



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년01월07일
(11) 등록번호 10-2348948
(24) 등록일자 2022년01월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04W 52/38 (2009.01) H04W 4/70 (2018.01)
H04W 52/14 (2009.01) H04W 52/24 (2009.01)
H04W 52/28 (2009.01)
(52) CPC특허분류
H04W 52/38 (2013.01)
H04W 4/70 (2018.02)
(21) 출원번호 10-2020-0010323
(22) 출원일자 2020년01월29일
심사청구일자 2020년01월29일
(65) 공개번호 10-2021-0096820
(43) 공개일자 2021년08월06일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020150107794 A
(뒷면에 계속)

(73) 특허권자
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
김형석
서울특별시 광진구
카시프 메흐무드
서울특별시 광진구 능동로 209 세종대학교
이병무
서울특별시 광진구 능동로 209 세종대학교
(74) 대리인
김현승

전체 청구항 수 : 총 8 항

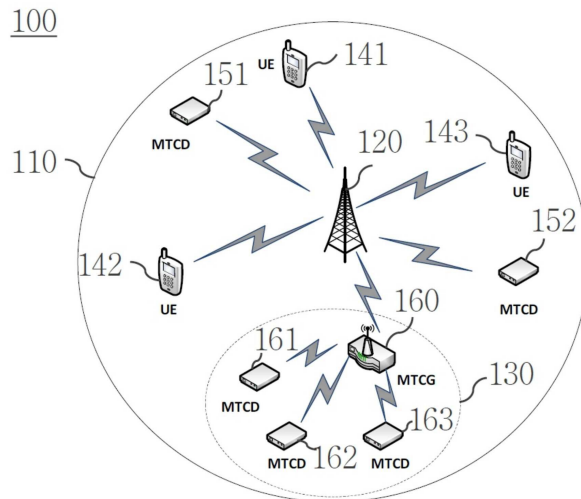
심사관 : 박성호

(54) 발명의 명칭 머신 타입 통신을 위한 송신 전력의 제어를 위한 평균장 게임 프레임워크 기반 기법

(57) 요약

머신 타입 통신(Machine Type Communication: MTC)을 위한 송신 전력 제어 방법이 제공된다. 개시된 송신 전력 제어 방법은, 네트워크 환경 내에 위치한 다수의 MTC 디바이스에 걸친 시스템 상태의 통계적 분포를 나타내는 평균장의 Fokker-Planck-Kolmogorov (FPK) 방정식이 시간 구간에 걸친 다수의 MTC 디바이스 각각의 송신 전력의 최적 제어 정책의 판정을 좌우하는 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 방정식에 제약으로서 결합된 평균장 게임의 해를 유한 차분법을 사용하여 획득하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H04W 52/146 (2013.01)
H04W 52/243 (2013.01)
H04W 52/28 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌

KR1020170005906 A
 KR1020180008351 A
 KR1020180112242 A
 KR1020160085797 A
 KR1020170127440 A

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711098512
 부처명 과학기술정보통신부
 과제관리(전문)기관명 한국연구재단
 연구사업명 집단연구지원(R&D)
 연구과제명 Tactile Internet을 위한 초저지연 고신뢰 햅틱 데이터 통신 기술 및 촉각 센서/액
 튜에이터 기술 연구

기 여 율 70/100
 과제수행기관명 세종대학교
 연구기간 2019.09.01 ~ 2020.02.29

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711094641
 부처명 과학기술정보통신부
 과제관리(전문)기관명 한국연구재단
 연구사업명 개인기초연구(과기정통부)(R&D)
 연구과제명 대규모 머신타입 통신/고신뢰 저지연 통신 성능 향상을 위한 평균 필드 게임 이론
 및 비직교 다중 액세스 기반 기술 연구

기 여 율 30/100
 과제수행기관명 세종대학교
 연구기간 2019.06.01 ~ 2020.02.29

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

머신 타입 통신(Machine Type Communication: MTC)을 위한 송신 전력 제어 방법으로서,
 네트워크 환경 내에 위치한 다수의 MTC 디바이스에 걸친 시스템 상태의 통계적 분포를 나타내는 평균장(mean field)의 Fokker-Planck-Kolmogorov (FPK) 방정식 및 상기 다수의 MTC 디바이스 각각과 상기 평균장과의 관계를 모델링하여 시간 구간에 걸친 상기 각각의 MTC 디바이스의 송신 전력의 최적 제어 정책을 판정할 좌우하는 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 방정식의 결합으로 정의된 평균장 게임의 해를 위한 차분법을 사용하여 획득하는 단계를 포함하되, 상기 시스템 상태는 잔여 배터리 에너지 및 연관된 간섭에 의해 정의된 2차원 상태이고, 상기 해를 획득하는 단계는,

상기 시간 구간과 더불어, 상기 잔여 배터리 에너지의 구간 및 상기 연관된 간섭의 구간에 의해 정의된 3차원 도메인 공간이 이산화된(discretized) 격자 공간 내의 복수의 격자점 각각에 대해, 상기 FPK 방정식의 이산화된 버전(version)을 사용하여 시간에 있어서 순방향으로 상기 평균장의 갱신치(updated value)를 계산하는 단계와, 상기 각각의 격자점에 대해, 상기 평균장 게임을 위한 이산화된 라그랑지안(Lagrangian)에 기반하여 시간에 있어서 역방향으로 상기 송신 전력의 갱신치를 계산하는 단계를 포함하는,

송신 전력 제어 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 네트워크 환경은 상기 각각의 MTC 디바이스의 통신 외에도 인간 타입 통신(Human Type Communication: HTC) 디바이스의 액세스를 위해 구성되고, 상기 연관된 간섭은 상기 각각의 MTC 디바이스에 의해 유발되어 다른 MTC 디바이스가 겪는 간섭은 물론, 상기 각각의 MTC 디바이스에 의해 유발되어 상기 HTC 디바이스가 겪는 간섭도 나타내는,

송신 전력 제어 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 FPK 방정식의 상기 이산화된 버전은 상기 송신 전력에 의존하는 항 및 간섭 이득에 의존하는 항을 포함하되, 상기 연관된 간섭은 상기 송신 전력에 상기 간섭 이득이 곱해진 것인,

송신 전력 제어 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 각각의 MTC 디바이스의 상기 송신 전력의 상기 최적 제어 정책은 해당 MTC 디바이스로부터의 송신의 신호 대 간섭 및 잡음 비율(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio: SINR) 및 상기 송신 전력에 기반한 비용 함수가 상기 시간 구간에 걸쳐 누적된 비용 값을 최소화하고, 상기 이산화된 라그랑지안은 상기 비용 함수에 의존하는,

송신 전력 제어 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 송신 전력의 상기 갱신치를 계산하는 단계는,

오직 상기 평균장에 대한 상기 이산화된 라그랑지안의 변화율이 0이 되도록 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)의 갱신치를 계산하는 단계와,

오직 상기 송신 전력에 대한 상기 이산화된 라그랑지안의 변화율이 0이 되도록 상기 송신 전력의 상기 갱신치를 계산하는 단계를 포함하는,

송신 전력 제어 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 해를 획득하는 단계는,

상기 평균장, 상기 라그랑주 승수 및 상기 송신 전력 각각의 초기치(initial value)를 획득하는 단계와,

상기 초기치를 획득하는 단계 후에, 상기 평균장의 상기 갱신치를 계산하는 단계와, 상기 라그랑주 승수의 상기 갱신치를 계산하는 단계와, 상기 송신 전력의 상기 갱신치를 계산하는 단계를 반복하는 루프 반복(loop iteration)을 하는 단계를 더 포함하되, 상기 평균장의 상기 갱신치 및 상기 평균장의 이전 값의 차이가 사전설정된 값보다 작은 경우에 상기 루프 반복은 종료되는,

송신 전력 제어 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 해는 장래의 참조를 위해 상기 다수의 MTC 디바이스에 대해 일괄 처리(batch processing)을 수행하는 방식으로 획득되는,

송신 전력 제어 방법.

청구항 8

머신 타입 통신(Machine Type Communication: MTC)을 위한 송신 전력 제어 장치로서,

프로세서와,

프로세서 실행가능 명령어가 저장된 메모리를 포함하되,

상기 프로세서 실행가능 명령어는 상기 프로세서에 의해 실행되는 경우 상기 프로세서로 하여금 제1항 내지 제7항 중 어느 한 항에 기재된 송신 전력 제어 방법을 수행하게 하는,

송신 전력 제어 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 개시는 머신 타입 통신(Machine Type Communication: MTC)을 위해 송신 전력을 제어하는 기법에 관한 것으로서, 더욱 구체적으로, 평균장 게임(Mean Field Game: MFG) 프레임워크에 기반하여 MTC를 위해 송신 전력을 제어하는 기법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 차세대 무선 셀룰러(cellular) 네트워크가 발전하면서 새로운 알고리즘 및 발달하는 애플리케이션을 위한 네트워크 아키텍처의 개발이 급속도로 증가하였다. 이는 국제 전기통신 연합 전파통신 부문(International Telecommunication Union Radiocommunication Sector: ITU-R)에 의해 정의된 바와 같은 새로운 서비스 카테고리 및 서비스 요구사항 간의 차이가 급격히 커졌기 때문이라고 볼 수 있다. 이에 반해, 이전 세대가 주안점을 둔 애플리케이션은 스펙트럼 효율성은 있지만 대역폭 소모가 많은 것이었다. 5세대(5th Generation: 5G) 네트워크는 각종 서비스 요구의 결과로서 밀집 배치, 에너지 고갈, 그리고 스펙트럼 부족과 사용자 용량의 증가를 비롯하여

갖가지 난제에 부딪힐 것으로 예견된다.

