(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0070875
(43) 공개일자 2023년05월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H02J 50/00 (2021.01) *H02J 50/20* (2016.01)
H02J 50/80 (2016.01) *H04W 74/08* (2019.01)
H04W 84/18 (2009.01)
(52) CPC특허분류
H02J 50/001 (2020.01)
H02J 50/20 (2016.02)
(21) 출원번호 10-2021-0156897
(22) 출원일자 2021년11월15일
심사청구일자 2021년11월15일

(71) 출원인
한림대학교 산학협력단
강원도 춘천시 한림대학길 1, 한림대학교(옥천동)
(72) 발명자
김의직
강원도 춘천시 지석로 29, 516동 1303호 (석사동, 휴먼타운아파트)
권정혁
강원도 춘천시 남춘로5번길 14-1, 301호(퇴계동)
이솔비
강원도 춘천시 후석로326번길 31, 303동 501호(후평동, 현대아파트)
(74) 대리인
김남혁

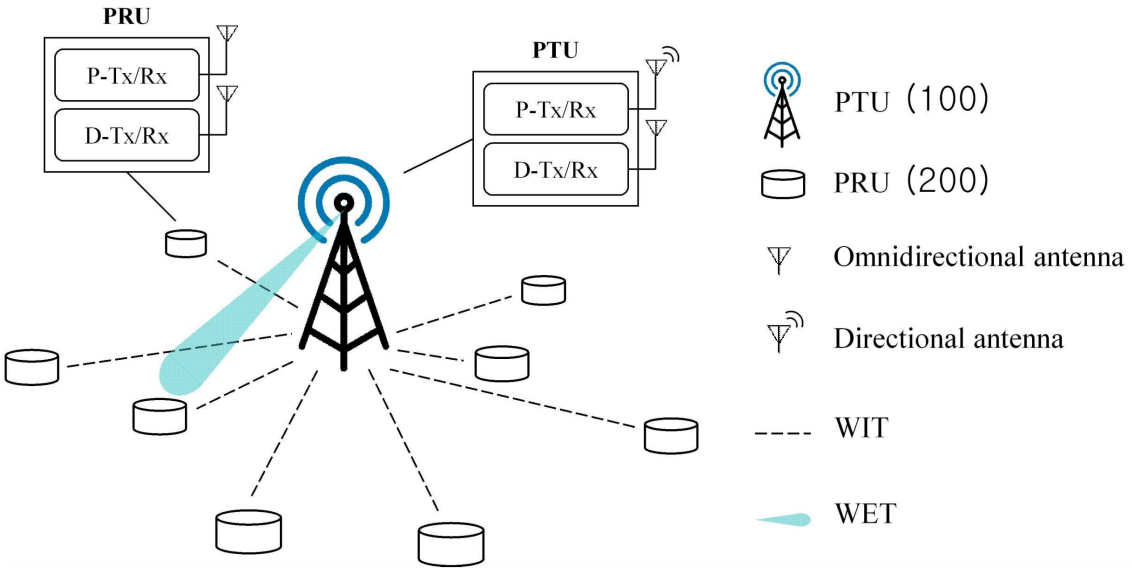
전체 청구항 수 : 총 7 항

(54) 발명의 명칭 **PRU의 잔여 에너지량을 기반으로 DPS를 할당하는 PTU, 및 WPSN 시스템**

(57) 요 약

본 개시는 중앙 코디네이터(PTU)와 다중 센서 장치(PRUs)로 구성된 WPSN(Wireless Powered Sensor Networks)을 위한 잔여 에너지 추정 기반 매체 접근 제어(REE-MAC) 프로토콜에 관한 것이다. PTU는 각 슈퍼프레임이 시작될 때 이전 슈퍼프레임 동안의 에너지 소모 및 에너지 하베스팅으로 인해 변경된 개별 PRU의 잔여 에너지량을 추정할 수 있다. 그런 다음, PTU는 WET 슈퍼프레임 내에서 전용 전력 슬롯(DPS)을 할당하는 기준에 따라 충전 우선순위를 결정한다.

대 표 도 - 도1a



(52) CPC특허분류
H02J 50/80 (2016.02)
H04W 74/0875 (2013.01)
H04W 84/18 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1345323113
과제번호 2020R1I1A3052733
부처명 교육부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 지역대학우수과학자지원사업
연구과제명 ULP-IoT를 위한 딥뉴럴 네트워크 모델 기반 실시간 고정밀 SWIPT 운용 플랫폼 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 한림대학교 산학협력단
연구기간 2020.06.01 ~ 2025.05.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711140077
과제번호 2021R1C1C2095696
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 세종과학펠로우십
연구과제명 의료 사물인터넷을 위한 부하분산 블록엣지 프레임워크 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 한림대학교 산학협력단
연구기간 2021.09.01 ~ 2026.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

WPSN(Wireless Powered Sensor Networks)에 포함되어 WET(Wireless Energy Transfer) 슈퍼프레임 및 WIT(Wireless Information Transfer) 슈퍼프레임에 따라 동작하는 PTU(Power Transmitting Unit)의 제어 방법에 있어서,

복수의 PRU(Power Receiving Unit) 각각의 잔여 에너지량을 추정하는 단계;

상기 잔여 에너지량을 기반으로, 상기 복수의 PRU 각각의 충전에 필요한 DPS(Dedicated Power Slot)의 수를 산출하는 단계; 및

상기 산출된 DPS의 수를 기반으로, 적어도 하나의 WET 슈퍼프레임 내에서 상기 복수의 PRU 각각에 할당될 DPS의 수를 식별하는 단계;를 포함하는, PTU의 제어 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 복수의 PRU 각각의 충전에 필요한 DPS의 수를 산출하는 단계는,

PRU의 최대 배터리 용량에서 상기 PRU의 잔여 에너지량을 차감한 값을 하나의 DPS마다 수신되는 에너지량으로 나누어, 충전에 필요한 DPS의 수를 산출하는, PTU의 제어 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 복수의 PRU 각각에 할당될 DPS의 수를 식별하는 단계는,

각 PRU의 충전에 필요한 DPS의 수를 상기 복수의 PRU 전체의 충전에 필요한 DPS의 수로 나눈 값에 따라, 각 PRU에 할당될 DPS의 수를 식별하는, PTU의 제어 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 PTU의 제어 방법은,

상기 복수의 PRU 각각에 할당될 DPS의 수에 대한 리스트를 내림차순으로 정렬하여, 상기 복수의 PTU의 충전 우선순위를 결정하는 단계; 및

상기 복수의 PRU 각각에 할당될 DPS의 수 및 상기 충전 우선순위를 기반으로, WET 슈퍼프레임 내 DPS들을 각 PRU에 할당하는 단계;를 더 포함하는, PTU의 제어 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 PTU의 제어 방법은,

각 PRU에 대하여, 할당된 DPS의 시작 인덱스를 생성하는 단계; 및

WET 슈퍼프레임의 첫번째 비콘 서브슬롯 동안, 상기 생성된 시작 인덱스를 포함하는 PTU 비콘을 각 PRU로 브로드캐스트 하는 단계;를 포함하는, PTU의 제어 방법.

청구항 6

전자 장치에 있어서,

적어도 하나의 인스트럭션이 저장된 메모리; 및

상기 인스트럭션을 실행하여 제1항의 제어 방법을 수행하는 프로세서;를 포함하는, 전자 장치.

청구항 7

컴퓨터 판독 가능 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램에 있어서,

전자 장치의 프로세서에 의해 실행되어 상기 전자 장치로 하여금 제1항의 제어 방법을 수행하도록 하는, 컴퓨터 판독 가능 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 개시는 WPSN 시스템에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 각 센서 장치의 잔여 에너지량을 기반으로 WET(Wireless Energy Transfer) 슈퍼프레임 내 DPS 할당을 PRU 별로 수행하는 MAC 프로토콜에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] WPSN에 대한 효율적인 MAC 프로토콜을 설계하기 위해 많은 연구가 수행되었다. 일부 선행문헌들(Naderi et al, Iqbal et al, Ha et al)에서 WPSN에 대한 반송파 감지 다중 액세스 및 충돌 회피(CSMA/CA) 기반 MAC 프로토콜이 제안된 바 있다. 센서 장치는 채널에 경쟁적으로 액세스하여 에너지 하베스팅 및 데이터 전송을 수행하며 채널 액세스 우선 순위는 잔여 에너지량에 따라 결정되는 백오프 기간 및 프레임 간 기간(IFS)에 의해 확률적으로 차별화된다. 또한, 일부 선행문헌들(Ju et al, Hadzi et al, Yao et al)에서는, 중앙 코디네이터가 센서 장치의 잔여 에너지, 데이터 전송에 필요한 에너지 소모를 고려하여 에너지 하베스팅 및 데이터 전송을 위한 시간 자원을 할당하고, 센서 장치는 전용 타임 슬롯에서 에너지를 수확하여 데이터를 전송하는, TDMA(Time-Division Multiple Access) 기반 MAC 프로토콜이 제안되었다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0003] 본 개시는, 이전 슈퍼프레임에서 각 PRU(Power Receiving Unit)가 소모한 에너지량 및 수확한 에너지량을 기반으로 각 PRU의 잔여 에너지량을 추정하고, 추정된 잔여 에너지량에 따라 이어지는 슈퍼프레임 내 각 PRU에 대한 DPS의 할당을 수행하는 PTU의 제어 방법을 제공한다.

[0004] 본 개시의 목적들은 이상에서 언급한 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 본 개시의 다른 목적 및 장점들은 하기의 설명에 의해서 이해될 수 있고, 본 개시의 실시 예에 의해 보다 분명하게 이해될 것이다. 또한, 본 개시의 목적 및 장점들은 특허 청구 범위에 나타낸 수단 및 그 조합에 의해 실현될 수 있음을 쉽게 알 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0005] 본 개시의 일 실시 예에 따라 WPSN(Wireless Powered Sensor Networks)에 포함되어 WET(Wireless Energy Transfer) 슈퍼프레임 및 WIT(Wireless Information Transfer) 슈퍼프레임에 따라 동작하는 PTU(Power Transmitting Unit)의 제어 방법은, 복수의 PRU(Power Receiving Unit) 각각의 잔여 에너지량을 추정하는 단계, 상기 잔여 에너지량을 기반으로, 상기 복수의 PRU 각각의 충전에 필요한 DPS(Dedicated Power Slot)의 수를 산출하는 단계, 상기 산출된 DPS의 수를 기반으로, 적어도 하나의 WET 슈퍼프레임 내에서 상기 복수의 PRU 각각에 할당될 DPS의 수를 식별하는 단계를 포함한다.

[0006] 상기 복수의 PRU 각각의 충전에 필요한 DPS의 수를 산출하는 단계는, PRU의 최대 배터리 용량에서 상기 PRU의 잔여 에너지량을 차감한 값을 하나의 DPS마다 수신되는 에너지량으로 나누어, 충전에 필요한 DPS의 수를 산출할 수 있다.

[0007] 상기 복수의 PRU 각각에 할당될 DPS의 수를 식별하는 단계는, 각 PRU의 충전에 필요한 DPS의 수를 상기 복수의 PRU 전체의 충전에 필요한 DPS의 수로 나눈 값에 따라, 각 PRU에 할당될 DPS의 수를 식별할 수 있다.

[0008] 상기 PTU의 제어 방법은, 상기 복수의 PRU 각각에 할당될 DPS의 수에 대한 리스트를 내림차순으로 정렬하여, 상

기 복수의 PTU의 충전 우선순위를 결정하는 단계, 상기 복수의 PRU 각각에 할당될 DPS의 수 및 상기 충전 우선순위를 기반으로, WET 슈퍼프레임 내 DPS들을 각 PRU에 할당하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0009] 여기서, 상기 PTU의 제어 방법은, 각 PRU에 대하여, 할당된 DPS의 시작 인덱스를 생성하는 단계, WET 슈퍼프레임의 첫번째 비콘 서브슬롯 동안, 상기 생성된 시작 인덱스를 포함하는 PTU 비콘을 각 PRU로 브로드캐스트 하는 단계를 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0010] 본 개시에 따른 WPSN의 REE-MAC 프로토콜은 서로 다른 주파수 대역에서 동시에 동작하는 두 가지 유형의 슈퍼프레임, 즉 WET(무선 에너지 전송) 슈퍼프레임과 WIT(무선 정보 전송) 슈퍼프레임을 사용한다. 각 슈퍼프레임이 시작될 때 코디네이터는 이전 슈퍼프레임 동안 에너지 소모 및 에너지 하베스팅으로 인해 변경된 개별 센서 장치의 잔여 에너지량을 추정한다.

[0011] REE-MAC은 센서 장치의 에너지 하베스팅 동작을 스케줄링하기 위한 제어 메시지로 인한 오버헤드를 줄이고 센서 장치에 데이터 전송 기회에 대한 공정성을 제공한다.

[0012] REE-MAC은 WET 슈퍼프레임 내에서 전용 전력 슬롯(DPS)을 할당하는 기준에 따라 충전 우선순위를 결정한다. REE-MAC의 우수성을 검증하기 위해 실험적인 시뮬레이션이 수행된 결과 REE-MAC은 기존의 대표적인 WPSN MAC 프로토콜에 비해 수확 에너지량, 평균 동결 시간 및 공정성 측면에서 더 나은 성능을 나타낸다는 점이 입증되었다.

