

5G-A 蜂窝无源物联网 关键技术研究

Key Technologies of 5G-A Cellular Ambient IoT

王璐璐¹,姚赛彬²,潘 婷²(1. 中国联通研究院,北京 100048;2. 中国联通上海分公司,上海 200080)

Wang Lulu¹, Yao Saibin², Pan Ting²(1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China; 2. China Unicom Shanghai Branch, Shanghai 200080, China)

摘 要:

无源物联网作为 5G-A 及未来 6G 网络的关键使能技术,基于射频能量采集与反向散射通信,为海量终端免电池、超低功耗连接提供了可行路径。系统梳理了 A-IoT 的应用场景、网络指标、设备分级、核心网 AIOTF 架构、无线网组网拓扑、物理层 R2D/D2R 信道设计及 MAC 层极简流程,揭示了蜂窝无源物联网从标准定义走向产业落地的技术全貌。标准化工作的推进和产业链的协同,正为万亿级泛在连接场景打开新的发展空间。

关键词:

5G-A;无源物联网;低功耗;R19

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.08.006

文章编号:1007-3043(2026)08-0030-07

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

As a key enabling technology for 5G-Advanced and future 6G networks, Ambient IoT (A-IoT) provides a viable path for battery-free, ultra-low-power connectivity of massive terminals through RF energy harvesting and backscatter communication. The use cases, network performance metrics, device classifications, core network AIOTF architecture, radio access network topology, physical layer R2D/D2R channel designs, and simplified MAC procedures of A-IoT are systematically reviewed, revealing the complete technical landscape of cellular passive IoT from standard definition to industry deployment. The advancement of standardization and the synergy of the industrial chain are opening up new development space for trillion-level ubiquitous connectivity scenarios.

Keywords:

5G-A; Ambient IoT; Low-power; R19

引用格式:王璐璐,姚赛彬,潘婷. 5G-A蜂窝无源物联网关键技术研究[J]. 邮电设计技术,2026(8):30-36.

0 引言

当前,以智能仓储为代表的新型仓储物流系统正加速向全流程自动化、无人化、数字孪生化方向发展。然而,传统射频识别技术存在 3 个固有瓶颈:一是覆盖范围小,典型无源 RFID 读写距离仅数米至十余米,难以覆盖大型立体仓库或跨区域流转场景;二是需专用

手持或固定式读写设备,无法利用现有蜂窝通信基础设施,导致系统投资大、部署复杂;三是依赖人工或半自动扫描,自动化程度低,难以实现货物实时、连续、无缝感知^[1-3]。

与此同时,有源物联网标签虽具备更强的通信与定位能力,但严重依赖电池供电^[4]。在数以万计的大规模仓储场景中,电池更换成本极高,维护工作量大,且存在环境污染与安全隐患。上述问题共同制约了仓储物流行业向全生命周期智能管理的转型升级。

收稿日期:2026-07-06

5G-A蜂窝通信系统提出的无源物联网(Ambient Internet of Things, A-IoT)方向,为解决上述矛盾提供了全新的技术路径^[5]。其核心思想是利用5G基站发射的射频能量为终端标签供电,标签通过反向散射或低功耗接收技术完成数据通信,从而实现“免电池、远距离、广覆盖、规模化”的物联连接。3GPP已在R19版本中启动无源物联网空口技术的标准化工作,定义了面向蜂窝网络的标签分级、应用拓扑、信道信号、定时获取与随机接入流程等^[6]。系统性地开展蜂窝网络下的无源物联网技术研究工作,成为从实验室原理验证迈向规模化产业落地的核心环节^[7]。

本文以3GPP无源物联网项目标准化进展为基础,聚焦R19版本协议内容。首先讨论无源物联网技术的应用场景,给出室内蜂窝无源物联网络指标要求,然后介绍标签分级,分析核心网和无线网的网络架构,梳理物理层关键技术、高层随机接入方案,最后对未来进行展望。

1 无源物联网应用场景与网络指标

1.1 应用场景

1.1.1 智慧仓储

在智慧仓储场景中,标签的全流程价值收益链较长,包含货物验证、装卸、入库盘点、库存盘点、出库盘点以及检查与装载等流程。货物在仓库中转移、储存和盘点过程中,会产生大量的仓储信息,这些信息具有数据读取操作频繁和数据量大的特点。通过将A-IoT终端嵌入商品包装,5G-A无源物联网基站设备根据需求部署在仓库的车间、道口、产线中,实现全区域连续覆盖,盘存更高效,准确率更高,自动盘存能进一步节省人力,提供更优质高效的业务体验。

