短距无源空口与5G异构融合组网技术研究

金奕丹[1]，罗达[1]，郑银香[1]，郑海娜[2]，黄怡霖[3]，王公仆[3]，于季弘[4]
（1. 中国移动通信有限公司研究院物联网技术与应用研究所，北京 100053；2. 华为技术有限公司通信技术研究院，深圳 518129；3. 北京交通大学计算机科学与技术学院，北京 100044；4. 北京理工大学信息与电子学院，北京 100081）

摘　要：面向智能制造、智能电网等工业场景海量无源低功耗传感器采集需求，传统 5G mMTC、RedCap 物联网技术易受金属遮挡与电磁干扰，存在信号盲区、通信中断、数据丢包、布设成本高等问题。短距无源空口（SLZ，Synchronous Link Zero-power）基于变频反向散射技术，支持无源、半无源、有源传感终端大规模并发接入，依托同步技术、轻量化编码、变频反射等物理层优化机制，具备零待机功耗、强抗干扰、低成本、大并发接入优势，可有效弥补 5G 工业物联网的接入短板。本文构建“5G 工业专网-双模融合网关-SLZ 无源传感节点”端网云异构融合组网架构，研究跨制式协同、频谱共享、端到端协议适配关键技术；定义 SLZ 物理帧结构，引入两级同步、子载波索引多址、分段导频等机制，补偿无源终端时钟漂移并抑制自干扰。针对不同终端算力和功耗差异，构建差异化调制编码体系：无源终端采用 OOK 调制降低取能门槛，有源终端利用 PSK/FSK 调制拓展覆盖范围，结合无编码传输提升吞吐性能。仿真结果表明，该方案可在复杂工业电磁环境下实现海量无源节点稳定同步数据采集，可为新型无源物联网标准化及 5G-SLZ 融合工业物联网规模化应用提供技术支撑。

关键词：SLZ；无源物联网；变频反向散射；5G异构融合；工业数据采集；跳频抗干扰；轻量化调制编码
中图分类号：TN929.5
文献标志码：A
doi：10.11959/j.issn.2096−3750.WLW26164

A short-range wireless-based passive air interface and its heterogeneous integration with 5G networks

JIN Yi-dan[1], LUO Da[1], ZHENG Yin-xiang[1], ZHENG Hai-na[2], HUANG Yi-lin[3], WANG Gong-pu[3], YU Ji-hong[4]
1. Institute of Internet of Things Technology and Applications,China Mobile Communications Corporation Research Institute, Beijing 100053,China
2. Communications Technology Research Institute, Huawei Technologies Co., Ltd, Shenzhen 518129, China
3. School of Computer Science and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
4. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing100081, China

Abstract: To meet the data collection requirements of massive passive low-power sensors in industrial scenarios such as intelligent manufacturing and smart grids, traditional 5G mMTC and RedCap IoT technologies are vulnerable to metal occlusion and electromagnetic interference, resulting in signal blind zones, communication interruption, data packet loss and high deployment costs. Based on the frequency-converting backscatter architecture, the SLZ (Synchronous Link Zero-power) technology supports large-scale concurrent access of multiple types of sensing terminals. With physical layer optimization, it achieves zero standby power consumption, strong anti-interference capability, low cost and massive concurrent access, making up for the access shortcomings of traditional 5G industrial IoT. This paper constructs an end-network-cloud heterogeneous convergence networking architecture and investigates core technologies including cross-system col-

收稿日期：2026−09−17；**修回日期：**2026−10−23
通信作者：金奕丹，jinyidan@chinamobile.com
基金项目：移动信息网络国家科技重大专项（No.2026ZD1306200）
Foundation Items: National Science and Technology Major Project of Mobile Information Network (No.2026ZD1306200)

laboration, spectrum sharing and protocol adaptation. By designing the Sparklink SLZ physical frame structure, mechanisms of two-level synchronization and subcarrier index multiple access are introduced to compensate clock drift and suppress self-interference of passive terminals. A differentiated modulation and coding system is established, where OOK modulation is adopted for passive terminals to reduce energy harvesting threshold, PSK/FSK modulation for active terminals to expand coverage, and uncoded transmission to improve throughput. Simulation results verify that the scheme realizes stable synchronous data collection of massive passive nodes, providing technical support for the standardization of novel passive IoT and large-scale application of 5G-SLZ converged industrial IoT.

Key words: SLZ, passive IoT, frequency-converting backscatter, 5G heterogeneous convergence, industrial data acquisition, frequency-hopping anti-interference, lightweight modulation and coding

0　引言

随着环境物联网（Ambient IoT）规模化落地，基于反向散射的无源通信凭借终端无外接电源、元器件成本极低的核心优势，成为智能制造、智能电网、智能工厂百万级微型传感标签的主流技术路线[1-2]。当前3GPP蜂窝标准体系、星闪（Nearlink）短距标准体系均将无源反向散射空口列为重点研究方向[3]。

国内“5G +工业互联网”已进入深度规模化落地阶段，产线、工厂全域布设无源温感、振动、电压、定位标签成为基础刚需，但现有单一无线通信方案存在多重不可调和短板：

1. 传统RFID、无源蓝牙、5G mMTC终端待机功耗、硬件模组成本偏高，难以实现厂区百万级批量布设[4]；

2. 工业厂房金属构件密集，多径衰落、多制式同频干扰叠加，形成大量5G信号盲区，极易出现传输丢包、同步时延超标、终端离线故障；

3. 蜂窝广域网络与短距无源感知系统协议相互割裂，缺少标准化融合网关与统一交互体系，全域感知数据形成孤立孤岛，无法支撑一体化工业管控业务。

星闪作为我国自主可控新一代短距通信标准，包含SLB宽带传输、SLE低功耗、SLP高精度定位、SLZ无源四大空口接入模式。其中SLZ同步无源空口为无源超低功耗传感场景定制，依托反向散射通信实现终端无有源射频发射，配套变频技术、分段导频时钟补偿等物理层优化，适配工业强干扰、多遮挡复杂信道稳定采集。

现有国内外相关研究多单独聚焦SLZ物理层单点性能优化，缺少蜂窝5G广域网络与SLZ短距无源感知协同组网的系统性成熟方案，无法解决工业场景泛在覆盖、海量连接、多源数据融合三大核心痛点[5]。针对上述空白，本文围绕工业无源全域感知场景，完成四项核心创新设计：

1. 通过定义SLZ无源空口上下行物理帧结构，提出粗细两级同步、分段中间导频、子载波索引多址一体化抗干扰时序方案；

2. 构建分层差异化调制编码体系，适配无源、半无源、有源终端差异化功耗与传输性能需求；

3. 设计一体式点对点、分体式三级中继两套SLZ标准化拓扑，搭建“5G广域主干+ SLZ局域补盲”分层协同覆盖网络；

4. 研究双模可重构融合网关全套异构融合技术，包含统一基带波形、双频段射频动态调控、频谱分时共享、跨制式协议转换机制。

本文提出的“5G+SLZ”方案面向工业无源感知场景，针对三组核心矛盾开展跨制式联合优化：广域回传与局域补盲、海量标签总量与千级并发接入、无源终端近零功耗与高可靠同步采集。相较于RFID、BLE反向散射、3GPP Ambient IoT等现有技术，SLZ在同步无源空口、OFDMA子载波索引多址、工业场景抗干扰机制，以及与5G专网原生网关融合等方面具备差异化特性，相关方案对比详见1.3节。面向5G-SLZ异构融合架构，本文对两级同步、分段导频、跳频、卷积编码等机制实施跨层协同设计，并依托双模融合网关搭建系统级仿真，验证该方案的整体增益。本文仿真重点验证千级终端并发采集性能；百万级标签容量并非依靠单网关实现，需借助多网关组网与多轮次采集机制扩展支撑。

1　工业无源感知场景需求与信道干扰约束

1.1　工业泛在无源感知核心痛点与业务需求

智能制造、智能仓储需在工位夹层、设备内

部、金属货架等全空间布设海量无源传感标签，行业核心需求集中四点，也是单一5G方案难以解决的核心短板[5-7]：

1．**超低终端成本、近乎零待机功耗**：节点依靠下行射频反向散射取能，无需电池供电，支持厂区百万级低成本标签部署，并实现千级终端并发采集，解决5G RedCap/mMTC模组成本高、终端耗电大的海量布设瓶颈；

2．**高密度海量并发接入**：单网关承载数千终端同步采集，支持高频短周期采样，缓解5G空口信令拥塞、资源抢占带来的海量连接上限约束；

3．**复杂工业环境全域高可靠传输**：金属遮挡、多无线设备干扰共存场景下链路低丢包、低时延，弥补5G室内、密闭空间深度覆盖缺陷；

4．**多源传感数据高精度时序同步**：全域多点采集数据实现微秒级时间对齐，支撑设备故障时序溯源、集群工况协同分析，打通5G与短距感知数据时序割裂、无法融合分析的壁垒。

现有5G mMTC、传统无源射频方案无法同时满足上述四项需求，金属多径衰减、同频脉冲干扰、无源终端固有时钟漂移、分时轮询采集时延累积等问题持续制约系统落地，亟需5G与SLZ异构融合组网架构配套专用物理层、组网层技术。

1.2　工业反向散射信道与电磁干扰约束

工业场景信道以金属散射、设备多径反射为核心特征[8]，传统反向散射通信为同频反射，上行终端反射回波功率极低，且容易收到下行激励链路和环境噪声干扰，极易被淹没。

车间存在多重干扰源，可分为三类：ISM频段窄带持续干扰、机电设备启停脉冲突发干扰、大规模终端并发产生的多址自干扰[9]。三类干扰会直接造成帧解调失败、邻道串扰、数据断连，需依靠跳频、正交子载波隔离机制实现干扰抑制。

同时无源终端仅依靠下行射频信号取能，硬件功耗约束严苛，振荡器启动、调制反射、时序同步均会产生能耗开销，要求无源空口调制、编码、同步全流程轻量化，降低终端射频取能最低工作门槛。

1.3　与RFID、BLE反向散射、3GPP Ambient IoT的对比分析

为阐明“5G+SLZ”融合组网的必要性，本节从供电方式、同步能力、多址并发、抗干扰特性、5G融合难度以及工业盲区补盲能力六个维度，对主流备选技术开展系统对比，结果如表1所示。

