

3GPP Ambient IoT 전송기술 표준 현황

정회윤 한국전자통신연구원 6G무선방식연구실 책임연구원

1. 머리말

IoT는 최근 무선통신 기술과 융합되며, 다양한 산업 분야에서 중요한 역할을 차지하고 있다. IoT 기술은 작업 효율성과 생산성을 크게 향상시키며, 일상생활의 편리함을 증대시키기 위해 더 많은 사물들을 연결하는 방향으로 발전하고 있다. 이러한 기술 발전으로 인해, 수십억 개에서 수백억 개에 이르는 IoT 장치가 다양한 응용 분야에 배치될 가능성이 높아지고 있다. 그러나 이러한 확장성에도 불구하고, 대부분의 IoT 장치가 배터리에 의존하고 있어, 전력 공급 문제와 유지관리 부담이 큰 과제로 남아 있다.

기존 무선통신 장치는 대부분 배터리를 사용해 작동하며, 주기적인 교체나 충전이 필수적이다. 이로 인해 발생하는 높은 유지보수 비용과 환경 문제는 IoT 기술 확산에 걸림돌이 되고 있다. 특히, 전력이나 석유 산업과 같이 무선 센서를 많이 사용하는 환경에선, 배터리 교체 작업이 안전 위험을 유발할 가능성도 존재한다. 또한, 자동화와 디지털화가 가속화되는 산업 현장에선, 배터리 교체 또는 충전이 필요 없는 에너지 자립형 IoT 기술이 필수적이다.

이러한 필요에 대응해, Ambient IoT 기술이 등장했다. Ambient IoT는 주변 환경에서 에너지를 수확해 전력으로 활용하는 기술로, 에너지 하베스팅을 통해 장기간 유지 관리가 가능한 IoT 장치 개발을 목표로 한다. 이 기술은 특히 에너지 사용이 제한적인 소형 IoT 장치에 적합하며, 일반적으로 1μW에서 수백 μW의 전력으로 구동할 수 있도록 설계된다. 에너지를 효율적으로 수확하고 이를 저장해 사용하는 방식은 기존 셀룰러 장치의 고전력 소모 문제를 효과적으로 해결할 수 있다. 현재 많은 산업에서 바코드와 RFID 기술을 이용해 자산 식별을 하고 있지만, 이러한 기술은 한계가 명확하다. 통신 범위가 짧아 대규모 네트워크 구성에 적합하지 않으며, 인프라 설치 비용도 상당하다. 특히, 밀집된 환경에선 간섭 문제로 인해 네트워크 안정성도 저하될 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 3GPP TSG RAN에서 릴리즈-18 RAN 수준 Ambient IoT에 대한 연구를 완료했으며, 릴리즈-19에선 성능 검증과 물리계층 전송 기술 설계를 통해 표준화 작업이 진행 중이다 [1]-[3]. 이번 원고에선 현재 진행중인 3GPP Ambient IoT 전송 기술 표준 현황에 대해 설명한다.

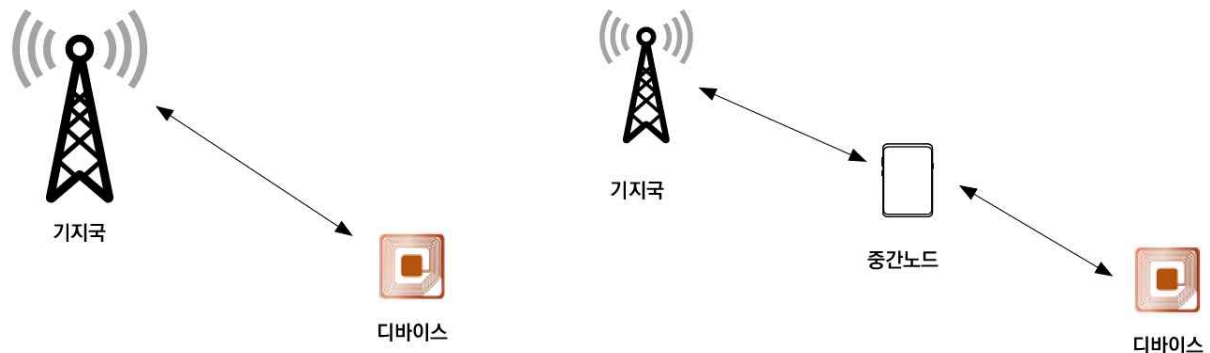
2. Ambient IoT 네트워크 및 디바이스 구조

2.1 Ambient IoT 네트워크 구조

릴리즈-19 Ambient IoT 네트워크 구조는 두 가지 형태로 구성된다. 첫 번째로, 토폴로지(Topology) 1은 기지국이 리더(Reader) 역할을 수행해 Ambient IoT 디바이스와 직접 통신하는 구조를 갖는