1.1.2 数字化工厂

在大规模工厂生产中,信息流与实物流无法实时同步是导致生产效率低下的一个典型问题。数字化工厂采用接单生产模式,其产品从生产伊始就明确对应终端客户,每个步骤须极其精准地选择零部件配

置,并快速用于生产。如何实现零部件供应、制造、仓储、物流运输及交付的全流程高效管理至关重要。通过室内5G-A无源物联网部署可实现生产物流全域连续覆盖,进而提供对物料和容器的实时盘存和区域定位能力,实现对大批量和多规格物料的出入库、仓储、配送全过程数字化智能高效协同决策,成为制造行业数字化进程的重要支撑。

1.1.3 智慧电网

智慧电网的输电网络、变电网络、配电网络以及用电环境中需要大量的物联网设备,实时监测环境温湿度、设备运行状态以及用电状态,这是避免电力中断、资产损失,甚至人身伤害事故的必要手段。随着电网规模的持续扩大,末端节点呈现种类多、数量大、运行环境复杂、分布范围广且所处环境差异大等特点。现有物联感知技术功耗高、取电难、尺寸大的问题日益凸显,难以满足电力系统全场景物联感知需求。在电网系统中,传感器通常部署在难以接近的位置,在这些地方进行物理更换成本高,难度大,对物联网设备的寿命期望为10年或更长,传统电源供电的物联网设备难以满足需求。无源物联网设备无需更换电池,通过环境供能的技术,在电网系统中具备显著优势。

1.2 网络指标

根据无源物联网的潜在应用需求,3GPP开展了应用场景和指标分析工作,并将室内场景下的无源物联网关键指标划分为盘存、传感器数据采集、追踪、制动器控制4个方面,具体要求如表1所示。

2 标签分级

考虑到无源物联网标签设备在尺寸和复杂度上的限制,其能量采集器的输出功率通常在1至数百 μW 。3GPP基于标签的峰值功耗、储能能力和射频信号生成能力,在R18和R19阶段分别定义了不同的设备类型。其中,在R18阶段,标签被划分为类型A、B、C3类,在R19阶段,则进一步将其演进为设备类型1、

表1 无源物联网室内场景网络指标^[8]

指标分类	最大端到端时延	通信可用性/%	用户体验数据速率/(kbit/s)	信息大小	设备密度	通信范围/m	服务面积	设备速度	定位精度/m
盘存	秒级	99	<2	96/256 bit	<1 500 000/km ²	30~50	1~10 km ²	3~10 km/h	3
传感器数据采集	20~30 s	99	<1	<1 000 bit	1.5/m ²	10~200	6 000 m ²	接近静止	-
追踪	1 s	99.9	<1	<1 000 bit	25/100 m ²	10	200 m ²	<3 km/h	1~3
制动器控制	数秒	99	2	<100 B	<1 500 000/km ²	50	<15 800 m ²	静止	3~5

2a和2b^[9]。在实际标准化讨论中,R19阶段主要聚焦于类型1和2a,而R20阶段的讨论范围扩展至类型1、2b及类型C。目前R19标准已冻结,产业界将优先开展以类型1设备为主的试验应用。

2.1 A类(1类)设备

3GPP R18版本对A类设备的定义为:无能量存储单元,不具备独立信号生成/放大能力,完全依赖反向散射通信技术进行数据传输。A类设备的成本最低。在R19版本中,设备按照峰值功耗进行分类,A类标签演变为1类设备。

1类设备的峰值功耗约为 $1\mu\text{W}$,具有储能功能,设备不包含上/下行链路放大功能。设备的上行链路传输通过外部提供的载波进行反向散射。1类标签的终端架构如图1所示。

