

IEEE P802.11bp 물리 계층 표준 기술 동향

김진경, 명정호, 고영조
한국전자통신연구원

{jkkim, jhmyung, koyj}@etri.re.kr

Technology Trends in IEEE P802.11bp Physical Layer Standardization

Kim, Jin Kyeong; Myung Jung Ho; Ko, Young Jo
Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

극저전력 앰비언트 IoT 통신을 위한 IEEE 802.11 TGBP 표준화 동향을 변조 및 파형 설계, 동기화 필드 설계, Sub-1 GHz 설계, 양방향 후방산란 간섭 완화 기술 및 WPT 제어 동작 방식 등 물리 계층의 주요 기술을 중심으로 고찰한다.

I. 서론

IEEE 802.11bp는 주변 RF 에너지를 활용하여 배터리 없이 통신하는 AMP(Ambient Power Communication) 기술의 표준화를 목표로 하는 프로젝트이다. 2024년 1월 PAR(Project Authorization Request) 승인 이후, Task Group bp(TGBP)는 2025년 한 해 동안 총 4회의 회의를 통해 기술 사양을 구체화해왔다. 본고에서는 물리 계층의 핵심 기술 도출 과정을 살펴보고, 표준 Draft 0.1 생성에 이르기까지의 기술적 쟁점과 합의 과정을 고찰한다[1].

II. PHY 관련 사항

2.1 변조 및 파형 설계

초기 회의에서는 후방산란 통신을 위한 다양한 변조 방식이 제안되었다. 하일라는 3월 회의에서 기존 DSB(Double Side Band) 대비 전력 효율이 우수한 SSB(Single Side Band) 백스캐터 변조를 제안하였으며, PSK 변조를 통한 장거리 통신 가능성을 제시했다. 하지만 실무적 검토 결과, PSK는 4-phase 클럭 생성에 많은 전력이 소모되어 AMP 태그에 부적합하다는 의견이 제기되었다. 이에 따라 3/5월 회의에서 하향링크(DL)는 맨체스터 인코딩, 상향링크(UL)는 OOK 변조를 사용하는 기본 구조가 합의되었다[2].

DL PPDU의 캐리어 파형 설계는 여러 기술적 검토를 거쳤다. NXP는 반복되는 기본 파형에 의사 랜덤 위상을 적용하는 구조를 제안했으며, 퀄컴은 OFDM 대역 확산 파형을 통한 대역폭 제어 방안을 제시했다. 5월 회의에서 DSSS와 OFDM 방식의 비교 분석을 제시했다. 주요 발견 사항은:

- DSSS는 스펙트럼 마스크 준수를 위해 약 7dB의 백오프가 필요
- OFDM은 20dBm 전송 시 추가 백오프 불필요
- 필터링 후 PAPR 고려 시 OFDM이 전송 전력 측면에서 유리

이러한 분석을 바탕으로 7월 회의에서 캐리어 파형을 "반복되는 기본 파형 구조"로 정의하는 제안이 통과되었다. 또한 250kbps는 2μs, 1Mbps는 0.5μs 칩 지속시간을 사용하며, 맨체스터 인코딩에서 '1'은 '01', '0'은 '10'으로 매핑하는 것으로 확정되었다.

7월 회의에서 PHY 파라미터는 AP가 지시하는 구조로 합의되었다. 9월 회의에서는 FEC 적용 시 약 3dB의 코딩 이득을 얻을 수 있다는 시뮬레이션 결과를 제시했다.

하지만 FEC 적용 시 칩 지속 시간 변경이 필요하고, OOK를 연관성 정보로 변환하는 방법 등 구현 복잡도가 증가로 인해 FEC는 선택적 기능으로 유지되기로 했다.

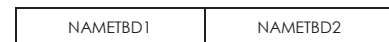
2.2 동기화 필드 설계

Sync 필드는 저전력 장치가 낮은 SNR 환경(-10dB 이하)에서도 신호를 감지하고 타이밍을 획득해야 하는 핵심 요소이다. 5월 회의에서 퀄컴은 상관 기반과 전력 기반의 두 가지 검출 방식을 비교 제시했다:

