는다. 수학식 13에 의하여 우리는 다음의 수학식 16을 얻을 수 있다.

수학식 16

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta a \rightarrow 0} x_{k,n} &= \lim_{\Delta a \rightarrow 0} w_{k,n} \frac{F_{k,n}(l)^{1/w_{k,n}} - F_{k,n}(l-1)^{1/w_{k,n}}}{F_{k,n}(l) - F_{k,n}(l-1)} \\ &= \lim_{\Delta a \rightarrow 0} w_{k,n} \frac{a^{1/w_{k,n}} - (a - \Delta a)^{1/w_{k,n}}}{a - (a - \Delta a)} \\ &= a^{1/w_{k,n}-1} = F_{k,n}(l)^{1/w_{k,n}-1}. \end{aligned}$$

[0084]

[0085] 명제 1 및 2는 MCS 레벨의 개수가 SINR 임계치들이 연속적이 되도록 충분히 큰 경우, '연속' 기법과 SPP-SF 기법은 동일한 피드백 메트릭을 생성하고, 동일한 성능을 보인다. 이에 의하여, '연속' 기법의 성능을 분석하여, SPP-SF 기법의 근사화 성능 결과 값을 얻는다.

[0086] 연속 기법의 피드백 메트릭 생성 규칙으로부터, 수학식 12를 $\Pr[n \in \mathcal{N}_k | L_{k,n} = l]$ 에 대하여 다시 작성하면, 다음의 수학식 17을 얻을 수 있다.

수학식 17

$$\begin{aligned} \Pr[n \in \mathcal{N}_k | L_{k,n} = l] &= \int_{F_{k,n}(l-1)}^{F_{k,n}(l)} \Pr[n \in \mathcal{N}_k | Y_{k,n} = y, L_{k,n} = l] f_{Y_{k,n} | L_{k,n}}(y|l) dy \\ &= \frac{1}{F_{k,n}(l) - F_{k,n}(l-1)} \int_{F_{k,n}(l-1)}^{F_{k,n}(l)} \Pr[n \in \mathcal{N}_k | Y_{k,n} = y] dy, \end{aligned}$$

[0087]

[0088] 여기서, $f_{Y_{k,n} | L_{k,n}}(y|l)$ 은 $L_{k,n} = l$ 에서, $Y_{k,n}$ 의 조건부 확률 밀도 함수(PDF; Probability Density Function)이다. 수학식 17을 $\Pr[n \in \mathcal{N}_k | Y_{k,n} = y]$ 에 대하여 정리하면, 다음의 수학식 18을 얻을 수 있다.

수학식 18

$$\begin{aligned}
 \Pr[n \in \mathcal{N}_k | Y_{k,n} = y] &= \sum_{i=1}^M \Pr[n = \pi_k^{(i)} | Y_{k,n} = y] \\
 &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J^{(i)}} \Pr \left[Y_{k,n'}^{1/w_{k,n'}-1} \leq y^{1/w_{k,n}-1} \quad \forall n' \in \theta_n^{(i,j)}, \right. \\
 &\quad \left. Y_{k,n'}^{1/w_{k,n'}-1} > y^{1/w_{k,n}-1} \quad \forall n' \in \mathcal{N} - \{n\} - \theta_n^{(i,j)} \right] \\
 &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J^{(i)}} \prod_{n' \in \theta_n^{(i,j)}} \Pr \left[Y_{k,n'} \leq y^{\frac{w_{k,n'}(1-w_{k,n})}{w_{k,n}(1-w_{k,n'})}} \right] \prod_{n' \in \mathcal{N} - \{n\} - \theta_n^{(i,j)}} \left(1 - \Pr \left[Y_{k,n'} \leq y^{\frac{w_{k,n'}(1-w_{k,n})}{w_{k,n}(1-w_{k,n'})}} \right] \right)
 \end{aligned}$$

[0089]

여기서, $J^{(i)} \equiv (N-1)!/((N-i)!(i-1)!)$ 은 집합 $\mathcal{N} - \{n\}$ 의 $(N-i)$ - 부분집합의 개수를 의미하고,

$\theta_n^{(i,j)}$ 는 j 번째 부분 집합을 의미한다. $z = y^{\frac{w_{k,n'}(1-w_{k,n})}{w_{k,n}(1-w_{k,n'})}}$ 와 같이 치환하면, $\Pr[Y_{k,n'} \leq z]$ 는 다음의 수학식 19로 정리된다.

수학식 19

$$\Pr[Y_{k,n'} \leq z] = \sum_{l=1}^L \Pr[Y_{k,n'} \leq z | L_{k,n'} = l] \Pr[L_{k,n'} = l]$$

[0091]

$Y_{k,n'}$ 의 정의로부터, $\Pr[Y_{k,n'} \leq z | L_{k,n'} = l]$ 는 다음의 수학식 20과 같이 표현된다.

수학식 20

$$\Pr[Y_{k,n'} \leq z | L_{k,n'} = l] = \begin{cases} 0, & z < F_{k,n'}(l-1) \\ \frac{z - F_{k,n'}(l-1)}{F_{k,n'}(l) - F_{k,n'}(l-1)}, & F_{k,n'}(l-1) \leq z < F_{k,n'}(l) \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0093]

수학식 20을 수학식 19에 대입함에 의하여 다음의 수학식 21을 얻는다.

수학식 21

$$\Pr[Y_{k,n'} \leq z] = z$$

[0095]

이제 상기의 결과의 조합에 의하여 T 를 구한다. 먼저, 수학식 21을 수학식 18에 대입하여 다음의 수학식 22를 얻는다.

[0096]

수학식 22

$$\Pr[n \in \mathcal{N}_k | Y_{k,n} = y] = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J^{(i)}} \prod_{n' \in \theta_n^{(i,j)}} y^{\frac{w_{k,n'}(1-w_{k,n})}{w_{k,n}(1-w_{k,n'})}} \prod_{n' \in \mathcal{N} - \{n\} - \theta_n^{(i,j)}} \left(1 - y^{\frac{w_{k,n'}(1-w_{k,n})}{w_{k,n}(1-w_{k,n'})}} \right)$$

[0097]

[0098] 다음으로, 수학식 22에 수학식 16을 대입하여 $\Pr[n \in \mathcal{N}_k | L_{k,n} = l]$ 을 얻고, 이를 수학식 12에 대입하여 $\Pr[\tilde{L}_{k,n} = l]$ 을 얻는다. 그리고, $\Pr[\tilde{L}_{k,n} = l]$ 으로부터, $\tilde{F}_{k,n}(l)$ 을 구하고, 이를 수학식 6에 대입하여, 마지막으로 T 를 얻는다.

[0099] B. 적은 계산량으로 T 의 하계(Lower bound)를 얻는 방법

[0100] 수학식 22의 계산은 N 의 값이 특히 큰 경우 매우 복잡하다. 그래서, 본 섹션에서는 T 보다 적게 복잡한 계산에 의하여 하계(Lower bound)를 구하는 방법을 설명한다.