다. 두 번째로, 토폴로지 2는 기지국과 중간 노드(Intermediate Node)를 통해 연결되는 구조로, 중간 노드가 IoT 디바이스와 데이터를 주고 받는다.

릴리즈-19 Ambient IoT의 배치 방안은 두 가지 주요 시나리오로 구분된다. 첫 번째로, 배치 시나리오 1은 디바이스와 기지국이 모두 실내에 위치해 마이크로 셀 환경을 조성하는 방식이다. 두 번째로, 배치 시나리오 2는 디바이스와 중간 노드가 실내에 배치되며, 기지국은 외부에 위치해 매크로 셀 환경을 구성한다. 이러한 시나리오에서 Ambient IoT의 사용 대역은 NR과 동일대역, LTE/NR의 가드(Guard) 대역, 독립(Standalone) 대역을 고려하고 있다.



[그림 1] Ambient IoT 네트워크 토폴로지

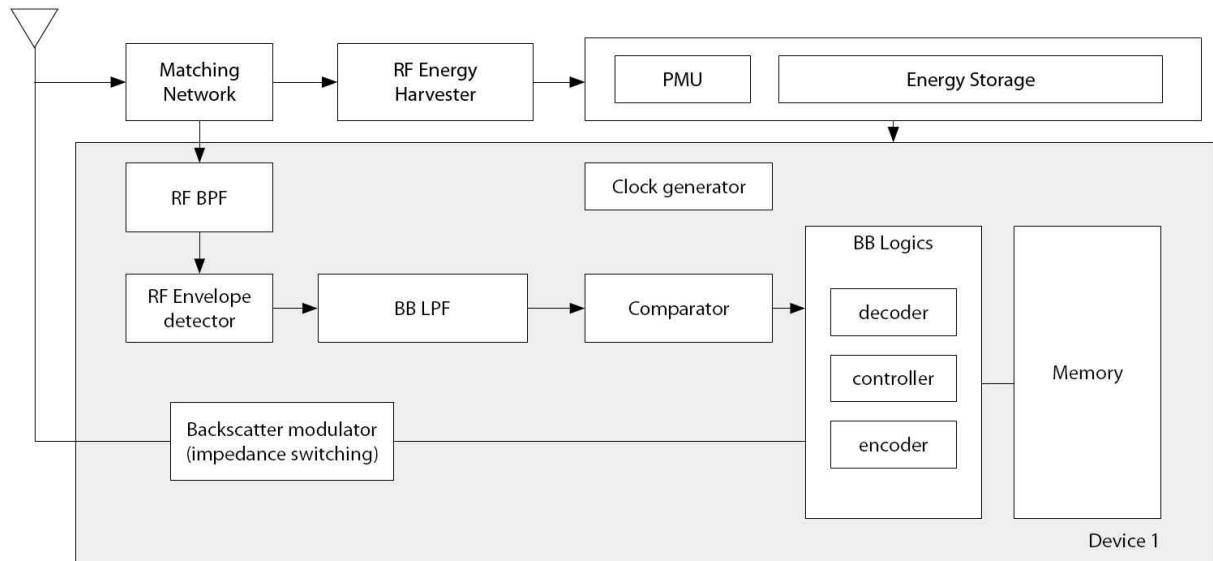
2.2 Ambient IoT 디바이스 구조

Ambient IoT를 지원하기 위해 설계된 디바이스 구조는 크게 세 가지 유형으로 구분된다. 각 디바이스 유형은 전력 소비 수준과 에너지 활용 방식에 따라 구별되며, 다양한 응용 환경에서 사용될 수 있다.

첫 번째 유형은 디바이스 1로, 최대 전력 소비가 약 $1\mu W$ 에 불과하다. 이 디바이스는 에너지 저장 장치를 탑재하고 있으며, 초기 샘플링 주파수 오프셋은 최대 $10Xppm$ 이다. 중요한 특징으로는 디바이스 자체에 다운링크 또는 업링크 증폭 기능이 없다는 점이다. 대신, 디바이스의 업링크 전송은 외부에서 제공되는 반송파를 반사해 이뤄진다. 이러한 구조는 저전력 환경에서 효율적으로 활용될 수 있다.