表1　典型无源/反向散射方案与5G+SLZ方案对比

方案	供电/成本	同步能力	多址/并发	抗干扰	与5G融合	工业盲区补盲
传统RFID	无源、低成本	弱，以轮询为主	差，时隙ALOHA	一般	协议简单，不支持网络层协议功能拓展	可补盲，但并发低、同步差
BLE反向散射	半无源/有源激励	依赖BLE同步	中	较弱	BLE网络层传输适配协议接口不开放	覆盖有限，金属遮挡敏感
3GPP Ambient IoT	蜂窝直连/无源	蜂窝同步	中	蜂窝机制	整系统方案复杂度高	室内盲区仍存，功耗受限
5G+SLZ	无源/半无源/有源	两级同步	OFDMA子载波索引	跳频+DSSS+HBCC	双模网关原生支持层二融合通信，终端免改造	局域精准补盲，千级并发

由表1可见，传统RFID与BLE反向散射方案虽具备低成本特点，但同步能力、并发承载能力及抗干扰性能有限，难以适配工业场景下海量无源节点同步感知采集需求；3GPP Ambient IoT能够复用现有蜂窝基础设施，却在终端成本、功耗以及室内深度遮挡覆盖等方面存在显著局限。5G+SLZ方案的差异化核心优势如下：□面向反向散射通信设计两级同步无源空口，支持OOK粗同步唤醒与OFDMA精同步的终端分级机制；□采用OFDMA子载波索引多址方式，抑制邻道干扰，提升高密度节点场景下的接入识别能力；□构建由跳频、直接序列扩频（DSSS）与轻量化HBCC编码组成的复合抗干扰体系，适配复杂工业干扰环境；□借助双模融合网关方案实现与5G工业专网的统一回传与集中管控，解决多协议异构组网架构割裂的痛点。综上，5G+SLZ异构融合方案无法由现有任意一类短距无源通信方案简单替代。

2　SLZ无源空口物理层关键技术

SLZ无源空口全部底层设计围绕提升覆盖可靠

性、扩容并发接入、统一数据时序三大目标展开，从物理层底层解决物联网泛在覆盖、海量连接、数据同步融合基础难题。

2.1　上下行标准化物理帧结构重构

SLZ 无源反向散射物理层支持 FDMA 与 OFDMA 两种多址机制，可按需切换以实现海量标签并发传输[10]。面向工业场景大规模终端接入需求，该空口重构上下行帧结构，并引入两级同步与分段导频机制，协同解决无源终端时钟漂移、同步时延长及多终端并发冲突等难题。

2.1.1　下行帧结构与两级粗细同步机制

下行控制帧由前导信号、控制信息、自适应 CRC 校验三部分构成，前导信号拆分粗同步、精同步两级时序序列，整体结构如图 1 所示。

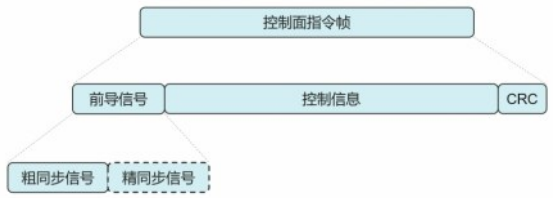

图 1　下行链路帧结构

1. 粗同步信号：设置两组互斥序列区分 FDMA/OFDMA 接入模式，采用无编码 OOK 调制，无源终端无需启动本地振荡器（LO，Local Oscillator）即可实现快速捕获信号、完成时域粗唤醒，大幅降低终端取能开销，支撑全域海量终端同步激活，夯实泛在覆盖基础；

2. 精同步信号：仅面向启用振荡器的 OFDMA 有源终端，完成高精度时域微调，消除固定同步等待时延，大幅提升单网关并发接入终端数量，破解海量连接瓶颈；

3. 控制信息承载终端制式、速率、调制模式配置信息，CRC 支持 6 bit/16 bit 动态切换，适配长短不同传感数据包，为多规格感知数据标准化融合提供底层时序基准[11]。

传统无源通信同步机制存在固定延时、同步精度不足、并发干扰突出缺陷，本文两级分离同步架构拆分振荡器唤醒与高精度时序校准流程，网关可并行调度多终端同步接入，缩短上下行交互时延，保障全域传感数据时序统一，支撑跨节点数据融合分析。

2.1.2　上行帧结构、分段中间导频与可变终止信号

上行数据响应帧采用五段式标准化结构：前导信号+数据信息+可选中间导频+数据信息+可选终止信号+自适应 CRC，帧结构如图 2 所示。针对性解决长距离遮挡场景信号漂移、多终端数据边界混乱问题：

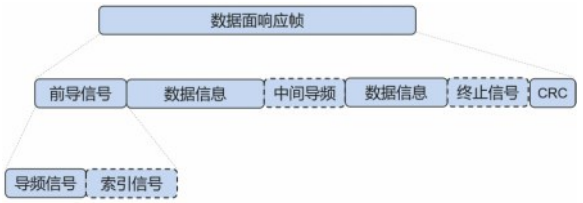

图 2　上行链路帧结构

1. 前导信号包含基础导频、OFDMA 专属子载波索引信号[12]：导频用于网关实时信道估计，补偿金属遮挡带来的信号衰减，拓展 SLZ 有效覆盖范围；索引序列为终端唯一标识，网关通过正交序列匹配滤除子载波能量泄露引发的邻道串扰，提升高密度场景识别能力；

2. 分段中间导频：长帧传输过程中分段插入 BPSK 导频序列，逐段校准无源终端数千 PPM 时钟漂移，抑制时序误差累积，降低金属盲区场景数据误块率（BLER），保障全域覆盖下数据传输可靠性；

3. 可变终止信号[13]：灵活标识不定长数据包边界，统一温感、振动、能耗、定位多类型数据帧格式，消除多源数据格式壁垒，为上层数据融合预处理提供标准化基础；

4. 自适应 CRC 校验[12]：根据报文长度动态切换校验位长度，平衡终端功耗与纠错性能。

2.1.3　工业无源场景下 SLZ 帧结构与 Wi-Fi/蓝牙帧方案优势分析

本节从空口帧架构与接入机制层面，对比 SLZ 与传统 RFID、蓝牙 BLE、WiFi 方案在无源反向散射场景下的性能差异，分析结论仅针对协议帧体制特性，与系统工作频段无关。

SLZ 采用面向反向散射通信定制的轻量化帧结构：短前导、极简帧头、咬头卷积编码、子载波索引多址，适配无源节点低复杂度特性；而 Wi-Fi、蓝牙 BLE 帧为有源通信设计，帧开销大、同步序列冗长，未考虑无源反向散射终端半双工、低反射调制、射频接收灵敏度受限特征。

帧有效传输效率[12]：

$$\eta = \frac{L_{pay}}{L_{pre} + L_{hdr} + L_{pay} + L_{tail}} \quad (1)$$

其中：L_{pre}为前导码长度；L_{hdr}为帧头控制域长度；L_{pay}为业务有效载荷；L_{tail}为尾比特/校验冗余。

1. BLE/Wi-Fi：同步前导、信令帧头占比高，协议采用固定长度同步序列；在反向散射场景中，无源终端难以支持长序列同步，易出现同步失败，额外引入重传开销α；

2. SLZ定制帧结构：精简可配置短前导、压缩控制帧头，配套反向散射专用同步机制，同步开销大幅降低；同时帧结构兼容无源NRZ调制与跳频时序，重传概率小于α。

在工业无源海量小数据包场景（有效载荷L_{pay}通常很小，以传感短报文为主），帧固定开销成为影响传输效率的主导因素。此时SLZ轻量化帧带来的效率优势进一步凸显；Wi-Fi、蓝牙的长帧头架构存在不可规避的固有开销损耗。

进一步考虑反向散射链路信道损耗，无源终端工作在受限信噪比区间。SLZ帧结构引入分段校验、咬头卷积编码，适配低SNR传输环境；Wi-Fi/蓝牙的编码方式与帧封装机制面向有源高信噪比终端设计，在无源弱信道下译码性能快速恶化。链路容量闭式对比表明：在同等发射功率、相同传输距离前提下，SLZ帧结构支持的可靠链路容量显著高于BLE、Wi-Fi方案。

2.2　分层差异化调制编码机制

针对无源、半无源、有源终端硬件功耗、解调能力差异，设计上下行非对称调制编码方案，兼顾低功耗、广覆盖、高吞吐三重需求，支撑低成本百万级终端泛在布设。

2.2.1　下行分层调制适配

1. 基础OOK调制[12][14]：作为全部无源终端标准下行调制方式，解调逻辑极简，射频取能损耗极低，适配零功耗标签大规模布设，解决海量无源终端供电难题；

2. 增强PSK/FSK调制[15]：面向有源工业传感器开放BPS/QPSK/2FSK高灵敏度调制，拓展SLZ单节点通信距离，补齐5G弱覆盖区域补盲能力。

2.2.2　上行轻量化编码与NRZ无编码传输

面向工业无源传感低成本、超低功耗、差异化传输需求，对上行链路编码、调制、速率机制轻量化优化，兼顾终端适配性与链路传输性能，具体设计如下：

1）轻量化咬头卷积码（HBCC）优化

重构传统卷积码运算流程，精简冗余计算、剔除无效运算单位，大幅降低无源终端浮点运算与内存占用，无需高端主控芯片，即可在无源终端侧完成编码操作，显著降低终端硬件成本，支撑海量节点规模化布设；级联自适应CRC校验后可在极低功耗下大幅降低误块率，保障复杂遮挡场景数据稳定回传[16-18]。

2）NRZ无编码线路优化

舍弃高开销曼彻斯特自同步编码，上行统一采用NRZ传输[19]，同等误码性能下上行吞吐提升一倍、帧长缩短50%，缓解无源终端低精度晶振定时偏移问题；残余时序偏差依靠分段中间导频校准，不额外增加终端硬件功耗。

3）极化码

针对半无源、有源两类高能力标签，其配置的大容量电容或电池可支撑10μW及以上功耗，实现通信性能增强，但会造成上行通信覆盖范围明显衰减。为了提升高能力标签的上行覆盖能力，信道编码可采用定码率Polar码，编码功耗可控制在＜10μW，匹配半无源/有源标签功耗预算[20-21]。