[0101] 수학식 22의 단순화를 위하여, SPP-SF 기법의 동작을 에뮬레이트 하는 다른 가상 피드백 기법을 채택한다. 매 타임 슬롯 마다, 단말 k 는 전체 N 개의 부채널을 크기 N/M 로 M 개의 부채널로 무작위로 분할한다. (설명의 편의를 위하여, M 이 N 의 약수인 것을 가정하였다. M 이 N 의 약수가 아닌 경우에는, 하계(Lower bound)를 얻기 위하여 N/M 대신에 $\lfloor N/M \rfloor$ 를 사용한다. 여기서, $\lfloor N/M \rfloor$ 은 N/M 과 동일하거나 더 작은 가장 큰 정수이다.) 그 다음에, 단말 k 는 $Y_{k,n}^{1/w_{k,n}-1}$ 이 가장 큰 한 개의 부채널을 선택함에 의하여 $\mathcal{N}_k$ 를 형성한다. 이러한, '분할' 기법은 더 낮은 자유도를 갖기 때문에, SPP-SF 기법보다 낮은 성능을 낸다. 그러므로, '분할' 기법의 성능을 분석하여 SPP-SF 성능의 하계(Lower bound)로 간주한다. 그러나, 이러한 하계(Lower bound)가 본 발명에 따른 SPP-SF 기법의 성능에 꽤 근접하는 것은 수치 결과에서 명백해진다.

[0102] '분할' 기법의 피드백 매트릭 생성 규칙으로부터 수학식 22를 다음과 같이 재작성 할 수 있다.

수학식 23

$$\Pr[n \in \mathcal{N}_k | Y_{k,n} = y] = \prod_{n' \in \lambda_n - \{n\}} y^{\frac{w_{k,n'}(1-w_{k,n})}{w_{k,n}(1-w_{k,n'})}} = y^{\bar{w}_{k,n}}$$

[0103]

[0104] 여기서, λ_n 은 부채널 n 이 속한 그룹을 의미한다. 그리고, $\bar{w}_{k,n}$ 은 다음의 수학식 24에 의하여 정의되는 보조 변수이다.

수학식 24

$$\bar{w}_{k,n} \equiv \frac{1 - w_{k,n}}{w_{k,n}} \sum_{n' \in \lambda_n - \{n\}} \frac{w_{k,n'}}{1 - w_{k,n'}}$$

[0105]

[0106] λ_n 이 무작위 방식으로 생성되기 때문에, $\bar{w}_{k,n}$ 은 분석을 복잡하게 하는 랜덤 변수이다. 그러나, $N/M \gg 1$ 의 조건에서, 다음의 프로세스를 통하여 $\bar{w}_{k,n}$ 을 결정 변수로 근사화할 수 있다. $\mathcal{N} - \{n\}$ 을 모 집단(Population)

으로 간주하고, $\lambda_n - \{n\}$ 을 모 집단으로부터 추출된 $N/M - 1$ 개의 비복원 단순 무작위 샘플(Simple random sample without replacement)로 간주할 수 있다. $w_{k,n'}/(1 - w_{k,n'})$ 의 표본 평균을 D 로 나타내면, D , D 의 평균 $E[D]$, 및 D 의 분산 $V[D]$ 는 다음의 수학적 식 25와 같다.

수학적 식 25

$$D = \frac{1}{N/M - 1} \sum_{n' \in \lambda_n - \{n\}} \frac{w_{k,n'}}{1 - w_{k,n'}},$$

$$E[D] = \mu = \frac{1}{N - 1} \sum_{n' \neq n} \frac{w_{k,n'}}{1 - w_{k,n'}},$$

$$V[D] = \frac{\sigma^2}{|\lambda_n - \{n\}|} \cdot \frac{|\mathcal{N} - \{n\}| - |\lambda_n - \{n\}|}{|\mathcal{N} - \{n\}| - 1} = \frac{\sigma^2 N(M - 1)}{(N - M)(N - 2)}$$

[0107]

(이 때, $|\mathcal{A}|$ 는 집합 $\mathcal{A}$ 의 cardinality이다.)

[0108]

여기서, μ 는 모 평균(Population mean)을 의미하고, σ^2 은 모 분산(Population variance)을 의미한다. $N/M \gg 1$ 이면, $V[D] \approx 0$ 이므로, $D \approx E[D]$ 로 근사화할 수 있다. 즉, 다음의 수학적 식 26과 같다.

수학적 식 26

$$D = \frac{1}{N/M - 1} \sum_{n' \in \lambda_n - \{n\}} \frac{w_{k,n'}}{1 - w_{k,n'}} \approx \frac{1}{N - 1} \sum_{n' \neq n} \frac{w_{k,n'}}{1 - w_{k,n'}} = E[D]$$

[0110]

수학적 식 26을 변형하여, 수학적 식 24에 대입하면, 다음의 수학적 식 27과 같은 결정 변수 $\bar{w}_{k,n}$ 을 얻는다.

수학적 식 27

$$\bar{w}_{k,n} \approx \frac{1 - w_{k,n}}{w_{k,n}} \cdot \frac{N/M - 1}{N - 1} \sum_{n' \neq n} \frac{w_{k,n'}}{1 - w_{k,n'}}$$

[0112]

이제 수학적 식 23을 수학적 식 17에 대입함에 의하여 다음의 수학적 식 28을 얻는다.

수학적 식 28

$$\Pr[n \in \mathcal{N}_k | L_{k,n} = l]$$

$$= \frac{1}{F_{k,n}(l) - F_{k,n}(l - 1)} \int_{F_{k,n}(l-1)}^{F_{k,n}(l)} y^{\bar{w}_{k,n}} dy$$

$$= \frac{1}{\bar{w}_{k,n} + 1} \cdot \frac{F_{k,n}(l)^{\bar{w}_{k,n}+1} - F_{k,n}(l - 1)^{\bar{w}_{k,n}+1}}{F_{k,n}(l) - F_{k,n}(l - 1)}$$

[0114]

[0115] 그리고, 수학식 28을 수학식 12에 대입함에 의하여 다음의 수학식 29을 얻는다.

수학식 29

$$\Pr[\tilde{L}_{k,n} = l] = \frac{F_{k,n}(l)^{\bar{w}_{k,n}+1} - F_{k,n}(l-1)^{\bar{w}_{k,n}+1}}{\bar{w}_{k,n} + 1}, \quad 2 \leq l \leq L$$

$$\Pr[\tilde{L}_{k,n} = 1] = 1 - \sum_{l'=2}^L \Pr[\tilde{L}_{k,n} = l'].$$

[0116]

[0117] T 를 계산하기 위한 나머지 과정은 섹션 A에 설명된 과정과 같다.

[0118] 모든 가중 팩터(Weighting factor)가 동일한 특수한 경우(즉, $w_{k,n} = 1/K, \forall k, \forall n$), 수학식 29에서 $\Pr[\tilde{L}_{k,n} = l]$ 은 더욱 단순화될 수 있다. 이와 같은 경우, 수학식 27에 의하여 다음의 수학식 30을 얻을 수 있다.

수학식 30

$$\bar{w}_{k,n} = \frac{N}{M} - 1$$

[0119]

[0120] 그리고, 수학식 30을 수학식 29에 대입하여 다음의 수학식 31을 얻는다.

수학식 31

$$\Pr[\tilde{L}_{k,n} = l] = \frac{F_{k,n}(l)^{N/M} - F_{k,n}(l-1)^{N/M}}{N/M}, \quad 2 \leq l \leq L$$

$$\Pr[\tilde{L}_{k,n} = 1] = 1 - \sum_{l'=2}^L \Pr[\tilde{L}_{k,n} = l'].$$

[0121]

[0122] T 를 계산하기 위한 나머지 과정은 섹션 A에 설명된 과정과 같다.