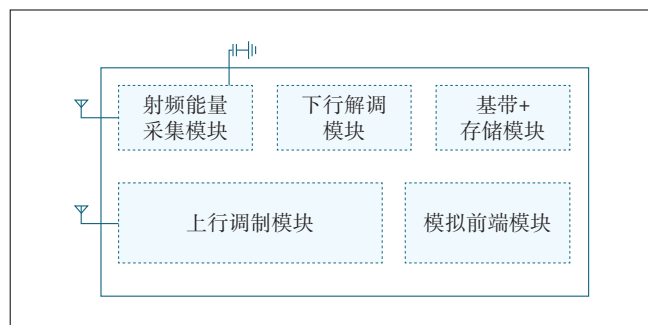


图1 1类标签架构

2.2 B类设备

B类设备配备能量存储单元,但不具备独立信号生成能力,所存储的能量可用于反射信号的放大处理。R19标准将B类标签分为2a类设备和2b类设备,它们的区别在于是否具备主动信号生成能力。

2a类设备的定义为:峰值功耗 $\leq$ 几百 μW ,具有储能功能,具备上行和下行链路放大功能的设备。设备的上行链路传输通过外部提供的载波进行反向散射。2a类标签的终端架构如图2所示。

2b类设备的定义为:峰值功耗 $\leq$ 几百 μW ,具有储能功能,内置上行和下行链路放大功能的设备。设备具备主动信号生成能力,设备到读写器(Device-to-Reader,D2R)传输由设备内部主动生成。

2.3 C类设备

C类设备具备更强的处理能力和器件性能,功耗可达到 $1\sim 10\text{mW}$,具有储能功能,设备内置上行和下行链路放大功能。设备具备主动信号生成能力,D2R传输由设备内部主动生成。

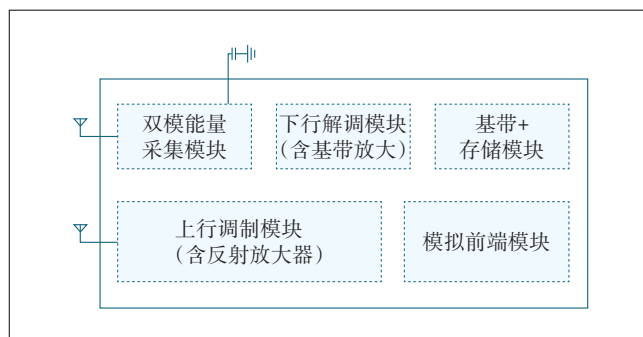


图2 2a类标签架构

3 无源物联网络架构

3.1 核心网架构

为支持无源物联网业务,核心网引入无源物联功能网元(Ambient IoT Function,AIOTF)作为无源物联网系统中的核心控制网元,实现运营商对海量无源终端的统一管理^[10-12]。AIOTF作为连接无源标签与上层应用服务器的桥梁,一方面实现与无源设备的非接入层(Non-Access Stratum,NAS)协议的交互,处理注册、唤醒、配置等控制指令;另一方面负责接收应用服务器的盘点、读取、写入等任务请求,调度合适的基站或用户设备作为阅读器执行,并将海量标签返回的数据进行聚合、匹配与安全处理,最终实现蜂窝网络对无源终端的双向可靠管控。

AIOTF对无线接入网(Next-Generation Radio Access Network,NG-RAN)的访问模式分为直接连接模式和间接连接模式^[10]。

3.1.1 直接连接模式

在直接连接模式中,AIOTF网元通过AIOT2接口与NG-RAN建立直接控制通道,无需经过接入和移动性管理功能(Access and Mobility Management Function,AMF)网元的中转,路径更短、时延更低,适合对实时性要求较高的盘点与读写任务(见图3和图4)。

3.1.2 间接连接模式

在间接连接模式中,AIOTF不直接连接无线接入网,而是通过AMF网元中转。该模式重用5G现网中AMF与RAN之间的N2接口机制,无须对AMF进行重大改造,便于在现有5G网络基础上进行升级部署(见图5和图6)。