4）多调制自适应兼容

上行兼容OOK、BPSK、QPSK、FSK多类调制，网关通过下行指令动态配置终端上行调制模式，面向纯无源弱反射终端选用低功耗低速调制，面向有源传感器启用高速高可靠调制，实现无源、有源、移动终端统一接入，统一多类型设备数据输出标准，简化后端数据融合流程。

2.3　变频抗干扰技术

针对工业厂房窄带持续干扰、脉冲噪声、金属多径深度衰减造成的5G弱覆盖、终端离线痛点，采用变频抗干扰方案：系统基于工业免授权频谱频点集，通过伪随机跳频图案动态切换工作频点，将局部集中干扰均匀分散至全频谱，从物理层规避单频点深度衰落与持续干扰导致的通信中断；同步预存厂房固定干扰频点集，自动避让固定干扰信道，大幅提升SLZ在金属夹层、设备内部等5G盲区的通信稳定性，实现厂区无死角泛在覆盖[22]。

在此基础上，引入轻量化咬头卷积码前向纠错[23]，在不显著增加节点运算与终端功耗前提下，

抵消跳频残留干扰、多径传输信号畸变误差，叠加扩频分集增益与编码纠错增益，显著提升通信链路抗干扰阈值，有效改善单一 5G 方案在金属厂房场景下终端离线、帧丢失、传输误码等问题，保障密闭工业场景无线通信稳定可靠。

2.4　OFDM 子载波索引多址

大规模 OFDMA 并发传输易产生子载波能量泄露，邻道串扰，制约单网关接入终端数量。本文引入 OFDMA 专属子载波索引信号，索引序列为终端唯一标识，网关通过正交序列匹配滤除子载波能量泄露引发的邻道串扰，提升高密度场景识别能力，适配工业厂区高密度大规模组网部署需求[24-26]。

2.5　机制溯源与本文创新边界界定

为明确本文的创新边界，表 2 梳理了 SLZ 物理层及融合组网内各项关键机制的来源与本文改进工作。

表 2　机制溯源与本文创新边界界定

机制	来源	本文改进/新设计
两级同步	SLZ/无源同步思想	粗同步 OOK 唤醒+精同步 OFDMA 有源终端分离，降低无源终端取能开销
分段导频	已有导频设计	与分段中间导频联合补偿无源终端 PPM 时钟漂移
OFDMA 子载波索引	OFDM-IM/反向散射多址	用于 SLZ 高密度邻道串扰抑制与终端唯一标识
跳频/DSSS/HBCC	已有抗干扰技术	面向无源终端的轻量化联合优化，形成频域规避—窄带抑制—残余纠错三级抗干扰
双模融合网关	本文	统一基带、频谱共享、协议转换、聚合回传
5G+SLZ 分层组网	本文	广域主干+局域补盲+跨制式协同切换
可变终止信号	已有短包设计	统一多类型传感数据帧格式，支撑上层数据融合

本文创新并非首次提出上述任一单项机制，而是体现在以下四方面：□ 对两级同步、分段导频、子载波索引多址开展一体化时序设计，联合解决无源终端时钟漂移与多址干扰问题；□ 构建分层差异化调制编码体系，实现无源、半无源、有源终端的统一接入；□ 提出“5G 广域主干+SLZ 局域补盲”分层协同组网架构，给出双模融合网关的跨制式资源映射、频谱共享及协议转换实现方法；□ 借助系统级仿真，验证整套机制组合在金属遮挡与强干扰工业环境下的性能增益。

3　“5G 专网-融合网关-SLZ 节点”分层融合组网架构

SLZ 无源空口具备零功耗、低成本、单网关大容量并发、复杂遮挡场景高可靠补盲等优势，但存在覆盖距离有限、无广域远程回传、独立组网管控能力缺失等短板；5G 工业专网具备广域连续覆盖、大带宽移动传输、运营商级统一运维、跨区域组网能力，但海量低成本无源终端直连 5G 存在模组成本高、功耗大、室内盲区严重、信令拥塞等问题。二者所构建的 5G 广域蜂窝主干覆盖+局域 SLZ 无源精准补盲体系，属于基础服务层异构网络组网融合。SLZ 接入层保留独立的无源反向散射空口体制，由 SLZ 管理节点在基础服务层汇聚无源终端数据，并依托 5G 网络完成广域回传与统一网络管控，形成广域蜂窝主干+局域无源微网的异构互补分层架构，能够从组网层面系统性解决泛在覆盖、海量连接、数据融合三大核心问题。

3.1　双模融合网关核心架构

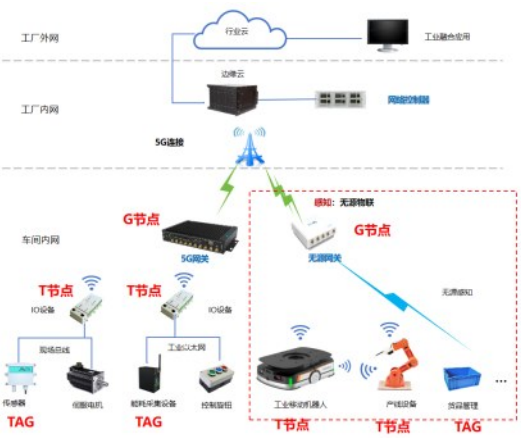

图 3　5G 广域主干覆盖+SLZ 无源精准补盲

双模融合网关是 5G 与 SLZ 融合组网的核心枢纽，集成 SLZ 无源通信模块、5G 工业通信模组、边缘计算单元、协议转换单元四大核心模块，承担全网资源调度、局域海量数据汇聚、跨制式协议解析、广域安全回传全流程功能[5]：

1. 局域网：通过 SLZ 模块批量接入车间、仓储无源传感节点，采集设备工况、环境参数、资产感知原始感知数据，本地完成数据清洗、去重、时序对齐预处理；

2. 广域网：依托 5G 工业切片专网，将标准化

结构化数据安全回传至边缘节点、工业云平台[27]；

3. 协同管控：统一调度5G宽带终端与SLZ无源节点信道资源，实现业务无缝切换，消除两类网络独立部署带来的数据孤岛；网关/激励节点可主导自适应跳频激励与接收机制，无源标签跟随激励频点完成反向散射调制。

相较单一通信制式，融合网关实现能力互补：保留SLZ终端轻量化、低成本、易布设优势，依托5G补齐广域远程传输、统一网络运维能力、一次性解决无源终端覆盖碎片化、组网混乱、数据无法跨越互通三大行业痛点。网关内置抗干扰、链路冗余、制式动态切换能力，适配车间复杂电磁环境，同步提升终端接入规模与全网运维效率。

3.2　SLZ两套标准化节点拓扑

SLZ定义一体式点对点、分体式中继三级两套标准化拓扑，按需灵活部署，填补5G各类弱覆盖区域，构建无死角泛在感知网络。

3.2.1　一体式G-T点对点拓扑

由集成于融合网关的主控G节点（汇聚管理节点）、无源目标T节点构成无中继双向通信链路，下行链路实现G节点向T节点下发控制指令，上行链路由T节点通过反向散射向G节点回传传感数据与终端ID，适用于小型仓储、单点设备近距离监测场景，低成本完成局部5G盲区补盲。



图4　一体式拓扑：点对点双向通信链路

3.2.2　分体式G-H-T三级中继拓扑

新增低成本辅助节点，仅负责发射下行激励信号、不解析T节点反射数据，大幅降低中继硬件成本；上行反向散射回波统一由网关G节点接收。适配大面积厂房、长距离产线分布式全域感知、无源定位场景，通过低成本中继节点拓展SLZ覆盖范围，以极低工程成本补齐5G大面积金属遮挡区域覆盖短板，实现厂区全域无死角泛在感知。

3.3　5G与SLZ分层覆盖协同切换

针对工业产线、仓储金属密集、遮挡严重，5G网络大量信号盲区、补盲部署成本过高的痛点，



图5　分体式拓扑：三级节点功能分离架构

本文提出“5G广域主干覆盖+SLZ无源精准补盲”分层协同覆盖体系：

1. 5G工业专网承载厂区移动设备、高清视频、工业控制等高宽带、高移动性业务，完成厂区室外、开阔区域大范围基础连续覆盖；

2. SLZ无源节点、低成本H中继集中部署于工位死角、设备夹层、金属货架、地下管网等5G深度弱覆盖区域，以无源零功耗标签实现低成本全域补盲；

3. 配套跨空口业务协同切换机制，传感采集业务可在5G直连终端、SLZ无源标签之间无缝切换，数据传输全程连续不中断；无需大规模布设有源5G补盲基站，大幅降低工业物联网全域覆盖工程建设与运维成本。

3.4　异构融合算法、接口与时序流程

本节给出统一基带资源映射、频谱共享、协议转换及切换时序的详细设计方案。

3.4.1　统一基带资源映射

双模融合网关采用统一基带+双模可重构射频架构。基带处理单元将5G OFDM波形与SLZ反向散射波形映射至同一时频资源网格：

· 5G链路：占用连续带宽，承载广域回传、移动终端接入与高清视频业务；

· SLZ链路：采用子载波索引OFDMA，为每个无源标签分配单个或多个子载波索引，网关基于正交序列匹配完成终端识别；

· 保护带：在5G与SLZ频段交界位置预留保护子载波，抑制跨制式邻道干扰；

· 切换点：以5 ms接入轮作为基础调度单元，网关依据业务优先级动态划分5G时隙与SLZ时隙。

3.4.2　频谱共享算法

面向2.4 GHz ISM频段共存5G、SLZ、Wi-Fi/蓝牙多类设备的场景，本文设计频点分时避让频谱共享算法，伪代码如算法1所示：

算法1：5G-SLZ频谱共享与跳频避让

输入：候选频点集F，干扰门限T，5G业务队列Q_{5G}，SLZ采集队列Q_{SLZ}

输出：调度结果S

1. 网关周期性感知候选频点集F内各频点的干扰能量$I(f)$

2. 将满足$I(f) > T$的频点纳入黑名单B

3. 在可用频点集合$F\backslash B$内为SLZ生成伪随机跳频图案H

4. **if** Q_{5G}存在高优先级业务 **then**

5. 在时隙t为5G分配连续带宽资源

6. 在时隙t+1为SLZ分配跳频资源块

7. **else**：

8. 优先调度SLZ采集业务，按跳频图案H执行跳频传输

9. **if** 检测到资源冲突 **then**

10. 触发分时避让机制，并更新黑名单B

11. 返回调度结果S

3.4.3　跨制式协议转换接口

SLZ无源终端与5G工业网络分属两套技术标准，协议栈、数据帧格式与时序体系相互割裂。融合网关设计标准化协议转换接口，如表3所示。

表3　SLZ-5G协议转换接口

SLZ字段	统一报文	5G QoS/切片映射
终端ID	deviceId	切片标识、UE标识
传感数据	payload	QoS flow、5QI
时序戳	timestamp	5G时间同步、PTP
CRC	checksum	传输校验、ARQ
业务类型	serviceType	切片类型、调度优先级