[0003] 향상된 모바일 광대역(enhanced Mobile BroadBand: eMBB)을 초신뢰성 저지연시간 통신(ultra-Reliable Low Latency Communication: uRLLC) 및 대규모 머신 타입 통신(massive Machine-Type Communication: mMTC)과 더불어 제공하는 것은 각종 사용자 애플리케이션을 위한 동적 서비스 구조를 가진 복잡한 네트워크 아키텍처를 요구한다. 머신 타입 통신(Machine-Type Communication: MTC)은 사용자 디바이스가 사람의 개입이나 디바이스 없이 데이터를 산출, 교환 및 분석하는 통신 설계라고 정의된다. MTC는 특정한 서비스 품질(Quality of Service: QoS) 제약이 주어지면 대략적으로 mMTC 아니면 uRLLC로 분류된다. mMTC가 통상적으로 지원하는 것은 변화하는 QoS에 따른 전력 요구사항과 낮은 복잡도로 특징지어지는 보다 밀집도가 높은 사용자 환경이다. 그러한 디바이스의 용례는 감시 시스템, 스마트 농업, 스마트 계측, 센서 네트워크, 원격 제어 및 진단을 포함한다. 반면에, uRLLC 디바이스는 단대단(end-to-end) 지연시간에 매우 민감하며, 비교적 중간 정도의 서비스 레이트(service rate)와 함께 높은 신뢰성을 요구한다. uRLLC의 몇몇 용례는 자율주행 차량/드론, 원격 건강관리, 자동화된 사이버-물리적(cyber-physical) 시스템 및 교통 관리 등이다.

[0004] 3세대 파트너십 프로젝트(3rd Partnership Project: 3GPP) 및 전기전자 엔지니어 협회(Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE)는 네트워크 설계를 수월하게 하기 위해 MTC를 위한 구체적인 특징, 예컨대 시간 의존적인 저빈도 송신(infrequent transmission)과 낮은 이동성(mobility)을 정의하였다. MTC 디바이스의 리소스(resource) 및 트래픽(traffic) 요구사항은 그렇지 않은 디바이스, 가령 인간 타입 통신(Human Type Communication: HTC) 디바이스와 보통 구별된다. HTC는 사람에 의해 신호의 송신이 결정된 통신인 반면, MTC에서는 사람의 개입 없이 각 디바이스가 자체적으로 주기적으로 또는 이벤트에 기반하여 신호 송신을 결정한다. 이와 같이 MTC 및 HTC 디바이스의 트래픽 요구사항이 구별되기에, 대규모 연결성뿐만 아니라 낮은 지연시간과 신뢰성의 측면에서 MTC 디바이스의 광범위한 요구를 수용하기 위해서는 배치된 네트워크의 인프라스트럭처(infrastructure)의 보다 진전된 재모델링이 요구된다. 예를 들어, Ericsson 사의 Ericsson Mobility Report, November 2018은 MTC 디바이스의 수가 2024년까지 41억 개에 달할 것이라고 예측하면서, 장래의 네트워크에서의 MTC 트래픽 트렌드와 관련된 연구·개발의 동기를 제시하고 있다. 그러한 밀집된 MTC 네트워크에서 네트워크 과부하를 피하기 위해서는 트래픽 수요 및 처리의 관점에서 분산형 리소스 관리 접근법이 알맞을 것이다. 분산형 설계를 위한 핵심 목표는 스케일가능성(scalability)을 수용하는 능력, 디바이스의 랜덤(random) 배치, 최소의 시그널링 오버헤드(signaling overhead)와 한정된 에너지 공급, 디바이스 간의 이질성, 그리고 불완전한 정보의 이용가능성을 포함한다.

[0005] 이와 같이, 셀룰러 가입자에게 제공되는 서비스가 진화되면서 MTC-HTC 공존 셀룰러 네트워크에 대한 필요성이 현실이 되고 있다. HTC 디바이스의 주요 목표는 고선명(High Definition: HD) 비디오, 텔레프레전스(telepresence) 및 가상 현실(virtual reality)와 같은 서비스에 있어서 데이터 쓰루풋(throughput)을 개선하는 것이며, 그러한 사용자 디바이스의 데이터 레이트(data rate)를 개선하는 데에는 스펙트럼 효율적이지만 에너지 소모가 많은 서비스 아키텍처가 요구된다. 한편, 원격 감지를 하는 MTC 디바이스는 그것의 배터리 기대 수명(battery lifetime expectancy)을 향상시키는 것이 바람직하므로, 이를 감안한 에너지 효율적인 전력 제어 방안의 설계가 필요하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 머신 타입 통신(Machine Type Communication: MTC)을 위해 송신 전력을 제어하는 기법이 본 문서에 개시된다.

과제의 해결 수단

[0007] 적어도 하나의 실시예에 따르면, 머신 타입 통신(Machine Type Communication: MTC)을 위한 송신 전력 제어 방법은, 네트워크 환경 내에 위치한 다수의 MTC 디바이스에 걸친 시스템 상태의 통계적 분포를 나타내는 평균장(Mean Field: MF)의 Fokker-Planck-Kolmogorov (FPK) 방정식이 시간 구간에 걸친 상기 다수의 MTC 디바이스 각각의 송신 전력의 최적 제어 정책의 관정을 좌우하는 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 방정식에 제약으로서 결합된 평균장 게임(Mean Field Game: MFG)의 해(solution)를 유한 차분법(Finite Difference Method: FDM)을 사용하여 획득하는 단계를 포함하되, 상기 시스템 상태는 잔여 배터리 에너지 및 연관된 간섭에 의해 정의된 2차원 상태이고, 상기 해를 획득하는 단계는, 상기 시간 구간과 더불어, 상기 잔여 배터리 에너지의 구간 및 상기 연관된 간섭의 구간에 의해 정의된 3차원 도메인 공간(domain space)이 이산화된(discretized) 격자 공간(grid

space) 내의 복수의 격자점 각각에 대해, 상기 FPK 방정식의 이산화된 버전(version)을 사용하여 시간에 있어서 순방향으로(forward) 상기 평균장의 갱신치(updated value)를 계산하는 단계와, 상기 각각의 격자점에 대해, 상기 평균장 게임을 위한 이산화된 라그랑지안(Lagrangian)에 기반하여 시간에 있어서 역방향으로(backward) 상기 송신 전력의 갱신치를 계산하는 단계를 포함한다.

[0008] 상기 네트워크 환경은 상기 각각의 MTC 디바이스의 통신 외에도 인간 타입 통신(Human Type Communication: HTC) 디바이스의 액세스를 위해 구성될 수 있고, 상기 연관된 간섭은 상기 각각의 MTC 디바이스에 의해 유발되어 다른 MTC 디바이스가 겪는 간섭은 물론, 상기 각각의 MTC 디바이스에 의해 유발되어 상기 HTC 디바이스가 겪는 간섭도 나타낼 수 있다.

[0009] 상기 FPK 방정식의 상기 이산화된 버전은 상기 송신 전력에 의존하는 항(term) 및 간섭 이득(interference gain)에 의존하는 항을 포함할 수 있는데, 여기서 상기 연관된 간섭은 상기 송신 전력에 상기 간섭 이득이 곱해진 것이다.

[0010] 상기 각각의 MTC 디바이스의 상기 송신 전력의 상기 최적 제어 정책은 해당 MTC 디바이스로부터의 송신의 신호 대 간섭 및 잡음 비율(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio: SINR) 및 상기 송신 전력에 기반한 효용 함수(utility function)가 상기 시간 구간에 걸쳐 누적된 비용 값을 최소화할 수 있다.

[0011] 상기 이산화된 라그랑지안은 상기 효용 함수에 의존할 수 있다.

[0012] 상기 송신 전력의 상기 갱신치를 계산하는 단계는, 오직 상기 평균장에 대한 상기 이산화된 라그랑지안의 변화율이 0임을 나타내는 관계식에 기반하여 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)의 갱신치를 계산하는 단계와, 오직 상기 송신 전력에 대한 상기 이산화된 라그랑지안의 변화율이 0임을 나타내는 관계식에 기반하여 상기 송신 전력의 상기 갱신치를 계산하는 단계를 포함할 수 있다.

[0013] 상기 해를 획득하는 단계는, 상기 평균장, 상기 라그랑주 승수 및 상기 송신 전력 각각의 초기치(initial value)를 획득하는 단계와, 상기 초기치를 획득하는 단계 후에, 상기 평균장의 상기 갱신치를 계산하는 단계와, 상기 라그랑주 승수의 상기 갱신치를 계산하는 단계와, 상기 송신 전력의 상기 갱신치를 계산하는 단계를 반복하는 루프 반복(loop iteration)을 하는 단계를 더 포함할 수 있는데, 여기서 상기 루프 반복은 상기 루프 반복이 최대 반복 횟수만큼 반복된 경우에 종료된다.