[0123] 동일 가중 팩터(Identical weighting factor)를 사용하는 CS 알고리즘은 PF(Proportional fair) 스케줄러와 유사한 스케줄링 결과를 산출하기 때문에, 수학식 31에서 파생되는 결과값 T 를 PF 스케줄러가 채택된 시스템에서 SPP-SF 기법의 근사화 성능으로 간주할 수 있다.

[0124] C. 연역적 지식이 없는 경우의 확장

[0125] 지금까지 $F_{k,n}(l)$ 이 연역적으로 주어진 가정하에 T 의 계산에 의하여 최적의 M 을 결정하는 방법에 대하여 설명하였다. SPP-SF 기법은 $F_{k,n}(l)$ 이 기지국에서 연역적으로 활용 가능하지 않은 경우로 확장될 수 있다. 확장된 SPP-SF 기법의 과정은 하기의 내용을 제외하고는 섹션 3에 설명된 것과 유사하다.

[0126] 모든 $S_1(> 1)$ 슬롯들에서, 각 단말은 모든 부채널의 실제 MCS 레벨을 전송한다. 그 다음에 기지국은 수학식 4에 설명된 것과 같은 방법으로 해당 슬롯들에서 $\tilde{l}_{k,n}$ 을 리코딩(Recording)하는 것에 의하여 $F_{k,n}(l)$ 을 추정한다. 해

당 슬롯들에서 모든 k 및 n 에 대하여 $\tilde{l}_{k,n} = l_{k,n}$ 이기 때문에, 추정된 CMF는 대수의 법칙(Law of large number s)에 의하여 거의 확실하게 실제의 $F_{k,n}(l)$ 으로 수렴한다.

[0127] 모든 $S_2(> S_1)$ 슬롯들에서 기지국은 섹션 A 및 B에 설명된 과정으로 추정된 $F_{k,n}(l)$ 에 기초하여 최적의 M 을 결정하고, 그 것을 단말들에 브로드캐스트한다. 확장된 SPP-SF 기법은 오리지널의 것보다 더 큰 피드백 부하가 요구된다. 그러나, S_1 을 크게 설정한다면, 그 증가는 매우 작을 것이다.

[0128] 이하에서는, 본 발명에 따른 SPP-SF 기법에 의하여 기회적 스케줄링이 진행된 경우의 다중 사용자 다이버시티(Multiuser diversity)를 분석한다.

[0129] SPP-SF 기법을 사용함에 의하여 채널 상태 정보가 피드백 되는 경우에 기회적 스케줄링에 의하여 얻을 수 있는 다중 사용자 다이버시티를 분석한다. 그리고, 분석을 위하여 다음을 가정한다.

[0130] i) $K \rightarrow \infty$

[0131] ii) $w_{k,n} = 1/K, \forall k, \forall n$

[0132] iii) $H_{k,n}(g)$ 는 미분 가능하고, 절대적으로 증가하는 함수이다.

[0133] iv) $t(l) - t(l-1) \rightarrow 0, \forall l, \text{ as } L \rightarrow \infty$

[0134] 또한, 다음과 같이 CS 알고리즘의 스케줄링 과정 2)를 수정한다. 기지국은 $[\tilde{F}_{k,n}(\tilde{l}_{k,n}-1), \tilde{F}_{k,n}(\tilde{l}_{k,n})]$ 대신에 $[F_{k,n}(\tilde{l}_{k,n}-1), F_{k,n}(\tilde{l}_{k,n})]$ 사이에서 균등 램덤 변수 $U_{k,n}$ 을 생성한다. (이러한 수정은 분석에서 부정확함을 야기할 수 있지만, 이는 섹션 A에서 다루어진 바와 같이 무시할 수 있는 정도이다.) 그 다음에, 기지국은 $U_{k,n}$ 을 스케줄링 메트릭 $U_{k,n}^{1/w_{k,n}}$ 으로 변환한다.

[0135] <명제 3>

[0136] SPP-SF 기법을 채택한 시스템에서 CS 알고리즘은 상기의 가정 및 수정 하에, $\forall k \in \mathcal{K}$ 인 단말 중에서 $H_{k,n}(g_{k,n})$ 이 가장 큰 단말을 선택한다. 즉, 다음의 수학적 식 32와 같다.

수학적 식 32

[0137]
$$\arg \max_{k \in \mathcal{K}} U_{k,n}^{1/w_{k,n}} = \arg \max_{k \in \mathcal{K}_n} H_{k,n}(g_{k,n})$$

[0138] 여기서, $\mathcal{K}_n$ 은 부채널 n 의 MCS 레벨을 보고한 단말들의 집합을 의미한다. 이는 다음의 3 가지 단계에 의하여 해당 명제를 증명할 수 있다.

[0139] 단계 1 : $\forall k \in \mathcal{K}$ 인 단말 중에서 최적의 단말을 선택하는 스케줄러와 $\forall k \in \mathcal{K}_n$ 인 단말 중에서 최적의 단말을 선택하는 스케줄러와 동등하다. 즉, 다음의 수학적 식 33과 같다.

수학식 33

[0140]
$$\arg \max_{k \in \mathcal{K}} U_{k,n}^{1/w_{k,n}} = \arg \max_{k \in \mathcal{K}_n} U_{k,n}^{1/w_{k,n}}$$

[0141] 단계 2 : 스케줄링 메트릭 $U_{k,n}^{1/w_{k,n}}$ 을 이용한 스케줄러와 스케줄링 메트릭 $U_{k,n}$ 을 이용한 스케줄러와 동등하다. 즉, 다음의 수학식 34와 같다.

수학식 34

[0142]
$$\arg \max_{k \in \mathcal{K}_n} U_{k,n}^{1/w_{k,n}} = \arg \max_{k \in \mathcal{K}_n} U_{k,n}$$

[0143] 단계 3 : $L \rightarrow \infty$ 의 조건에서, $\forall k \in \mathcal{K}_n, U_{k,n} \rightarrow H_{k,n}(g_{k,n})$ 이다.

[0144] 상기의 i)의 가정에 의하여, $K \rightarrow \infty$ 에서 $\Pr[|\mathcal{K}_n| = 0] \rightarrow 0$ 을 얻을 수 있다. 스케줄러는 $|\mathcal{K}_n| = 0$ 경우 외에는 부채널 n 을 단말 $k \notin \mathcal{K}_n$ 에 할당하지 않기 때문에, 단계 1에서의 전자 및 후자의 스케줄러가 동등하다는 것은 명백하다. 단계 2는 ii)의 가정에 의하여 증명된다.

[0145] 이제 단계 3을 증명한다. $k \in \mathcal{K}_n$ 이기 때문에, $\tilde{l}_{k,n} = l_{k,n}$ 인 것은 명백하다. 이와 같은 점 및 CS 알고리즘의 수 정된 스케줄링 과정에 의하여, $[F_{k,n}(\tilde{l}_{k,n} - 1), F_{k,n}(\tilde{l}_{k,n})]$ 사이에서, $U_{k,n}$ 은 균등 랜덤 변수이다. 명제 1의 증명 과 같은 방법으로 $L \rightarrow \infty$ 에서, 확률적으로 $U_{k,n} \rightarrow F_{k,n}(l_{k,n}) = H_{k,n}(t(l_{k,n}))$ 을 얻을 수 있다. iv)의 가정에 의하여 $L \rightarrow \infty$ 에서 $t(l_{k,n}) \rightarrow g_{k,n}$ 인 것은 명백하다. 따라서, $L \rightarrow \infty$ 에서 확률적으로 $U_{k,n} \rightarrow H_{k,n}(g_{k,n})$ 이라고 결론을 낼 수 있다.