- 상관 기반: 정확한 타이밍 획득 가능하나 낮은 SNR에서 성능 저하
- 전력 기반: 낮은 SNR에서 강인하나 타이밍 정확도 낮음

DL Sync 필드의 주요 기술적 쟁점은 오경보 확률 제어였다. 퀄컴은 7월 회의에서 백스캐터 모드와 달리 비백스캐터 모드의 경우 데이터 부분과의 상호 상관으로 인한 오경보를 줄이기 위해 그림 1과 같이 특수 세그먼트 구조를 제안했다. 이 구조는 주요 특징은:

- Sync 시퀀스 전에 짧은 특수 패턴 삽입
- 검출 임계값 설정의 신뢰도 향상
- 약 1dB의 성능 손실을 감수하되 오경보 확률 대폭 감소



(a) 비백스캐터 모드



(b) 백스캐터 모드

그림 1. AMP Sync 필드 구조*

* NAMETBD1과 NAMETBD3는 수신기의 PPDU 검출 및 심볼 타이밍 복원에 사용되며, NAMETBD1은 데이터 전송 물 결정을 기능을 더한다. NAMETBD2는 오경보를 감소시키기 위해 설계된 특수 세그먼트임

7월 회의에서 24 칩 길이의 Sync 시퀀스를 사용하는 것으로 합의되었으나, 미디어텍과 화웨이는 32 칩이 더 적합하다고 주장하며 논의가 계속되었다.

후방산란 UL의 경우, 퀄컴은 7월 회의에서 단방향 환경을 위한 Sync 필드 설계를 제시했다. 주요 특징은:

- 길이 8의 시퀀스 W를 3회 반복하는 구조
- 100,000ppm 클럭 오차 환경 고려
- 코히어런트 수신 가능 (단방향 특성 활용)

9월 회의에서 Active Tx를 위한 별도의 Sync 시퀀스가 필요하다는 의견이 제기되었으며(미디어텍), 48 칩

이상의 긴 시퀀스가 페이로드 길이를 고려할 때 오버헤드 측면에서 적절하다는 의견이 모아졌다.

L-STF	L-LTF	L-SIG	RL-SIG	U-SIG	AMP-Sync	AMP-SIG (TBD)	AMP-Data
-------	-------	-------	--------	-------	----------	---------------	----------

(a) NAMETBD1 format

L-STF	L-LTF	L-SIG	RL-SIG	U-SIG	AMP-Excitation	AMP-Sync	AMP-Data	AMP-Excitation
-------	-------	-------	--------	-------	----------------	----------	----------	----------------

(b) NAMETBD2 format

L-STF	L-LTF	L-SIG	RL-SIG	U-SIG	AMP-Sync	AMP-Data	AMP-Excitation
-------	-------	-------	--------	-------	----------	----------	----------------

(c) NAMETBD3 format

그림 2. AMP 하향링크 PPDU 구조[4]*

* (a)는 비백스캐터 STA 인 경우이며, (b)와 (c)는 백스캐터 STA 인 경우임

2.3 Sub-1 GHz 대역 설계

S1G 대역 활용은 지역별 규제 차이로 인해 복잡한 기술적 검토가 필요했다:

- 중국: 200/250kHz 대역폭, 최대 30dBm
- 유럽: 200kHz 대역폭, 엄격한 스펙트럼 마스크
- 미국: 최소 500kHz 또는 주파수 도약 필요

7 월 회의에서 화웨이와 오포는 각각 단일 반송파 기반 설계를 제안했다. 주요 논의사항:

- OFDM 은 유럽의 엄격한 스펙트럼 마스크 준수 어려움
- 단일 반송파가 UHF RFID 와 유사하여 구현 용이
- 주파수 도약은 미국 규제 준수를 위한 옵션

9 월 회의 결과, S1G 채널화는 IEEE 802.11ah 기반 으로 하되, 특정 지역의 요구사항은 별도 고려하기로 합의되었다.

9 월 회의에서 화웨이는 S1G 의 DL/UL 데이터 전송률로 31.25kb/s, 62.5kb/s, 125kb/s, 250kb/s 를 제안했다. 하지만 미국 규제를 만족시키기 위한 주파수 도약 구현 방식과의 상충 문제가 남아있어 추가 논의가 필요한 상황이다.