[0014] 상기 루프 반복이 반복된 횟수가 상기 최대 반복 횟수에 미치지 않더라도 상기 평균장의 상기 갱신치 및 상기 평균장의 이전 값의 차이가 사전설정된 값보다 작다면 상기 루프 반복은 종료될 수 있다.

[0015] 상기 해는 장래의 참조를 위해 상기 다수의 MTC 디바이스에 대해 일괄 처리(batch processing)을 수행하는 방식으로 획득될 수 있다.

[0016] 상기 송신 전력 제어 방법은, 상기 획득된 해를 나중에 상기 네트워크 환경 내의 MTC 디바이스에 의해 상기 최적 제어 정책에 부합하는 MTC 송신을 위해 인덱싱 동작(indexing operation)으로써 참조될 데이터 구조의 형태로 제공하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0017] 적어도 하나의 실시예에 따르면, 머신 타입 통신(Machine Type Communication: MTC)을 위한 송신 전력 제어 장치는, 프로세서와, 프로세서 실행가능 명령어가 저장된 메모리를 포함하되, 상기 프로세서 실행가능 명령어는 상기 프로세서에 의해 실행되는 경우 상기 프로세서로 하여금 전술된 송신 전력 제어 방법을 수행하게 한다.

[0018] 전술된 개요는 상세한 설명에서 추가로 후술되는 몇몇 양상을 단순화된 형태로 소개하기 위해 제공된다. 이 개요는 청구된 주제(subject matter)의 중요 특징 또는 필수적 특징을 식별하도록 의도되지 않고, 청구된 주제의 범위를 정하는 데 사용되도록 의도되지도 않는다. 나아가, 청구된 주제는 본 명세서에서 논의되는 임의의 또는 모든 이점을 제공하는 구현에 한정되지 않는다.

발명의 효과

[0019] 본 발명의 실시예에 따르면, MTC 디바이스가 HTC 디바이스와 함께 공존하는 네트워크 환경에서 MTC 디바이스의 배터리 에너지를 감안한 에너지 효율적인 송신 전력 제어 메커니즘이 제공된다.

[0020] 본 발명의 실시예에 따르면, MTC를 위한 송신 전력 제어 문제가 평균장 게임으로 변환되며, 이 평균장 게임의 해는 유한 차분법을 통해 획득될 수 있다.

[0021] 본 발명의 실시예에 따르면, 평균장 게임의 해는 이에 부합하는 MTC 송신을 위해 MTC 디바이스에 의해 참조될

수 있는 데이터 구조의 형태로 제공될 수 있는바, 분산형 접근법의 설계를 통해 MTC에서의 지연시간이 단축될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0022] 도 1은 본 발명의 실시예에 따라, 혼성 셀룰러 MTC 및 HTC 액세스 프레임워크를 위한 네트워크 아키텍처(network architecture)를 도시한다.

도 2는 본 발명의 실시예에 따라 MTC를 위해 송신 전력을 제어하는 기법을 의사코드(pseudocode)의 형태로 제시한다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따라 MTC를 위한 송신 전력 제어를 수행하는 장치의 블록도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 이하에서는, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세히 설명한다. 본 발명은 여러 가지 실시예를 가질 수 있고, 몇몇 실시예가 본 명세서에 개시된다. 그러나, 이는 본 발명에 대한 한정이나 예시로서 제공되며, 본 발명의 사상 및 범주에 속하는 모든 변환, 균등물 내지 대체물을 망라하는 것으로 이해되어야 한다. 개시된 실시예에 따른 방법, 장치 및/또는 시스템에 대한 포괄적인 이해를 돕기 위해 다음의 상세한 설명에서 특정한 세부사항이 제공되는데, 몇몇 실시예는 이들 세부사항 중 일부 또는 전부가 없더라도 실시될 수 있다. 또한, 본 발명의 다양한 양상을 불필요하게 모호하게 하지 않도록 공지 기술의 구체적인 설명은 생략될 수 있다.

[0024] 후술되는 용어는 단지 특정 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 한정적 의미로 고려되고자 의도된 것이 아니다. 단수 형태의 표현은 명확하게 달리 사용되지 않는 한, 복수 형태의 의미를 포함한다. 또한, 이 문서에서, "포함하다" 또는 "가지다"와 같은 용어는 어떤 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 정보 또는 이들의 조합이 존재함을 나타내려는 것이며, 하나 또는 그 이상의 다른 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 정보 또는 이들의 조합의 존재 또는 가능성을 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

시스템 개요

[0026] 도 1은 본 발명의 실시예에 따라, 혼성 셀룰러 MTC 및 HTC 액세스 프레임워크를 위한 네트워크 아키텍처를 도시한다. 실시예에서, 도 1에 도시된 바와 같이, 예시적인 무선 통신 네트워크 환경(100)은 기지국(Base Station: BS)(120)(예컨대, 진화된 노드B(evolved Node B: eNB))에 의해 서빙되는(served) 셀(110)을 포함한다. 또한, 실시예에서, 셀(110) 내에는 하나 이상의 HTC 디바이스(예컨대, 사용자 장비(User Equipment: UE)(141, 142, 143))와, 하나 이상의 MTC 노드(예컨대, MTC 디바이스(MTC Device: MTC Device: MTC Device)(151, 152, 161, 162, 163), MTC 게이트웨이(MTC Gateway: MTC Gateway: MTC Gateway)(160))가 존재할 수 있다. 몇몇 예시적인 구현에서, MTC 노드는 HTC 디바이스를 위한 기존의 셀룰러 네트워크 내에 수용된다고 이해될 수도 있다.

[0027] 실시예에서, uRLLC 서비스 노드(예컨대, MTC Device(151, 152))에는 저지연(low latency) 및 신뢰성 있는 통신 링크를 보장하기 위해서 BS(120)에의 직접적인 연결성이 제공된다. 한편, mMTC 디바이스에 의한 BS(120)로의 직접적인 액세스는 모든 디바이스에 의한 대규모 동시적 액세스로 인해 심각한 혼잡 문제를 야기할 수 있으므로, 예를 들어, mMTC 디바이스가 그룹화되어 중계됨으로써 BS에서의 혼잡에 대처하는 클러스터화(clustering) 접근법이 고려될 수 있다. 이러한 접근법에서 MTC Gateway(160)는 연결된 MTC Device(예컨대, MTC Device(161, 162, 163))의 데이터를 BS(120)에 중계하는 것을 담당하는바, 이는 끊김 없는 액세스(seamless access) 경험을 위한 것이다. MTC Gateway(160)는 그 자체가 MTC 디바이스일 수 있거나 아니면 HTC 디바이스일 수 있다. 몇몇 예시적인 구현에서, 프라이버시(privacy) 및 데이터 무결성(integrity)을 위해, mMTC 디바이스가 게이트웨이 노드로서 선택될 수 있고, 이는 배터리 수명과 에너지 소모의 개선으로 이어질 수 있다. 나아가, 예로서, 비록 도시되지 않았으나, 서로 페어링되어(paired) 직접적인 통신을 하는 MTC 디바이스가 존재할 수 있다.

[0028] 실시예에 따르면, 각각의 MTC 노드에서 에너지 효율적인 액세스 방안의 구현을 위해 다음 사항이 고려될 수 있다. 첫째, 모든 MTC 디바이스는 각자의 채널 응답을 획득하여 현재의 네트워크 환경(100)에 대한 정확한 모델링과 정보 파악을 가능하게 한다. 몇몇 예시적인 구현에서, 서비스 중단 방지를 위해, MTC 노드가 전통적인 HTC 디바이스와 효과적으로 통합되도록 서비스 및 노드 제약이 고려될 수도 있다. 둘째, 디바이스 및 콘텍스트(context) 정보의 판정 후에 MTC 노드에의 액세스 제공이 수행된다. 이를 위해, 예를 들어, mMTC 및 uRLLC 노드를 위해 그들의 특정한 QoS 제약에 따라 이들 MTC 노드를 위한 스케줄링이 고려될 수 있다. 몇몇 예시적인 구현

에서, mMTC 디바이스는 리소스 액세스를 단순화하기 위해, 또 이들 디바이스의 대규모 연결성 요구사항으로 인해 발생할 확률이 높은 혼잡 조건을 다루기 위해 클러스터(가령, 클러스터(130))로 정렬될 수 있다. 유사하게, 몇몇 예시적인 구현에서, uRLLC 디바이스는 이들 디바이스의 트래픽의 이벤트 구동형(event-driven) 특성 때문에 이들 디바이스의 요구사항에 따라 스케줄링될 수 있다. 셋째, MTC 디바이스의 송신 전력 제어에 주안점을 두고서 에너지 인지형(energy-aware) 설계를 위한 추계적인 미분 게임(Stochastic Differential Game: SDG)이 구성된다. 특히, 몇몇 예시적인 구현을 위해, 구성된 SDG에 대한 가능한 해를 구하는 접근법으로서 평균장(Mean Field: MF) 근사화가 제시되는데, 이는 전적으로 HTC/MTC 조합 셀룰러 인프라스트럭처 내에서의 MTC 노드의 상태 동역학(state dynamics)의 MF 모델링이 얼마나 정확한지에 의존한다. 넷째, 평균장 근사화된 해에 기반한 최적 제어 정책이 수립되는데, 이는 수립되는 에너지 인지형 전력 제어를 얻기 위해 MF 방정식을 푸는 데에 유한 차분법(Finite Difference Method: FDM)을 사용하는 것을 수반한다.