[0146] 명제 3에 기대어, $\forall k \in \mathcal{K}_n$ 인 단말 중에서 $H_{k,n}(g_{k,n})$ 이 가장 큰 단말을 선택하는 스케줄러를 이용하여 분석 을 수행한다. SPP-SF 기법의 다중 사용자 다이버시티를 분석하기에 앞서, 먼저, 단말이 모든 부채널의 MCS 레벨 을 피드백하는 풀-피드백(Full-feedback) 기법을 분석한다.

[0147] 풀-피드백 기법은 SPP-SF 기법에 있어서, $\mathcal{K}_n = \mathcal{K}$ 인 경우와 같기 때문에, 선택된 단말의 스케줄링 메트릭 $H_{k_n^*,n}^{\text{Full}}(g_{k_n^*,n})$ 은 다음의 수학식 35에 의하여 주어진다.

수학식 35

[0148]
$$H_{k_n^*,n}^{\text{Full}}(g_{k_n^*,n}) = \max_{k \in \mathcal{K}} H_{k,n}(g_{k,n})$$

[0149] 그러면, $H_{k_n^*,n}^{\text{Full}}(g_{k_n^*,n})$ 의 누적 밀도 함수(CDF; Cumulative Density Function)는 다음의 수학식 36과 같다.

수학식 36

$$\begin{aligned} \Pr[H_{k_n^*,n}^{\text{Full}}(G_{k_n^*,n}) \leq q] &= \Pr\left[\max_{k \in \mathcal{K}} H_{k,n}(G_{k,n}) \leq q\right] \\ &= \prod_{k \in \mathcal{K}} \Pr[H_{k,n}(G_{k,n}) \leq q] = \prod_{k \in \mathcal{K}} \Pr[G_{k,n} \leq H_{k,n}^{-1}(q)] \\ &= \prod_{k \in \mathcal{K}} H_{k,n}(H_{k,n}^{-1}(q)) = q^K, \quad 0 \leq q \leq 1. \end{aligned}$$

[0150]

[0151] 여기서, 두 번째 등호는 각 부채널이 독립적이기 때문에 유효하다. 수학식 36으로부터, 선택된 단말의 스케줄링 메트릭이 임계값을 초과하지 않을 확률이 K 에 따라 지수적으로 감소하므로 K 는 다중 사용자 다이버시티 차수로 고려될 수 있다.

[0152] 이제, SPP-SF 기법의 다중 사용자 다이버시티를 분석한다. 선택된 단말의 스케줄링 메트릭 $H_{k_n^*,n}^{\text{SPP}}(g_{k_n^*,n})$ 은 다음과 같다.

수학식 37

$$H_{k_n^*,n}^{\text{SPP}}(g_{k_n^*,n}) = \max_{k \in \mathcal{K}_n} H_{k,n}(g_{k,n})$$

[0153]

[0154] 그 다음에, $H_{k_n^*,n}^{\text{SPP}}(g_{k_n^*,n})$ 의 누적 밀도 함수(CDF; Cumulative Density Function)는 다음의 수학식 38과 같다.

수학식 38

$$\begin{aligned} \Pr[H_{k_n^*,n}^{\text{SPP}}(G_{k_n^*,n}) \leq q] &= \Pr\left[\max_{k \in \mathcal{K}_n} H_{k,n}(G_{k,n}) \leq q\right] \\ &= \prod_{k \in \mathcal{K}_n} \Pr[H_{k,n}(G_{k,n}) \leq q | k \in \mathcal{K}_n] = \prod_{k \in \mathcal{K}_n} \Pr[H_{k,n}(G_{k,n}) \leq q | n \in \mathcal{N}_k] \\ &= \prod_{k \in \mathcal{K}_n} \frac{\Pr[n \in \mathcal{N}_k, G_{k,n} \leq H_{k,n}^{-1}(q)]}{\Pr[n \in \mathcal{N}_k]} \\ &= \prod_{k \in \mathcal{K}_n} \frac{1}{\Pr[n \in \mathcal{N}_k]} \int_0^{H_{k,n}^{-1}(q)} \Pr[n \in \mathcal{N}_k | G_{k,n} = g] f_{G_{k,n}}(g) dg, \quad 0 \leq q \leq 1 \end{aligned}$$

[0155]

[0156] 여기서, $f_{G_{k,n}}(g)$ 는 $G_{k,n}$ 의 확률 밀도 함수(PDF)이다. 그리고, 수학식 38을 $\Pr[n \in \mathcal{N}_k]$ 에 대해서 정리하면, 다음과 같다.

수학식 39

$$\begin{aligned}\Pr[n \in \mathcal{N}_k] &= \sum_{l=1}^L \Pr[n \in \mathcal{N}_k | L_{k,n} = l] \Pr[L_{k,n} = l] \\ &= \frac{1}{\bar{w}_{k,n} + 1} = \frac{M}{N},\end{aligned}$$

[0157]

이 때, 두 번째 등호 및 마지막 등호는 각각 수학식 28 및 수학식 30에 의하여 유도된다. 수학식 38을 $\Pr[n \in \mathcal{N}_k | G_{k,n} = g]$ 에 대해서 정리하면, 다음의 수학식 40을 얻을 수 있다.

수학식 40

$$\begin{aligned}\Pr[n \in \mathcal{N}_k | G_{k,n} = g] &= \Pr[n \in \mathcal{N}_k | L_{k,n} = l] \quad (l \text{ s.t. } g \in [t(l-1), t(l))) \\ &= \frac{1}{N/M} \cdot \frac{F_{k,n}(l)^{N/M} - F_{k,n}(l-1)^{N/M}}{F_{k,n}(l) - F_{k,n}(l-1)} \\ &= F_{k,n}(l)^{N/M-1} = H_{k,n}(g)^{N/M-1}\end{aligned}$$

[0159]

이 때, 두 번째 등호는 수학식 28 및 30에 의하여 유도된다. 세 번째 등호는 명제 2의 증명과 같은 과정을 통해 성립한다. 그리고, 마지막 등호는 명제 3의 단계 3과 같은 과정을 통해 성립한다.

그 다음에 수학식 39 및 수학식 40을 수학식 38에 대입하여 다음의 수학식 41을 얻는다.

수학식 41

$$\begin{aligned}\Pr[H_{k_n^*, n}^{\text{SPP}}(G_{k_n^*, n}) \leq q] &= \prod_{k \in \mathcal{K}_n} \frac{N}{M} \int_0^{H_{k,n}^{-1}(q)} H_{k,n}(g)^{N/M-1} f_{G_{k,n}}(g) dg \\ &= \prod_{k \in \mathcal{K}_n} H_{k,n}(H_{k,n}^{-1}(q))^{N/M} = \prod_{k \in \mathcal{K}_n} q^{N/M}, \quad 0 \leq q \leq 1\end{aligned}$$

[0162]

<명제 4>

SPP-SF 기법에서, $K \rightarrow \infty$ 이면, $|\mathcal{K}_n| \rightarrow KM/N$ 이다.

이를 증명하기 위하여, 단말 k 가 $\mathcal{K}_n$ 에 속하는지를 나타내는 랜덤 변수 $Z_{k,n}$ 를 다음의 수학식 42와 같이 정의한다.