3.4.4　端到端切换时序

跨制式业务协同切换流程描述如下：

1. SLZ无源节点完成同步，基于OFDMA子载波索引机制接入融合网关；

2. 网关接收多类型传感数据，在本地执行数据去重、时序对齐与结构化封装；

3. 网关依托5G工业切片，将标准化数据回传至边缘节点或工业云平台；

4. 当5G直连终端与SLZ标签间发生业务切换时，网关对信道资源实施统一调度，保障业务数据传输连续无中断；

5. 上层业务系统通过统一接口获取多源融合感知数据。

4　5G与SLZ异构融合核心关键技术

4.1　统一基带可重构波形设计

传统单模网关硬件固定、波形不可调，5G宽带通信与SLZ反向散射无源空口兼容性差、频谱互相干扰[28]。本文融合网关采用统一基带+双模可重构射频硬件架构，硬件平台复用，波形可编程动态切换：

1. 面向工业控制、高清视频、移动终端宽带业务，动态启用5G OFDM宽带波形，发挥大带宽、高频谱效率优势；

2. 面向无源传感器低采集场景，切换至SLZ反向散射调制波形，匹配无源终端无有源射频、超低功耗反射通信特性。

两种制式波形无缝动态切换，硬件平台复用降低多模网关开发成本，同时实现5G、SLZ信道资源统一调度，从底层减少跨制式频谱干扰，保障全域网络稳定运行。

4.2　双频段射频前端与动态功率调控

射频前端可集成Sub-1GHz、2.4GHz两大工业免授权主流频段，Sub-1GHz适配室内遮挡远距离组网，2.4GHz用于高密度短距无源标签采集，双频段协同拓展SLZ补盲覆盖距离。配套链路损耗自适应动态功率调节机制，网关根据终端距离、遮挡程度自动调节发射功率，在保障通信稳定前提下降低整机电磁辐射与功耗；内置实时频谱感知模块，自动识别频点干扰并触发SLZ跳频信道避让，实现信道自愈，持续优化复杂工况下泛在覆盖可靠性[5][28]。

4.3　IMS频段动态跳频频谱共享协调

2.4GHz ISM频段共存5G、SLZ、Wi-Fi/蓝牙多类无线设备，信道资源冲突严重，极易引发链路中断。网关联动5G信道码资源与SLZ动态跳频图案，设计频点分时避让频谱共享机制，实现多制式信道资源有序复用，消除同频持续干扰，保障5G宽带业务与SLZ海量无源采集业务并行稳定运行，避免多制式共存造成的覆盖失效、连接掉线问题。

4.4　跨制式协议适配与端网协同转发

SLZ无源终端与5G工业网络分属两套独立标准，协议栈、数据帧格式、时序体系天然割裂，多源感知数据无法直接统一处理，形成数据孤岛。本文设计标准化跨制式协议转换体系，打通“SLZ无

源终端-双模融合网关-5G工业专网-边缘/云平台”完整统一数据链路：

1. 局域预处理：融合网关接收SLZ多类型无源传感原始数据，本地完成重复数据过滤、统一结构化封装、时序对齐校准，统一输出标准化数据报文；

2. 安全广域传输：通过物理隔离5G工业切片回传预处理后的数据，保障海量小包并发上传实时性与传输安全[29]；

3. 全域数据统一调度：5G承载跨厂区、跨车间大范围数据互通与全局协同指令下发，SLZ负责局域精细化感知采集，形成“本地实时处理+广域全局调度”分层数据治理模式，实现5G移动终端、工业设备、SLZ无源标签多源异构数据一体化融合分析，支撑全厂智能管控、故障溯源、资产盘点等上层业务。

5　系统级组网仿真与结果分析

本章依托工业物联网典型厂区拓扑搭建系统级仿真平台，构建工业无源感知场景下5G-SLZ融合组网仿真环境，围绕融合组网性能、抗干扰能力两个维度开展仿真对比测试，完成对所提5G-SLZ融合组网方案的综合量化评估。

5.1　5G-SLZ融合组网性能仿真

为验证5G-SLZ融合组网在工业金属遮挡和海量无源节点集中接入场景下的性能，构建120m×60m×10m工业厂房模型，部署1个5G基站、4个SLZ融合网关G和4个辅助激励节点H，无源标签随机分布于金属障碍物之外，如图6所示。

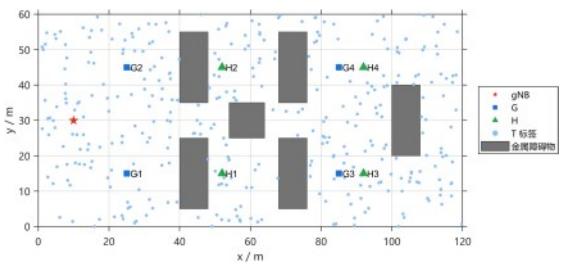

图6　5G+SLZ融合组网系统级仿真场景

考虑厂房内金属设备密集分布，5G基站高度高于平均杂波高度，采用3GPP InF-DH信道模型；SLZ网关及辅助激励节点位于平均杂波高度以下，采用InF-DL信道模型[30]。通过设置0~40dB的金属附加损耗表征不同程度的金属遮挡，其中5G链路需同时满足上下行接收条件，SLZ链路需同时满足标签激励和反向散射回波接收条件。工业无源感知业务模型与仿真参数，如表4所示。

表4　工业无源感知业务模型与仿真参数

参数	取值/说明
单终端报文	128 bit
采样周期	1s/10s/事件触发（仿真采用一次同步采集周期）
时延要求	200 ms内完成一次采集任务
可靠性	95%业务完成率
单网关并发	约1300终端
部署	1个gNB、4个G、4个H
标签总量	百万级通过多网关、多轮次扩展
取能距离	前向链路满足标签灵敏度-22dBm
能量预算	标签反射损耗6dB，G接收灵敏度-90dBm

无源通信链路下行覆盖主要受标签灵敏度限制，而上行反向散射信号经双重衰落后功率较低，其覆盖能力主要受读写器接收灵敏度约束。对于5G主动链路，接收端功率需满足：

$$P_{5G,rx} = P_{5G,tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL_{5G} - L_{metal} \geqslant P_{5G,sens} \quad (2)$$

其中，$P_{5G,tx}$和$P_{5G,rx}$分别为5G链路的发射功率和接收功率，G_{tx}和G_{rx}分别为发射端和接收端的天线增益，PL_{5G}为路径损耗，L_{metal}为信号穿越金属障碍物时引入的单程附加损耗，$P_{5G,sens}$为接收端灵敏度。

对于SLZ链路，无源标签需先获取充足射频能量，实现激励启动。同时，其反向散射信号能够被融合网关G可靠接收。因此，标签侧接收功率需满足：

$$P_{tag,abs} = P_{tx} + G_{G/H} - PL_{forward} - L_{metal,f} - L_{pol,f} + G_{tag} - L_{mismatch} \geqslant P_{tag,sens} \quad (3)$$

其中，P_{tx}为G或H的激励发射功率，$G_{G/H}$和G_{tag}分别为激励节点和标签的天线增益，$PL_{forward}$为G/H至标签的前向传播损耗，$L_{pol,f}$为极化损耗，$L_{mismatch}$为标签失配损耗，$P_{tag,sens}$为标签灵敏度。

在反向散射链路中，融合网关G接收到的反射信号功率需满足[12]：

$$P_{G,rx} = P_{tag,incident} - L_{backscatter} - PL_{backscatter} - L_{metal,r} - L_{pol,r} + G_{G,rx} \geqslant P_{G,sens} \quad (4)$$

其中，$P_{tag,incident}$为标签反射功率，$L_{backscatter}$为标签反射损耗，$PL_{backscatter}$为标签至G的反向传播损耗，$G_{G,rx}$和$P_{G,sens}$分别为融合网关的接收天线增益和接收灵敏度。5G仅在上下行链路均满足接收条件时计为有效覆盖；G-T链路需同时满足标签激励与反向散射接收条件，在G-H-T模式下，H用于改善标签

激励与取能条件，标签回波仍由对应G接收。

集中接入仿真中，NR侧采用54个竞争前导、5 ms随机接入机会间隔和20ms退避窗口，SLZ侧每轮配置75个OFDMA竞争资源，接入轮时长为5ms，本地数据速率为100 kbit/s。每个终端在一次采集任务中产生1个128 bit报文，设置200 ms业务观察窗口，并以窗口内业务完成率不低于95%作为并发容量判据。主要仿真参数见表5。

表5　系统级仿真主要参数

参数	取值/说明
场景与部署	120m×60m×10m；1个gNB、4个G、4个H
5G链路配置[30-31]	InF-DH；gNB发射功率30dBm；UE发射功率23dBm；接收灵敏度约−92dBm
SLZ链路配置[12][30]	InF-DL；G/H发射功率30dBm；G天线增益6dBi；标签天线增益3dBi
SLZ链路门限与主要损耗	标签灵敏度−22dBm；G接收灵敏度−90dBm；标签反射损耗6 dB
金属遮挡	单程附加损耗0～40dB
NR随机接入	54个竞争前导；随机接入机会等效间隔5ms；碰撞检测8ms；退避窗口20ms
SLZ随机接入	75个OFDMA竞争资源/轮；接入轮时长5ms；本地数据速率100kbps
业务与容量判据	一次同步采集周期；每终端1个128 bit报文；200 ms业务观察窗口；95%业务完成率门限