도면의 간단한 설명

[0013] 도 1a는 본 개시에 따른 REE-MAC의 시스템 아키텍처를 나타내는 도면,

도 1b는 본 개시의 일 실시 예에 따라 PRU의 잔여 에너지량을 기반으로 DPS를 할당하는 PTU의 동작을 설명하기 위한 흐름도,

도 2는 본 개시의 일 실시 예에 따른 REE-MAC 기반 WPSN의 WET 슈퍼프레임 및 WIT 슈퍼프레임의 구조를 설명하기 위한 도면,

도 3은 본 개시의 일 실시 예에 따른 REE-MAC의 전체 동작을 설명하기 위한 도면,

도 4는 본 개시의 일 실시 예에 따른 WPSN의 성공 및 충돌 각각에 해당하는 타이밍 다이어그램,

도 5는 본 개시의 비교실험예에서 데이터 패킷의 사이즈 별로 PRU의 수에 따른 에너지 수확량을 나타내는 그래프들,

도 6은 본 개시의 비교실험예에서 데이터 패킷의 사이즈 별로 PRU의 수에 따른 에너지 소모량을 나타내는 그래프들,

도 7은 본 개시의 비교실험예에서 데이터 패킷의 사이즈 별로 PRU의 수에 따른 동결 시간(freezing time)을 나타내는 그래프들,

도 8은 본 개시의 비교실험예에서 데이터 패킷의 사이즈 별로 개별적인 PRU에 대한 잔여 에너지의 분포를 나타내는 그래프들,

도 9는 본 개시의 비교실험예에서 데이터 패킷의 사이즈 별로 개별적인 PRU에 대한 처리량(throughput) 분포를 나타내는 그래프들,

도 10은 본 개시의 비교실험예에서 데이터 패킷의 사이즈 별로 PRU의 수에 따른 잔여 에너지의 공정성 인덱스(fairness index)를 나타내는 그래프들,

도 11은 본 개시의 비교실험예에서 데이터 패킷의 사이즈 별로 PRU의 수에 따른 처리량의 공정성 인덱스(fairness index)를 나타내는 그래프들, 그리고

도 12는 본 개시의 일 실시 예에 따른 PTU의 구성을 설명하기 위한 블록도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0014] 본 개시에 대하여 구체적으로 설명하기에 앞서, 본 명세서 및 도면의 기재 방법에 대하여 설명한다.

[0015] 먼저, 본 명세서 및 청구범위에서 사용되는 용어는 본 개시의 다양한 실시 예들에서의 기능을 고려하여 일반적인 용어들을 선택하였다. 하지만, 이러한 용어들은 당해 기술 분야에 종사하는 기술자의 의도나 법률적 또는 기술적 해석 및 새로운 기술의 출현 등에 따라 달라질 수 있다. 또한, 일부 용어는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있다. 이러한 용어에 대해서는 본 명세서에서 정의된 의미로 해석될 수 있으며, 구체적인 용어 정의가 없으면 본 명세서의 전반적인 내용 및 당해 기술 분야의 통상적인 기술 상식을 토대로 해석될 수도 있다.

[0016] 또한, 본 명세서에 첨부된 각 도면에 기재된 동일한 참조번호 또는 부호는 실질적으로 동일한 기능을 수행하는 부품 또는 구성요소를 나타낸다. 설명 및 이해의 편의를 위해서 서로 다른 실시 예들에서도 동일한 참조번호 또는 부호를 사용하여 설명한다. 즉, 복수의 도면에서 동일한 참조 번호를 가지는 구성요소를 모두 도시되어 있다고 하더라도, 복수의 도면들이 하나의 실시 예를 의미하는 것은 아니다.

[0017] 또한, 본 명세서 및 청구범위에서는 구성요소들 간의 구별을 위하여 "제1", "제2" 등과 같이 서수를 포함하는 용어가 사용될 수 있다. 이러한 서수는 동일 또는 유사한 구성요소들을 서로 구별하기 위하여 사용하는 것이며 이러한 서수 사용으로 인하여 용어의 의미가 한정 해석되어서는 안 된다. 일 예로, 이러한 서수와 결합된 구성요소는 그 숫자에 의해 사용 순서나 배치 순서 등이 제한되어서는 안 된다. 필요에 따라서는, 각 서수들은 서로 교체되어 사용될 수도 있다.

[0018] 본 명세서에서 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "구성되다" 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.

[0019] 본 개시의 실시 예에서 "모듈", "유닛", "부(part)" 등과 같은 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 수행하는 구성요소를 지칭하기 위한 용어이며, 이러한 구성요소는 하드웨어 또는 소프트웨어로 구현되거나 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다. 또한, 복수의 "모듈", "유닛", "부(part)" 등은 각각이 개별적인 특정한 하드웨어로 구현될 필요가 있는 경우를 제외하고는, 적어도 하나의 모듈이나 칩으로 일체화되어 적어도 하나의 프로세서로 구현될 수 있다.

[0020] 또한, 본 개시의 실시 예에서, 어떤 부분이 다른 부분과 연결되어 있다고 할 때, 이는 직접적인 연결뿐 아니라, 다른 매체를 통한 간접적인 연결의 경우도 포함한다. 또한, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 포함한다는 의미는, 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.

[0021] 이하에서, 첨부된 도면을 이용하여 본 발명의 다양한 실시 예들에 대하여 구체적으로 설명한다.

[0022] 도 1은 단일 PTU와 다중 PRU로 구성된 REE-MAC에서 고려하는 WPSN의 시스템 아키텍처를 나타낸다. PRU는 PTU의 전송 범위 내에 배치된다. PRU의 요청에 따라 PTU는 PRU에 전원을 공급하거나 PRU로부터 데이터를 수신할 수 있다. 이를 위해 PTU와 PRU에는 WET용 전력 송수신기(P-Tx/Rx)와 WIT용 데이터 송수신기(D-Tx/Rx)의 두 가지 유형의 송수신기가 장착되어 있다.

[0023] 장치의 P-Tx/Rx 및 D-Tx/Rx는 서로 다른 주파수 대역에서 독립적으로 작동하며 내부 시그널링을 통해 서로 상호작용할 수 있다. 이를 통해 REE-MAC의 WET 및 WIT가 동시에 수행될 수 있다. 또한, PTU의 P-Tx/Rx 및 D-Tx/Rx는 항상 켜진 상태로 유지하는 반면, PRU의 경우 해당 D-Tx/Rx만 항상 켜져 있고 P-Tx/Rx는 에너지를 절약하기 위해 비콘이나 전력을 수신하는 경우를 제외하고 꺼질 수 있다.

[0024] 또한, PTU와 PRU에는 두 개의 안테나가 구비될 수 있다. PTU에는 WET용 지향성 안테나와 WIT용 무지향성 안테나가 장착되어 있을 수 있다. PRU에는 WET 및 WIT용으로 각각 2개의 무지향성 안테나가 있을 수 있다.

[0025] 본 개시에 따른 REE-MAC에서 개별 PRU에 전력을 전달하는 시기와 기간을 결정하기 위해 PTU는 각 PRU가 단위 시간당 수신할 수 있는 전력의 양을 추정하며, 이는 수학식 1에 의해 도출될 수 있다.

수학식 1

[0026] $$P_{r,i}=P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 d_i^{-\alpha}$$

[0027] 여기서 $P_{r,i}$는 i번째 PRU가 초당 수신하는 전력량이고 P_t는 PRU의 전송 전력이다. 그리고 G_t, G_r은 각각 PTU와 PRU의 안테나 이득이다. 평면형 방사 패턴이 PTU의 지향성 안테나 모델로 간주된 바(Nobar et al), G_t는 $2\pi/\Theta$와 같고, Θ는 PTU의 지향성 안테나의 빔폭을 나타낸다.

[0028] 반면에, PRU는 무지향성 안테나를 사용하여 PTU로부터 전력을 수신하기 때문에, G_r은 1과 같다(Cai et al). 그리고, λ, d_i, α는 각각 파장, PTU와 i번째 PRU 사이의 거리, 경로 손실 지수를 나타낸다.

[0029] 도 2는 REE-MAC의 슈퍼프레임 구조를 나타낸다. REE-MAC은 분리된 주파수 대역에서 작동하는 이중 슈퍼프레임 구조(WET 및 WIT 슈퍼프레임)를 유지할 수 있다. WET 슈퍼프레임에서 PTU는 TDMA 방식으로 전용 일정에 따라 PRU에 전력을 전송하고 PRU는 WIT 슈퍼프레임에서 경쟁 기반 CSMA/CA를 사용하여 제어 메시지 및 데이터 패킷을 교환하기 위해 수확된 에너지를 사용할 수 있다. WET 슈퍼프레임은 동일한 크기의 여러 DPS(Dedicated Power Slots. 전용 전력 슬롯)로 나뉘며, 각 DPS는 간섭 없는 전력 수신을 위해 개별 PRU에 할당될 수 있다. DPS는 비콘 서브슬롯, P-Tx/Rx 스위칭 서브슬롯 및 WET 서브슬롯의 세 가지 서브슬롯으로 구성될 수 있다. 비콘 서브슬롯에서 PTU 또는 PRU의 비콘이 브로드캐스트 될 수 있다. PTU 비콘은 WET 슈퍼프레임의 첫 번째 DPS의 비콘 서브슬롯에서 전송되며, 이를 통해 PTU는 WET 슈퍼프레임의 DPS에 대한 할당 결과를 PRU에 알릴 수 있다.

[0030] WET 슈퍼프레임의 나머지 DPS의 비콘 서브슬롯에서 PRU는 PTU로 PRU 비콘을 전송하여 전력 전송을 요청할 수 있다. P-Tx/Rx 스위칭 서브슬롯에서 PTU는 수신된 PRU 비콘으로부터 PRU의 방향을 얻고 PRU는 에너지를 수확하기 위해 Tx에서 Rx로 P-Tx/Rx의 모드를 전환할 수 있다. WET 서브슬롯에서 PTU는 할당된 PRU에 전력을 전달할 수 있다. WIT 슈퍼프레임은 비콘 구간과 데이터 통신 구간으로 구성된다. WIT 슈퍼프레임의 비콘 구간에서 PTU는 D-Tx/Rx를 통해 WIT 슈퍼프레임 파라미터를 포함하는 비콘을 브로드캐스트 한다. PTU와 PRU는 CSMA/CA 방식으로 채널 액세스를 위해 서로 자유롭게 경쟁할 수 있다.

[0031] 도 3은 REE-MAC의 전반적인 동작을 나타낸 것이다. 여기서, 실선과 점선은 각각 WET 및 WIT 슈퍼프레임에서 장치의 작동을 나타낸다. 이 두 슈퍼프레임은 서로 다른 주파수 대역에서 WET 동작과 WIT 동작이 동시에 수행되기 때문에 서로 중첩되도록 표현될 수 있다. WIT 슈퍼프레임이 시작될 때 PTU는 먼저 D-Tx/Rx를 사용하여 비콘을 브로드캐스트 할 수 있다. PTU로부터 비콘을 수신한 PRU는 노드 식별자(ID), 잔여 에너지, 최대 배터리 용량, PTU로부터의 거리와 같은 에너지 하베스팅 정보를 PTU로 전송할 수 있다. 그 후 PTU와 PRU는 CSMA/CA를 사용하여 제어 메시지와 데이터 패킷을 교환할 수 있다.

[0032] WET 슈퍼프레임이 시작될 때 PTU는 DPS 할당을 수행할 수 있다. 이 작업은 개별 PRU가 완전히 충전되는 데 필요한 DPS 수 계산, 개별 PRU에 할당될 DPS 수 계산, 및 개별 PRU에 대한 충전 우선순위 결정의 세 가지 작업으로 구성될 수 있다.

[0033] DPS 할당이 완료된 후, PTU는 PTU 비콘을 브로드캐스트하여 WET 슈퍼프레임에서 첫 번째 DPS의 비콘 서브슬롯에서 스케줄링된 WET 슈퍼프레임 구조를 PRU에 알릴 수 있다. 그런 다음, 개별 PRU에 할당된 후속 DPS의 비콘 서브슬롯에서 PRU는 PRU 비콘을 PTU에 보낼 수 있다. PTU는 PRU 비콘을 통해 PRU의 방향을 획득하고 WET 서브슬롯에서 해당 PRU로 전력을 전송할 수 있다.