수학식 42

$$Z_{k,n} = \begin{cases} 1, & \text{if } k \in \mathcal{K}_n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

[0166]

[0167] 대수의 약법칙 (weak law of large numbers)에 의하여, 다음을 얻는다.

수학식 43

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K Z_{k,n} \rightarrow E[Z_{k,n}] \text{ in probability as } K \rightarrow \infty$$

[0168]

[0169] 수학식 43은 $Z_{k,n}$ 의 정의에 의하여 다음과 정리할 수 있다.

수학식 44

$$\frac{1}{K} |\mathcal{K}_n| \rightarrow \frac{M}{N} \text{ in probability as } K \rightarrow \infty$$

[0170]

[0171] 명제 4에 의하여 $|\mathcal{K}_n| \approx KM/N$ 와 같이 근사화할 수 있다. 따라서, 수학식 41을 $\Pr[H_{k_n^*,n}^{\text{SPP}}(G_{k_n^*,n}) \leq q]$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

수학식 45

$$\begin{aligned} \Pr[H_{k_n^*,n}^{\text{SPP}}(G_{k_n^*,n}) \leq q] &= \prod_{k \in \mathcal{K}_n} q^{N/M} \\ &= (q^{N/M})^{KM/N} = q^K, \quad 0 \leq q \leq 1 \end{aligned}$$

[0172]

[0173] 상기에서 설명한 바와 같이, SPP-SF 기법의 다중 사용자 다이버시티는 단말의 개수가 매우 많을 때에는 M 에 의존적이지 않다. 다중 사용자 다이버시티는 T^{data} 를 결정하는 주요 요소이기 때문에, SPP-SF 기법의 T^{data} 는 K 가 큰 경우 M 에 의존적이지 않다. 반면, τ^{data} 는 M 에 대하여 순감소함수(Strictly decreasing function)이다. 그러므로, K 가 증가함에 따라 $T = \tau^{\text{data}} T^{\text{data}} / \tau$ 를 최대화하는 최적의 M 값은 감소한다.

[0174] 이하에서는, 본 발명에 따른 피드백 기법과 비교예에 따른 피드백 기법의 성능을 비교한다.

[0175] 도 4는 OFDMA 하향링크 시스템에서, 본 발명에 따른 이동 통신 단말의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하기 위한 시뮬레이션 파라미터이다. 도 5는 다중 셀 구조 및 셀에 위치하는 단말의 위치의 예시를 도시한 것이다. 도 6은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말 개수의 변화에 따른 유효 전체 수율(Effective total Throughput)의 변화를 나타내는 그래프이다. 도 7은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말의 개수의 변화에 따른 기지국에 피드백 할 부채널의 개수를 보여주는 테이블이다. 도 8은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 부채널 인덱스의 개수

의 변화에 따른 부채널의 MCS 레벨을 보고한 단말들의 개수의 실험적 평균의 변화를 나타내는 그래프이다. 도 9는 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말의 개수의 변화에 따른 데이터 전송 구간 동안의 전체 수율의 변화를 나타내는 그래프이다. 도 10은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말의 개수의 변화에 따른 타임 슬롯에 대한 데이터 전송 구간의 길이의 비의 변화를 나타내는 그래프이다. 도 11은 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말 인덱스에 따른 각 단말의 유효 수율을 나타내는 그래프이다. 도 12는 본 발명에 따른 피드백 기술과 비교예에 따른 피드백 기술에 있어서, 단말의 개수의 변화에 따른 유효 전체 수율의 변화를 나타내는 그래프이다.

[0176] 하향링크 OFDMA 시스템에서 본 발명에 따른 SPP-SF 기법의 성능에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 확인하였다. 시뮬레이션 파라미터는 도 4와 같다. 도 5와 같이 총 25개의 셀을 구성하였으며, 13 번 셀에 단말들을 위치시키고, 13 번 셀에서의 성능을 관찰하였다. 도 5는 다중 셀 구조 및 K 가 15인 경우 단말의 위치의 예시를 도시한 것이다.

[0177] 다음과 같이 FFR 기법의 단순 모델을 생성하였다. 1) 13 번 셀은 40 개의 모든 부채널을 사용한다. 2) 나머지 셀들은 ρ_n 의 확률로 부채널 n 을 사용한다. 여기서, ρ_n 은 다음의 수학적 식 45에 의하여 주어지는 부채널 n 의 재사용 확률(Reuse probability)이다.

수학적 식 46

$$\rho_n = \frac{1}{3} + \frac{2(n-1)}{117}, n = 1, 2, \dots, 40$$

[0179] 채널 인덱스가 작은 부채널은 적은 수의 셀들에서 사용되며, 재사용 팩터(Reuse factor)가 높은 부채널을 모델링한다. 대조적으로, 부채널 인덱스가 높은 부채널들은 낮은 재사용 팩터(Reuse factor)에 의하여 표현된다. 따라서, 13 번 셀의 단말들은 부채널 인덱스가 낮은 부채널에서 낮은 간섭도를 느끼게 되고, 부채널 인덱스가 높은 부채널에서 높은 간섭도를 느끼게 된다. 이로 인하여 SINR의 통계적 특성이 부채널별로 상이해진다.

[0180] 모든 k 및 모든 n 에 대하여, $w_{k,n} = 1/K$ 으로 설정한다. K 의 값을 10에서 30까지 변화시키고, K 개의 단말들을 13 번 셀의 내에 무작위로 균등 분포시키고, 20 개의 단말 위치로 구성되는 시뮬레이션을 생성하였다. 상기 섹션 C에 설명된 확장된 SPP-SF 기법의 유효 총 전송량을 측정하기 위하여 각 단말 위치 설정마다 20,000 타임 슬롯의 시뮬레이션을 수행하였다.

[0181] 그리고, $\lambda = 0.99$, $S_1 = 50$, and $S_2 = 1,000$ (slot)으로 설정하였다. 성능 비교를 위하여, 일반적인 SF 기법과 풀-피드백 기법을 고려하였다. 일반적인 SF 기법에서는 각 단말은 MCS 레벨이 가장 높은 M 개의 부채널 및 해당 부채널들의 인덱스를 피드백한다. SF 기법은 SPP-SF 기법의 피드백 부하와 같은 피드백 양 $KM(B_{MCS} + B_{CH})$ 을 야기한다. 풀-피드백 기법의 경우에, 단말은 모든 부채널들의 MCS 레벨을 피드백한다. 그래서, 풀-피드백 기법의 총 피드백 부하 양은 KNB_{MCS} bit이다.

[0182] 도 6은 SPP-SF 기법과 다른 참조 기법들의 유효 총 전송량을 도시한 것이다. 본 발명에 따른 SPP-SF 기법을 위하여, 최적의 M 은 상기 섹션 B의 분석에 의하여 결정된다. 반면, 일반적인 SF 기법의 경우에는 시뮬레이션에 의하여 유효 총 전송량을 최대화하도록 결정하였다. 도 7은 각각의 기법에 의하여 결정된 M 의 값의 목록을 정리한 테이블이다. (단말 위치 설정이 달라지면 단말의 개수 K 가 같더라도 최적의 M 의 값이 달라질 수 있다. 예를 들어, K 의 값이 20일 때에, 특정 단말 위치 설정에서는 SPP-SF 기법의 최적의 M 의 값이 4이고, 다른 위치 설정에서는 5일 수 있다.) 이의 도면 및 테이블에서 다음의 결과를 관찰할 수 있다.