图7给出了不同金属附加损耗下的有效覆盖性能。随着金属遮挡增强，5G覆盖率明显下降，而SLZ可通过G-T反向散射链路补充蜂窝覆盖盲区，并利用G-H-T辅助激励进一步扩大无源标签可达范围。在40 dB金属附加损耗下，5G、G-T融合及完整G-T+G-H-T融合组网的有效覆盖率分别约为58.5%、71%和76%，其中G-T和G-T+G-H-T两种融合方案对应的SLZ补盲率分别约为31%和42%，表明SLZ能够有效改善工业金属遮挡环境下的5G深度覆盖能力。

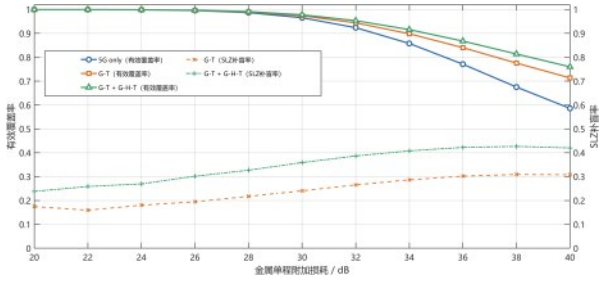

图7　不同金属附加损耗下的有效覆盖率与SLZ补盲率

在接入性能对比中，本文重点关注终端向网络侧上传短报文的集中上行业务过程。容量仿真针对一次同步采集周期，所有待测终端在周期起点同时产生1个128 bit报文，观察窗口内不再引入新的业务到达。5G方案中终端直接竞争NR随机接入资源并上传数据；融合方案中标签首先通过SLZ接入附近G，再由持续保持5G连接的G完成聚合回传。本文将200 ms设为一次采集任务的业务完成时限，并以该时限内平均业务完成率不低于95%定义系统可承载的并发终端规模。

图8、图9对比了5G与5G-SLZ融合组网两种方案的集中接入性能。随着同时活跃终端数增加，5G受到随机接入碰撞[32]及退避重试影响，业务完成率下降、平均完成时延增加；融合方案通过SLZ局域分流、并行接入及网关聚合回传降低了蜂窝随机接入压力。以95%业务完成率为判据，5G与5G-SLZ融合组网的并发容量分别约为580和1300个终端，融合方案提升至约2.24倍；在500个终端同时激活时，平均业务完成时延由约为98 ms降低至18 ms。结果表明，融合组网不仅能够提高并发承载能力，也能够显著降低高可靠工作区间的平均业务完成时延。

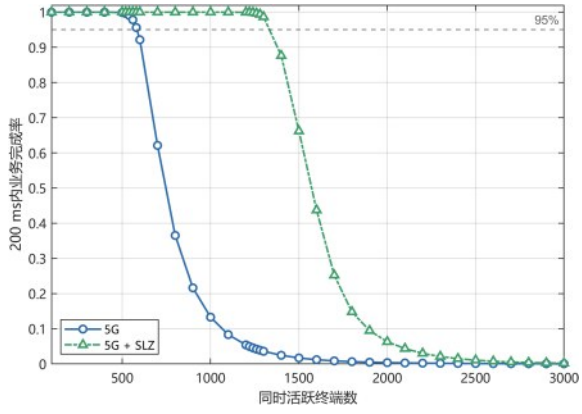

图8　200ms业务观察窗口下业务完成率与95%并发容量

为检验覆盖结果对5G接收门限的敏感性，进一步对最低解调SNR进行分析，结果如图10所示。随着最低解调SNR提高，两种方案的有效覆盖率均有所下降，但融合方案始终保持更高的覆盖水平，SLZ补盲趋势整体稳定。

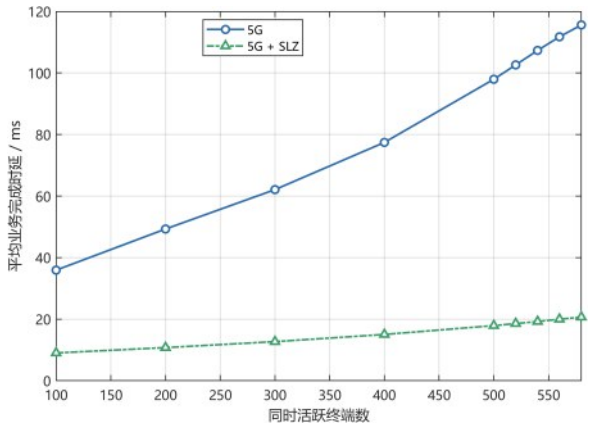

图9　高可靠工作区内平均业务完成时延对比

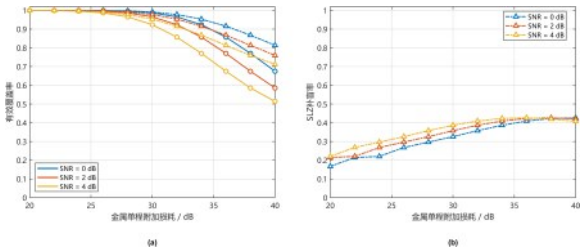

图10　5G最低解调SNR对有效覆盖率与SLZ补盲率的影响

业务观察窗口对并发容量的影响如图11所示。随着业务完成时限放宽，两种方案的95%业务完成容量均有所提升，且融合方案在不同观察窗口下均保持明显的容量优势，表明其对不同业务时限具有较好的适应性。

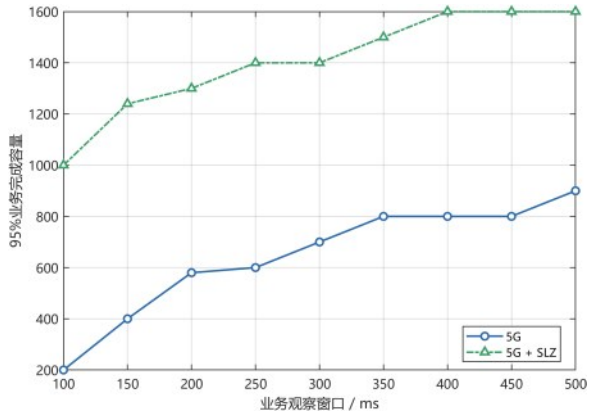

图11　业务观察窗口对95%业务完成容量的影响

图12给出了接入资源配置对并发容量的影响。增加SLZ每轮OFDMA竞争资源数可明显提升融合方案容量，而增大NR随机接入机会间隔会使5G容量下降。结果表明，融合方案能够通过SLZ局域并行接入有效缓解蜂窝随机接入压力，并在不同接入资源配置下保持较强的海量终端承载能力。

5G与SLZ在工业无源感知场景中具有互补性。

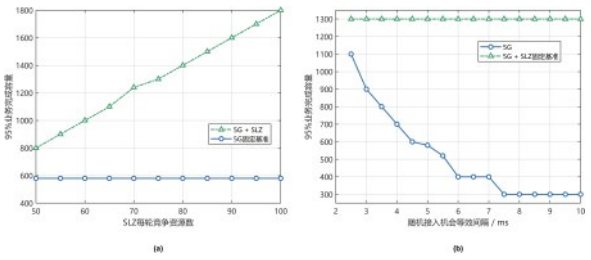

图12　接入资源配置对95%业务完成容量的影响

5G承担广域覆盖与统一网络承载，SLZ利用Sub-1 GHz反向散射、辅助激励以及多网关OFDMA并行接入补充金属遮挡盲区，并降低海量无源节点直接竞争蜂窝随机接入资源所产生的拥塞。仿真结果表明，5G+SLZ融合组网能够同时提升复杂遮挡环境下的有效覆盖能力与集中采集场景下的并发承载能力，并显著降低高可靠工作区内的平均业务完成时延；敏感性分析进一步说明，上述性能优势在合理的链路门限、业务时限及接入资源配置变化范围内均能够保持。

5.2　公平性基线与消融实验

5.2.1　公平基线设置

为验证本文所提出5G+SLZ异构融合组网方案在工业感知场景下的性能优势，构建5G-only、5G+RFID[33]、5G+PassiveBLE[34-35]与5G+SLZ四种对照方案，围绕高密度感知任务承载能力、复杂工业环境端到端传输性能、蜂窝网络资源开销三个维度开展对比测试。仿真场景为120 m×60 m×10 m工业厂房，部署1台5G基站；各融合方案通过4个局域接收聚合节点接入5G网络，其中5G+SLZ方案额外布设4个辅助激励节点。感知终端每周期生成16 B感知数据，定义200 ms内完成正确交付的任务占比为业务完成率。三种融合方案的终端同时支持5G直连与对应局域接入模式，可依据链路质量动态选择接入路径。仿真过程中统一业务流量输入、5G时频资源、调度控制开销与边缘回传条件，实现在同等蜂窝资源约束下，客观评估不同局域接入技术的系统性能差异。

不同组网方案的业务完成率随同步终端数量的变化规律如图13所示。为剔除短距技术原生覆盖范围带来的干扰，本组实验假定局域接入链路均可正常通信；融合方案优先经由局域链路传输感知数据，仅在局域链路失效时切换至5G直连模式，从而聚焦对比各短距协议的接入承载能力与共享回传性能。仿真结果显示：终端数量从64增长至192的

过程中，5G-only 与 5G+SLZ 方案的业务完成率始终维持 100%，5G+RFID、5G+PassiveBLE 方案的业务完成率随终端数增加逐渐衰减，终端数达到 192 时，分别降至 78.30% 和 90.63%。该结果表明，在本实验的高密度短报文采集场景下，SLZ 相比 RFID、PassiveBLE 具备更稳健的数据交付能力，可实现与 5G 直连方案持平的业务完成率。