[0034] 개별 PRU의 잔여 에너지량을 추정하기 위해 PTU는 먼저 이전 WIT 슈퍼프레임에서 비콘, 성공, 충돌 및 유휴에 해당하는 슬롯의 수를 계산할 수 있다. 비콘 슬롯은 PTU와 PRU가 비콘을 송수신하기 위해 사용하는 슬롯을 나타낸다. 성공 슬롯은 PTU와 PRU 간의 성공적인 패킷 전송에 사용되는 슬롯을 나타낸다. 충돌 슬롯은 둘 이상의 PRU에서 동시에 전송되는 패킷으로 인해 충돌이 발생한 슬롯을 나타낸다. 유휴 슬롯은 랜덤 백오프로 인해 PRU가 전송한 패킷이 없는 슬롯을 의미한다. 네트워크 내 n개의 PRU는 항상 포화 상태에서 전송할 데이터 패킷을 가지고 있다고 가정한다. PTU는 PRU들의 노드 ID(즉, ID), 수신된 PRU 비콘으로부터 얻은 각 PRU까지의 거리(즉, D), 각 PRU의 이웃 노드 ID(즉, Nbr(i)), 및 수학식 2와 같이 행렬로 표현되는 이전 슈퍼프레임 동안 각 PRU로부터 수신된 패킷의 수(즉, Npkt)를 유지/관리한다.

수학식 2

[0035] $$ID=[id_{(1)},id_{(2)},\ldots,id_{(i)},\ldots,id_{(n)}],0<i\leq n$$

[0036] $$D=[d_{(1)},d_{(2)},\ldots,d_{(i)},\ldots,d_{(n)}],0<i\leq n$$

[0037] $$Nbr_{(i)}=[id_{(i,1)},id_{(i,2)},\ldots,id_{(i,l)}],0<i\leq n,0\leq l\leq(n-1)$$

[0038] $$Npkt=[npkt_{(1)},npkt_{(2)},\ldots,npkt_{(i)},\ldots,npkt_{(n)}],0<i\leq n,$$

[0039] 여기서 $id_{(i)}$는 i번째 PRU의 노드 ID, $d_{(i)}$는 PTU에서 i번째 PRU까지의 거리, $id_{(i,1)}$는 i번째 PRU의 1번째 인접 PRU의 노드 ID, $npkt_{(i)}$는 이전 WIT 슈퍼프레임 동안 i번째 PRU에서 수신된 패킷 수이다.

[0040] 이전 WIT 슈퍼프레임에서 비콘 및 성공에 해당하는 슬롯의 수는 L_{beacon} 및 Npkt를 사용하여 계산할 수 있으며, 여기서 L_{beacon}은 DPS의 비콘 서브슬롯의 길이를 나타낸다. 충돌 및 유휴 슬롯의 수를 계산하기 위해, 이전 WIT 슈퍼프레임에서 비콘 및 성공 슬롯을 제외한 나머지 슬롯의 충돌 및 유휴 확률을 각각 P_{col} 및 P_{idle}로 간주할 수 있다(Bianchi et al). P_{col}는 이전 WIT 슈퍼프레임에서 비콘 및 성공에 해당하는 슬롯을 제외한 무작위로 선택된 슬롯에서 둘 이상의 PRU가 패킷을 전송할 때 발생하는 충돌 확률을 나타내며, 이는 수학식 3과 같다.

수학식 3

[0041] $$p_{col}=\sum_{k=2}^{n}\binom{n}{k}\tau^{k}(1-\tau)^{n-k}$$

[0042] 여기서 τ는 PRU가 이전 WIT 슈퍼프레임에서 비콘과 성공에 해당하는 슬롯을 제외한 무작위로 선택된 슬롯에서 패킷을 전송할 확률을 나타낸다. P_{idle}는 이전 WIT 슈퍼프레임에서 비콘 및 성공에 해당하는 슬롯을 제외한 무작위로 선택된 슬롯에서 PRU가 패킷을 전송하지 않을 확률을 나타내며, 이는 수학식 4와 같다.

수학식 4

[0043] $$p_{idle}=1-p_{col}$$

[0044] 그러면, 이전 WIT 슈퍼프레임의 총 슬롯 수($n_{totalSlots}$)는 이하 수학식 5와 같이 계산될 수 있다.

수학식 5

[0045] $$n_{totalSlots}=L_{dataSF}/L_{BP}$$

[0046] 여기서 L_{BP}는 단위 백오프 기간과 동일한 슬롯 길이를 나타낸다. 이전 WIT 슈퍼프레임에서 비콘, 성공, 충돌 및 유휴에 해당하는 슬롯의 수인 $n_{beaconSlots}$, $n_{succSlots}$, $n_{colSlots}$, $n_{idleSlots}$는 각각 이하 수학식 6 내지 9를 통해 계산될 수 있다.

수학식 6

[0047] $$n_{beaconSlots}=L_{beacon}/L_{BP}$$

수학식 7

[0048] $$n_{succSlots}=(L_{succ}\sum_{i=1}^{n}n_{pkt,i})/L_{BP}$$

수학식 8

[0049] $$n_{colSlots}=p_{col}(n_{totalSlots}-n_{beaconSlots}-n_{succSlots})$$

수학식 9

[0050] $$n_{idleSlots}=p_{idle}(n_{totalSlots}-n_{beaconSlots}-n_{succSlots})$$

[0051] 여기서 L_{succ}는 PTU와 PRU 간의 성공적인 전송에 소요되는 시간을 나타낸다.

[0052] 도 4는 성공적인 전송 및 충돌에 대한 타이밍 다이어그램을 보여준다. L_{data}, L_{SIFS}, L_{ACK}, 및 L_{DIFS}는 데이터 패킷의 길이, SIFS(Short Inter-Frame Space)의 길이, ACK(Acknowledgement)의 길이, DIFS(Distributed Inter-Frame Space)의 길이를 각각 나타낸다.

[0053] 여기서, PTU는 타이밍 다이어그램을 고려하여 이전 WIT 슈퍼프레임에서 비콘, 성공, 충돌 및 유휴 슬롯에서 i번째 PRU가 소모한 에너지량인 $E_{beacon,i}$, $E_{succ,i}$, $E_{col,i}$, $E_{idle,i}$를 각각 계산할 수 있다. $E_{beacon,i}$는 i번째 PRU가 비콘을 수신하기 위해 소모한 에너지량을 나타내며, 이하 수학식 10과 같이 주어질 수 있다.

수학식 10

[0054] $$E_{beacon,i}=n_{beaconSlots}E_{rx}L_{BP}$$

[0055] 여기서, E_{rx}는 D-Tx/Rx가 Rx 상태에 있을 때 PRU가 소모하는 초당 에너지량을 나타낸다. $E_{succ,i}$는 이전 WIT 슈퍼프레임에서 성공 슬롯 동안 i번째 PRU가 소모한 에너지량을 나타내며, 이는 수학식 11과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 11

[0056] $$E_{succ,i}=E_{succTx,i}+E_{succRx,i}+E_{succIdle,i}$$

[0057] 여기서, $E_{succTx,i}$는 D-Tx/Rx가 Tx 상태일 때 i번째 PRU의 성공적인 전송에 의해 소모되는 에너지량을 나타내고, $E_{succRx,i}$는 D-Tx/Rx가 Rx 상태일 때 i번째 PRU의 주변 유닛들의 성공적인 전송에 의해 소모된 에너지량을 나타낸다. 또한, $E_{succIdle}$은 D-Tx/Rx가 유휴 상태일 때 i번째 PRU에 인접하지 않은 PRU의 성공적인 전송에 소모되는 에너지량을 나타낸다. 이하 수학식 12에 의해 계산될 수 있다.

수학식 12

[0058] $$E_{succTx,i}=n_{pkt,i}(E_{tx}L_{data}+E_{rx}L_{ACK}+E_{idle}(L_{SIFS}+L_{DIFS}))$$

[0059] 여기서 E_{tx} 및 E_{idle}는 D-Tx/Rx가 Tx 및 유휴 상태일 때 PRU가 초당 소모하는 에너지량을 각각 나타낸다. 수학식

13에 의해 계산될 수 있다.

수학식 13

[0060] $$E_{succRx,i}=n_{succNbr,i}(E_{rx}L_{data}+E_{idle}L_{ACK}+E_{idle}(L_{SIFS}+L_{DIFS}))$$

[0061] 여기서 $n_{succNbr,i}$는 i번째 PRU의 인접 PRU가 PTU로 성공적으로 전송한 총 패킷 수를 나타낸다. 이하 수학식 14에 의해 계산될 수 있다.

수학식 14

[0062] $$E_{succIdle,i}=(n_{succSlots}-(n_{pkt,i}L_{data})-(n_{succNbr,i}L_{data}))E_{idle}L_{BP}$$

[0063] $E_{col,i}$는 이전 WIT 슈퍼프레임에서 충돌 슬롯 동안 i번째 PRU가 소모하는 에너지량을 나타내며, 이는 수학식 15와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 15

[0064] $$E_{col,i}=E_{colTx,i}+E_{colRx,i}+E_{colIdle,i}$$

[0065] 여기서 $E_{colTx,i}$는 i번째 PRU와 하나 이상의 다른 PRU가 동시에 패킷을 전송하는 충돌 슬롯 동안 i번째 PRU가 소모하는 에너지량을 나타낸다. $E_{colRx,i}$는 i번째 PRU가 아닌 2개 이상의 PRU가 동시에 패킷을 전송하는 충돌 슬롯동안 i번째 PRU가 소모하는 에너지량을 나타낸다. $E_{colIdle,i}$는 D-Tx/Rx가 유휴 상태일 때 i번째 PRU가 충돌 슬롯 동안 소모하는 에너지량을 나타낸다. 이 경우, i번째 PRU의 전송 범위 밖에 있는 둘 이상의 PRU가 동시에 패킷을 전송한다. $E_{colTx,i}$, $E_{colRx,i}$, $E_{colIdle,i}$는 각각 이하 수학식 16 내지 18에 의해 계산될 수 있다.

수학식 16

[0066] $$E_{colTx,i}=n_{colSlots}(E_{tx}L_{data}+E_{idle}L_{DIFS})(\tau\sum_{k=1}^{n-1}\binom{n-1}{k}\tau^{k}(1-\tau)^{n-k-1}),1\leq k\leq(n-1)$$

수학식 17

[0067] $$E_{colRx,i}=(n_{colSlots}(E_{rx}L_{data}+E_{idle}L_{DIFS})(1-\tau)\sum_{k=2}^{n-1}\binom{n-1}{k}\tau^{k}(1-\tau)^{n-k-1})-E_{colIdle},2\leq k\leq(n-1)$$

수학식 18

[0068] $$E_{colIdle,i}=n_{colSlots}E_{idle}((1-\tau)(1-\tau)^{n_{nbr,i}}\sum_{k=2}^{n-n_{nbr,i}-1}\binom{n-n_{nbr,i}-1}{k}\tau^{k}),2\leq k\leq(n-n_{nbr,i}-1)$$

[0069] 마지막으로, $E_{idle,i}$는 D-Tx/Rx가 유휴 상태일 때 이전 WIT 슈퍼프레임의 유휴 슬롯 동안 i번째 PRU가 소모하는 에너지량을 나타내며, 이는 수학식 19와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 19

[0070] $$E_{idle,i}=n_{idleSlots}E_{idle}L_{BP}$$

[0071] i번째 PRU의 잔여 에너지를 추정하기 위해 PTU는 i번째 PRU가 소모한 에너지량 뿐 아니라 이전 WET 슈퍼프레임에서 i번째 PRU가 수확한 에너지량(즉, $E_{rx,i}$)을 계산해야 하며, 이는 이하 수학식 20으로 표현될 수 있다.

수학식 20

[0072] $$E_{rx,i}=\sum_{k=1}^{n_{DPS,i}}E_{DPS,i}$$

[0073] 여기서 $n_{DPS,i}$는 이전 WET 슈퍼프레임에서 i번째 PRU에 할당된 DPS의 수를 나타낸다. $E_{DPS,i}$는 하나의 DPS 동안 i번째 PRU가 수확한 에너지량을 나타내며, 이는 수학식 21과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 21

[0074] $$E_{DPS,i}=\eta P_{r,i}L_{WET}$$

[0075] 여기서 η는 PRU의 에너지 하베스팅 효율을 나타내고, $P_{r,i}$는 i번째 PRU의 초당 수신 전력량(수학식 1 참조)을 나타내며, L_{WET}은 WET 서브슬롯의 길이를 나타낸다.

[0076] 그 결과, i번째 PRU의 잔여 에너지량(즉, $E_{res,i}$)은 수학식 22와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 22

[0077] $$E_{res,i}=E_{res,i}-E_{beacon,i}-E_{succ,i}-E_{col,i}-E_{idle,i}+E_{rx,i}$$

[0078] 개별 PRU에 대한 잔여 에너지 추정에 대한 지식을 기반으로 PTU는 모든 WET 슈퍼프레임의 시작 부분에서 DPS 할당을 수행할 수 있다. 알고리즘 1은 1) 개별 PRU가 완전히 충전되는 데 필요한 DPS 수 계산, 2) 개별 PRU에 할당할 DPS 수 계산, 3) 개별 PRU에 대한 충전 우선순위 결정의 세 가지 작업으로 구성된 DPS 할당 절차를 나타낸다. 본 알고리즘에서 PTU는 속성 및 변수를 초기화한다(예를 들어, I_{DPS}, $I_{startDPS}$, N_{DPS}, $N_{sortedDPS}$, S_{DPS}, $n_{reqDPS-,i}$, cnt, n_{avaDPS}, $E_{max,i}$).