[0183] SPP-SF 기법은 모든 단말의 개수에 대하여 다른 비교 기법보다 나은 성능을 보인다. 풀-피드백 기법 대비 성능 향상은 데이터 전송 구간의 길이가 증가한 것에서 기인한 것이다. SF 기법 대비 성능 향상은 실제 스케줄링 확

률이 높은 부채널들을 피드백하여, 피드백의 효율을 높였기 때문이다.

[0184] SF 기법 대비 성능 향상에 대한 보다 높은 이해를 위하여 도 5에서 단말 위치 설정에 초점을 맞추어 시뮬레이션을 반복하였다. 그리고, SPP-SF 기법 및 SF 기법에서 $|K_n|$ 의 실험적 평균을 측정하였다. 도 8의 결과로부터, 일반적인 SF 기법의 경우에, $|K_n|$ 은 채널 인덱스가 낮은 부채널(즉, 높은 재사용 팩터를 갖는 부채널)에서 크게 나왔고, 채널 인덱스가 높은 부채널(즉, 낮은 재사용 팩터를 갖는 부채널)에서 낮게 나왔다. 즉, 채널 인덱스가 높은 부채널에서는 기회적 스케줄링이 효과적으로 이루어지지 않으며, 전체적인 성능이 저하된다. 반면, SPP-SF 기법의 경우에, $|K_n|$ 은 명제 4에서 설명한 바와 같이 모든 부채널에 대하여 동일하다. 따라서, 모든 SPP-SF 기법은 모든 부채널에서 기회적 스케줄링이 잘 이루어지는 것을 알 수 있다.

[0185] 그리고, 시뮬레이션에 의한 SPP-SF 성능은 섹션 B에서 구한 SPP-SF 기법의 하계(Lower bound)와 잘 맞는다.

[0186] 또한, SPP-SF 기법에서의 최적의 M 의 값은 섹션 5의 마지막 단락에서 예상한 바와 같이, 단말의 개수 K 가 증가할수록 감소한다. M 의 값을 변경하며, 시뮬레이션을 반복하여 T^{data} 에 대한 도 9의 결과 및 τ^{data}/τ 에 대한 도 10의 결과를 얻었다.

[0187] 도 9를 참조하면 T^{data} 의 경우, 인접하는 두 곡선간의 갭이 K 의 값이 적을 때 크고, K 의 값이 클 때 좁게 나타나는 것을 관찰할 수 있고, 도 10을 참조하면, τ^{data}/τ 의 경우 반대의 현상이 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

[0188] 이러한, 현상은 T^{data} 가 증가할 때 K 가 증가할수록 큰 M 의 값에 의한 효과가 감소한다. 반면, τ^{data}/τ 가 감소할 때 K 가 증가할수록 큰 M 의 값에 의한 효과가 강해진다. 따라서, SPP-SF 기법에서 최적의 M 의 값은 단말의 개수 K 가 증가할수록 감소한다.

[0189] 다음으로, 각 개인 단말별 유효 전송률을 비교하기 위하여 시뮬레이션을 반복하였다. 도 11에 그 결과가 도시된다. 도 11을 통하여 본 발명에 따른 SPP-SF 기법이 모든 각 단말의 유효 전송률을 현저히 향상시키는 것을 볼 수 있다.

[0190] 마지막으로, 서로 다른 부채널들의 통계적 특성이 동일한 경우, MCS 레벨의 순서는 스케줄링 확률의 순서와 동일하다는 의미에서 일반적인 SF 기법이 SPP-SF 기법의 특별한 케이스로 간주되는 것을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션에서, 모든 n 에 대하여 $\rho_n = 1$ 으로 설정한다. 이는 n 에 대하여 $F_{k,n}(l)$ 을 동일하게 만든다. 도 12는 유효 총 전송률의 결과값에 대한 그래프가 도시된다. 도 12를 참조하면, 상기의 특별한 케이스에 있어서, SPP-SF 기법과 일반적인 SF 기법이 동일한 성능을 갖는 것을 관찰할 수 있다.

[0191] 이하에서는 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법에 대하여 설명하도록 한다.

[0192] 도 13은 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법을 설명하기 위한 플로우차트이다.

[0193] 도 13을 참조하면, 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 방법은 먼저, 이동 통신 단말이 보유한 복수개의 부채널들 각각의 MCS 레벨을 결정한다(S110).

[0194] 그리고, 복수개의 부채널들 각각의 히스토리에 기반하여 복수개의 부채널들 각각의 통계적 채널 특성을 파악한다(S120). 이 때, 통계적 채널 특성은 각 부채널들의 MCS 레벨의 누적 질량 함수(CMF)에 기초하여 결정될 수 있다.

[0195] 그 다음, 복수개의 부채널들의 통계적 채널 특성 및 매 순간의 채널 상태를 이용하여, 복수개의 부채널들 각각을 기지국에 피드백 하였을 때 해당 채널을 기지국에서 스케줄링할 확률을 계산한다(S130).

[0196] 그리고, 계산된 스케줄링 확률이 높은 순서대로 소정 개수의 부채널들을 선정한다(S140). 이 때, 선정되는 부채널들의 소정 개수는 피드백 오버헤드를 고려한 유효 수율이 최대가 되도록 결정될 수 있다. 또한, 선정되는 부

채널들의 소정 개수는 통계적 채널 특성을 이용하여 모든 가능한 개수에 대하여 유효 수율을 계산하여 결정될 수 있다.

[0197] 단계(S140)에서 선정된 부채널들의 MCS 레벨을 기지국에 피드백한다(S150). 이 때, 선정된 부채널들의 채널 인덱스를 함께 피드백한다.

[0198] 본 발명은 OFDMA 하향링크 시스템에서 기회적 스케줄링을 위하여 필요한 피드백 부하를 감소시키는 스케줄링 확률 예측 기반 선택적 피드백 기법 즉, SPP-SF 기법을 제안하였다. SPP-SF 기법에서, 각 단말은 먼저, 각 부채널의 스케줄링 확률을 계산하고, 스케줄링 확률이 가장 큰 M 개의 부채널에 대한 MCS 레벨을 피드백한다. M 개의 부채널을 선택하는 기준으로 MCS 레벨 대신에 스케줄링 확률을 사용하는 점에서, 기존의 SF 기법과 다르다. SPP-SF 기법은 각 부채널 간의 통계적 특성이 상이한 경우를 포함한 다른 부채널 환경들에 널리 적용 가능하다. 일반적인 SF 기법은 부채널들의 통계적 특성이 동일한 경우 적용되는 SPP-SF 기법의 특별한 케이스인 것으로 판명되었다.

[0199] 그리고, 상기에서 SPP-SF 기법의 구축 및 해당 기법의 하계(Lower bound)가 완성된 솔루션과 일치하는 것을 이끌어 내기 위하여 수학적 해석을 만들었다. SPP-SF 기법의 성능을 기존의 기법과의 비교 검증 및 해당 기법의 작용을 설명하기 위하여 종합적인 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 SPP-SF 기법이 SF 기법보다 더 나은 성능을 갖는 것을 확인하였다. 이러한 성능 향상은 스케줄링 확률이 가장 높은 M 개의 부채널을 선택함에 의하여 피드백 효율이 향상되었기 때문이다.