NG-RAN的协议栈在2种模式下保持一致,A-IoT NAS消息在无源终端与AIOTF之间的传输均经过NG-RAN透明转发。运营商可根据实际需求选择部

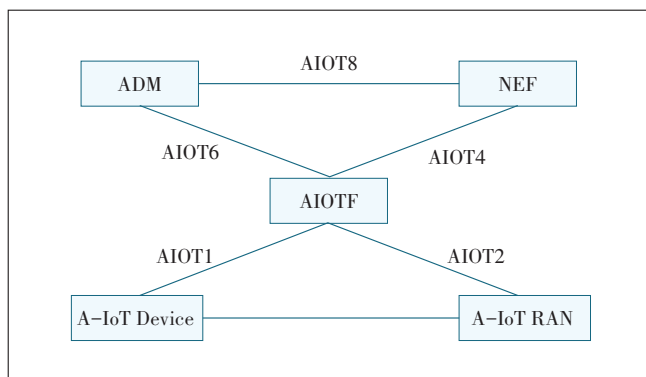


图3 直连模式无源物联网核心网架构示意

署其中1种或2种模式,无需同时部署全部接口。

3.1.3 接入层协议栈

A-IoT无线接口的接入层(Access Stratum, AS)协议栈包含A-IoT媒体接入控制(MAC)层和A-IoT物理层(见图7)。接入层的控制信息和数据均由A-IoT MAC层和A-IoT物理层处理。对于A-IoT无线接口而言,控制面和用户面不做区分。

3.2 无线网组网

在无源物联网无线网系统中,通过基站(BS)和载波节点(Carrier-Wave node, CW)协同工作实现对无源标签的通信与激励^[6]。基站是无线系统的控制中心,