[0079] 여기서 I_{DPS} 및 $I_{startDPS}$는 PRU의 인덱스를 저장하는 속성이고, N_{DPS} 및 $N_{sortedDPS}$는 할당된 DPS의 수를 추적하는 속성이며, S_{DPS}, $n_{reqDPS-,i}$, cnt, n_{avaDPS}, $E_{max,i}$는 DPS의 수를 계산하는 변수들이다.

[0080] I_{DPS}는 N_{DPS}가 $N_{sortedDPS}$와 같이 내림차순으로 정렬되기 전의 N_{DPS}의 요소의 인덱스를 포함한다.

[0081] $I_{startDPS}$는 WET 슈퍼프레임에서 개별 PRU에 할당된 DPS의 시작 인덱스를 포함한다. N_{DPS}는 PRU에 할당된 DPS의 수를 포함한다.

[0082] $N_{sortedDPS}$는 N_{DPS}에 포함된 요소의 값에 따라 내림차순으로 정렬된 N_{DPS}를 나타낸다. I_{DPS}, $I_{startDPS}$, N_{DPS}, $N_{sortedDPS}$는 1차원 배열로 표현될 수 있다. S_{DPS}는 PRU들에 필요한 DPS의 수($n_{reqDPS,i}$)의 합을 나타낸다. $n_{reqDPS,i}$는 i번째 PRU가 현재 잔여 에너지량에서 최대 배터리 용량까지 완전히 충전되는 데 필요한 DPS의 수를 나타낸다.

[0083] cnt는 WET 슈퍼프레임에서 개별 PRU에 할당된 DPS의 시작 인덱스를 계산하는 데 사용되는 카운터 값에

해당한다. n_{avaDPS}는 WET 슈퍼프레임에서 첫 번째 DPS 및 PRU들에 이미 할당된 DPS를 제외한 사용 가능한 DPS의 수를 나타내며, $n_{totalDPS}-1$로 초기화될 수 있다.

[0084] 첫 번째 동작에서 PTU는 개별 PRU가 완전히 충전되는 데 필요한 DPS의 수(즉, $n_{reqDPS,i}$)를 얻을 수 있다. 이는 각 PRU의 배터리가 최대 배터리 용량까지 충전되는 데 필요한 에너지량(즉, $E_{max,i} - E_{res,i}$) 및 한 DPS 동안 수확된 에너지량(즉, $E_{DPS,i}$)을 사용하여 계산될 수 있다.

[0085] 그런 다음, PTU는 모든 PRU에 필요한 DPS 수의 합계(즉, S_{DPS})를 계산할 수 있다. 두 번째 동작에서 PTU는 각 PRU가 필요로 하는 DPS 수와 모든 PRU가 필요로 하는 DPS 수의 합(즉, $n_{DPS,i}$) 간의 비를 바탕으로 개별적인 PRU에 할당될 DPS의 수(즉, $n_{reqDPS,i}/S_{DPS}$)를 산출할 수 있다. 이렇듯, PTU는 개별적인 PRU들에 할당될 DPS의 수의 리스트를 유지/관리할 수 있다(즉, $N_{DPS}[i]$). 그리고, PTU는 DPS의 수에 따라 $N_{DPS}[i]$를 내림차순으로 정렬함으로써 개별적인 PRU의 충전 순위를 판단할 수 있다.

[0086] 각 PRU에 할당된 WET 슈퍼프레임에서 DPS의 시작 인덱스는 개별 PRU에 대한 충전 우선순위에 따라 계산될 수 있다. 따라서, 잔여 에너지가 낮은 PRU가 다른 PRU보다 먼저 에너지 하베스팅을 수행할 수 있다.

Algorithm 1. DPS allocation

INITIALIZE $\mathbf{N}_{DPS}$ to [], $\mathbf{N}_{sortedDPS}$ to [], $\mathbf{I}_{DPS}$ to [], $\mathbf{I}_{startDPS}$ to [], S_{DPS} to 0, $n_{reqDPS,i}$ to 0, cnt to 2, n_{avaDPS} to $n_{totalDPS}-1$, $E_{max,i}$ to 1
/* Calculation of the number of DPSs required for individual PRUs to be fully charged */
FOR each PRU, i, $i \in [1,n]$
  $n_{reqDPS,i} \leftarrow (E_{max,i} - E_{res,i}) / E_{DPS,i}$
  $S_{DPS} \leftarrow S_{DPS} + n_{reqDPS,i}$
ENDFOR
/* Calculation of the number of DPSs to be allocated to individual PRUs */
FOR each PRU, i, $i \in [1,n]$
  $n_{DPS,i} \leftarrow round(n_{avaDPS}(n_{reqDPS,i} / S_{DPS}))$
  $\mathbf{N}_{DPS}[i] \leftarrow n_{DPS,i}$
ENDFOR
/* Determination of the charging priority for individual PRUs */
$[\mathbf{N}_{sortedDPS}, \mathbf{I}_{DPS}] \leftarrow$ sort($\mathbf{N}_{DPS}$,'descend')
FOR each PRU, i, $i \in [1,n]$
  $\mathbf{I}_{startDPS}[\mathbf{I}_{DPS}[i]] \leftarrow cnt$
  $cnt \leftarrow cnt + \mathbf{N}_{sortedDPS}[i]$s
ENDFOR
RETURN $\mathbf{N}_{DPS}$ and $\mathbf{I}_{startDPS}$

[0087]

[0088] DPS 할당 알고리즘을 완료한 후 PTU는 DPS의 개수(즉, N_{DPS})와 각 PRU에 할당된 DPS의 시작 인덱스(즉, $I_{startDPS}$)를 포함하는 PTU 비콘을 브로드캐스트할 수 있다. DPS 스케줄링 결과에 따라 PTU는 PRU에 전력을 전송하고 PRU는 에너지 하베스팅을 수행할 수 있다.

[0089] MATLAB 시뮬레이터를 기반으로 수행된 실험적 시뮬레이션을 통해 REE-MAC의 성능이 평가되었다. 시뮬레이션 결과는 FF-WPT(Xia et al)와 HE-MAC(Ha et al)의 결과와 비교되었다. FF-WPT는 데이터 패킷 전송에 사용되는 주파수 대역과 분리된 다른 주파수 대역을 사용하여 장치에 전원을 공급하는 대역 외 솔루션이다. 반면, HE-MAC은 동일한 주파수 대역 내에서 전원 공급과 데이터 전송을 동시에 수행하는 대역 내 솔루션이다.

[0090] 시뮬레이션에서는 하나의 PTU와 여러 PRU로 구성된 WPSN이 구현되었다. 각 PRU는 4m로 설정된 PTU의 통신 범위 내에서 무작위로 배치되는 것으로 가정한다. 또한 PRU에는 항상 PTU로 전송할 데이터 패킷이 있다고 가정되었다. 시뮬레이션에서 PRU의 수는 2에서 20까지 변화한다. REE-MAC의 성능은 평균 수확 에너지량, 소모 에너지, 평균 동결 시간, 잔여 에너지 분포, 처리량 분포, 잔여 에너지 및 처리량에 대한 공정성 지수 등의 지표에서 FF-WPT 및 HE-MAC의 성능과 비교되었다.

[0091] 공정성(fairness)을 조사하기 위해 PRU가 잔여 에너지가 부족하여 패킷을 전송할 수 없는 장치의 상태를 의미하는 동결 상태를 고려할 수 있다. 시뮬레이션에서, PRU는 잔여 에너지량이 미리 구성된 에너지 임계값보다 작을 때 동결 상태에 진입한다. 그런 다음 미리 설정된 활성 임계값을 초과하면 동결 상태에서 해제된다. 활성 임계

값은 동결 상태의 PRU가 패킷 전송을 재개하는 데 필요한 최소 잔여 에너지량을 나타낸다. 이는 PRU가 동결 상태에서 해제된 직후 다시 동결 상태로 진입하는 것을 방지하기 위해 에너지 임계값보다 크게 설정되었다.

[0092] FF-WPT에서 WET 연산은 TDMA 기반 라운드 로빈 스케줄링에 따라 수행되고 WIT 연산은 CSMA/CA 방식으로 수행된다. FF-WPT에서는 제어 메시지를 교환하는 데 필요한 간격은 300 μs로 설정되었다. 또한, 각 PRU의 에너지 프레임 수는 데이터 패킷의 크기와 초당 수확되는 에너지량을 고려하여 결정되었다.

[0093] HE-MAC에서 PTU 및 PRU에 대한 AIFS(즉, $AIFS_{PTU}$ 및 $AIFS_{PRU}$)는 각각 50 μs 및 70 μs로 설정되었다. 시뮬레이션은 50번 반복되었다. 자세한 시뮬레이션 파라미터는 표 1에 나열되어 있다.

표 1

[0094]

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of PRUs	2–20	d	0–4 m
Data rate	2 Mbps	Maximum battery capacity	1 mJ
WET superframe	1 sec	Initial residual energy	0.6 mJ
WIT superframe	1 sec	Active threshold	0.6 mJ
DPS length	10 ms	Energy threshold	0.1 mJ
Number of DPSs	100	CW_{min}	31
Beacon subslot	40 μs	CW_{max}	1023
P-Tx/Rx switching subslot	10 μs	G_t	12
WET subslot	9950 μs	G_r	1
RTS	20 bytes	P_{tx}	31.47 mA
CTS	14 bytes	P_{rx}	26.94 mA
ACK	14 bytes	P_{idle}	0.00156 mA
SIFS	10 μs	P_t	3,000 mW
DIFS	50 μs	a	2.7
Beacon	15 bytes	h	0.85
Packet size	100–200 bytes	Slot length	20 μs

[0095] 도 5(a)와 5(b)는 각각 100바이트와 200바이트 패킷에 대한 평균 수확 에너지량의 변화를 보여준다. 전반적으로 평균 수확 에너지량은 WET 슈퍼프레임당 개별 PRU가 수확하는 에너지량의 감소로 인해 네트워크의 PRU 수가 증가함에 따라 감소하였다. 도 5(a) 및 5(b) 모두에서 REE-MAC은 FF-WPT 및 HE-MAC에 비해 더 높은 평균 수확 에너지를 나타낸다.

[0096] DPS 할당 동작과 관련하여 REE-MAC은 FF-WPT보다 짧은 오버헤드를 필요로 한다. REE-MAC에서 PTU는 개별 PRU에 대한 잔여 에너지량을 추정하여 DPS 할당을 수행하고, WET 슈퍼프레임의 시작 부분에 PTU 비콘을 통해 PRU에게 할당된 DPS의 수를 알려준다. 따라서 REE-MAC은 하나의 PTU 비콘을 보내는 데 걸리는 시간만을 오버헤드로 수반한다. 반면에 FF-WPT는 PTU가 자신과 각 PRU 사이의 거리를 얻기 위해 모든 PRU와 제어 메시지를 교환해야 하기 때문에 긴 오버헤드가 발생하였다. 한편, HE-MAC에서 제어 메시지의 교환, 데이터 패킷의 전송, 에너지 하베스팅이 모두 동일한 주파수 대역에서 수행되기 때문에 HE-MAC은 가장 낮은 평균 수확 에너지량을 나타낸다.

[0097] 표 2에서 보는 바와 같이 패킷 크기가 100바이트에서 200바이트로 증가하더라도 REE-MAC과 FF-WPT의 평균 수확 에너지량은 거의 같다. 이는 패킷 크기가 대역 외 접근 방식에서 PRU의 평균 수확 에너지량에 영향을 미치지 않기 때문이다. 그러나 HE-MAC에서는 패킷 크기가 100바이트에서 200바이트로 증가할 때 평균 수확 에너지량이 약간 감소한다. 이는 WET 슈퍼프레임 내에서 에너지 하베스팅 시간의 비율이 줄어들기 때문이다. 정량적으로 REE-MAC의 평균 수확 에너지량은 PRU가 100바이트 및 200바이트 패킷을 전송할 때 FF-WPT보다 각각 17.79% 및 18.38% 높다. 또한, REE-MAC의 평균 수확 에너지량은 PRU가 100바이트 및 200바이트 패킷을 전송할 때 HE-MAC보다 각각 132.15% 및 159.04% 더 높았다.