[0029] 논의를 위해, 도 1에 도시된 바와 같이, 상이한 서비스 요구사항이 공존하는 MTC 및 HTC 디바이스가 다양하게 분포된 단일 셀이 고려된다. 이와 같이, 도 1의 예시적인 네트워크 환경(100)은 많은 수의 MTC 디바이스가 전체 셀 영역에 걸쳐 랜덤하게 분포된 것으로서, BS(120)가 이러한 셀 환경의 중심이라고 할 수 있다. 이제, BS(120)의 커버리지(coverage) 내에 총 N개의 사용자, 즉 J개의 통상적인 HTC 디바이스와 K개의 MTC 디바이스가 있는 경우를 가정하자.

[0030] 실시예에서, 도 1에 도시된 바와 같이 MTC 및 HTC 디바이스가 공존하는 네트워크 환경(100)에서 HTC 디바이스 및/또는 MTC 디바이스와 연관된 간섭은 그러한 네트워크 환경(100)에서의 상호작용에 기반하여 모델링될 수 있다. 그러한 간섭은 HTC 디바이스 및 MTC 디바이스 양자 모두와 연관된 간섭인지, 아니면 MTC 디바이스이든 또는 HTC 디바이스이든 어느 한쪽과 연관된 간섭인지에 따라 각각 도메인간(inter-domain) 간섭 또는 도메인내(intra-domain) 간섭으로 칭해진다.

[0031] 예를 들어, 임의의 시간 t에서 제k MTC 디바이스로부터의 송신(이하에서 제k MTC 송신으로 지칭될 수 있음)에 나머지 MTC 디바이스에 의해 도입된 도메인내 간섭은 다음과 같이 표현될 수 있다.

수학식 1

$$i_k(t) = \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i(t) g_{i,k}(t)$$

[0032]

[0033] 여기서, $p_i(t)$ 는 제i MTC 디바이스의 송신 전력이고, $g_{i,k}(t)$ 는 제i MTC 디바이스 및 제k MTC 송신의 수신단(가령, 네트워크 환경(100)에서의 uRLLC 디바이스(151)로부터의 업링크 송신을 위한 시나리오에서, BS(120) 간에 겪는 채널 이득이다.

[0034] 또한, 임의의 시간 t에서 제k MTC 디바이스로부터의 송신에 HTC 디바이스에 의해 도입된 도메인간 간섭은 다음과 같이 정의될 수 있다.

수학식 2

$$I_k(t) = \sum_{j=1}^J P_j(t) G_{j,k}(t)$$

[0035]

[0036] 여기서 $P_j(t)$ 는 제j HTC 디바이스의 송신 전력이고 $G_{j,k}(t)$ 는 제j HTC 디바이스 및 제k MTC 송신의 수신단에 겪는 채널 이득이다.

[0037] 그러면, 시간 t 에서 $p_k(t)$ 의 송신 전력으로 이득이 $g_k(t)$ 인 채널을 통해 잡음 분산 σ^2 의 신호를 송신하는 제 k MTC 디바이스에 대해, 달성가능한 신호 대 간섭 및 잡음 비율(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio: SINR)은 다음과 같다.

수학식 3

$$\gamma_k(t) = \frac{p_k(t)g_k(t)}{i_k(t) + I_k(t) + \sigma^2}$$

[0038]

[0039]

전력 제어를 위한 미분 게임 프레임워크

[0040]

네트워크 환경(100)에서 MTC 디바이스를 위한 에너지 효율적인 송신 전력 제어 메커니즘은 전술된 바와 같이 각 MTC 디바이스의 잔여 배터리 에너지를 감안하는 에너지 인지형 방식으로 설계될 수 있는데, 이는 무선 디바이스의 에너지 효율이 그것의 배터리 수명에 직접적으로 비례하는 관계가 있다는 점에 의거한다.

[0041]

구체적으로, 실시예에 따르면, HTC 및 MTC가 공존하는 네트워크 환경에서 MTC 디바이스의 송신 전력을 어떻게 제어하여 에너지 소모를 개선하는지의 문제는 각 MTC 디바이스와 연관된 간섭 및 그것의 잔여 에너지 양자 모두의 동역학에 기반한 추계적인 미분 게임(Stochastic Differential Game: SDG)으로 정의될 수 있다. 그러한 SDG 프레임워크는 이 게임의 각 플레이어(player), 곧 MTC 디바이스를 위한 어떤 효용(utility)을 최대화(또는 비용 값(cost value)을 최소화)한다는 개념을 활용한다. 다시 말해, 위의 전력 제어 문제를 푼다는 것은 각 플레이어를 위한 최적의 전력 제어 정책을 정한다는 것이다.

[0042]

이하에서, 논의를 위해, 시작 시간 T_i 부터 최종 시간 T_f 까지의 시간 구간 내의 모든 시점 t 에 대해 MTC 디바이스의 송신 전력을 제어하기 위한 SDG가 정의된다. 통상적으로, 추계적인 미분 게임 \tilde{G} 는 플레이어 세트 $\tilde{K} = \{1, \dots, K\}$ (가령, 전술된 전력 제어 SDG에서, 제1 내지 제 K MTC 디바이스를 나타냄), 그리고 플레이어와 연관된 액션(action) 세트 \tilde{P}_k 및 대응하는 상태 공간 S_k 로 구성되며, 플레이어 세트 \tilde{K} 내의 각 플레이어에 의해 취해지는 액션의 성능을 분석하는 수단으로서 효용 함수(또는 비용 함수) θ_k 가 주어지며, 제어 정책 C_k 는 시간 구간 $[T_i, T_f]$ 에 걸친 비용 값(즉, 이 시간 구간에 걸쳐 효용 함수가 누적된 값)을 최소화하고자 각 플레이어에 의해 취해지도록 정해진 일련의 액션(가령, 전술된 전력 제어 SDG에서, 각 플레이어의 송신 전력 값의 세트)이다.

[0043]

실시예에 따르면, 전력 제어 SDG는 각각의 MTC 디바이스의 잔여 배터리 에너지 및 연관된 간섭에 기반하여 모델링된 상태 공간을 갖는다. 우선, MTC 디바이스는 제한된 배터리 에너지로 인해 유한한 시간 동안에만 송신을 한다. 일반적으로, $t \in [T_i, T_f]$ 인 임의의 시간 t 에서 제 k MTC 디바이스(k 는 1, 2, ..., 또는 K)의 배터리의 가용 에너지 $E_k(t)$ 의 상태 동역학, 곧 잔여 배터리 에너지 및 소모된 전력 간의 관계는 다음과 같이 배터리의 잔여 에너지 레벨 $E_k(t)$ 가 송신 전력 소모 $p_k(t)$ 에 따라 감소한다고 두더라도 무방하다.

수학식 4

$$dE_k(t) = -p_k(t)dt$$

[0044]

[0045]

몇몇 예시적인 구현에서, 제 k MTC 디바이스와 연관된 간섭 $\beta_k(t)$ 는, 아래의 수학식 5에 표현된 바와 같이, 제 k MTC 디바이스에 의해 유발된 간섭(이 예에서, 제 k MTC 디바이스에 의해 다른 MTC 디바이스로부터의 송신에

도입된 도메인내 간섭 및 제k MTC 디바이스에 의해 HTC 디바이스로부터의 송신에 도입된 도메인내 간섭을 포함)일 수 있다. 다만, 본 발명의 실시예는 이 점에 한정되지 않는데, 몇몇 다른 예시적인 구현에서 제k MTC 디바이스와 연관된 간섭 $\beta_k(t)$ 는 제k MTC 송신에 대해 다른 디바이스에 의해 야기된 간섭(가령, 도메인내 간섭 $i_k(t)$ 및 도메인내 간섭 $I_k(t)$ 의 합)일 수 있다.

수학식 5

$$\beta_k(t) = \sum_{i=1, i \neq k}^K p_k(t)g_{k,i}(t) + \sum_{j=1}^J p_k(t)g'_{k,j}(t) = p_k(t)\omega_k(t)$$

[0046]

여기서 $p_k(t)$ 는 제k MTC 디바이스의 송신 전력이고, $g_{k,i}(t)$ 는 제k MTC 디바이스 및 제i MTC 디바이스로부터의 송신의 수신단 간에 겪는 채널 이득이며, $g'_{k,j}(t)$ 는 제k MTC 디바이스 및 제j HTC 디바이스로부터의 송신의 수신단 간에 겪는 채널 이득이다. 또한, 위 수학식은 간섭 레벨 $\beta_k(t)$ 이 송신 전력 $p_k(t)$ 와 간섭 이득 $\omega_k(t)$ 의 곱으로서 나타내어질 수 있음을 보여준다. 그러면, 간섭 상태의 동역학은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[0047]

수학식 6

$$d\beta_k(t) = \omega_k(t)dp_k(t) + p_k(t)\partial_t\omega_k(t)$$

[0048]

실시예에 따르면, 전력 제어 SDG를 위한 상태 공간은 다음과 같이 2차원으로 정의된다.