2.4 양방향 후방산란

양방향 후방산란은 익사이터와 리더가 분리되어 있어 간섭 문제가 핵심 주제이다. 7 월 회의에서 하일라는 두 가지 접근법을 제시했다:

1. 주파수 분리: 40MHz 채널 내에서 여기 신호(excitation)와 후방 산란 신호를 주파수적으로 분리
2. 신호 처리: 디지털 도메인 필터링을 통한 간섭 제거 시뮬레이션 결과를 통해 다음의 사항을 확인하였다:
 - 10MHz 여기 신호 대역폭 사용 시 약 10dB SNR 개선
 - 이상적 필터 가정 시 -20dBm LOS 간섭 환경에서 동작 가능
 - 실제 구현에서는 PA 비선형성, 수신기 동적 범위 등 추가 고려 필요

9 월 회의에서 양방향 후방산란을 위한 여기 신호 파형은 40MHz 채널 내 단일 반송파 파형으로 정의되었으며, DL 은 1Mbps 도 지원하고 UL 데이터 필드는 Active Tx 와 동일한 코딩 방식을 사용하는 것으로 승인 되었다.

III. WPT 관련 사항

3.1 파형 및 채널화

7 월 회의에서 다음과 같이 WPT 신호의 기본 특성이 정의되었다:

- S1G 대역에서 동시 전송 허용
- 에너지이저 능력 보고 필요
- 싱글 캐리어 파형 사용

오포는 WPT 파형 설계 시 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)에 따른 충전 효율 변화와 다수 에너지이저

간 동기화 이슈 그리고 LBT(Listen Before Talk) 필요성을 고려해야 한다고 제안했다.

3.2 제어 및 최적화

7 월 회의에서 AP 가 에너지이저에 전달해야 할 제어 정보가 정의되었다:

- 시작 시간, 지속 시간, 간격
- 송신 전력
- 주파수 관련 파라미터

9 월 회의에서 화웨이는 PDT 를 통해 구체적 구조를 제안했다:

- 기능 인코딩 구조
- 여기 신호와 WPT 파형을 별도 기능으로 구분
- 대역 정보는 대역 선택 의미(신호 폭이 아님)

오포는 다수의 에너지이저 시나리오에서 동기화의 중요성을 강조했다:

- 동기화 필요성: 중첩 영역의 간섭 최소화
- 반대 의견: 사각 지대 생성 우려, 주파수 차이에 따른 신호 상쇄 현상 발생

결론적으로 "모든 상황에서 동기화 필수"가 아니라, AP 가 상황에 따라 선택적으로 에너지이저를 제어하는 유연한 구조가 필요하다는 의견으로 수렴되었다.

3.3 상호 공존

9 월 회의에서 WPT 신호의 상호 공존 메커니즘이 논의되었다:

- LBT 강제 여부: PAR 에서 상호 공존 메커니즘 요구
- 지역별 차이: 주파수 도약 허용 지역은 LBT 불필요
- ED 레벨: -62dBm 제안, 하지만 채널 구성 방식이 11ah 와 다를 수 있음

최종 결론에서 논쟁적인 LBT 필수 옵션 부분을 제거하고 통과되었고, 이는 지역별 규제 차이를 고려하되, 최소한의 상호 공존 메커니즘은 필요하다고 절충안의 결과이다.

IV. 결론

본 논문에서는 엠베언트 IoT 표준화를 담당하는 IEEE P802.11 TGbp 에서 표준 Draft 0.1 생성을 결의한 2025 년 9 월까지 진행된 물리 계층 주요 진행 내용을 살펴해보았다. 표준화 과정에서 드러난 가장 큰 도전은 "극도로 제한된 전력 환경에서 충분한 기능 제공"이라는 모순적 요구사항이다. 앞으로 긴 시퀀스는 감도를 높이지만 전력 소모 증가하는 문제에 직면한 DL Sync 와 S1G 주파수 도약 등 미해결 쟁점 사항에 대해 계속 표준화가 진행될 예정이며, 이를 통해 모순적 요구 사항을 만족하는 엠비언트 IoT 기술이 구체화될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO.RS-2024-00397216, Upper-mid Band Extreme massive MIMO (E-MIMO) 시스템 기술 개발)

참고 문헌

- [1] IEEE P802.11 TGbp, Specification Framework for TGbp, IEEE 802.11-24/1613r12, 2025.
- [2] IEEE P802.11 TGbp, DL non-AMP portion preamble, IEEE 802.11-25/1439r2, 2025.
- [3] IEEE P802.11 TGbp, DL PPDU format, IEEE 802.11-25/1373r2, 2025.
- [4] IEEE P802.11 TGbp, DL Sync field, IEEE 802.11-25/1599r3, 2025.