표 2

[0098]

Packet size	Protocol	Number of PRUs									
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
100 bytes	REE-MAC	2.65	1.56	1.03	0.76	0.61	0.52	0.48	0.41	0.36	0.31
	FF-WPT	2.57	1.47	0.95	0.67	0.51	0.41	0.36	0.30	0.25	0.21
	HE-MAC	1.31	0.72	0.48	0.35	0.28	0.24	0.20	0.18	0.16	0.14
200 bytes	REE-MAC	2.65	1.56	1.03	0.76	0.61	0.52	0.46	0.41	0.36	0.31
	FF-WPT	2.57	1.47	0.95	0.67	0.51	0.41	0.36	0.30	0.25	0.21
	HE-MAC	1.20	0.65	0.44	0.32	0.25	0.21	0.18	0.16	0.14	0.13

[0099] 도 6(a) 및 6(b)는 각각 100바이트 및 200바이트 패킷에 대한 평균 에너지 소모량의 변화를 보여준다. REE-MAC에서는 PRU의 수가 증가함에 따라 평균 에너지 소모량이 감소한다. 이는, 충돌 및 백오프 지연의 증가로 인해 PRU에서 전송하는 데이터 패킷의 수가 점차 감소하기 때문이다. 그 결과, PRU의 전송 횟수가 줄어들어 PRU가 소모하는 에너지가 감소한다. FF-WPT에서는 REE-MAC에서와 같이 PRU 수가 증가함에 따라 전반적으로 평균 에너지 소모량이 감소하는 경향이 있었다. 또한 FF-WPT는 REE-MAC과 유사한 평균 에너지 소모량을 나타냈다. 그러나 일부 구간(즉, PRU 수가 14~18인 경우)에서는 FF-WPT의 평균 에너지 소모량이 약간 증가하였다. PRU의 수가 증가함에 따라 각 PRU가 수확할 수 있는 에너지량이 감소하고 이에 따라 동결 상태에 진입하는 PRU의 수가 증가하였다. 따라서, 상대적으로 적은 수의 PRU가 데이터 패킷을 PTU로 전송하고, 감소된 경쟁 수준으로 인해 평균 에너지 소모량이 증가할 수 있다.

[0100] HE-MAC은 REE-MAC 및 FF-WPT에 비해 평균 에너지 소모량이 낮았다. HE-MAC에서 PRU는 WET 및 WIT 동작이 모두 동일한 주파수 대역 내에서 수행되기 때문에 데이터 패킷의 전송 기회가 상대적으로 적다. 따라서 적은 수의 데이터 패킷 전송은 PRU가 소모하는 에너지량을 줄일 수 있다. 정량적으로 PRU가 100바이트 및 200바이트 패킷을 전송할 때 REE-MAC의 평균 에너지 소모량은 FF-WPT보다 각각 7.79% 및 8.29% 높았다. 또한 HE-MAC 대비 각각 43.78%, 43.74% 높다.

[0101] 도 7(a)와 7(b)는 각각 100바이트 패킷과 200바이트 패킷에 대한 평균 동결 시간의 변화를 보여준다. 동결 시간은 PRU가 동결 상태에 있는 시간을 의미한다. PRU의 수가 증가할수록 각 PRU가 수확하는 에너지량이 감소하므로 PRU의 평균 동결 시간이 증가할 가능성이 높다.

[0102] 다만, REE-MAC은 FF-WPT 및 HE-MAC보다 평균 동결 시간이 더 짧았다. REE-MAC에서는 개별 PRU의 잔여 에너지량을 고려하여 DPS 할당을 수행할 수 있다. 따라서 REE-MAC에서는 잔여 에너지가 적은 PRU에 슈퍼프레임 내에서 더 많은 DPS를 할당할 수 있다. 그러므로, 네트워크의 모든 PRU는 유사한 수준의 잔여 에너지를 유지하고 동결 상태에 있는 시간이 상대적으로 짧게 된다.

[0103] 특히 PRU가 전송하는 패킷의 크기가 100바이트와 200바이트인 경우 REE-MAC의 평균 동결 시간은 PRU가 각각 10개와 12개가 될 때까지 거의 0이다. 그러나 PRU의 수가 10, 12를 초과하면 PRU의 수가 증가함에 따라 REE-MAC의 평균 동결 시간이 증가하였다.

[0104] FF-WPT는 항상 REE-MAC 및 HE-MAC에 비해 더 긴 평균 동결 시간을 나타낸다. 이는 FF-WPT에서 PTU가 PRU의 잔여 에너지량을 고려하지 않고 거리에 따라 PRU에 전력을 공급하기 때문이다. 또한 개별 PRU는 WET 작동에 필요한 제어 메시지 교환으로 인해 더 적은 양의 에너지를 수확한다. 따라서 FF-WPT에서는 PRU가 더 자주 동결 상태에 진입하였다. PRU의 수가 12개 이상이면 FF-WPT의 평균 동결 시간이 점차 증가한다. PRU의 수가 12개 이상으로 증가하면 수확된 에너지량이 감소하여 PRU가 더 빨리 동결 상태에 진입한다. 따라서 동결 상태에 있는 PRU의 잔여 에너지량이 활성 임계값에 도달하는 데에 더 오랜 시간이 걸린다.

[0105] HE-MAC에서 채널을 점유하는 PRU는 수확 후 전송 방식을 사용한다. 따라서 PRU는 먼저 패킷을 전송하는 데 필요한 에너지량을 수확한 다음 이를 사용하여 패킷을 전송할 수 있다. 다른 PRU는 유휴 상태를 유지하여 에너지 소모를 최소화할 수 있다. 따라서 HE-MAC의 평균 동결 시간은 FF-WPT보다 짧다.

[0106] 정량적으로, PRU가 100바이트 및 200바이트 패킷을 전송할 때 REE-MAC의 평균 동결 시간은 FF-WPT보다 각각 72.03% 및 90.04% 짧다. 그리고, HE-MAC과 비교하면 47.26%, 81.15% 짧다.

[0107] 도 8(a) 및 8(b)는 각각 100바이트 및 200바이트 패킷에 대한 개별 PRU의 잔여 에너지 분포의 변화를 보여준다.

도 8(a) 및 도 8(b) 모두 실험적인 시뮬레이션의 특정 라운드에서 개별 PRU의 잔여 에너지 분포를 나타낸 것이다.

[0108] REE-MAC 및 FF-WPT에서는 패킷 크기가 증가하면 소모 에너지량의 증가로 인해 개별 PRU의 잔여 에너지량이 감소한다. HE-MAC에서는 Dead PRU의 수가 증가한다. 여기서, Dead PRU는 잔여 에너지량이 0인 PRU를 의미한다.

[0109] REE-MAC에서는 FF-WPT 및 HE-MAC에 비해 개별 PRU의 잔여 에너지량의 차이가 작은 바, REE-MAC은 잔여 에너지량을 고려한 DPS 할당을 통해 PRU가 비슷한 양의 잔여 에너지를 유지할 수 있도록 한다.

[0110] FF-WPT에서는 DPS가 PTU와 개별 PRU 사이의 거리만을 고려하여 할당되기 때문에 개별 PRU의 잔여 에너지 분포의 변동이 REE-MAC보다 크다. HE-MAC에서 개별 PRU의 잔여 에너지량은 PRU의 개수가 2인 경우를 제외하고는 거의 0이다. 이는 PRU가 패킷 전송 외에 추가적인 에너지를 소모하여, PRU의 잔여 에너지량이 점차 감소하기 때문이다. 그 결과 HE-MAC에서는 REE-MAC 및 FF-WPT에 비해 Dead PRU가 더 많이 발생하였다.

[0111] 도 9(a) 및 9(b)는 각각 100바이트 및 200바이트 패킷에 대한 개별 PRU의 처리량 분포의 변화를 보여준다. 도 9(a) 및 9(b) 모두 실험적인 시뮬레이션의 특정 라운드에서 개별 PRU의 처리량 분포를 나타낸다. 전반적으로 네트워크의 PRU 수가 증가할수록 처리량 분포의 변동이 커지는 것이 확인된다. 또한, 패킷 크기가 증가하면 백오프 지연 감소로 인한 이득으로 인해 개별 PRU의 처리량이 증가한다.

[0112] 다만, REE-MAC은 FF-WPT 및 HE-MAC에 비해 PRU 수에 관계없이 일정한 처리량 분포를 보인다. 즉, REE-MAC에서는 네트워크의 모든 PRU가 비슷한 수준의 처리 성능을 유지할 수 있다. 도 7과 8의 결과로부터 REE-MAC에서는 PRU가 평균적으로 가장 짧은 동결시간을 유지하고 있으며, 잔여 에너지량이 0인 Dead PRU는 거의 발생하지 않음이 확인되었다. 따라서, FF-WPT 및 HE-MAC에 비해 REE-MAC를 사용하는 PRU는 상대적으로 균등한 전송 기회를 가질 수 있다. 반면, FF-WPT 및 HE-MAC에서는 네트워크의 PRU 수가 증가함에 따라 전송 기회가 일부 PRU로 편중된다. 따라서 FF-WPT 및 HE-MAC에서는 특정 PRU에 대한 처리량 분포의 집중이 심해진다.

[0113] 도 10(a) 및 10(b)는 각각 100바이트 및 200바이트 패킷에 대한 잔여 에너지에 대한 공정성 지수를 보여준다. 잔여 에너지에 대한 공정성 지수(F_{res})는 이하 수학식 23에 의해 계산될 수 있다.

수학식 23

[0114]
$$F_{res}=\frac{(\sum_{i}^{n} x_i^2)}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

[0115] 여기서, n은 PRU의 수이고, x_i는 i번째 PRU의 잔여 에너지량을 가리키는 공정성 파라미터이다.

[0116] REE-MAC에서 잔여 에너지에 대한 공정성 지수는 PRU 수가 증가함에 따라 감소했다가 다시 증가하였다. 구체적으로, 100바이트 및 200바이트 패킷의 경우, PRU의 수가 각각 10개 및 14개 이하인 경우, REE-MAC의 잔여 에너지에 대한 공정성 지수는 PRU의 수가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 네트워크 내의 PRU의 수가 증가할수록 개별 PRU가 수확하는 에너지량의 감소와 개인이 소모하는 에너지량의 차이로 인해 개별 PRU 간의 잔여 에너지량의 차이가 증가하기 때문이다(도 8 참조).

[0117] 한편, PRU의 개수가 각각 10개 및 14개보다 큰 경우에는 PRU의 수가 증가할수록 REE-MAC의 잔여 에너지에 대한 공정성 지수가 증가한다. PRU의 수가 증가함에 따라 개별 PRU가 수확하는 에너지량은 감소하고 이에 따라 동결 상태의 PRU의 수도 증가한다.

[0118] 동결 상태의 PRU는 잔여 에너지가 활성 임계값에 도달할 때까지 WET 동작만 수행할 수 있다. 따라서 동결 상태에 있는 많은 PRU의 잔여 에너지량이 활성 임계값에 가까워질수록 잔여 에너지에 대한 공정성 지수가 증가할 수 있다.

[0119] 그러나, FF-WPT와 HE-MAC에서는 네트워크의 PRU 수가 증가할수록 잔여 에너지에 대한 공정성 지수가 감소한다. 이는 도 7과 같이 PRU의 평균 동결 시간이 길어질수록 PRU 간 전송 기회의 격차가 커지기 때문이다. 이 차이는 개별 PRU가 소모하는 에너지량의 차이를 증가시킨다. 따라서 개별 PRU의 잔여 에너지량의 차이가 커질수록 잔여

에너지에 대한 공정성 지수는 점차 감소한다. 정량적으로 PRU가 100바이트와 200바이트 패킷을 전송할 때 REE-MAC의 잔여 에너지에 대한 공정성 지수는 FF-WPT보다 각각 95.34%, 116.23% 높고, HE-MAC 대비 각각 165.88%, 276.00% 높다.

[0120] 도 11(a) 및 11(b)는 각각 100바이트 및 200바이트 패킷의 처리량에 대한 공정성 지수를 보여준다. 처리량(F_{th})에 대한 공정성 지수는 수학식 24에 의해 계산될 수 있다.

수학식 24

[0121]
$$F_{th}=\frac{(\sum_{i}^{n} y_i^2)}{n\sum_{i=1}^{n} y_i^2}$$

[0122] 여기서, n은 PRU의 수이고, y_i는 i번째 PRU가 PTU로 전송하는 패킷의 수를 가리키는 공정성 파라미터이다.

[0123] 100바이트 패킷과 200바이트 패킷의 경우, REE-MAC은 PRU 수에 관계없이 각각 0.924 및 0.956 이상의 처리량에 대한 공정성 지수를 유지할 수 있다. PRU의 수가 증가함에 따라 개별 PRU가 수확하는 에너지량은 감소하고 개별 PRU가 소모하는 에너지의 차이는 증가한다. 그럼에도 불구하고, REE-MAC에서는 개별 PRU의 잔여 에너지량을 고려한 DPS 할당으로 인해 PRU의 잔여 에너지량이 유사하게 유지된다. 따라서, 개별 PRU는 유사한 전송 기회를 가짐으로써 처리량에 대한 높은 공정성 지수를 달성할 수 있다.

[0124] 반면에, FF-WPT는 REE-MAC 및 HE-MAC에 비해 처리량에 대한 공정성 지수가 낮다. 그리고, 도 7의 결과를 통해 확인했듯, FF-WPT에서 PRU는 평균적으로 가장 긴 동결 시간을 유지한다. FF-WPT에서 PRU 간의 처리량 성능 차이는 동결 시간의 증가로 인해 전송 기회가 일부 PRU로 편중되기 때문에 커진다. FF-WPT의 처리량에 대한 공정성 지수는 패킷 크기에 관계없이 PRU의 수가 증가할수록 감소한다. 이는 개별 PRU가 수확하는 에너지량의 감소로 인해 PRU의 평균 동결 시간이 증가하기 때문이다.