두 번째 유형은 디바이스 2a로, 최대 전력 소비가 수백 μW 수준이다. 이 유형은 에너지 저장 장치를 갖추고 있으며, 초기 샘플링 주파수 오프셋 역시 최대 $10Xppm$ 이다. 디바이스 내부에는 다운링크 또는 업링크 증폭을 지원하는 기능이 포함돼 있어, 외부 반송파를 반사해 업링크 전송을 수행할 수 있다.

세 번째 유형은 디바이스 2b로, 디바이스 2a와 동일하게 최대 수백 μW 의 전력을 소비하며 에너지 저장 장치를 보유하고 있다. 가장 큰 차이점은 디바이스 내부에서 직접 신호를 생성해 업링크 전송이 가능하다는 점이다. 초기 샘플링 주파수 오프셋은 최대 $10Xppm$ 으로 동일하지만, 자체 신호 생성 능력을 통해 반송파 없이도 데이터를 송신할 수 있는 특징이 있다.



[그림 2] Ambient IoT 디바이스 구조[2]

3. Ambient IoT 물리계층 전송 기술

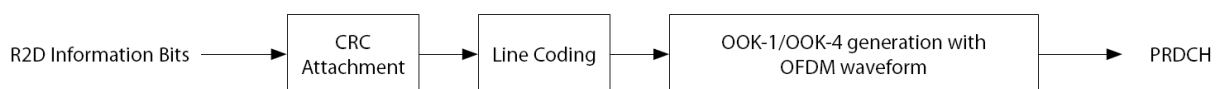
3.1 R2D 전송 기술

Ambient IoT 시스템 중 리더에서 디바이스로 데이터를 전송하는 방식을 R2D(Reader-to-Device) 전송이라 한다. 이 R2D 전송의 전송 파형으로는 15kHz 서브캐리어 간격을 갖춘 OFDM 기반 OOK(On-Off Keying) 방식이 사용된다. 구체적으로, 하나의 OFDM 심볼에 하나의 칩(Chip)을 사용하는 OOK-1 변조 방식과 하나의 OFDM 심볼에 M개의 칩을 사용하는 OOK-4(M) 변조 방식이 고려된다. OOK-4(M) 방식에선 M 값으로 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32 등이 사용될 수 있다.

R2D 전송의 핵심 중 하나는 라인 코딩(Line coding) 적용이다. 라인 코딩은 디바이스가 칩 수준에서 시간 동기를 획득할 수 있도록 돕는 역할을 한다. R2D 전송에선 대표적으로 맨체스터(Manchester) 코딩과 PIE(Pulse Interval Encoding) 코딩 방식이 고려된다.

R2D 전송에선 Ambient IoT 디바이스의 저복잡도 특성을 고려해 오류 정정 부호를 사용하지 않는 것으로 합의됐다. CRC 적용에 대해선 기존 3GPP 38.212 표준에서 정의된 6비트 또는 16비트 다항식을 사용하기로 했다[4]. 또한, R2D 전송의 반복 전송(Repetition)과 관련해 비트 레벨, 블록 레벨, 칩 레벨 등 다양한 반복 전송 방식이 논의됐다.

R2D 전송에 필요한 물리채널로는 PRDCH(Physical Reader-to-Device Channel)가 정의됐으며, PRDCH는 R2D 전송을 위한 유일한 물리채널로 설정됐다. PRDCH 생성 과정에선 R2D 정보 비트에 CRC를 추가하고, 맨체스터 또는 PIE 라인 코딩을 적용한 후, OOK-1 또는 OOK-4(M) 기반의 OFDM 파형을 생성해 채널을 구성한다.



[그림 3] PRDCH 생성 블록도[2]

R2D 신호는 PRDCH와 이의 앞부분에 위치한 프리앰블(Preamble)로 구성된다. 프리앰블은 전송 시작을 알리는 '시작 지시 파트'와 시간 동기 확보를 위한 '동기 획득 파트'로 나뉜다. 시작 지시 파트는 ON과 OFF 신호의 특정 패턴으로 정의되며, 동기 획득 파트는 OOK 기반의 신호로, 상승 에지(Rising Edge)와 하락 에지(Falling Edge)가 최소 두 번 이상 포함돼 있어 칩 길이 확인에 도움을 준다.