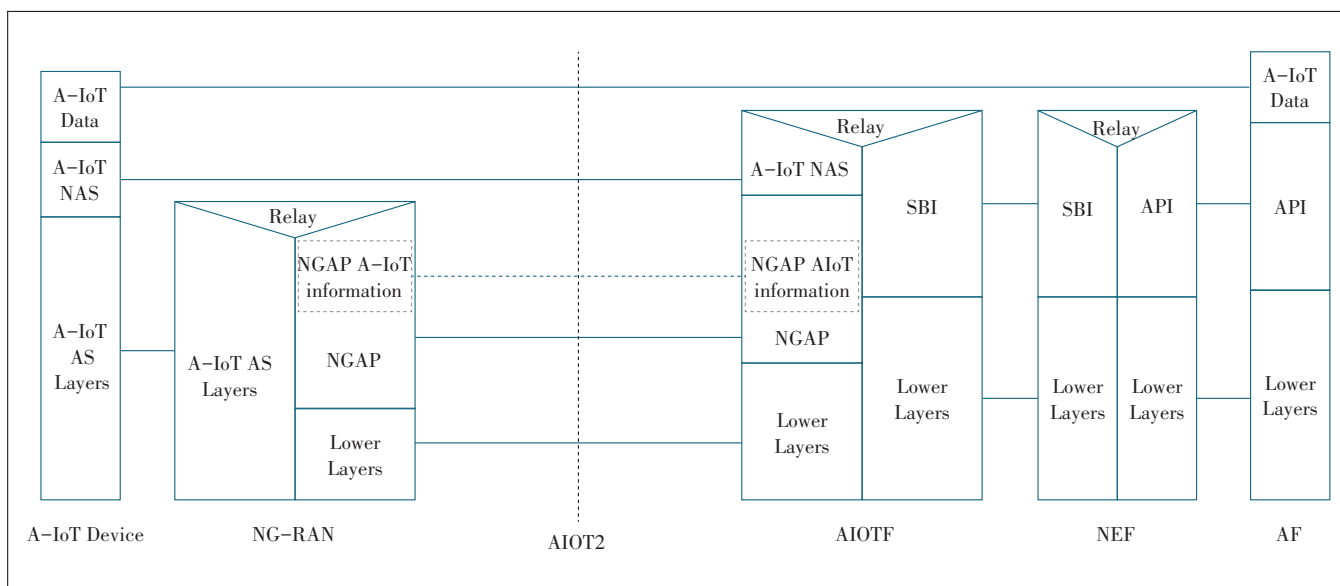


图4 直连模式从A-IoT终端到应用服务器AF的协议栈

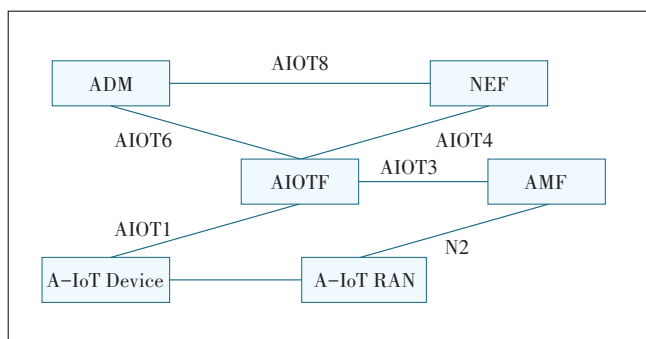


图5 间接模式无源物联网核心网架构示意

它负责发送读写器到设备链路(Reader-to-Device, R2D)的控制指令和下行数据,并接收标签反向散射回来的上行信号。CW节点是无源物联网中关键的辅助设备。由于无源1类标签自身不产生射频信号,它需

要依赖外部提供的连续波作为能量来源和信号载波,通过对该载波进行调制来实现上行反向散射通信。CW节点通常部署在靠近标签的位置,由基站控制并在上行频段发送激励信号,以解决反向散射链路预算不足的问题,从而保证通信距离。

无源物联网的无线接入网组网拓扑采用DxTx标准化术语体系进行描述,其中,D代表部署场景,T代表连接拓扑^[13]。D1T1代表室内部署场景下基站直连拓扑的核心架构,基站集成读写器功能,R2D使用下行频段,D2R通过上行频段的载波激励实现反向散射。D2T2则对应室内标签设备通过UE中继的无线组网拓扑,读写器功能部署在UE上,标签与UE之间短距离反向散射通信,UE再通过空口连接室外基站。