[0125] HE-MAC은 패킷 크기에 관계없이 FF-WPT보다 처리량에 대한 공정성 지수가 더 높다. HE-MAC에서 동결 상태가 아닌 PRU는 수확 후 전송 방식을 통해 비슷한 양의 잔여 에너지를 유지하므로 상대적으로 유사한 전송 기회를 갖는다. 정량적으로 PRU가 100바이트 및 200바이트 패킷을 전송할 때 REE-MAC의 처리량에 대한 공정성 지수는 FF-WPT보다 각각 98.58% 및 91.80% 높고, HE-MAC 대비 각각 44.46%, 55.91% 높다.

[0126] 본 개시는 WET 동작을 스케줄링하기 위한 제어 메시지로 인한 오버헤드를 줄이고 센서 장치에 데이터 전송 기회에 대한 공정성을 제공하는 것을 목표로 하는 WPSN용 REE-MAC 프로토콜을 제시한다. REE-MAC은 제어 메시지를 교환하지 않고 개별 PRU의 잔여 에너지량을 수치적으로 추정하여 낮은 오버헤드를 달성한다.

[0127] 또한 REE-MAC에서 PTU는 DPS를 개별 PRU의 잔여 에너지량에 반비례하여 할당하므로 네트워크의 모든 PRU가 비슷한 수준의 잔여 에너지를 유지할 수 있다. 따라서, 일부 PRU의 에너지 소모를 최소화하고 개별 PRU에 공정한 데이터 전송 기회를 제공할 수 있다. 각 슈퍼프레임이 시작될 때 PTU는 개별 PRU의 소모 및 수확 에너지량을 계산한 다음 잔여 에너지를 추정할 수 있으며, 이후 잔여 에너지 추정 결과에 따라 DPS 할당을 수행할 수 있다.

[0128] 네트워크 크기 및 패킷 크기가 변화하는 환경에서 REE-MAC의 성능을 평가하기 위해 실험적 시뮬레이션이 수행되었다. 결과는 REE-MAC가 잔여 에너지 추정을 사용하여 제어 메시지 교환으로 인한 불필요한 대역폭 낭비를 줄이고 결과적으로 개별 PRU가 수확하는 에너지량을 증가시키는 것으로 나타났다. 또한, REE-MAC은 DPS가 일부 PRU에 편향적으로 할당되는 것을 방지하여 에너지 부족으로 인한 PRU의 동결 시간을 줄이는 것이 입증되었다. REE-MAC의 이러한 동작은 네트워크의 PRU에 유사한 전송 기회를 제공하여 잔여 에너지 및 처리량 측면에서 FF-WPT 및 HE-MAC에 비해 더 높은 공정성을 보장하였다. REE-MAC은 FF-WPT 및 HE-MAC와 각각 비교했을 때, 평균적으로, 18.08% 및 145.60% 더 많은 에너지 수확량, 81.03% 및 64.21% 더 짧은 평균 동결 시간, 105.79% 및 220.94% 더 높은 잔여 에너지 공정성 지수, 95.19% 및 50.18% 더 높은 공정성을 달성했다.

[0129] 한편, 도 12는 본 개시의 일 실시 예에 따른 PTU의 구성을 설명하기 위한 블록도이다. PTU는 적어도 하나의 컴퓨터, 서버, 내지는 시스템으로 구현될 수 있다.

[0130] 도 2를 참조하면, PTU(100)는 메모리(110), 통신부(120), 및 프로세서(130)를 포함할 수 있다.

[0131] 메모리(110)는 PTU(100)의 구성요소들의 전반적인 동작을 제어하기 위한 운영체제(OS: Operating System) 및 PTU(100)의 구성요소와 관련된 적어도 하나의 인스트럭션 또는 데이터를 저장하기 위한 구성이다.

[0132] 메모리(110)는 ROM, 플래시 메모리 등의 비휘발성 메모리를 포함할 수 있으며, DRAM 등으로 구성된 휘발성 메모리를 포함할 수 있다. 또한, 메모리(110)는 하드 디스크, SSD(Solid state drive) 등을 포함할 수도 있다.

[0133] 통신부(120)는 다양한 유무선 통신방식으로 적어도 하나의 외부 장치와 통신을 수행하기 위한 회로, 모듈, 칩 등을 포함할 수 있다.

[0134] 통신부(120)는 다양한 네트워크를 통해 외부 장치들과 연결될 수 있다.

[0135] 프로세서(130)는 PTU(100)를 전반적으로 제어하기 위한 구성이다. 구체적으로, 프로세서(130)는 메모리(110)와 연결되는 한편 메모리(110)에 저장된 적어도 하나의 인스트럭션을 실행함으로써 본 개시의 다양한 실시 예들에 따른 동작을 수행할 수 있다.

[0136] 프로세서(130)는 CPU, AP, DSP(Digital Signal Processor) 등과 같은 범용 프로세서, GPU, VPU(Vision Processing Unit) 등과 같은 그래픽 전용 프로세서 또는 NPU와 같은 인공지능 전용 프로세서 등을 포함할 수 있다. 인공지능 전용 프로세서는, 특정 인공지능 모델의 훈련 내지는 이용에 특화된 하드웨어 구조로 설계될 수 있다.

[0137] 한편, 이상에서 설명된 다양한 실시 예들은 서로 저촉되지 않는 한 둘 이상의 실시 예가 함께 구현될 수 있다.

[0138] 한편, 이상에서 설명된 다양한 실시 예들은 소프트웨어(software), 하드웨어(hardware) 또는 이들의 조합된 것을 이용하여 컴퓨터 또는 이와 유사한 장치로 읽을 수 있는 기록 매체 내에서 구현될 수 있다.

[0139] 하드웨어적인 구현에 의하면, 본 개시에서 설명되는 실시 예들은 ASICs(Application Specific Integrated Circuits), DSPs(digital signal processors), DSPDs(digital signal processing devices), PLDs(Programmable logic devices), FPGAs(field programmable gate arrays), 프로세서(processor), 제어기(controller), 마이크로 컨트롤러(micro-controllers), 마이크로 프로세서(microprocessor), 기타 기능 수행을 위한 전기적인 유닛(unit) 중 적어도 하나를 이용하여 구현될 수 있다.

[0140] 일부의 경우에 본 명세서에서 설명되는 실시 예들이 프로세서 자체로 구현될 수 있다. 소프트웨어적인 구현에 의하면 본 명세서에서 설명되는 절차 및 기능과 같은 실시 예들은 별도의 소프트웨어 모듈들로 구현될 수 있다. 상술한 소프트웨어 모듈들 각각은 본 명세서에서 설명되는 하나 이상의 기능 및 작동을 수행할 수 있다.

[0141] 한편, 상술한 본 개시의 다양한 실시 예들에 따른 서버 또는 단말의 처리동작을 수행하기 위한 컴퓨터 명령어(computer instructions)는 비일시적 컴퓨터 판독 가능 매체(non-transitory computer-readable medium)에 저장될 수 있다. 이러한 비일시적 컴퓨터 판독 가능 매체에 저장된 컴퓨터 명령어는 특정 기기의 프로세서에 의해 실행되었을 때 상술한 다양한 실시 예에 따른 전자 장치(ex. PTU, PRU)의 처리 동작을 상술한 기기가 수행하도록 한다.

[0142] 비일시적 판독 가능 매체란 레지스터, 캐쉬, 메모리 등과 같이 짧은 순간 동안 데이터를 저장하는 매체가 아니라 반영구적으로 데이터를 저장하며, 기기에 의해 판독(reading)이 가능한 매체를 의미한다. 구체적으로는, 상술한 다양한 어플리케이션 또는 프로그램들은 CD, DVD, 하드 디스크, 블루레이 디스크, USB, 메모리카드, ROM 등과 같은 비일시적 판독 가능 매체에 저장되어 제공될 수 있다.

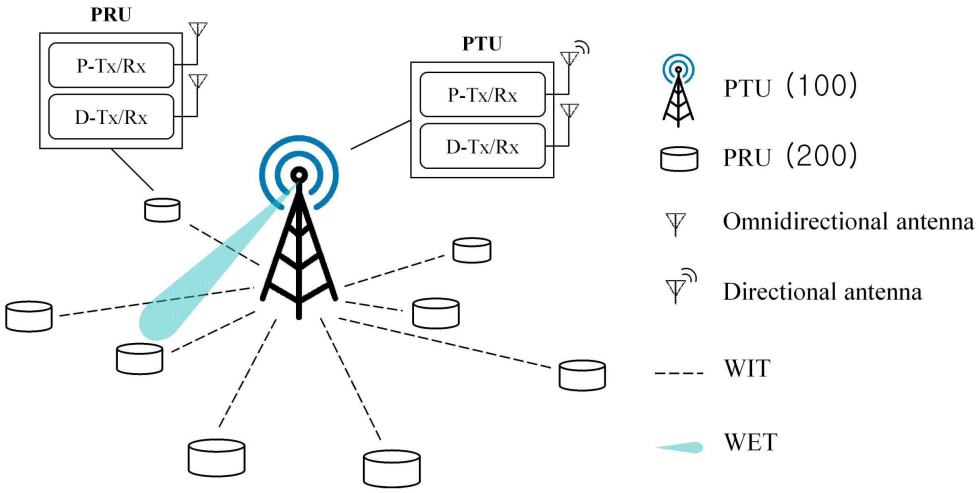
[0143] 또한, 이상에서는 본 발명의 바람직한 실시 예에 대하여 도시하고 설명하였지만, 본 발명은 상술한 특정의 실시 예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 다양한 변형실시가 가능한 것은 물론이고, 이러한 변형실시들은 본 발명의 기술적 사상이나 전망으로부터 개별적으로 이해돼서는 안 될 것이다.

부호의 설명

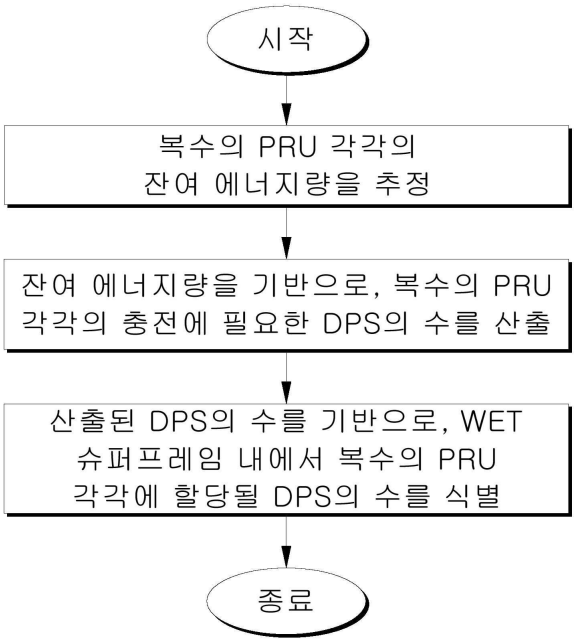
[0144] 100: PTU(Power Transmitting Unit) 200: PRU(Power Receiving Unit)

도면

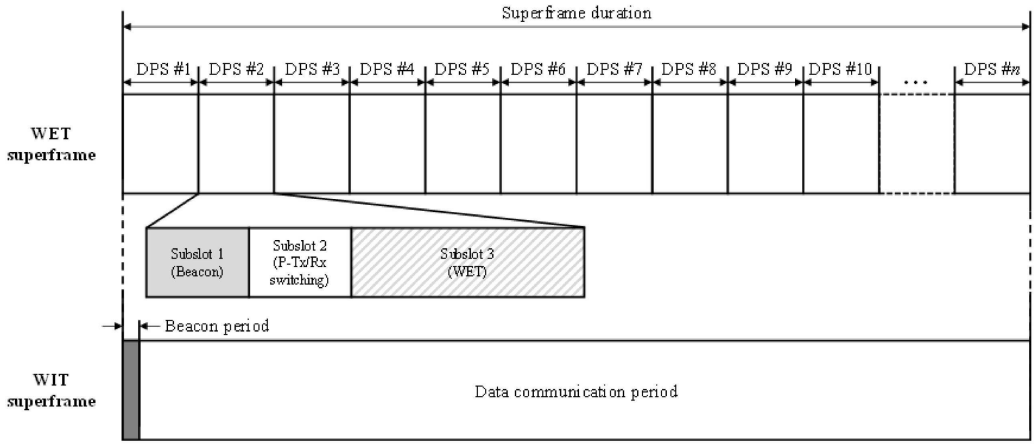
도면1a


PRU
P-Tx/Rx
D-Tx/Rx
PTU
P-Tx/Rx
D-Tx/Rx
PTU (100)
PRU (200)
Omnidirectional antenna
Directional antenna
WIT
WET