R2D 전송의 종료 시점 결정은 두 가지 방식으로 고려된다. 첫 번째는 R2D 제어 정보에 포함된 TB 크기를 통해 종료 시점을 지정하는 방법이며, 두 번째는 PRDCH 종료 후 포스트앰블(Postamble)을 추가해 전송 완료를 명시하는 방법이다. R2D 전송에선 시간 영역 다중화 방식을 지원하는 것으로 합의됐다.

3.2 D2R

Ambient IoT 시스템 중 디바이스로부터 리더로 데이터를 전송하는 방식을 D2R (Device-to-Reader) 전송이라 한다. D2R 전송은 디바이스 구조에 따라 다양한 전송 방식을 사용하며, 디바이스 유형에 따라 접근 방식이 달라진다.

디바이스 2b의 경우, 기존 셀룰러 통신과 유사한 형태로 동작하는데, 자체적으로 신호를 생성해 송신하는 방식을 사용한다. 반면, 디바이스 1과 2a는 외부로부터 제공된 반송파를 이용한 후방 산란(Back Scattering) 방식을 통해 신호를 전송한다. 이러한 구조적 차이에 따라 전송 방식이 구분되며, 각 디바이스의 특성에 맞춘 기술이 적용된다.

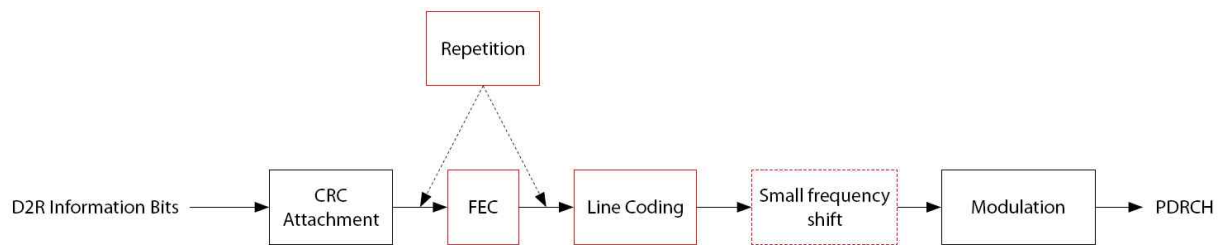
D2R 전송에서 사용되는 변조 방식으로는 OOK, BPSK(Binary Phase Shift Keying), BFSK(Binary Frequency Shift Keying) 방식이 논의됐다. 특히 BFSK 변조 방식에선 여러 세부 방식 중 MSK (Minimum Shift Keying)가 고려됐다. 연구 결과, OOK와 BPSK는 모든 디바이스 구조에서 구현이 가능한 것으로 확인됐지만, BFSK의 경우 일부 디바이스에서 구현이 어려운 문제점이 있다.

D2R 전송에서도 R 2D와 유사하게 라인 코딩이 적용된다. 주요 라인 코딩 방식으론 맨체스터 코딩, FM0 코딩, 밀러(Miller) 코딩이 있으며, 경우에 따라 라인 코딩을 적용하지 않는 옵션도 함께 고려됐다.

R2D 전송과 달리 D2R 전송에선 채널 코딩 도입이 논의됐다. 채널 코딩 방식으로 컨볼루션 코딩(Convolutional Code)가 고려됐으며, 이는 LTE 표준에 정의된 기본 환경 변수를 사용하고 성능 분석을 통해 최적화를 진행하고 있다[5]. 또한, 반복 전송 기법으로 비트 레벨 반복 전송과 블록 레벨 반복 전송이 적용 가능하다.

D2R 전송을 위한 물리 채널로 PDRCH가 정의돼 있으며, 이는 D2R 전송을 위한 유일한 물리 채널로 사용된다. PDRCH는 라인 코드 적용 여부에 따라 구성 방식이 달라진다. 라인 코딩이 적용되는 경우, D2R 정보 비트에 CRC를 추가한 뒤, 채널 코딩 전이나 후에 반복 전송 기법이 적용된다. 이후 라인 코딩 방식을 적용해 소규모 주파수 천이(Small Frequency Shift)를 통해 PDRCH를 생성한다.