如图8所示,D1T1-B属于室内基站直连拓扑的细

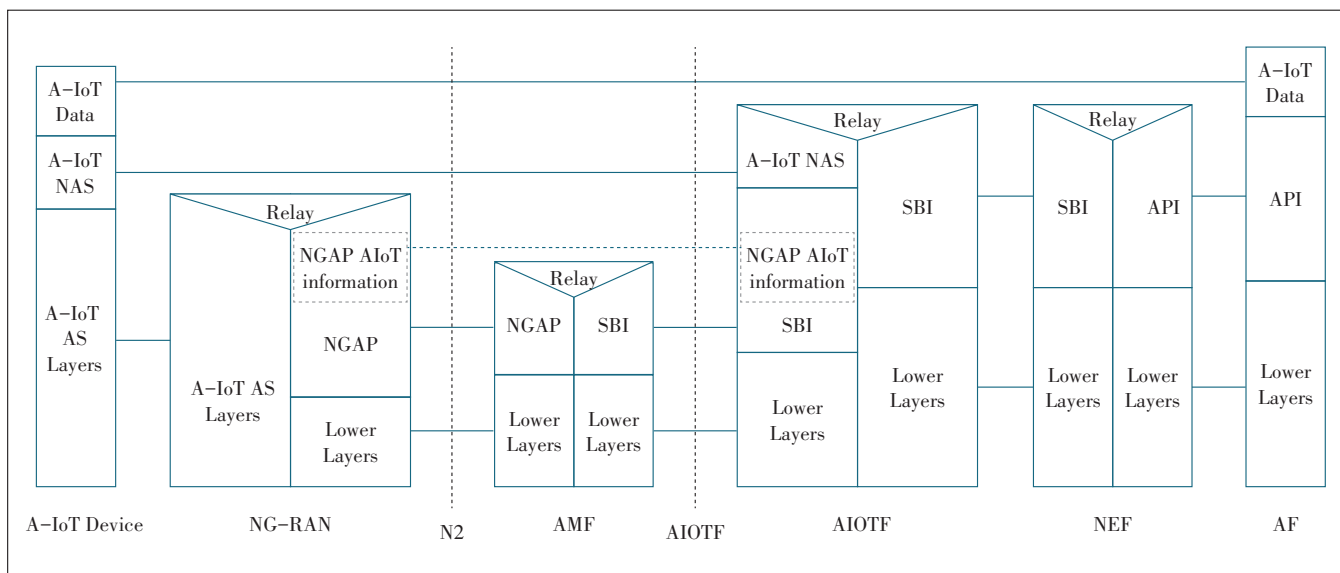


图6 间接模式从A-IoT终端到应用服务器AF的协议栈

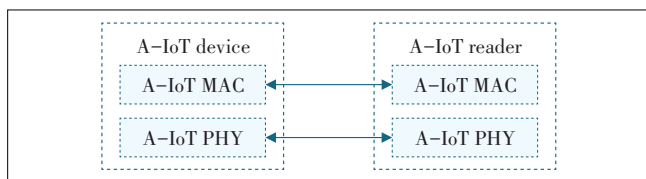


图7 A-IoT的AS协议栈

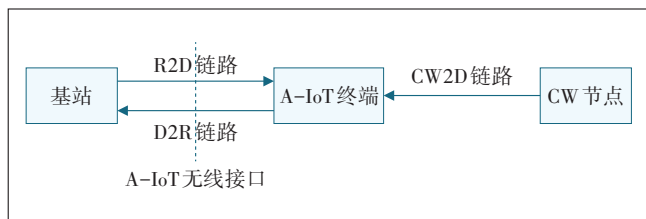


图8 D1T1-B组网拓扑

分场景,将CW和D2R配置在相同的上行频段上,提升了频谱效率,但也带来了更复杂的干扰管理需求。由于1类设备是峰值功耗约 $1\mu\text{W}$ 的纯反向散射标签,不具备信号放大能力,完全依赖外部提供的载波来完成上行通信,这决定了D1T1-B场景中对CW激励源的部署质量有较高要求。D1T1-B作为首个完成标准化的1类标签部署场景,它为无源物联网从理论走向实际应用奠定了关键基础。

4 物理层关键技术

4.1 R2D下行链路

4.1.1 物理信道与信号

R2D链路是无源物联网系统中基站向无源设备发

送指令与数据的下行物理信道。在R2D链路中,物理层信道与信号包括物理层基站到终端设备信道(Physical Reader-to-Device Channel, PRDCH)、R2D定时捕获信号(R2D Timing Acquisition Signal, R-TAS)以及R2D后同步信号(postamble)。其中,PRDCH是承载来自MAC层传输块的核心数据通道,负责传输调度指令和业务数据。R-TAS是一个前导信号,由起始指示部分(Start Indicator Part, SIP)和时钟捕获部分(Clock Acquisition Part, CAP)组成,用于辅助终端设备进行定时捕获和时钟同步。R2D后同步信号位于PRDCH之后,采用固定4 bit序列[1, 1, 1, 1]指示传输结束。在映射顺序上,依次为R-TAS SIP、R-TAS CAP、PRDCH、R2D后同步信号以及可选的填充(padding)(见图9)。

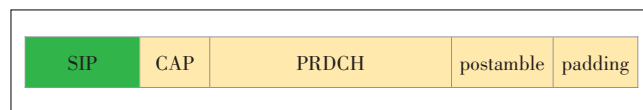


图9 R2D信道与信号

4.1.2 物理层流程

R2D的物理层处理流程以来自MAC层的传输块为起点,先独立完成CRC添加和线路编码,生成PRDCH数据;然后在物理层与独立构造的R-TAS和后同步信号按序拼接,经开关键控(On-Off Keying, OOK)调制和按需填充后,映射到OFDM符号并完成基带生成与上变频发射(见图10)。

在时频资源方面,R2D链路采用15 kHz的子载波

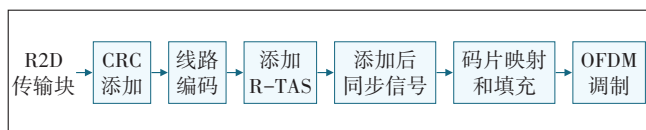


图10 R2D物理层过程

间隔,与NR系统保持一致,以利于频带共存和资源共享。信道带宽支持200 kHz、400 kHz、600 kHz和800 kHz 4种配置,分别对应1、2、3、4个PRB的传输带宽配置,保护带分别为对称的10 kHz、20 kHz、30 kHz和40 kHz。R2D链路采用基于离散傅里叶变换扩频正交频分复用(Discrete Fourier Transform-spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing, DFT-s-OFDM)的OOK下行波形,这与1类设备的处理能力相匹配。在线路编码方面,R2D链路采用曼彻斯特编码,一个码片对应于一个调制符号,比特到码片的映射关系为:比特0(bit 0)→码片序列{1,0},比特1(bit 1)→码片序列{0,1},有效解决包络检波器可能遇到的信号直流分量和时钟同步问题。