[0200] 최적의 M 의 값을 결정하는 것은 SPP-SF 기법에서 중요한 부분이다. 최적의 M 의 값을 결정하면, 유효 전송률을 최대화할 수 있다. 분석 및 시뮬레이션에 따르면, 최적의 M 의 값은 단말의 개수가 증가할수록 감소하는 것으로 판명되었다. 이는 M 과 함께 피드백 오버헤드가 증가하지만, SPP-SF 기법에 의하여 제공된 다중 사용자 다이버시티가 큰 K 값에서 M 의 값에 의하여 영향을 받지 않기 때문에 발생하는 것이다.

[0201] SPP-SF 기법은 다양한 환경에서 실제로 적용 가능하다. 이는 서로 다른 부채널의 통계적 특성이 상이한 경우의 실제 OFDMA 시스템에 적용할 수 있다. 그리고, 본 발명은 유효 전송률을 최대화하도록 피드백 부하를 순응적으로 설정하여 단말들의 개수가 동적으로 변하는 환경에서도 잘 적응한다.

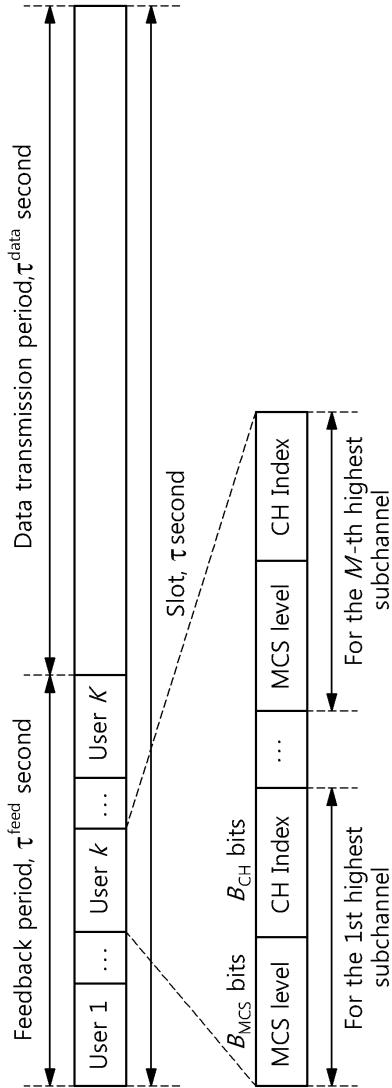
[0202] 이상에서와 같이 본 발명에 따른 채널 상태 피드백 감소를 위한 이동 통신 단말 및 방법은 상기한 바와 같이 설명된 실시예들의 구성과 방법이 한정되게 적용될 수 있는 것이 아니라, 상기 실시예들은 다양한 변형이 이루어질 수 있도록 각 실시예들의 전부 또는 일부가 선택적으로 조합되어 구성될 수도 있다.

부호의 설명

[0203] 100; 이동통신단말
110; 히스토리 기록부
120; 통계적 특성 파악부;
130; 스케줄링 확률 계산부
140; 선정부
150; 피드백부

도면

도면1

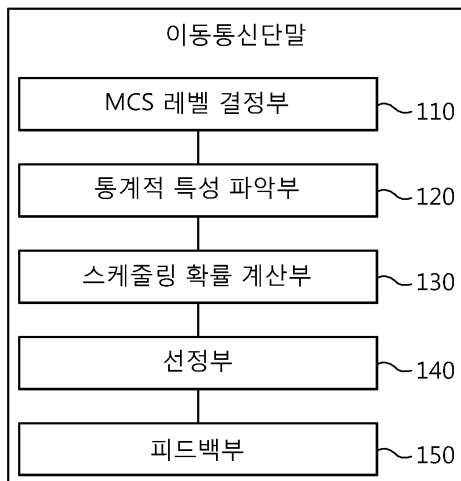


도면2

MCS level l	SINR threshold (dB)		Data rate $r(l)$ (bps/Hz)
	$t(l-1)$	$t(l)$	
1	$-\infty$	-6	0
2	-6	-3.5	0.0991
3	-3.5	-1	0.1718
4	-1	1.5	0.2926
5	1.5	4	0.4853
6	4	6.5	0.7750
7	6.5	9	1.1793
8	9	11.5	1.6999
9	11.5	14	2.3216
10	14	16.5	3.0199
11	16.5	19	3.7704
12	19	21.5	4.5539
13	21.5	24	5.3572
14	24	26.5	6.1722
15	26.5	29	6.9939
16	29	∞	7.8194

도면3

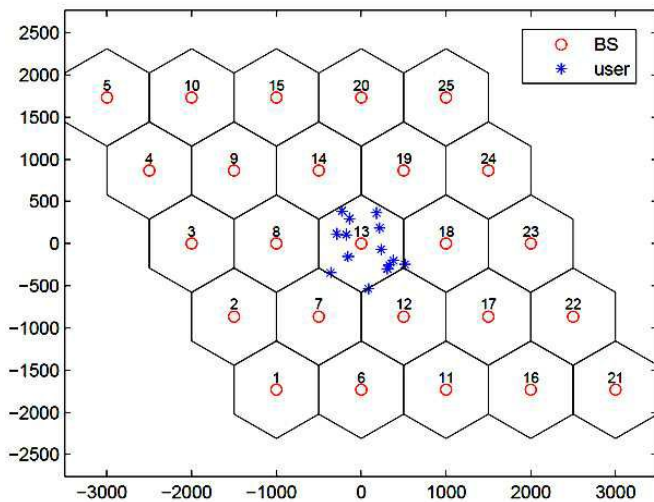
100



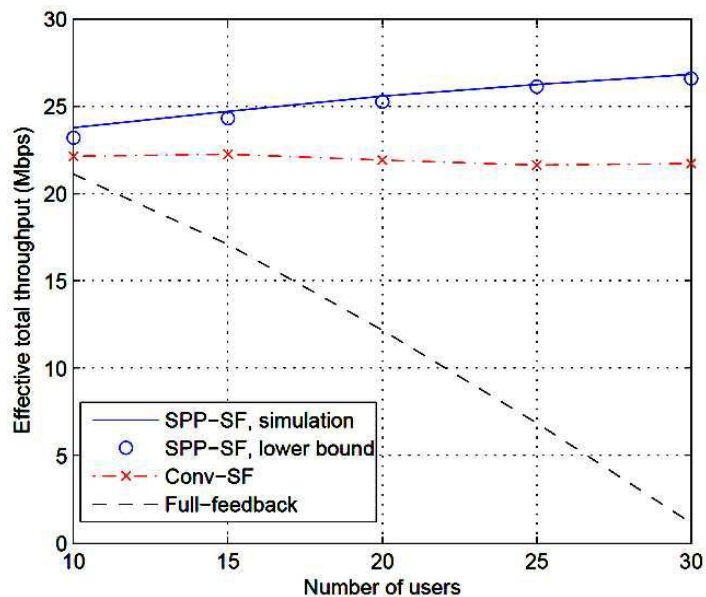
도면4

PARAMETERS	VALUES
Total bandwidth, β	10 MHz
Number of subchannels, N	40
Number of MCS levels, L	16
Relationship among MCS levels and data rates	Values in Table 1
Time slot length, τ	5 ms
Feedback message transmission rate, R^{feed}	$r(2) \times \beta = 991$ kbps
Cellular layout	Hexagonal grid, 25 cell sites, 1 sector per site (Refer to Fig.2)
Inter-site distance	1000 m
Distance-dependent path loss	$128.1 + 37.6\log_{10}(d)$, d in kilometers
Shadowing standard deviation	8 dB
Correlation distance of Shadowing	50 m
Shadowing correlation between cells	0.5
Short term fading	Rayleigh distribution, i.i.d. for different time slots and subchannels
BS transmit power per subchannel	30 dBm
Noise power density	-174 dBm/Hz
Traffic model	Fully backlogged