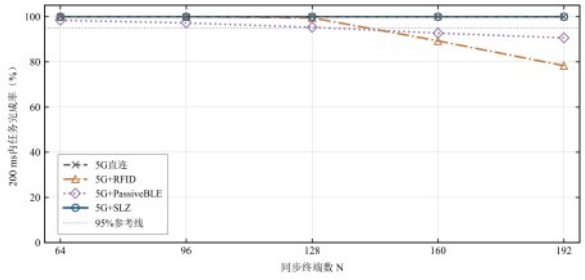

图 13　不同组网方案的同步感知任务完成率

不同金属遮挡强度下的端到端业务完成率如图 14 所示。金属附加损耗较小时，所有方案均可维持较高业务完成率；随着附加损耗持续增大，5G 直连链路的通信可靠性逐步降低，而融合组网可依托 SLZ 局域链路对蜂窝覆盖盲区进行补盲。当金属附加损耗为 40 dB 时，5G-only 方案业务完成率降至 60.59%，5G+SLZ（4G/4H）方案仍可保持 63.45%。上述结果表明，在存在金属遮挡的复杂工业场景中，SLZ 局域网络可与 5G 广域网络形成覆盖互补，有效提升感知任务的端到端交付性能。

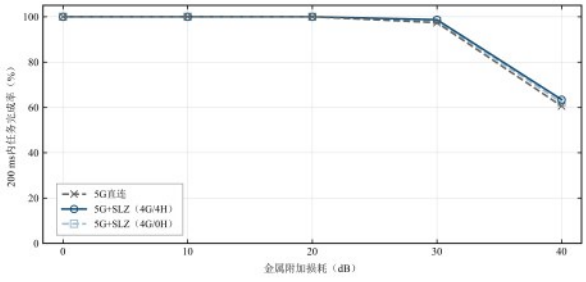

图 14　不同金属遮挡强度下的端到端业务完成率

为进一步验证该融合组网方案在工业深度遮挡区域的适配能力，设置均匀部署与集中感知簇两种终端分布模式。集中感知簇场景下，128 个终端集中部署在金属设备周边的两处局域区域，剩余 64 个终端分散布于厂房其余区域。不同部署方式对应的业务完成率如图 15 所示。在 40 dB 金属附加损耗条件下：均匀部署场景中，5G-only 与 5G+SLZ（4G/4H）的业务完成率分别为 58.16%、66.32%；集中感知簇场景中，二者分别为 35.16%、60.24%。对比可见，当感知终端聚集在金属遮挡区域时，5G 直连性能出现显著衰减，而融合方案仍可维持较高业务完成率。其原因在于 SLZ 可借助就近网关建立局域接入链路，将难以直连 5G 的感知数据先在本地汇聚，再经由 5G 主干链路回传，有效削弱金属遮挡对感知业务连续性带来的不利影响。

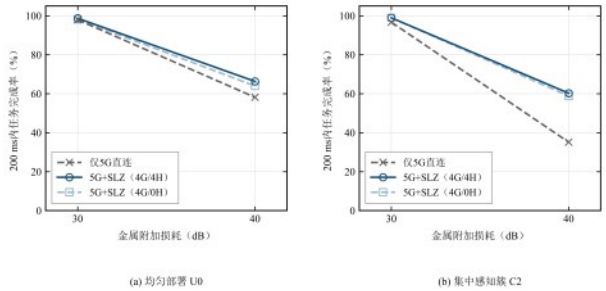

图 15　不同终端部署条件下的端到端业务完成率

不同方案的蜂窝控制资源开销与任务完成时延如表 6 所示。相较于 5G 直连方案，5G+SLZ 依托局域接入与网关汇聚机制，削减了终端独立上报带来的蜂窝控制信令请求、调度次数以及回传数据量。在蜂窝控制资源受限场景下，5G+SLZ 可在保障同等业务完成率的基础上降低任务交付时延；而当控制资源充裕时，5G 直连无需额外的局域接入与聚合流程，传输时延更优。该结果说明，SLZ 局域汇聚可缓解高密度感知业务对蜂窝控制资源的需求，但其时延优势受网络资源条件制约。

在本文测试条件下，SLZ 相对其他短距无源通信技术具备更优的业务交付能力；相较于纯 5G 直连方案，该融合方案借助短距局域链路提升金属遮挡区域的数据交付性能，并通过网关汇聚削减蜂窝侧控制信令与回传开销。由此可见，5G 与 SLZ 异构融合可充分发挥蜂窝广域覆盖与短距局域感知的互补特性，为高密度、强遮挡工业场景下的感知采集业务提供可靠的组网方案。

5.2.2　消融实验

为剖析各项抗干扰机制的性能增益，构建完整方案以及依次关闭跳频（FH）、直接序列扩频（DSSS）和咬头卷积编码（HBCC）的三组消融对照方案。仿真设置 16 个候选工作频点，其中 4 个频点存在持续性窄带干扰；数据包载荷长度 128 bit、

表6　不同组网方案的蜂窝资源开销与任务完成时延

SR服务上限	组网方案	任务完成率（%）	SR次数/成功任务	Grant次数/成功任务	NR传输字节/成功任务(B)	平均完成时延（ms）
1	5G-only	100.00	1.00	1.00	46.00	102.63
	5G+RFID	78.21	1.27	1.00	46.00	107.11
	5G+PassiveBLE	90.62	0.77	0.75	38.92	92.43
	5G+SLZ	100.00	0.20	0.39	23.59	64.46
8	5G-only	100.00	1.00	1.03	46.00	22.69
	5G+RFID	78.30	1.27	1.00	46.00	107.02
	5G+PassiveBLE	90.62	0.77	0.75	38.92	92.43
	5G+SLZ	100.00	0.20	0.39	23.59	64.46

附带16 bit CRC校验，采用QPSK调制，跳频块数为18，DSSS扩频因子15，HBCC编码率取1/2。所有方案维持一致的平均发射功率与外部干扰环境，以误包率（PER）和净有效吞吐量（Goodput）作为抗干扰性能评价指标。

图16展示了不同干信比（JSR）下各方案的性能变化趋势。随着干扰强调提升，所有方案的误包率整体上升，有效吞吐量逐步下降。当JSR为5 dB时，完整方案的PER为8.4%；关闭DSSS与HBCC后，PER分别升高至73.8%和77.2%。该结果表明，扩频机制与信道编码可显著提升窄带干扰环境下的传输可靠性。其中，HBCC借助编码冗余抑制误码，但汇引入额外传输开销，因此在弱干扰场景下会带来一定的吞吐量损失。

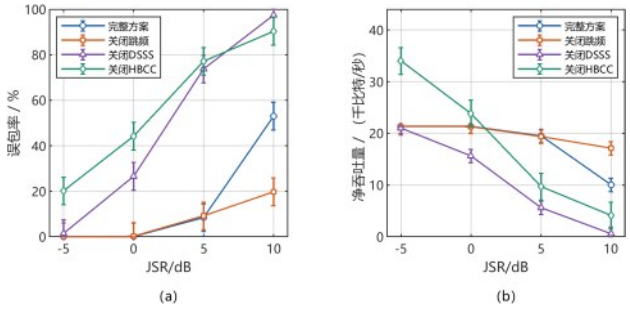

图16　不同抗干扰机制消融方案的误包率与净有效吞吐量

跳频机制在固定窄带干扰场景下并未带来平均误包率增益。JSR为10 dB时，完整方案PER为53.0%，关闭FH后PER反而降至19.8%。究其原因：关闭跳频时强干扰仅影响部分数据包；而跳频会将受扰时隙分散到更多分组，增大了单包解码失败的概率。为进一步验证跳频对终端持续性干扰的缓解效果，补充设置仿真：共16个终端、4个持续受扰频点，每个终端发送80个数据包，采用连续W次传输失败的服务中断概率来表征长期通信可靠性。

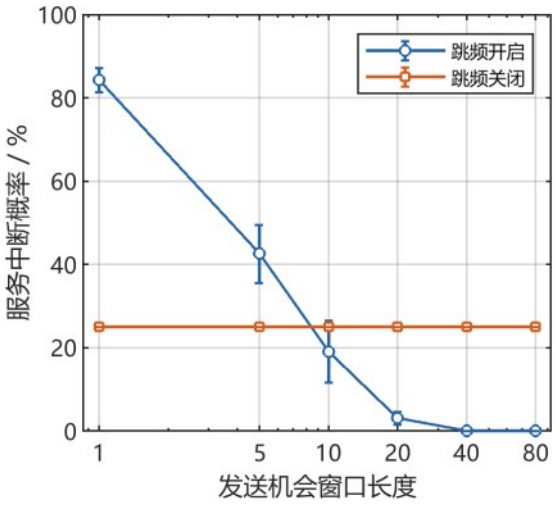

图17　固定频点持续干扰下跳频机制的服务中断概率

图17为服务中断概率随观察窗口长度的变化曲线。关闭跳频时，25%的终端将持续占用受扰频点，无法完成传输，该部分终端存在长期失联风险，进而导致传感数据持续丢失。开启跳频后，尽管单次传输的中断概率偏高，但中断概率随观察窗口增大快速降低；当W≥40时，仿真中不再出现中断事件。该结果表明，跳频能够打散持续干扰在终端与数据包上的分布，缓解终端长期失联问题，但会牺牲单包传输可靠性与平均有效吞吐量。

跳频依靠频率切换规避终端长期驻留于受扰频点引发的通信中断，DSSS借助扩频处理增化窄带干扰抑制能力，HBCC依托编码纠错提升传输可靠性，三项机制在不同维度形成互补的抗干扰体系。

为探究网关聚合回传机制对传输性能的作用，设置聚合开启、聚合关闭两组消融对照方案。实验固定采用SLZ局域接入+网关回传通路，终端载荷128 bit，业务截止时限统一设为200 ms。聚合开启

模式下，网关对多终端数据进行组包封装后经由5G回传，最大聚合终端数32，聚合等待时长上限2 ms；聚合关闭模式下，各终端数据独立封装、单独申请蜂窝调度资源。两组方案的局域接收结果、NR调度资源与回传链路配置保持一致，以业务完成率和应用层有效吞吐率为指标，评估网关聚合机制带来的性能增益。