[0049]

수학식 7

$$S_k(t) = [E_k(t), \beta_k(t)]$$

[0050]

전술된 바와 같이, SDG에서 각 플레이어의 목표는 최적 제어 정책을 결정하기 위해 각자의 효용을 최대화하는 것이다. 실시예에서, 각각의 MTC 디바이스는 전력 소모를 최소화하여 결국 배터리 수명을 최대화하고자 하는데, 이는 적절한 효용 함수를 사용하여 달성될 수 있다. 예를 들어, 효용 함수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

[0051]

수학식 8

$$\theta_k(t) = (\gamma_k(t) - \gamma_{th}(t))^2 + \Omega p_k(t)$$

[0052]

여기서 γ_k 는 수학식 3에서 정의된 SINR이고, γ_{th} 는 신뢰성 있는 통신 링크를 수립하는 데에 요구되는 SINR 임계 값(가령, 이는 모든 MTC 디바이스에 대해 동일하다고 가정될 수 있음)이며, Ω 는 제k MTC 디바이스의 송신 전력 p_k 및 SINR γ_k 간의 차이의 단위를 조화시키기 위해 포함된 상수이다. 이 효용 함수에는 제k MTC

[0053]

디바이스가 경험하는 통신 성능을 특징짓는 SINR 및 제k MTC 디바이스에 의해 취해지는 송신 전력이 모두 반영되어 있다는 점이 인식될 것이다. 또한, 위와 같이 주어진 효용 함수가 $p_k(t)$ 에 대해 볼록(convex)임은 쉽게 증명될 수 있다.

[0054] 이제, 실시예에 따르면, 전력 제어 문제는 시간 구간 $[T_i, T_f]$ 동안에 수학식 8에 의해 주어진 효용 함수가 누적된 비용 값을 최소화하는 최적의 송신 전력 제어 정책 $C_k^*(t)$ 를 결정하는 문제로 귀결된다. 그러한 최적 제어 문제는 다음과 같이 표현될 수 있다.

수학식 9

[0055]
$$C_k^*(t) = \arg \min_{p_k(t)} \mathbb{E} \left[\int_{T_i}^{T_f} \theta_k(t) dt + \theta_k(T_f) \right]$$

[0056] 여기서 $\theta_k(T_f)$ 는 최종 시간 T_f 에서의 효용 함수의 값이다.

[0057] 실시예에서, 이 최적 제어 문제를 다루기 위해 다음과 같은 가치 함수(value function)가 도입된다.

수학식 10

[0058]
$$V_k(t, S_k(t)) = \min_{p_k(t)} \mathbb{E} \left[\int_{T_i}^{T_f} \theta_k(t) dt + V_k(T_f, S_k(T_f)) \right]$$

[0059] 여기서 $V_k(T_f, S_k(T_f))$ 는 최종 시간 T_f 에서의 최종 상태 $S_k(T_f)$ 에서 가치 함수가 갖는 값이다.

[0060] 그러면, 최적 제어 프로파일 $C_k^*(t)$ (단, $k \in \tilde{K}$)이 미분 게임 \tilde{G} 의 내쉬 균형(Nash Equilibrium: NE)이기 위한 필요 충분 조건은 다음과 같다.

수학식 11

[0061]
$$C_k^*(t) = \arg \min_{p_k(t)} \mathbb{E} \left[\int_{T_i}^{T_f} \theta_k(p_k(t), p_{-k}^*(t)) dt + \theta_k(T_f) \right]$$

subject to:

$$S_k(t) = [E_k(t), \beta_k(t)],$$

$$dE_k(t) = -p_k(t)dt,$$

$$d\beta_k(t) = \omega_k(t)dp_k(t) + p_k(t)\partial_t \omega_k(t)$$

[0062] 여기서 $p_{-k}^*(t)$ 는 제k MTC 디바이스를 제외한 모든 MTC 디바이스의 송신 전력 벡터이다. 어떤 MTC 디바이스도 최적 제어 정책 외의 다른 전력 제어 정책을 채택하여 효용 함수를 더 낮출 수는 없다.

[0063] 구체적으로, 최적 제어 이론과 Bellman의 최적성 원리에 따르면, Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 방정식으로 알려진 편미분 방정식을 수학식 10의 가치 함수가 만족한다. 가치 함수가 HJB 방정식의 해인바, 이는 수학식 8과 같은 연관된 효용 함수를 갖는 동적 미분 게임 시스템에 대해 최대의 효용(즉, 최소의 비용)을 가져온다. 실시예에서, HJB 방정식은 다음과 같다.

수학식 12

$$-\partial_t V_k(t, S_k(t)) = \min_{p_k(t)} [\theta_k(t, S_k(t), p_k(t)) + \partial_t S_k(t) \cdot \nabla V_k(t, S_k(t))]$$

[0065] 여기서 해밀토니안(Hamiltonian)은 다음과 같이 정의된다.

수학식 13

$$H(p_k(t), S_k(t), \nabla V_k(t, S_k(t))) = \min_{p_k(t)} [\theta_k(t, S_k(t), p_k(t)) + \partial_t S_k(t) \cdot \nabla V_k(t, S_k(t))]$$

[0067] HJB 방정식의 고유한 해를 찾을 수 있다면 전술된 미분 게임에 대해 NE의 존재가 보장된다. 수학식 12의 HJB 방정식에 대한 해가 존재하는 것은 해밀토니안이 평활한(smooth) 경우인데, 앞서 정의된 효용 함수는 연속성을 가지므로 수학식 13의 해밀토니안은 평활하다. 결국, 전력 제어 미분 게임 \tilde{G} 에서 적어도 하나의 NE가 존재한다.

[0068] 그런데, 총 K개의 MTC 디바이스가 포함된 네트워크 환경에서 위와 같은 미분 게임의 NE에 도달하게 하는 수렴된 해를 구하는 것은 K개의 편미분 방정식을 동시에 찾는다는 뜻이므로, 그것과 연관된 차원적인 어려움(즉, 그 복잡도가 MTC 디바이스의 수가 늘어남에 따라 지수적으로 증가하는 것) 때문에 사실상 실현하기가 어렵다. 따라서, 예시적인 송신 전력 제어 기법은, 이하에서 논의되는 바와 같이, 그러한 SDG를 평균장(Mean Field: MF) 개념에 기반한 평균장 게임(Mean Field Game: MFG)으로 근사화하여 해결하는 방식으로 구현될 수 있다.

전력 제어를 위한 평균장 게임 프레임워크

[0070] MF 개념에 따르면, 어떤 미분 게임이 만일 플레이어의 수가 매우 커진다면 MFG 이론을 기반으로 풀기에 적합하게 된다. MFG는 HJB 방정식과 Fokker-Planck-Kolmogorov (FPK) 방정식이 결합된 시스템으로 표현된다. FPK 방정식은 취해진 액션에 따라 모든 플레이어의 집합적 거동을 모델링하여 MF의 전개를 기술하는 데에 사용되며, HJB 방정식은 개별 플레이어와 MF와의 관계를 모델링하는 데에 사용되므로 주어진 시간 구간에 걸친 해당 플레이어의 최적 제어 정책의 판정을 좌우한다.

[0071] 실시예에서, 전술된 전력 제어 미분 게임 \tilde{G} 에 대해, 평균장은 다음과 같이 임의의 주어진 시간에서 플레이어 세트에 걸친 그 게임의 상태의 통계적 분포로 정의된다.

수학식 14

$$m(t, S) = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbb{1}_{\{S_k(t)=S\}}$$

[0072]

[0073] 여기서 $\mathbb{1}$ 은 주어진 조건이 참이면 1이고 그렇지 않으면 0인 지표 함수를 나타내고, $S_k(t)$ 는 수학식 7에서 주어진 바와 같이 전력 제어 게임의 상태 공간이다.

[0074] 실시예에서, MTC 디바이스를 위한 전력 제어 미분 게임을 MFG로 전환하는 것은 다음과 같은 특성을 전제로 한다. 첫째, 개별 플레이어는 최적 제어 정책을 택하면서 합리적이고 독립적인 방식으로 행동한다. 둘째, 각 플레이어는 다른 플레이어와의 개별적인 상호작용에 참여하기보다는 평균장과 상호작용하는 것이다. 셋째, 전력 제어에서 제공되는 MTC 디바이스의 수가 많음은 평균장 모델의 연속성을 보장한다. 넷째, 평균장 근사화를 사용하여 플레이어의 액션이 모델링되는데, 이들은 서로 바뀌더라도 결과에 영향을 미치지 않는다는 상호교환성이 있다.