D2R 신호는 데이터를 포함하는 PDRCH와 프리앰블로 구성된다. 프리앰블의 목적은 시간 동기 획득과 D2R 전송의 시작을 알리기 위함이며, 추가적으로 주파수 오프셋 추정, 채널 특성 추정 등의 역할도 수행할 수 있다. 프리앰블 생성에는 이진(Binary) 시퀀스를 사용하는 것이 합의됐다.



[그림 4] PDRCH 생성 블록도 [2]

D2R 전송의 다중 접속 방식은 시간 영역과 주파수 영역 모두를 고려하며, 특히 디바이스 구조 2b의 경우 자체 신호 생성 기능을 활용해 주파수 영역 다중 접속을 구현할 수 있다. 그러나 코드 기반 다중 접속 방식은 복잡성 문제로 인해 도입에 대한 합의가 이뤄지지 않았다.

3.3 기타 요소 기술

Ambient IoT 시스템에서 디바이스가 리더와 가까운 위치에 있는지를 판별하기 위해 근접성 결정 (Proximity determination) 기법이 논의됐으며, 두 가지 접근 방식이 제안됐다. 첫 번째 방식(근접성 결정 방식 1)은 R2D 전송 이후 리더가 디바이스로부터 D2R 전송을 성공적으로 수신하면, 디바이스가 리더 근처에 있다고 판단하는 방법이다. 두 번째 방식(근접성 결정 방식 2)은 R2D 전송 후 리더가 디바이스로부터 D2R 전송을 수신한 다음, 해당 신호를 측정해 근접성을 판단하는 방식이다.

토폴로지 2에선 중간 노드가 리더로서 R2D 및 D2R 전송을 관리하며, 이때 기지국과 중간 노드 간 자원 할당 제어 방식으로 두 가지 접근법이 고려된다. 첫 번째는 상위계층 시그널링만을 이용해 제어하는 방식이며, 두 번째는 상위계층 시그널링과 물리계층 시그널링을 병행해 활용하는 방식이다.

한편, Ambient IoT 디바이스는 에너지 수확을 통해 동작하기 때문에 리더가 R2D 전송을 수행할 때, 디바이스의 에너지 상태에 따라 R2D 전송 수신이 불가능할 수 있다. 마찬가지로, 리더가 D2R 전송을 지시했음에도 디바이스의 에너지 부족으로 D2R 전송을 수행하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 디바이스 비가용성(Unavailability) 문제를 해결하기 위해 두 가지 대안이 논의됐다. 첫 번째 대안(디바이스 비가용성 결정 방식 1)은 리더가 디바이스의 가용 여부에 대한 정보를 명시적으로 전달하지 않는 방식이다. 두 번째 대안(디바이스 비가용성 결정 방식 2)은 리더가 디바이스의 가용 또는 비가용 상태를 명시적으로 전달해 상황을 공유하는 방식이다.

4. 맺음말

Ambient IoT는 배터리 교체와 충전의 한계를 극복해 지속가능하고 효율적인 IoT 환경을 구축할 수 있는 중요한 기술로 자리잡고 있다. 특히, 저전력 설계와 에너지 수확 기술을 통해 다양한 응용 분야에서 활용 가능하며, 무선통신 기반 데이터 전송 방식을 최적화해 안정성과 성능을 확보하고 있다. 현재 표준화 과정이 활발히 진행되고 있는 만큼, Ambient IoT 기술은 향후 다양한 산업 분야에서 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다. 이를 통해, 기존 IoT 기술이 갖고 있던 한계를 극복하고, 더욱 폭넓은 서비스 제공이 가능해질 전망이다.

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2024-00397789, (세부1) 6G 무선전송 표준기술 개발 및 표준화)

[참고문헌]

- [1] 3GPP TR 38.848, Study on Ambient IoT (Internet of Things) in RAN (Release 18), V18.0.0, September 2023.
- [2] 3GPP TR 38.769, Study on solutions for ambient IoT (Internet of Things) in NR (Release 19), V19.0.0, December 2024.
- [3] 3GPP RP-243326, New WID on Rel-19 Ambient IoT, December 2024.
- [4] 3GPP TS 38.212, NR; Multiplexing and channel coding, V18.6.0, March 2025.
- [5] 3GPP TS 36.212, E-UTRA; Multiplexing and channel coding, V18.1.0, December 2024

※ 출처: TTA 저널 제219호