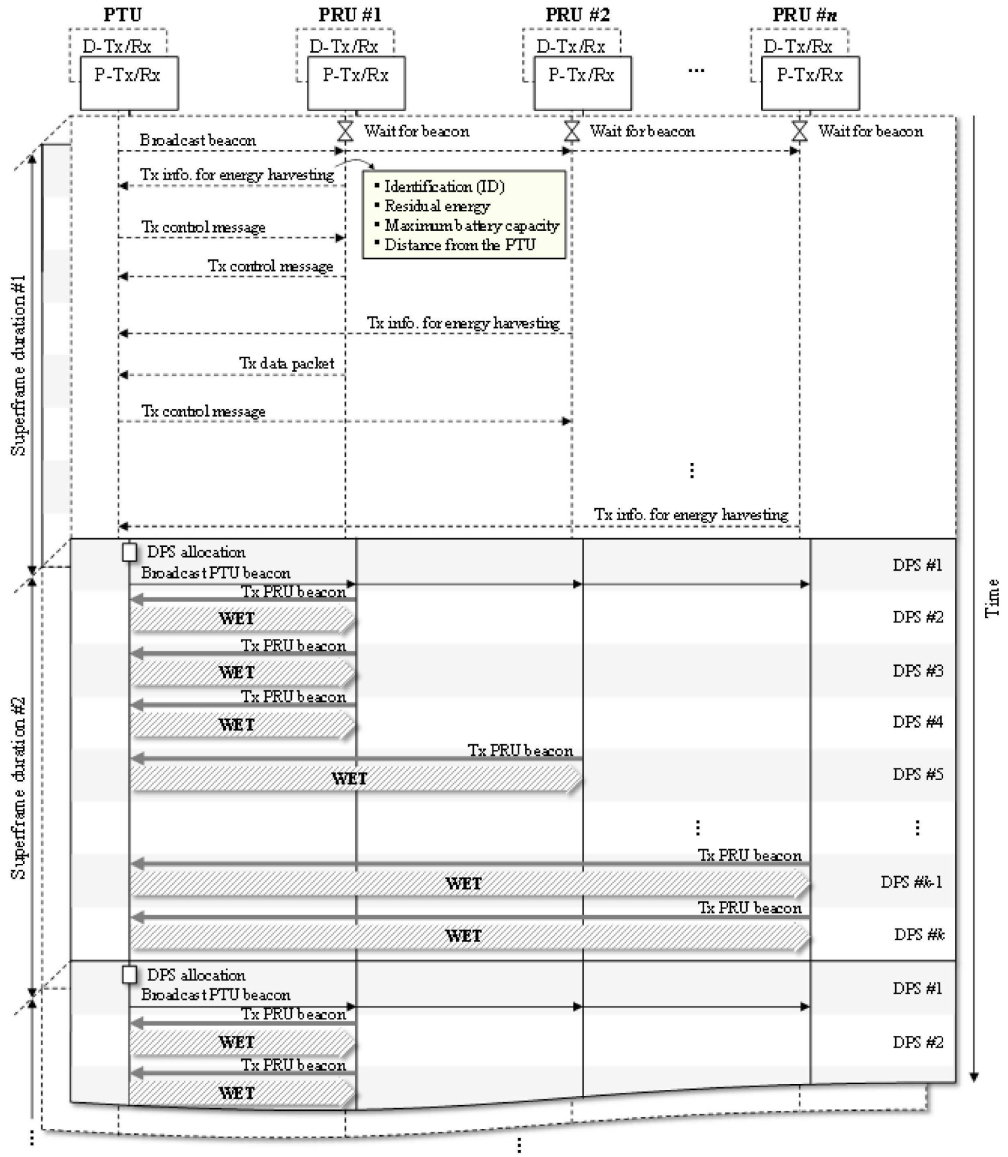
도면1b


시작
복수의 PRU 각각의
잔여 에너지량을 추정
잔여 에너지량을 기반으로, 복수의 PRU
각각의 충전에 필요한 DPS의 수를 산출
산출된 DPS의 수를 기반으로, WET
슈퍼프레임 내에서 복수의 PRU
각각에 할당될 DPS의 수를 식별
종료

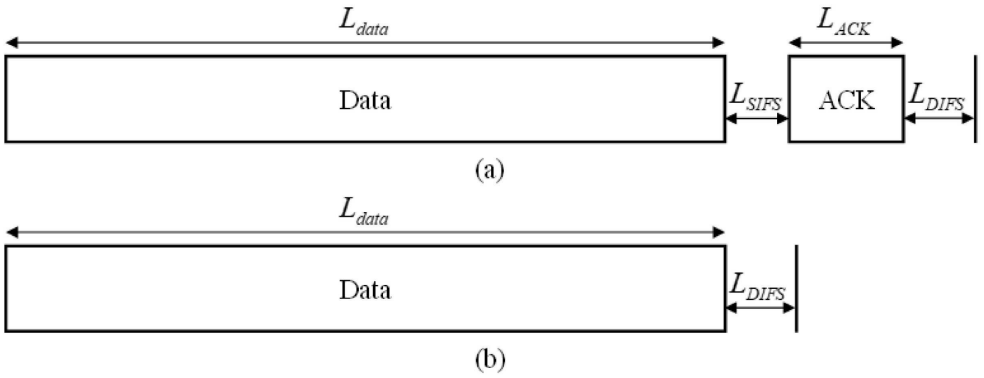
도면2


Superframe duration
DPS #1
DPS #2
DPS #3
DPS #4
DPS #5
DPS #6
DPS #7
DPS #8
DPS #9
DPS #10
DPS #n
WET superframe
Subslot 1 (Beacon)
Subslot 2 (P-Tx/Rx switching)
Subslot 3 (WET)
Beacon period
WIT superframe
Data communication period

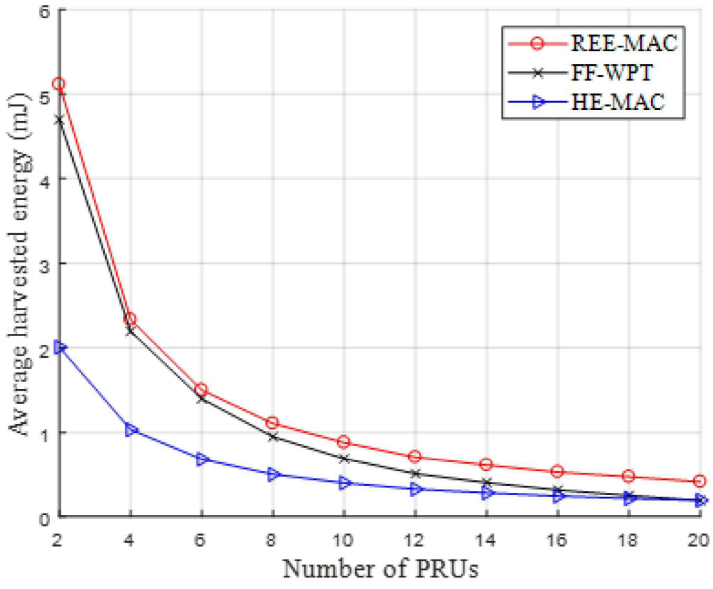
도면3


PTU
PRU #1
PRU #2
PRU #n
D-Tx/Rx
P-Tx/Rx
Broadcast beacon
Wait for beacon
Tx info. for energy harvesting
Identification (ID)
Residual energy
Maximum battery capacity
Distance from the PTU
Tx control message
Tx data packet
Superframe duration #1
Superframe duration #2
DPS allocation
Broadcast PTU beacon
Tx PRU beacon
WET
DPS #1
DPS #2
DPS #3
DPS #4
DPS #5
DPS #k-1
DPS #k
Time

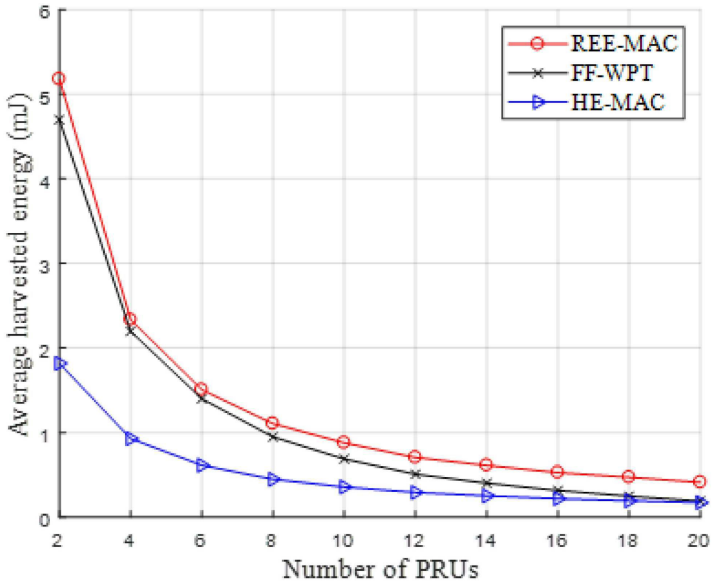
도면4



도면5

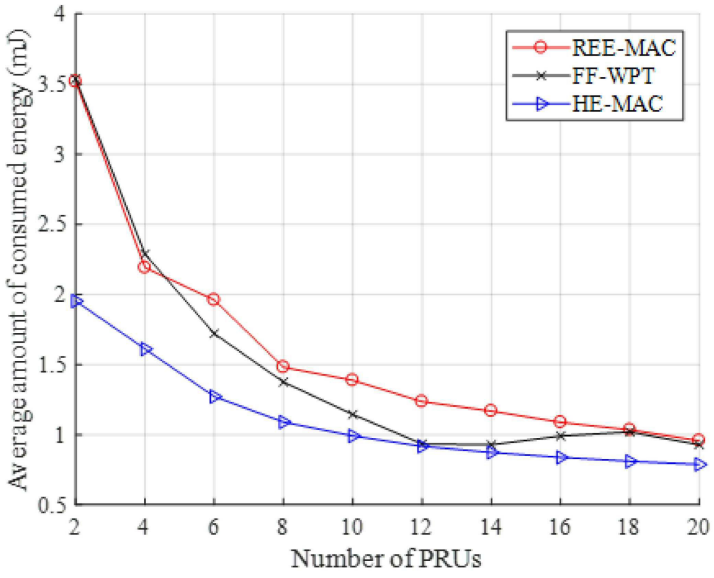

REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Average harvested energy (mJ)
Number of PRUs
0
1
2
3
4
5
6
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

(a)

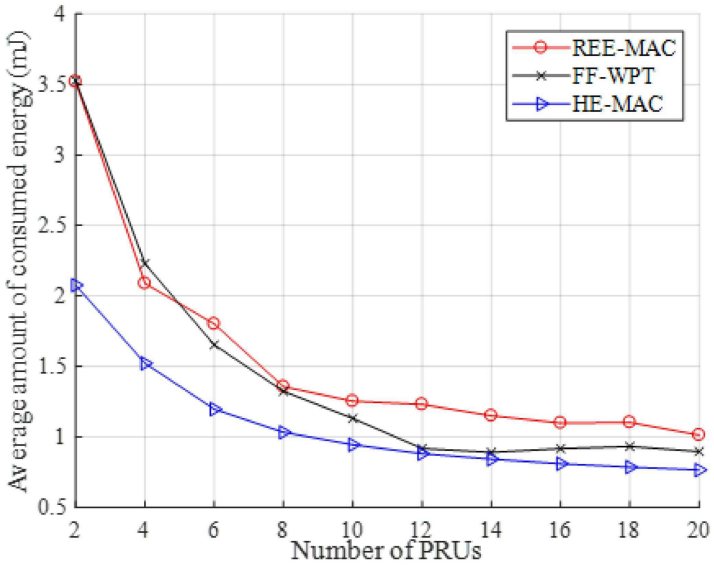

REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Average harvested energy (mJ)
Number of PRUs
0
1
2
3
4
5
6
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

(b)

도면6

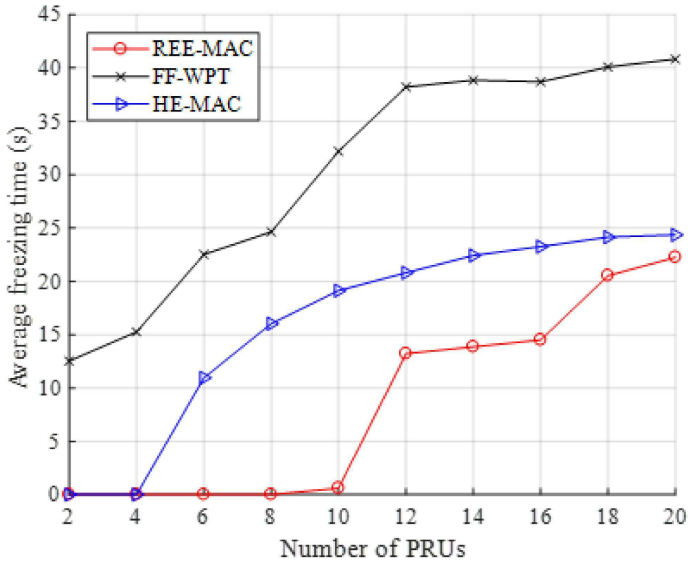

REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Average amount of consumed energy (mJ)
Number of PRUs
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

(a)