[0075] 실시예에서, 많은 수의 MTC 디바이스를 다루기 위해, 다음과 같은 평균장 근사화된 간섭을 고려할 수 있다.

수학식 15

$$i_k^m(t) = \sum_{i=1, i \neq k}^K p_i(t) g_{i,k}(t) \approx (K - 1) p_i^m(t) g_{i,k}^m(t)$$

[0076]

[0077] 여기서 $p_i^m(t)$ 는 MF 근사화에서 제i MTC 디바이스에 대해 요구되는 송신 전력이고, $g_{i,k}^m(t)$ 는 MF 근사화된 채널 이득이다. 예를 들어, 엠펙크 송신 테스트 시나리오에서, 각 MTC 디바이스의 송신 전력이 주어지고 제k MTC 디바이스로부터 BS로 의도된 신호가 $p_k^m(t)$ 의 송신 전력으로 송신된다고 가정하자. 그러면, BS에서 수신된 전력 $P_k^{RX}(t)$ 는 다음 수학식과 같이 수신된 의도된 신호의 전력 $p_k^m(t)g_k(t)$ 과 그러한 신호에 대한 총 간섭의 전력의 합이다.

수학식 16

$$P_k^{RX}(t) = p_k^m(t)g_k(t) + i_k^m(t) + I_k(t)$$

[0078]

[0079] 따라서, 채널 이득 $g_{i,k}^m(t)$ 가 추정될 수 있다. 또한, 추정된 채널 이득을 사용하여, 수학식 3과 마찬가지로 형태를 갖는 MF 근사화된 SINR $\gamma_k^m(t)$ 가, 그리고 결국 MF 근사화된 효율 함수 $\theta_k^m(t)$ 가 주어질 수 있다.

수학식 17

$$\theta_k^m(t) = (\gamma_k^m(t) - \gamma_{th}(t))^2 + \Omega p_k(t)$$

[0080]

[0081] 위와 같이 효율 함수 $\theta_k^m(t)$ 가 주어지면, 전력 제어 MFG는 HJB 방정식과 FPK 방정식의 결합으로 정의될 수 있다. 우선, FPK 방정식은 다음과 같다.

수학식 18

$$\partial_t m(t, S) + \nabla (m(t, S) \cdot \partial_t S(t)) = 0$$

[0082]

[0083] 그리고, 위의 FPK 방정식과 조합되는 HJB 방정식은 수학식 12와 마찬가지로 형태로 주어진다.

수학식 19

$$-\partial_t V(t, S(t)) = \min_{p(t)} [\theta(t, S(t), p(t)) + \partial_t S(t) \cdot \nabla V(t, S(t))]$$

[0084]

[0085] FPK 및 HJB 방정식은 각각 순방향(forward) 및 역방향(backward) 방정식으로도 칭해지는데, 이는 각 방정식과 평균장과의 상호작용의 특성에 따른 것이다. 즉, HJB 방정식은 언제나 시간에 있어서 역방향으로 풀려 $V(t, S)$ 가 획득되며, FPK는 시간에 따라 순방향으로 전개되어 $m(t, S)$ 가 획득된다.

[0086] 나아가, 최적의 가치 함수 $V^*(t, S)$ 및 평균장 $m^*(t, S)$ 를 통해 표현되는 안정적인 수렴되는 최적 제어 정책을 평균장 균형(Mean Field Equilibrium: MFE)이라고 정의할 수 있다. 실시예에서, 전력 제어 MFG의 MFE는 유한 차분법을 사용하여 달성할 수 있다. 특히, 몇몇 예시적인 구현에서, MFG의 HJB-FPK 방정식 조합을 푸는 데에 다음과 같이 Lax-Freidrichs 기법이 적용된다. 우선, 시간 구간 $[0, T_f]$ (편의상, MFG의 시작 시간 T_i 는 0이라고 가정됨), 에너지 상태 구간 $[0, E_{max}]$ 및 간섭 상태 구간 $[0, \beta_{max}]$ 가 각각 3차원 도메인 공간의 x축, y축 및 z축 상으로 이산화되어 맵핑된다. 예를 들어, 이산화된 3차원 공간은 x축, y축 및 z축에서의 스텝 크기(step size) δ_t , δ_E 및 δ_β 가 각각 다음과 같이 균일한 격자 공간(grid space)일 수 있다.

수학식 20

$$\delta_t = \frac{T_f}{X},$$

$$\delta_E = \frac{E_{max}}{Y},$$

$$\delta_\beta = \frac{\beta_{max}}{Z}$$

[0087]

[0088] 그러면, MFG의 해를 획득하는 것은 3차원 격자 공간 내의 각각의 격자점에 대해 FPK 및 HJB 방정식을 푸는 것을 수반한다. 이 기법이 적용되면 FPK 방정식은 다음과 같이 이산화된다.

수학식 21

$$M(i+1, j, k) = \frac{[M(i, j-1, k) + M(i, j+1, k) + M(i, j, k-1) + M(i, j, k+1)]}{2} + \frac{\delta_t [M(i, j+1, k)P(i, j+1, k) - M(i, j-1, k)P(i, j-1, k)]}{2\delta_E} + \frac{\delta_t [M(i, j, k+1)P(i, j, k+1)\omega(i, j, k+1) - M(i, j, k-1)P(i, j, k-1)\omega(i, j, k-1) - M(i, j, k-1)P(i, j, k-1)\omega(i, j, k-1)]}{2\delta_\beta}$$

[0089]

[0090] 여기서 $M(i, j, k)$, $P(i, j, k)$ 및 $\omega(i, j, k)$ 는 각각 격자 공간 내의 격자점 (i, j, k) (즉, 시간 i , 에너지 레벨 j 및 간섭 상태 k)에서의 평균장, 송신 전력 및 간섭 이득을 나타낸다.

[0091] HJB 방정식은 해밀토니안으로 인해 이를 푸는 데에 유한 차분법이 바로 적용될 수 없으므로, 최적 제어 문제는 다음과 같이 HJB 방정식에 FPK 방정식이 그 제약으로서 결합된 MFG 문제로 새로 정의된다.

수학식 22

$$\min_{p_k(t)} \mathbb{E} \left[\int_0^{T_f} \theta_k^m(t) dt + \theta_k^m(T_f) \right]$$

subject to:

$$\partial_t m(t, S) + \nabla_E m(t, S)E(t) + \nabla_\beta m(t, S)\beta(t) = 0$$

[0092]

[0093] 그러면, 다음 수학식에서 볼 수 있는 바와 같이, $\theta_k^m(T_f) = 0$ 으로 설정하고 라그랑주 승수(Lagrange multiplier) $\lambda(t, S)$ 를 도입함으로써 라그랑지안(Lagrangian) $L(m(t, S), p(t, S), \lambda(t, S))$ 이 획득된다.

수학식 23

$$L(m(t, S), p(t, S), \lambda(t, S))$$

$$= \int_{t=0}^{T_f} \int_{E=0}^{E_{max}} \int_{\beta=0}^{\beta_{max}} \left[\theta_k^m(t, S)m(t, S) + \lambda(t, S) \left(\partial_t m(t, S) + \nabla_E m(t, S)E(t) + \nabla_\beta m(t, S)\beta(t) \right) \right] dt dE d\beta$$

[0094]

[0095] 이제, FPK 방정식을 풀기 위한 수학식 21의 변환과 마찬가지로 수학식 23을 푸는 데에 유한 차분법을 적용함으로써, MFG로서 새로 정의된 최적 제어 문제를 풀 수가 있다. 이에 따라, 다음과 같이 이 MFG를 위한 이산화된 라그랑지안이 주어진다.

수학식 24

$$L_d = \delta_t \delta_E \delta_\beta \sum_{i=1}^{X+1} \sum_{j=1}^{Y+1} \sum_{k=1}^{Z+1} [M(i, j, k)U(i, j, k) + \lambda(i, j, k)(\Gamma + \phi + \zeta)]$$

[0096]

[0097] 여기서 Γ , ϕ 및 ζ 는 각각 다음과 같다.

수학식 25

$$\Gamma = \frac{1}{\delta_t} \left[M(i+1, j, k) - \frac{1}{2}M(i, j+1, k) + M(i, j-1, k) + M(i, j, k+1) + M(i, j, k-1) \right]$$

[0098]

수학식 26

$$\phi = \frac{1}{2\delta_\beta} [M(i, j, k+1)P(i, j, k+1)\omega(i, j, k+1) - M(i, j, k-1)P(i, j, k-1)\omega(i, j, k-1)]$$

[0099]

수학식 27

$$\zeta = \frac{1}{2\delta_E} [M(i, j+1, k)P(i, j+1, k) - M(i, j-1, k)P(i, j-1, k)]$$

[0100]

[0101] 이들 식에서 $M(i, j, k)$, $P(i, j, k)$, $U(i, j, k)$ 및 $\lambda(i, j, k)$ 는 각각 격자 공간 내의 격자점 (i, j, k) (즉, 시간 i , 에너지 레벨 j 및 간섭 상태 k)에서의 평균장, 송신 전력, 효율 함수 값 및 라그랑주 승수를 나타낸다.