4.2 D2R上行链路

4.2.1 物理信道与信号

D2R链路是无源物联网设备向基站或读写器发送数据的上行物理信道。设备通过反向散射方式将数据调制到外部提供的载波上进行发射。D2R链路定义了物理设备到读写器信道(Physical Device-to-Reader Channel, PDRCH),用来承载来自高层D2R传输块的核心数据,同时定义了D2R前同步信号(D2R Preamble)和D2R中间码(D2R Midamble),用于辅助接收端的定时捕获、频偏估计和信道估计等(见图11)。

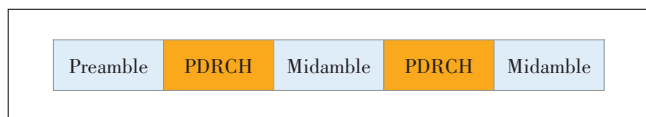


图11 D2R帧结构

4.2.2 物理层流程

在物理层处理流程上,来自MAC层的D2R传输块先独立完成CRC添加、块重复和选择性信道编码,生成PDRCH数据;然后在物理层与独立构造的前同步信号和中间码按规则组装拼接,经小频移调制映射到码片后,通过反向散射方式调制到外部载波上发射(见图12)。

在上行波形方面,D2R链路基于单音正弦波形实现反向散射,设备将调制符号映射到多个码片上生成

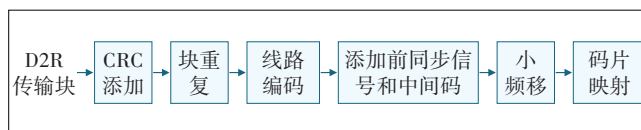


图12 D2R物理层过程

基带信号。在调制方式上,D2R支持OOK和BPSK 2种方案,其中基于方波基带的BPSK调制可在相干接收下较OOK非相干接收方案获得最高6 dB的性能增益^[14]。在线路编码方面,D2R链路 with R2D一致,采用曼彻斯特编码,每个比特映射为一对等长码片。为增强覆盖性能,D2R链路支持块重复机制,在信道编码前对传输块进行重复以提升接收端解调增益。

5 MAC层

5.1 MAC层功能

无源物联网的MAC层针对无源设备极低功耗和免电池的特性,在继承NR MAC基本架构的基础上进行了极简设计。A-IoT MAC层主要支持以下功能^[15]。

- a) MAC PDU构建与处理:构建要映射到D2R传输块(TB)的MAC PDU并交付给物理层,同时处理从R2D传输块接收的MAC PDU。
- b) 消息类型判断:区分不同类型的R2D消息。
- c) 寻呼终端:网络侧发起通信的关键流程。
- d) 无线资源选择:设备选择接入资源。
- e) 接入与重接入:支持基于竞争和免竞争的接入流程。
- f) 上层数据传输。
- g) D2R分段:支持将大块数据分段传输。
- h) MAC填充和失败检测。

与传统NR MAC相比,A-IoT MAC省去了调度请求(SR)、缓存状态报告(BSR)、HARQ等复杂机制,所有资源分配依赖于基站的调度指令,大幅降低了设备侧的决策复杂度。

5.2 核心MAC流程

5.2.1 启动与监听

终端设备完成充电后,持续监听PRDCH信道上的R2D消息,以执行相应的MAC流程。

5.2.2 寻呼

无源物联网的寻呼是网络侧发起通信的关键流程,允许读写器通过一条在PRDCH物理信道上发送的寻呼消息,来触发单个设备、一组设备或所有设备

发起接入流程。

由于无源设备功耗和R2D消息负载的限制,寻呼消息的格式设计尽可能精简。其MAC PDU格式包含消息类型、传输块大小(TBS)等公共字段,并通过“接入类型”字段明确指示设备后续应执行基于竞争的随机接入(CBRA)还是免竞争接入(CFA),同时为不同接入类型配置各自的物理层参数。

设备会持续监听寻呼消息,收到后根据消息中携带的寻呼ID判断自己是否被选中;若为广播寻呼,则所有设备均视为被选中。一旦被选中,设备便依据寻呼消息指示的接入类型启动对应的接入流程,以建立后续的数据传输。