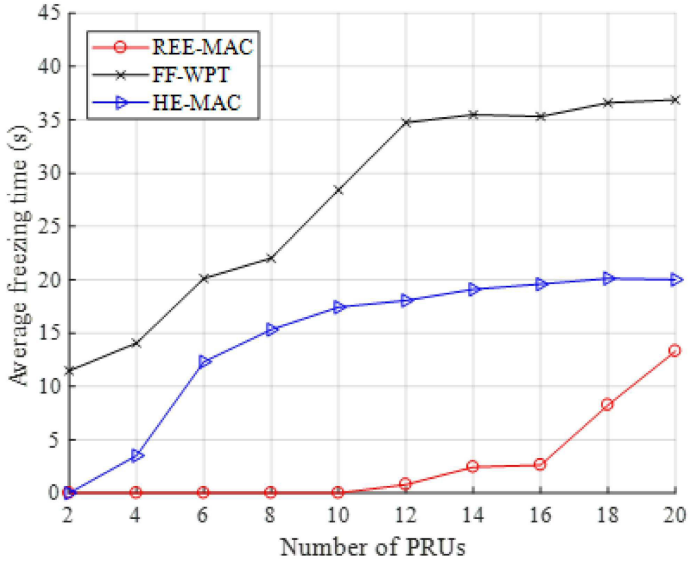

REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Average amount of consumed energy (mJ)
Number of PRUs
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

(b)

도면7

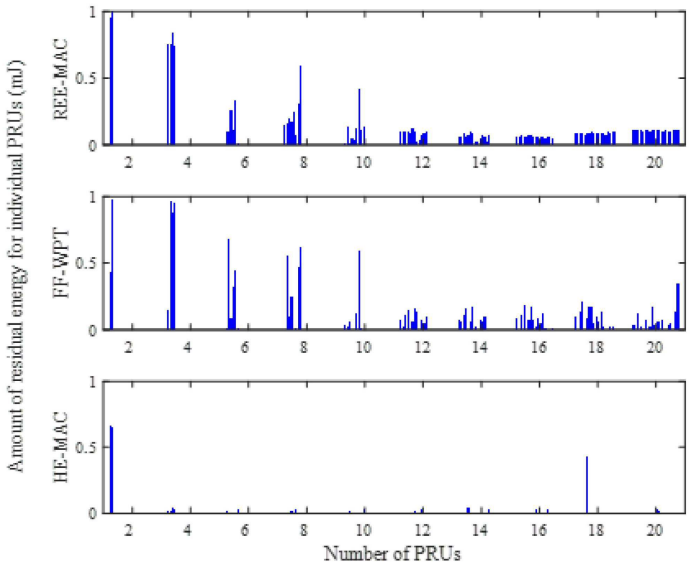

REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Average freezing time (s)
Number of PRUs
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

(a)

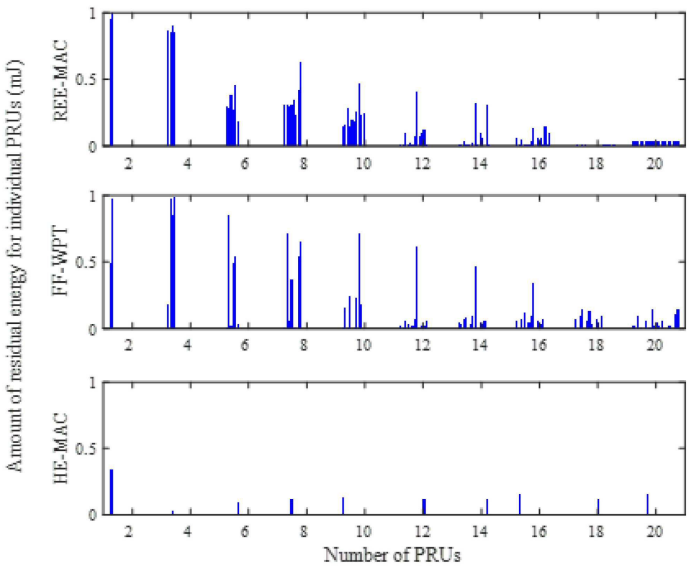

REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Average freezing time (s)
Number of PRUs
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

(b)

도면8

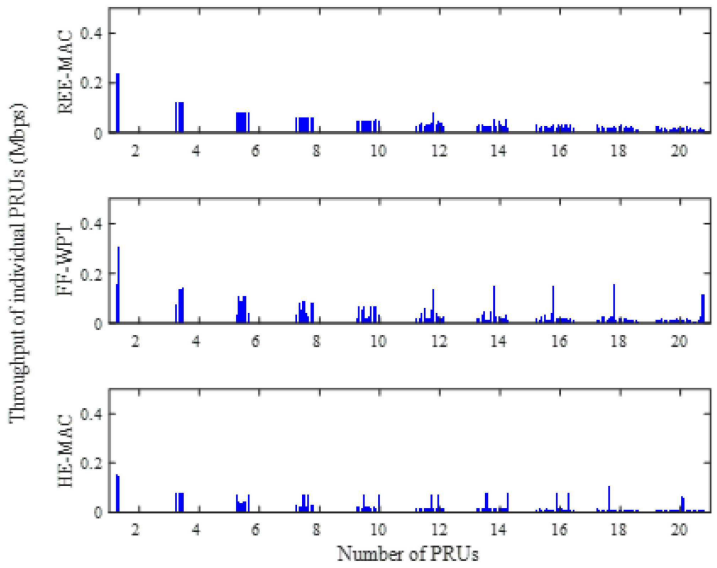

Amount of residual energy for individual PRUs (mJ)
REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Number of PRUs

(a)

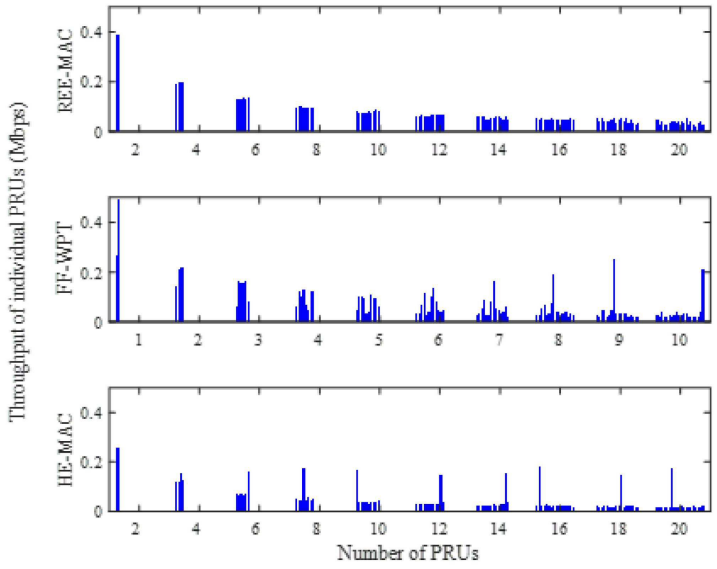

Amount of residual energy for individual PRUs (mJ)
REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Number of PRUs

(b)

도면9

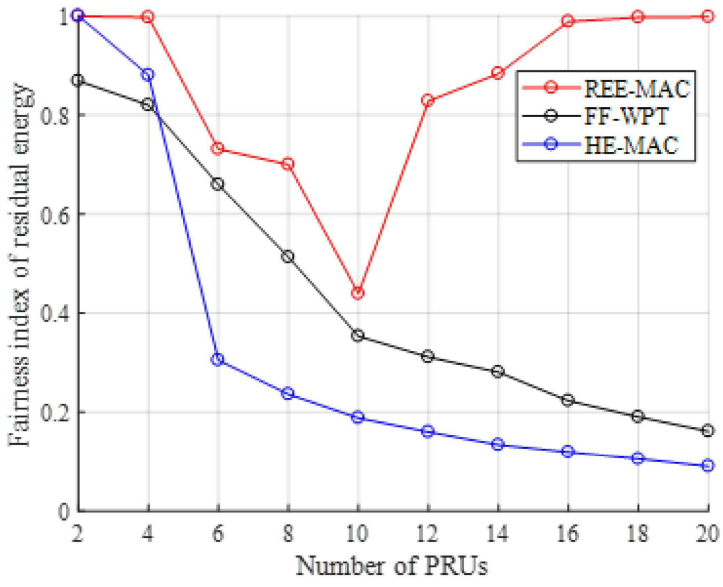

Throughput of individual PRUs (Mbps)
REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
0.4
0.2
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
Number of PRUs

(a)

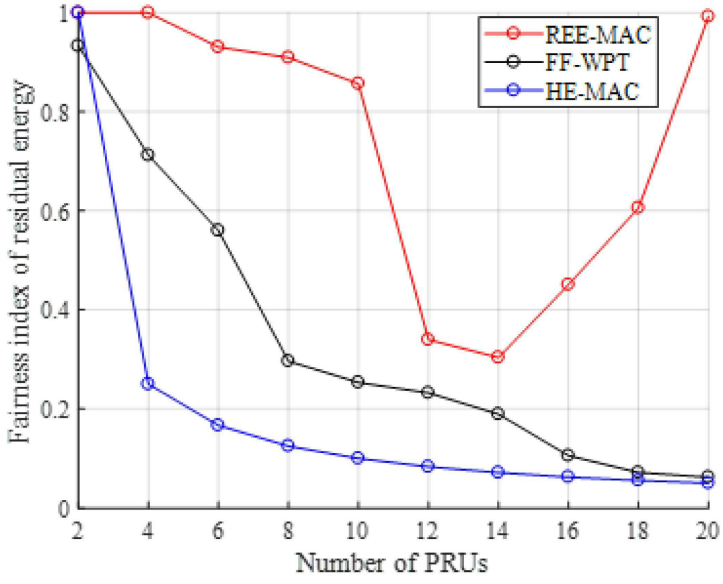

Throughput of individual PRUs (Mbps)
REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
0.4
0.2
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Number of PRUs

(b)

도면10

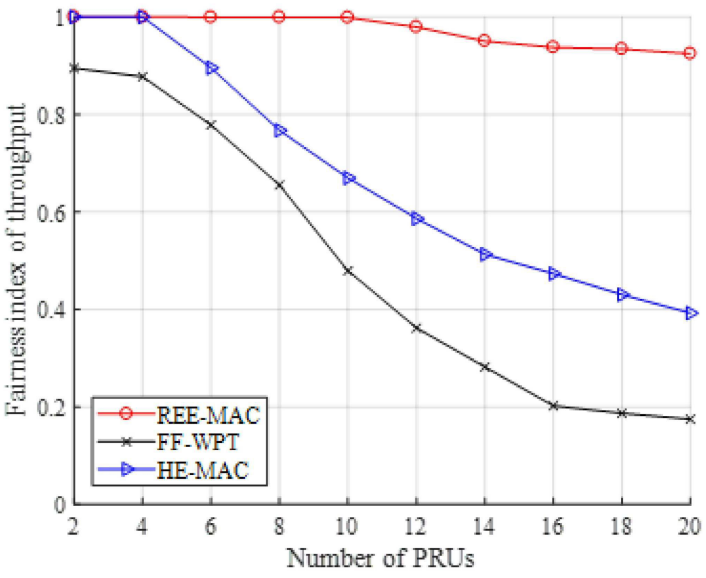

REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Fairness index of residual energy
Number of PRUs
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

(a)

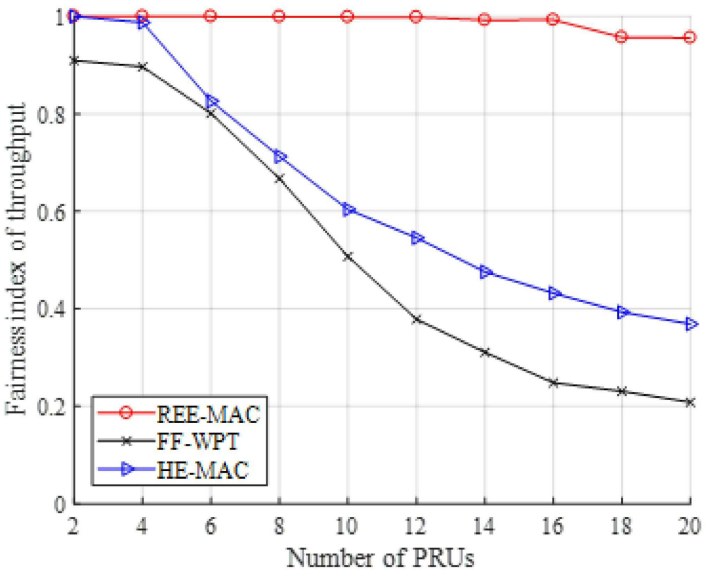

REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC
Fairness index of residual energy
Number of PRUs
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

(b)

도면11

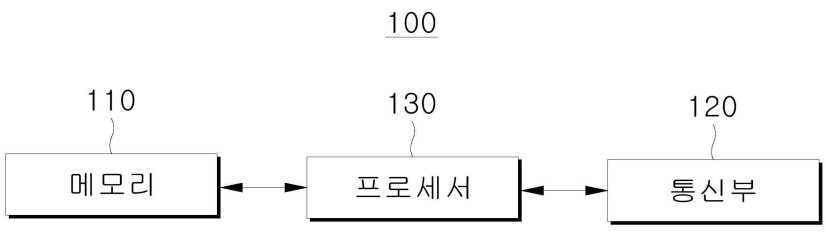

Fairness index of throughput
Number of PRUs
REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC

(a)


Fairness index of throughput
Number of PRUs
REE-MAC
FF-WPT
HE-MAC

(b)

도면12


100
110
130
120
메모리
프로세서
통신부