[0102] 수립된 최적 제어 정책을 위해서는 격자 공간에 대해 최적의 결정 변수 P^* , M^* , λ^* 가 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 조건을 만족하여야 한다. 격자 공간 내의 임의의 점 (i, j, k) 에 있어서, 최적의 송신 제어 정책은 다음의 수학식이 0이 되도록 하는 것이다.

수학식 28

$$\frac{\delta L_d}{\delta P(i, j, k)} = \sum_{j=1}^{Y+1} \sum_{k=1}^{Z+1} M(i, j, k) \frac{\delta U(i, j, k)}{\delta P(i, j, k)} + \left[\frac{M(i, j, k)}{2\delta_E} + \frac{M(i, j, k)\omega(i, j, k)}{2\delta_\beta} \right] [\lambda(i, j+1, k) - \lambda(i, j-1, k)]$$

[0103]

[0104] 추가적으로, $\frac{\delta L_d}{\delta M(i, j, k)} = 0$. 으로부터 라그랑주 승수에 관한 다음의 관계가 도출된다.

수학식 29

$$\lambda(i-1, j, k) = \frac{[\lambda(i, j+1, k) + \lambda(i, j-1, k)] + [\lambda(i, j, k+1) + \lambda(i, j, k-1)]}{2} - \frac{1}{2} \delta_t P(i, j, k) \left[\frac{\omega(i, j, k)}{\delta_\beta} + \frac{1}{\delta_E} \right] [\lambda(i, j+1, k) - \lambda(i, j-1, k)] + \delta_t U(i, j, k)$$

[0105]

[0106]

예시적인 송신 전력 제어 기법

[0107]

도 2는 본 발명의 실시예에 따라 MTC를 위해 송신 전력을 제어하는 기법을 의사코드(pseudocode)의 형태로 제시한다. 예시적인 송신 전력 제어 기법은 네트워크 환경(가령, 네트워크 환경(100)) 내의 개별 MTC 디바이스의 송신 전력을 최적으로 조정하여 송신 기간 동안의 배터리 에너지 소모를 최소화하기 위한 것이다. 이를 위해, 네트워크 환경 내의 MTC 디바이스와 연관된 간섭이 고려될 수 있다(그러한 간섭은 MTC 디바이스의 통신 외에도 HTC 디바이스의 액세스를 위해 구성된 네트워크 환경에서 해당 MTC 디바이스에 의해 유발되어 다른 MTC 디바이스가 겪는 간섭은 물론 HTC 디바이스가 겪는 간섭도 나타낸다).

[0108]

실시예에서, 송신 전력 제어 기법은 네트워크 환경 내에 위치한 다수의 MTC 디바이스에 걸친 시스템 상태(이는 잔여 배터리 에너지 및 연관된 간섭에 의해 정의된 2차원 상태일 수 있음)의 통계적 분포를 나타내는 평균장의 FPK 방정식이 시간 구간(가령, $[0, T_f]$)에 걸친 각각의 MTC 디바이스의 송신 전력의 최적 제어 정책의 관정을 좌우하는 HJB 방정식에 제약으로서 결합된 평균장 게임의 해를 유한 차분법을 사용하여 획득하는 것을 수반한다. 각각의 MTC 디바이스의 송신 전력의 최적 제어 정책은 해당 MTC 디바이스로부터의 송신의 SINR 및 송신 전력에 기반한 효용 함수가 시간 구간에 걸쳐 누적된 비용 값을 최소화한다. 예시적인 송신 전력 제어 기법에 따르면, 도 2에 보여진 바와 같이, 시간 구간과 더불어, 잔여 배터리 에너지의 구간(가령, $[0, E_{max}]$) 및 연관된 간섭의 구간(가령, $[0, \beta_{max}]$)에 의해 정의된 3차원 도메인 공간이 이산화된 격자 공간 내의 복수의 격자점 각각에 대해, FPK 방정식의 이산화된 버전(version)을 사용하여 시간에 있어서 순방향으로 평균장의 갱신치(updated value)가 계산되고, 평균장 게임을 위한 이산화된 라그랑지(이는 수학식 24에서 볼 수 있듯이 효용 함수에 기반함)에 기반하여 시간에 있어서 역방향으로 송신 전력의 갱신치가 계산될 수 있는데, 수렴 해를 얻기 위해 그러한 계산에서 수학식 21, 수학식 28 및 수학식 29가 반복적으로 사용될 수 있다. 구체적으로, 그러한 MFG의 해는 다음과 같이 획득될 수 있다.

[0109]

실시예에 따르면, 단계(205)에 의해 나타내어진 바와 같이, 먼저 평균장, 라그랑주 승수 및 송신 전력 각각의 초기치(initial value)가 획득된다. 평균장은 FPK 방정식에 따라 시간에 있어서 순방향으로 전개되므로, 평균장의 초기치는 격자 공간 내의 격자점 $(0,0,0)$ 에 대해 주어진다. HJB 방정식이 시간에 있어서 역방향으로 계산되므로, 송신 전력과 라그랑주 승수 각각의 초기치는 격자점 $(X+1,0,0)$ 에 대해 주어진다.

[0110]

이후, 단계(210), 단계(215) 및 단계(220)를 반복하는 루프 반복(loop iteration)이 수행된다. 이 루프 반복은 반복 종료 조건이 만족될 때까지 반복된다. 예를 들어, 그러한 종료 조건은 루프가 사전설정된 최대 반복 횟수($Iter_{max}$)만큼 반복된 것일 수 있다. 몇몇 예시적인 구현에서, 이 루프 반복은 다른 독립적인 반복 종료 조건이 만족된 경우에 종료될 수 있는데, 예를 들어, 루프의 반복 횟수(Iter)가 최대 반복 횟수에 미치지 않더라도, 평균장의 갱신치 및 그것의 이전 값의 차이가 사전설정된 값(가령, 10^{-5})보다 작다면 루프 반복은 종료될 수 있다.

[0111]

단계(210)에서, 격자 공간 내의 각각의 격자점에 대해, 이산화된 FPK 방정식(가령, 수학식 21)을 사용하여 평균장의 갱신치가 계산되는데, FPK 방정식의 이산화된 버전은 송신 전력에 의존하는 항 및 간섭 이득에 의존하는

항을 포함할 수 있다. 특히, 수학식 21으로부터, 평균장의 갱신치 $M(i+1, j, k)$ 는 시간에 있어서 순방향으로 계산된 것임이 이해될 수 있다. 추가로, 잔여 배터리 에너지 상태만 스텝 크기만큼 변화시킨 송신 전력 $P(i, j+1, k)$ 가 0이 아니라면 시간 및 두 상태 변수 모두 각자의 스텝 크기만큼 변화시킨 평균장 $M(i+1, j+1, k+1)$ 은 0이 될 수 있고, 그렇지 않으면 그러한 변화가 없을 때의 평균장

$M(i, j, k)$ 과 동일하게 유지될 수 있다.

[0112] 단계(215)에서, 격자 공간 내의 각각의 격자점에 대해, 라그랑주 승수의 갱신치가 계산되는데, 이는 오직 상기

평균장에 대한 이산화된 라그랑지안의 변화율(즉, $\frac{\delta L_d}{\delta M(i, j, k)} = 0$)이 0임을 나타내는 관계식(가령, 수학식 29)에 기반할 수 있다. 특히, 라그랑주 승수의 갱신치 $\lambda(i - 1, j, k)$ 는 시간에 있어서 역방향으로 계산된 것임이 이해될 수 있다.

[0113] 단계(220)에서, 격자 공간 내의 각각의 격자점에 대해, 송신 전력의 갱신치가 계산되는데, 이는 오직 송신 전력

에 대한 이산화된 라그랑지안의 변화율(가령, 수학식 28)이 0임(즉, $\frac{\delta L_d}{\delta P(i, j, k)} = 0$)을 나타내는 관계식에 기반할 수 있다. 특히, 송신 전력의 갱신치 $P(i - 1, j, k)$ 는 시간에 있어서 역방향으로 계산된 것임이 이해될 수 있다.

[0114] 실시예에서, MFG의 해는 장래의 참조를 위해 다수의 MTC 디바이스에 대해 일괄처리(batch processing)을 수행하는 방식으로 획득될 수 있다. 또한, 획득된 해는 나중에 네트워크 환경 내의 MTC 디바이스에 의해 최적 제어 정책에 부합하는 MTC 송신을 위해 인텍싱 동작으로써 참조될 데이터 구조(가령, 룩업 테이블(Look-Up Table: LUT))의 형태로 제공될 수 있고, 이에 따라 MTC 디바이스는 최적으로 제어된 전력으로써 송신할 수가 있다. 몇몇 예시적인 구현에서, MTC 디바이스가 HTC 디바이스와 공존하는 네트워크 환경에서 MTC 디바이스에서 이용가능한 배터리 에너지 레벨 및 MTC 디바이스와 연관된 간섭의 측정치를 사용하여 도 2에 예시된 송신 전력 제어 기법에 따라 MFG 해가 일괄 처리 방식으로 획득되고, 획득된 해는 네트워크 환경 내에 장래에 존재할 어떤 MTC 디바이스에 의해서든 최적의 송신 전력으로써 MTC 송신을 수행하는 데에 사용될 수 있도록 LUT 형태로 저장될 수 있다. 이에 따라, 그러한 MTC 디바이스는 개별적으로 LUT 내의 이미 획득된 MFG 해를 참조함으로써 실시간으로 MFG를 푸는 방식의 구현보다 감소된 지연시간이라는 이점을 얻을 수 있고, 특히 저지연이 요구되는 애플리케이션(가령, uRLLC)에서 유리할 것이다.