도면5



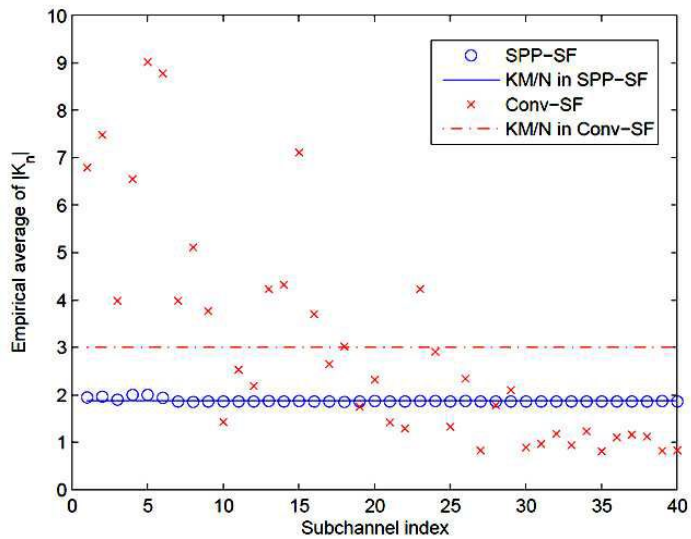
도면6



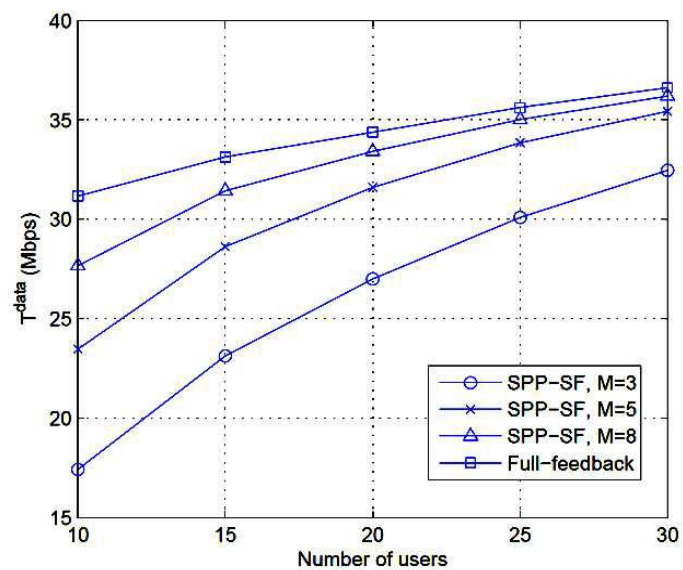
도면7

# of users	Optimal M of SPP-SF	Optimal M of Conv-SF
10	8	10 or 11
15	5	8 or 9
20	4 or 5	6 or 7
25	4	5 or 6
30	3	4 or 5

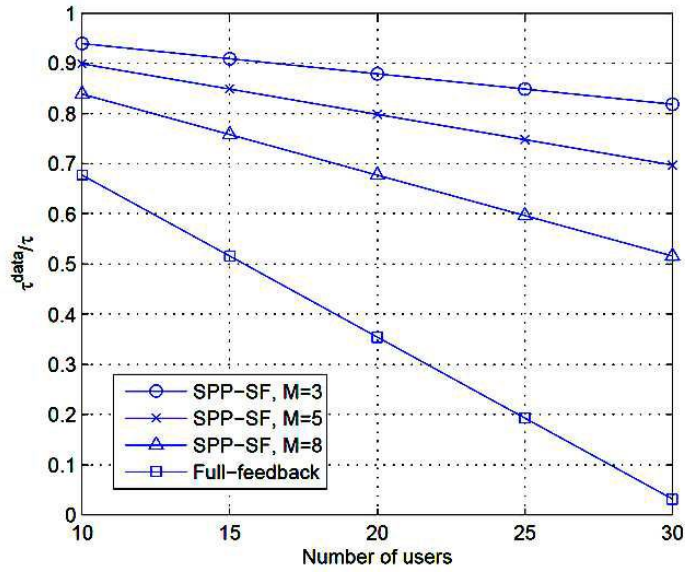
도면8



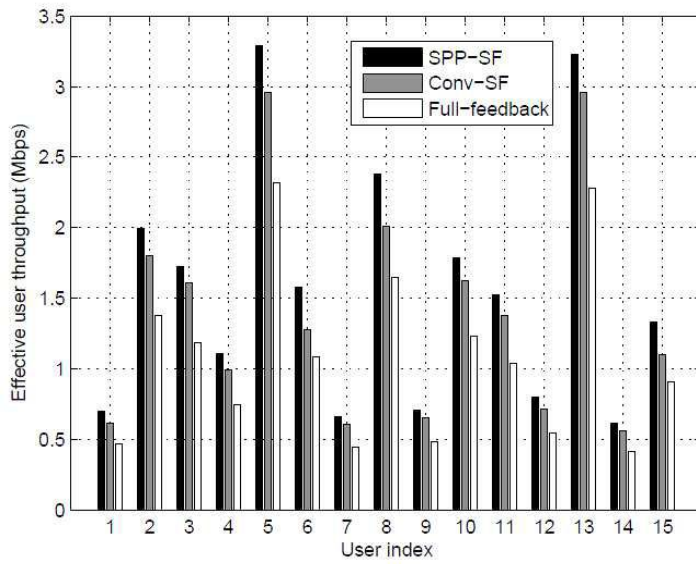
도면9



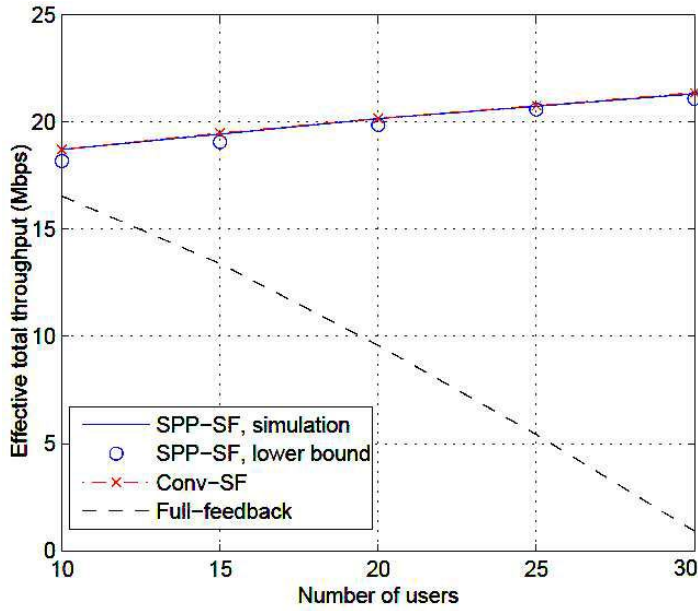
도면10



도면11



도면12



도면13