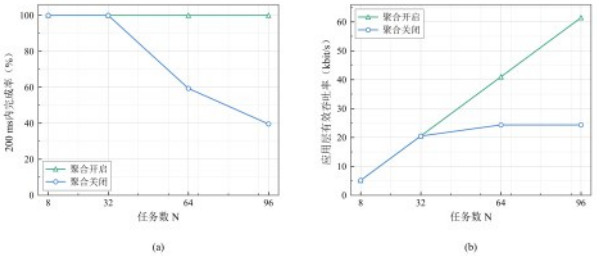

图18　网关聚合回传消融实验结果

图18展示了不同并发任务数下两组方案的性能变化。低负载场景中，两组方案均可实现业务100%交付。随着并发任务数上升，关闭聚合机制的方案业务完成率逐步衰减，而开启网关聚合的方案在全部测试负载区间内始终维持100%业务完成率。当并发任务数为96时，聚合开启方案的有效吞吐率可达61.44 kbit/s，关闭聚合后仅为24.32 kbit/s，前者约为后者的2.53倍。究其原因，关闭聚合时，各终端数据独立封装并发起上行资源申请，报文数量与调度开销显著增加，致使部分任务无法在时限内完成传输。与之相比，网关聚合可削减重复封装与调度请求，提升有限NR资源下的有效业务承载能力。

5.3　参数来源、蒙特卡洛仿真与敏感性分析

5.3.1　参数来源

· InF-DH/InF-DL信道模型：依据3GPP TR 38.901；

· 标签灵敏度、标签反射损耗、网关接收灵敏度：取自3GPP TR 38.848及文献[12]；

· 金属遮挡建模：厂房区域内随机生成矩形金属障碍物；当通信链路穿过障碍物时，叠加单程附加损耗，损耗取值在0~40 dB均匀分布；

· 双程信道相关性：若前向链路与反向链路途经同一障碍物，则两条信道具有相关性；反之信道相互独立。

5.3.2　蒙特卡洛仿真统计特性

为保障融合组网仿真结果的统计置信度，本文在固定厂房场景下采用蒙特卡洛方法开展统计分析。其中，覆盖性能仿真共执行1000次独立随机试验，每次试验随机生成2000个终端，引入终端位置、视距条件与阴影衰落等随机变量；并发接入性能仿真设置38组终端负载工况，每组负载工况独立完成1000次蒙特卡洛仿真，考虑终端位置、资源接入决策、冲突重传等随机因素。

在此基础上，将单次蒙特卡洛仿真输出的性能指标作为样本，求取各指标均值与95%置信区间。选取金属附加损耗40 dB条件下的覆盖指标，以及临界并发负载附近的业务完成率开展统计，结果如表7、表8所示。

表7　40 dB金属附加损耗下的覆盖率统计结果

指标	均值	95%置信区间
5G-only有效覆盖率	58.59%	[58.52%, 58.66%]
5G+G-T有效覆盖率	71.34%	[71.28%, 71.40%]
5G+SLZ有效覆盖率	75.99%	[75.93%, 76.05%]
融合方案相对5G覆盖增益	17.40%	[17.35%, 17.46%]

表8　并发容量临界负载附近的业务完成率统计结果

方案	并发终端数	平均业务完成率	95%置信区间
5G-only	580	95.634%	[95.514%, 95.754%]
5G-only	600	92.164%	[91.999%, 92.329%]
5G+SLZ	1300	98.662%	[98.449%, 98.875%]
5G+SLZ	1400	87.653%	[87.169%, 88.136%]

5.3.3　敏感性分析

为探究关键参数对融合组网覆盖性能的影响，沿用第5.1节工业厂房场景、信道模型与基准配置，固定金属附加损耗为40 dB，分别分析标签灵敏度、反射损耗以及网关部署密度对有效覆盖率的影响规律。

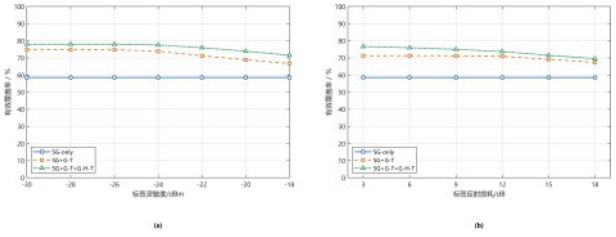

图19　标签灵敏度与反射损耗对有效覆盖率的影响

图19为不同标签灵敏度与反射损耗对应的有效覆盖率。随着标签灵敏度门限提高，G-T、G-T+G-H-T两类融合方案的有效覆盖率逐步下降；反射损耗增大时，融合方案覆盖率同样呈衰减趋势，而

5G方案覆盖率不受该参数影响。在本次考察的参数区间内，融合网络覆盖率波动幅度较小，且全程优于5G方案。该结果表明，标签灵敏度与反射损耗分别制约前向激励链路和反向散射链路的连通能力，融合组网覆盖性能由二者共同决定，并具备较好的参数稳健性。

表9　网关部署密度对融合组网有效覆盖率的影响

网关数量	5G+G-T覆盖率/%	5G+G-T+G-H-T覆盖率/%
1G	58.59	58.70
2G	65.37	70.86
4G	71.31	75.96
8G	80.57	84.85

网关部署密度对融合组网覆盖性能的影响如表9所示。在本文的网关部设条件下，增加G网关数量可提升网络有效覆盖率；搭载辅助激励节点的融合方案能够实现更高覆盖水平。针对8G配置，采用20组受约束随机布局开展验证，所有布局均呈现正向覆盖增益。在固定部署4个G网关的前提下，当H节点数量依次取0、2、4时，有效覆盖率分别为71.31%、73.67%、75.96%。该结果表明，网关加密在本场景下可带来稳定的覆盖提升，但其实际性能仍受节点空间排布的影响。

综上，该融合组网在标签参数的考察区间内可稳定维持覆盖优势。相较而言，网关部署规模与空间排布对强遮挡场景下的覆盖性能影响更为显著。对G网关与H辅助激励节点进行优化配置，能够充分释放异构融合组网的覆盖补盲潜力。

5.4　抗干扰性能仿真

为验证SLZ复合抗干扰机制在复杂工业场景中的传输性能，搭建上行链路仿真模型，依次覆盖持续窄带干扰、周期脉冲干扰、多址干扰以及工业混合干扰四类工况。仿真假设终端已完成同步与资源分配，聚焦评估各类抗干扰机制对链路可靠性与有效载荷吞吐量的作用效果。

发送数据由128 bit有效载荷和16 bit CRC校验位构成，调制方式为QPSK，基础符号速率24 kSps，复基带采样率11.52 MHz。系统共设置16组候选工作频率资源组，组间间隔540 kHz，单个数据包划分为18个跳频块；DSSS扩频因子取15，HBCC选用码率1/2、约束长度为3的轻量化卷积编码。试验设置五组对照方案，其中4个频域资源组受到持续窄带干扰，各组配置如下：固定频点（S0）、伪随机跳频（S1）、跳频+直接序列扩频（Direct Sequence Spread Spectrum，DSSS）（S2）、跳频+DSSS+HBCC（S3）以及在S3基础上增加频域资源组索引签名的复合方案（S4）。S4依托与资源组绑定的m序列循环移位实现扩频签名匹配。

四类干扰场景参数设置如下：1）持续窄带干扰：16组频率资源组内4组遭受持续干扰，干信比（JSR）扫描范围-10~30 dB；2）周期脉冲干扰：宽带脉冲噪声周期1 ms，占空比取1%、5%、10%、20%，脉冲激活时段干噪比（INR）固定为10 dB；3）多址干扰：并发活跃终端数K依次为1、4、8、12、16，在每个跳频块内为不同终端分配正交频率资源组，同时引入频偏、时偏与接收功率差异；4）混合工业干扰：8个终端并发传输，叠加持续窄带干扰与占空比10%的周期脉冲干扰。

所有方案保持相同的单包发送能量，参考E_b/N_0设置为10 dB，每个工况点独立仿真1000次。本文采用干信比（JSR）表征干扰强度，定义为单个跳频块内干扰能量与有用信号能量的比值[12]，计算公式为：$JSR=10\log10(E_J/E_S)$；选取误包率（PER）与单终端平均有效载荷吞吐量作为性能指标。其中误包率为CRC校验出错包数与总发包数的比值，即$PER=N_{err}/N_{pkt}$；有效载荷吞吐量基于单位标称传输时间内校验正确的128 bit载荷统计，无编码方案与HBCC编码方案的标称包时长分别为3 ms和6 ms。

如图20、图21所示，随着干扰强度提升，所有方案的误包率整体上升，有效载荷吞吐量同步衰

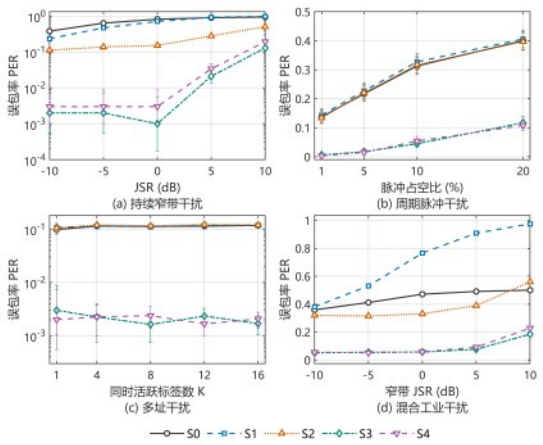

图20　不同干扰场景下各方案的误包率

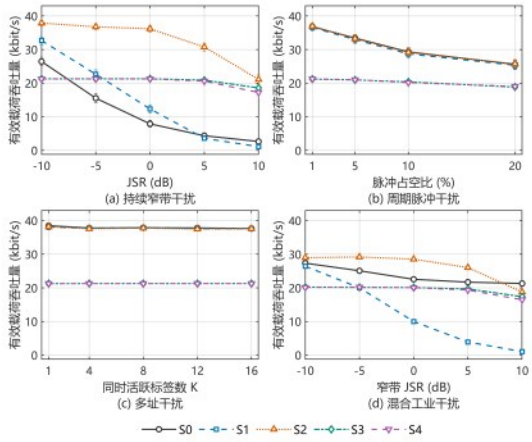

图21　不同干扰场景下各方案的有效载荷吞吐量

减。在持续窄带干扰工况下，DSSS 与 HBCC 的联合配置可显著提升链路可靠性。当 JSR=0 dB 时，S2、S3、S4 的 PER 依次为 15.2%、0.1% 和 0.3%；但编码引入的冗余开销使得 S3 与 S4 的吞吐量低于 S2。周期脉冲干扰场景中，随着脉冲占空比增大，各方案性能逐步劣化，S3 和 S4 则始终维持较低误包率。在多址干扰条件下，并发终端数量增长对各方案性能影响有限，S3、S4 可保持低误包水平，体现出频率资源隔离与信道编码的协同增益。面对混合工业干扰时，S3 与 S4 依旧具备较好的传输可靠性，但伴随窄带干扰持续增强，二者误包率逐步抬升、吞吐量随之降低。