5.2.3 随机接入

无源物联网的随机接入分为基于竞争的随机接入(CBRA)和免竞争接入(CFA)2种流程。

在CBRA流程中,设备从寻呼消息配置的接入时机中随机选择一个,在选定的接入时机上发送包含16位随机ID的随机接入消息,随后监听来自读写器的随机ID响应消息,以完成竞争接入。若响应消息中返回的随机ID与设备发送的一致,且频率索引匹配,则竞争接入成功,该终端获得AS ID后在响应消息中分配的资源上传输D2R上层数据。若设备在配置的监听窗口内未收到匹配的响应消息,则视为竞争失败,后续收到相同的传输ID的寻呼消息时可重新发起竞争接入。

在CFA流程中,寻呼消息直接提供专用的D2R调度资源和传输参数,设备无须竞争即可直接使用该资源发起D2R上层数据传输,也无须监听接入触发消息。

5.2.4 数据传输与分段

随机接入成功后,设备可进行D2R数据传输。当数据量较大时,MAC层支持D2R分段功能,将上层数据分割为多个适合传输块大小的片段分别发送,然后在接收端重组,以适应无源设备低功耗和有限传输能力的约束。

5.2.5 失败检测

MAC层持续监测各流程是否成功完成,失败检测主要用于CBRA流程。设备在发送随机接入消息后监听响应消息,若在配置窗口内未收到匹配的响应消息则判定流程失败并终止当前业务,释放资源后等待网络侧重新触发,而非自行重传或退避,以符合无源设备 μW 级功耗的极简设计。

6 结束语

随着3GPP R19标准的冻结,蜂窝无源物联网正迎来从技术定义走向产业落地的关键点,其核心空口技术已完成标准化。未来,成本的降低和产业生态的繁荣将是规模商用的关键。蜂窝无源物联网有望真正实现万亿级泛在连接,成为推动数字化社会深度演进的关键基础设施。

参考文献:

- [1] 郑黎明,刘培国,王宏义,等. 无源物联网:背景,概念,挑战及研究进展[J]. 电子与信息学报,2023,45(7):2293-2310.
- [2] 黄宇红,万鸿俊,王楚豫,等. 基于RFID的无源物联网无线感知研究现状与发展趋势[J]. 软件学报,2026,37(1):425-441.
- [3] 中国移动. 面向万物互联的无源物联网技术白皮书[R]. 北京:中国移动通信有限公司研究院,2023.
- [4] 陈佳,赵文栋,张正兴,等. 无源物联网定位技术发展现状及演进趋势[J]. 电信科学,2024,40(7):96-107.
- [5] Ericsson. Ericsson Mobility Report[R]. Stockholm:Ericsson,2023.
- [6] 3GPP TR 38.848 Study on Ambient IoT (Internet of Things) in RAN (Release 19)[S].
- [7] IMT-2020(5G)推进组. 5G-A无源物联网(Ambient IoT)技术研究报告[R]. 北京:IMT-2020(5G)推进组,2024.
- [8] 3GPP TS 22.369 Service requirements for ambient power-enabled IoT;Stage 1 (Release 19)[S].
- [9] 3GPP TS 38.194 NR; Ambient IoT User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 19)[S].
- [10] 3GPP TR 23.700-13 Study on Architecture support of Ambient power-enabled Internet of Things (Release 19)[S].
- [11] 3GPP TS 23.369 Architecture enhancements for Ambient IoT (Release 19)[S].
- [12] 3GPP TS 38.291 NR; Ambient IoT Physical layer (Release 19)[S].
- [13] 3GPP RAN1 Rapporteurs. Release 19 Ambient IoT[R/OL]. 2025-06-26. <https://www.3gpp.org/>.
- [14] Yin M, Wei C, Takeda K, et al. Low-Complex Waveform, Modulation and Coding Designs for 3GPP Ambient IoT[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2025, 9: 192-198.
- [15] 3GPP TS 38.391 NR; Ambient IoT Medium Access Control (MAC) protocol (Release 19)[S].

作者简介:

王璐璐,毕业于北京邮电大学,工程师,硕士,主要从事无线通信技术研究工作;姚赛彬,毕业于北京邮电大学,正高级工程师,硕士,主要从事无线新技术研究、管理工作;潘婷,毕业于东华大学,工程师,学士,主要从事无线通信技术研究工作。