[0115] 예시적인 송신 전력 제어 장치

[0116] 도 3은 본 발명의 실시예에 따라 MTC를 위한 송신 전력 제어를 수행하는 장치의 블록도이다. 예시적인 송신 전력 제어 장치(300)는 전송된 송신 전력 제어 기법을 사용하여 무선 통신 네트워크 환경(가령, 네트워크 환경(100)) 내의 MTC 디바이스를 위한 최적의 송신 전력 제어 정책을 판정하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 무선 통신 장치(300)는 네트워크 환경 내에 위치한 디바이스, 또는 이와 통신가능하게 커플링된 다른 디바이스이거나 그러한 디바이스 내에 구현될 수 있다. 도 3을 참조하면, 송신 전력 제어 장치(300)는 프로세서(processor)(310) 및 메모리(memory)(320)를 포함하는 것으로 예시된다. 실시예에서, 프로세서(310)는 도 2의 송신 전력 제어 기법에 따라 장치(300)를 동작시킬 수 있다. 예를 들어, 메모리(320)에는 컴퓨터 실행가능(또는 프로세서 실행가능) 명령어가 저장될 수 있는데, 이는 프로세서(310)에 의해 실행되는 경우 장치(300)로 하여금 전송된 송신 전력 제어 기법을 수행하도록 할 수 있다.

[0117] 예시적인 실시예는 본 문서에 기술된 동작, 기법, 프로세스, 또는 이의 어떤 양상이나 부분이 체현된 컴퓨터 프로그램을 포함하는 컴퓨터 판독가능 저장 매체로서 구현될 수 있다. 이러한 컴퓨터 판독 가능 저장 매체에는 프로그램 명령어, 로컬 데이터 파일, 로컬 데이터 구조 등등이 단독으로 또는 조합되어 포함될 수 있다. 개시된 동작, 기법, 프로세스, 또는 이의 어떤 양상이나 부분을 구현하거나 이용할 수 있는 프로그램은 컴퓨터에 의해 실행될 수 있는 어떤 유형의 (가령, 컴파일형(compiled) 또는 해석형(interpreted)) 프로그래밍 언어, 예컨대, 어셈블리(assembly), 기계어(machine language), 프로시저형(procedural) 언어, 객체지향(object-oriented) 언어 등등으로 구현될 수 있고, 하드웨어 구현과 조합될 수 있다. 용어 "컴퓨터 판독가능 저장 매체"는, 컴퓨팅 장치에 의한 실행을 위한 명령어(실행 시에 컴퓨팅 장치로 하여금 개시된 기법을 수행하게 함)를 저장할 수 있고, 그러한 명령어에 의해 사용되거나 이와 연관된 데이터 구조를 저장할 수 있는 임의의 매체를 포함할 수 있다. 컴퓨터 판독가능 저장 매체의 예는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체, CD-ROM, DVD와 같은 광 기록 매체, 플롭티컬 디스크와 같은 자기-광 매체, 그리고 ROM, RAM, 플래시 메모리, 솔리드 스테이트(solid-state) 메모리와 같은 메모리 디바이스를 포함하되, 이에 한정되지 않는다.

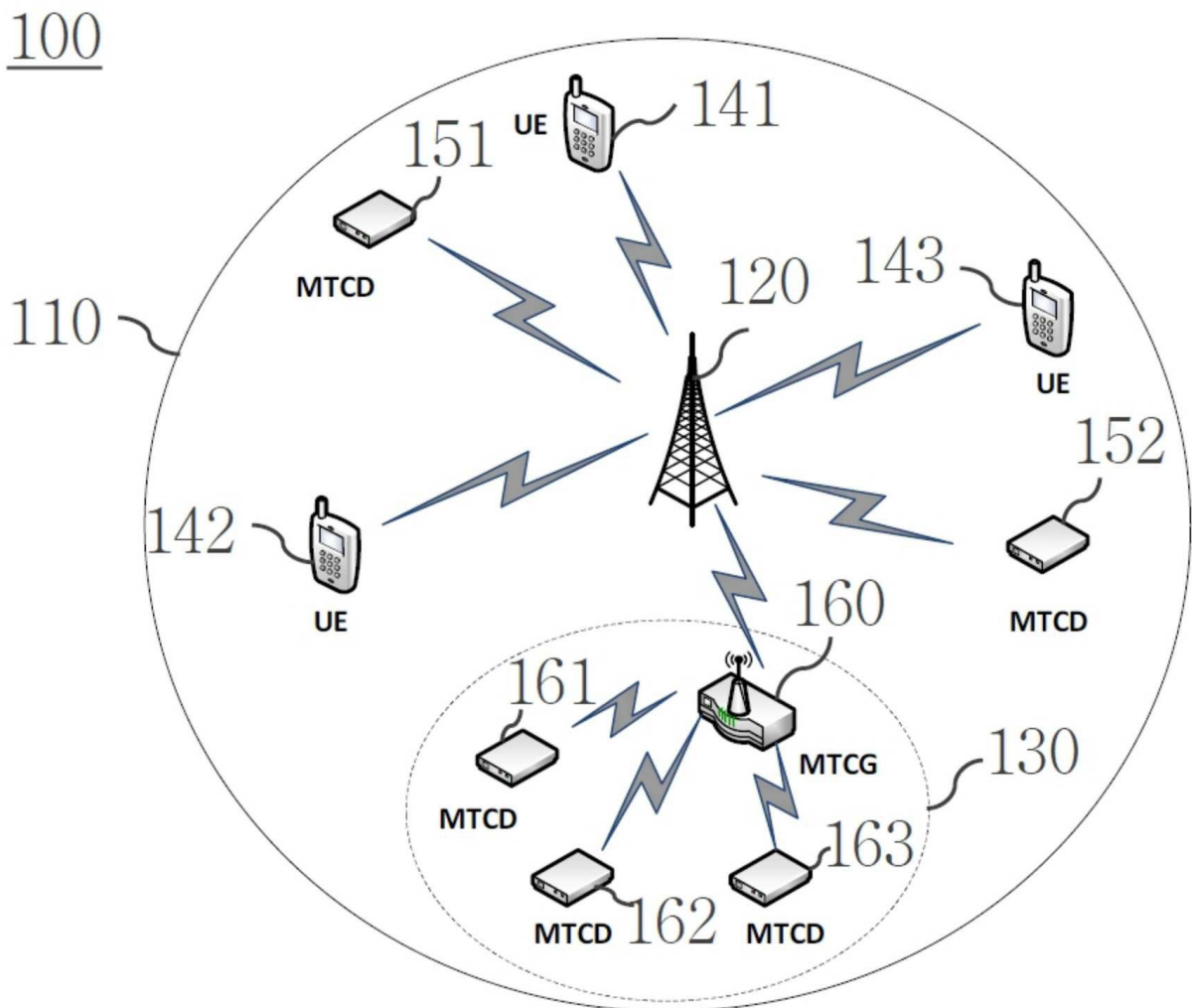
[0118] 이상에서 본 발명의 몇몇 실시예가 상세하게 기술되었으나, 이는 제한적이 아니고 예시적인 것으로 간주되어야 한다. 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 개시된 실시예의 세부사항에 대해 본 발명의 범주에서 벗어나지 않고서 다양한 변경이 행해질 수 있음을 이해할 것이다. 그러므로 본 발명의 범주는 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 안 되며, 후술하는 특허청구범위 및 그 균등물에 의해 정해져야 한다.

부호의 설명

- [0119] 100: 네트워크 환경
- 120: 기지국
- 141, 142, 143: HTC 디바이스
- 151, 152, 161, 162, 163: MTC 디바이스

도면

도면1



도면2

200

초기화

$M(0, 0, 0), P(X+1, 0, 0), \lambda(X+1, 0, 0), Iter = 1$

repeat

평균장 갱신

for all $i = 0: 1: X$ do

for all $j = 1: 1: Y$ do

for all $k = 1: 1: Z$ do

Calculate $M(i+1, j, k)$

if $P(i, j+1, k) = 0$

$M(i+1, j+1, k+1) = M(i, j, k)$

else: $M(i+1, j+1, k+1) = 0$

end

end

end

라그랑주 승수 갱신

for all $i = X+1: -1: 1$ do

for all $j = 1: 1: Y$ do

for all $k = 1: 1: Z$ do

Calculate $\lambda(i-1, j, k)$

end

end

end

송신 전력 갱신

for all $i = X+1: -1: 1$ do

for all $j = 1: 1: Y$ do

for all $k = 1: 1: Z$ do

Calculate $P(i-1, j, k)$

end

end

end

until $Iter \geq Iter_{max}$

} 205

} 210

} 215

} 220

도면3