结果表明，SLZ 复合抗干扰机制融合跳频、DSSS 扩频与 HBCC 信道编码，可协同实现频域分散、干扰抑制与差错纠错。相较于无编码方案，该机制在持续窄带干扰、周期脉冲干扰以及多终端并发等典型工况下能够显著压低误包率，并且在混合干扰环境中维持良好的传输可靠性。这一特性印证了其在提升无源短距链路的抗干扰能力、保障多终端并发可靠传输上的技术优势，可为复杂工业物联网场景下的数据可靠传输提供有效的技术支撑。

6　结束语

本文面向 5G-A 工业环境物联网百万级低成本标签部署、千级终端并发的无源传感器采集场景，针对传统单一 5G mMTC、RedCap 方案泛在覆盖不足、海量连接受限、多远数据难以融合三大核心痛点，完成一套完整可工程落地的“5G 专网-双模融合网关-SLZ 无源节点”端网云一体化异构融合通信体系设计，核心成果总结如下：

1. 重构 SLZ 无源空口上下行物理帧，创新两级同步、分段中间导频、OFDMA 子载波索引多址、可变终止信号成套机制，同步解决同步时延过长、多址频域干扰、无源终端时钟漂移底层问题，夯实泛在覆盖、海量并发硬件基础；

2. 设计差异化分层调制编码体系，无源终端采用低功耗 OOK 降低射频取能门槛，有源终端复用 PSK/FSK 拓展覆盖距离，上行 NRZ 无编码搭配 CRC 级联轻量化咬头卷积码，兼顾终端低成本功耗与链路高可靠传输；无源终端仅承担 HBCC 编码与 NRZ 调制功能，HBCC 译码与 CRC 校验在网关侧完成；

3. 搭建一体式点对点、分体式三级中继两套标准化 SLZ 拓扑，构建“5G 广域蜂窝主干+SLZ 无源精准补盲”分层协同组网，配套双模可重构网关、跳频频谱共享、跨制式协议转换全套异构融合技术，从组网层面一次性解决物联网三大核心难题；

4. 借助公平基线对照与消融实验可验证：融合组网相对 5G-only 方案获得的容量提升并非来源于额外频谱或功率资源，而是 SLZ 局域流量分流、OFDMA 并行接入、抗干扰机制以及网关聚合回传共同带来的联合增益。

仿真结果表明，整套 5G-SLZ 融合方案能够在 120m×60 m×10m 工业厂房、0~40dB 金属附加损耗场景下，实现无源终端近零待机功耗、千级终端并发采集、金属遮挡区域补盲以及强干扰环境下的可靠传输。百万级标签规模依靠多网关组网与多轮次采集扩展支撑；方案的实际功耗、能量预算与硬件成本仍有待后续硬件实测进一步验证。本文可为新型短距无源空口标准化、5G 与无源物联网在工业场景的规模化落地提供理论与工程技术支撑。

参考文献：

[1] LIU V, PARKS A, TALLA V, et al. Ambient Backscatter: Wireless Communication out of Thin Air[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review,2013,43(4): 39-50.

[2] 张晓茜,徐勇军.面向零功耗物联网的反向散射通信综述[J].通信学报,2022,43(11):199-212.
ZHANG X X, XU Y J. Survey on backscatter communication for zero-power IoT[J]. Journal on Communications, 2022, 43(11): 199-212.

[3] 3GPP TR 38.769 V19.0.0, Study on solution for Ambient IoT(In-

ternet of Things) in NR[S]. Release 19,2025.

[4] Ratasuk R, et al. Massive Machine-Type Communications in 5G: Physical and MAC-layer solutions[J]. IEEE Communications Magazine,2016,54(9):135-141.

[5] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G-Advanced通感融合网络架构研究报告(第二版)[R]. 北京：IMT-2020(5G)推进组,2024.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. 5G-Advanced integrated sensing and communication network architecture research report (Version 2)[R]. Beijing: IMT-2020 (5G) Promotion Group, 2024.

[6] 工业互联网产业联盟.5G +工业互联网无源物联网产业白皮书[R].北京:工业互联网产业联盟,2025.
Alliance of Industrial Internet. 5G+Industrial Internet Passive IoT Industry White Paper[R]. Beijing: Alliance of Industrial Internet, 2025.

[7] LIU Y, ZHAO Y, FEI Z S, et al. Backscatter-Aided Battery-Free Communications for Industrial Internet of Things[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(4): 112-118.

[8] DEL PERAL-ROSARIO J, VALENZUELA-VALDES J, GARCIA-ARMADA A, et al. Radio-Propagation Characterization in Industrial Environments: A Survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4555-4569.

[9] 张平阳,陈山枝.工业物联网无线信道与干扰特性分析[J]. 电信科学,2018,34 (1):112-120.
ZHANG P Y, CHEN S Z. Analysis on wireless channel and interference characteristics of industrial internet of things[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(1): 112-120.

[10] Wang B, Li W, Zhu F, et al. Constellation Mapping for Frequency-Agile OFDM Backscatter Network[J].IEEE/ACM Transactions on Networking, 2025, 33 (5): 2115-2130.

[11] 3GPP, 3GPP TS 38.211 V18.0.0: Physical channels and modulation, 2024.

[12] 3
GPP. 3GPP TR 38.848 V18.0.0: Study on ambient IoT in RAN (Release 18)[R/OL]. 2023.

[13] ZHANG L, JIANG H, LU Y. Short-Packet Physical-Layer Design for Low-Latency Synchronous Industrial Wireless Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(12):10842-10853.

[14] 郑黎明,王闻今,余旭涛,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 (5):1489-1502.
L. Zheng, W. Wang, X. Yu, et al., Background, concept, challenges and research progress of passive IoT, Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(5):1489-1502.

[15] SAHA R, KARMESHU, BHATTACHARYA S. Modulation-Hardware Tradeoffs for Battery-Less Backscatter IoT Sensors[J]. IEEE Internet of Things Journal,2022, 9(13):11148-11161.

[16] LIANG E, YANG H J, DIVSALAR D, et al. List-Decoded Tail-Biting Convolutional Codes with Distance-Spectrum Optimal CRCs for 5G[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2019:1-6.

[17] 杨义冰，许荣涛，陈霞等.无源物联网的编码技术研究[J].物联网学报,2023,7(3):24-31.
YANG Yibing, XU Rongtao, CHEN Xia, et al. Coding technology of passive internet of things,Chinese Journal on Internet of Things [J].2023,7(3):24-31.

[18] 金奕丹、马帅、李源等.面向蜂窝无源物联网系统的增强编码技术研究[J].北京邮电大学学报,2025,48(5):112-120.
JIN Y D, MA S, LI Y, et al. Research on Enhanced Coding Technology for Cellular Passive IoT Systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2025, 48(5): 112-120.

[19] ZHOU B, QIAN H, ZHENG L. Short-Packet Uplink Transmission for Resource-Limited Backscatter IoT Devices[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(15):26789-26802.

[20] Arikan E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55 (7):3051-3073.

[21] 高敏，万蕾，沈冉，等. SparkLink：一种面向超低时延超高可靠的短距无线通信协议[J]. The Innovation,2023,4 (2):100386.
GAO M, WAN L, SHEN R, et al. SparkLink: a short-range wireless communication protocol with ultra-low latency and ultra-high reliability[J]. The Innovation, 2023, 4(2): 100386.

[22] MIAO X, WANG H, ZHANG Y. Channel-Hopping MAC for Dense Industrial Short-Range IoT Under Heavy Co-Channel Interference[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20 (8):7561-7572.

[23] CHEN C, BAI B M, LI Z, et al. Tail-Biting Convolutional Codes for URLLC: Low-Complexity List Decoding and Rate-Compatible Construction[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(10):8596-8606.

[24] WU J, ZHANG H, YU C. OFDMA-Based Multi-Access for Large-Scale Backscatter IoT Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(2):1456-1468.

[25] LI S B, LU R. Passive Backscatter Communication Scheme for OFDM-IM with Dynamic Carrier Activation[J]. Sensors, 2023, 23 (8):3841.

[26] Caihui Du, Jihong Yu, et al. ConcurScatter: Scalable Concurrent OFDM Backscatter Using Subcarrier Pattern Diversity. IEEE INFOCOM 2024（CCF-A),2024:1771-1780.

[27] 3GPP. 3GPP TS 38.300 V18.0.0:E-UTRA and NR;Overall description; Stage-2[S].2024.

[28] IMT-2020(5G)推进组.5G-Advanced通感融合空口技术方案研究报告[R],北京:IMT-2020(5G)推进组,2024.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. Research Report on 5G-Advanced Integrated Sensing and Communication Air-Interface Technical Scheme[R]. Beijing: IMT-2020 (5G) Promotion Group, 2024.

[29] 3GPP. 3GPP TS 23.501 V18.0.0: System architecture for the 5G system [S/OL]. 2024.

[30] 3

GPP. 3GPP TR 38.901 V18.0.0: Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[R/OL]. 2024.

[31] 3GPP. 3GPP TS 38.101-1 V18.0.0: User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone[S/OL]. 2024.

[32] 3GPP. 3GPP TS 38.321 V18.0.0: Medium Access Control (MAC) protocol specification[S/OL]. 2024.

[33] GS1. EPC ™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID Standard: Release 2.1 [S]. Brussels: GS1, 2018.

[34] DONG H, WU Y, LI F, et al. PassiveBLE: Towards Fully Commodity-Compatible BLE Backscatter [C]//Proceedings of the 31st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2025: 139–153.

[35] HUANG Z, DING Y, WU D O, et al. Bitalign: Bit Alignment for Bluetooth Backscatter Communication [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23 (10): 10191–10201.