

## 无源物联网通信研究进展与演进思考

李源<sup>1</sup>, 张雨露<sup>1</sup>, 丁郁<sup>1</sup>, 马帅<sup>1</sup>, 肖善鹏<sup>1</sup>, 肖建明<sup>2</sup>, 李建<sup>3</sup>

(1. 中国移动通信研究院物联网技术与应用研究所, 北京 100032; 2. 中国移动通信集团供应链管理中心, 北京 100032;  
3. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

**摘要:** 无源物联网是产业数字化转型升级的基础性使能技术, 近年来, 射频识别等无源物联网通信技术以其低成本、零功耗、易部署等优势被广泛应用于资产管理领域。在此背景下, 介绍了无源物联网通信技术最新研究进展, 详细分析了潜在演进趋势, 深入思考无源物联网通信技术的发展瓶颈及技术挑战, 并提出与蜂窝网络深度融合的新型无源物联网通信解决方案与关键技术研究方向, 希望能为无源物联网通信技术发展提供新的思路。

**关键词:** 无源物联网通信; 反向散射; 环境能量采集; 蜂窝系统

**中图分类号:** TN919

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2023.00315

## Research progress and evolution prospect of passive internet of things communication

LI Yuan<sup>1</sup>, ZHANG Yulu<sup>1</sup>, DING Yu<sup>1</sup>, MA Shuai<sup>1</sup>, XIAO Shanpeng<sup>1</sup>, XIAO Jianming<sup>2</sup>, LI Jian<sup>3</sup>

1. Internet of Things Technology and Application Institute of China Mobile Research Institute, Beijing 100032, China  
2. Supply Chain Management Center of China Mobile Communications Group, Beijing 100032, China  
3. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

**Abstract:** Passive internet of things (IoT) is the fundamentally enabling technology of promoting digital transformation and upgrading of industries. In recent years, passive IoT communication technology such as radio frequency identification has been widely used in asset management fields due to its advantages of low cost, zero power consumption, and easy deployment. In this context, passive IoT communication technology and the latest research progress were introduced, the potential evolution prospects of passive IoT were analyzed. Based on that, development bottlenecks and challenges of passive IoT communication were given, a novel passive IoT communication system with deep fusion of the cellular system was presented, and the key technology research directions of this field were proposed. It is aimed to inspire new thoughts for the development of passive IoT communication technology.

**Key words:** passive IoT communication, backscatter, ambient energy harvesting, cellular system

### 0 引言

物联网本着万物皆可入网的思想, 以实现万物互联作为最终目标, 已帮助数以亿计的设备实现互联互通。然而, 随着市场的持续蓬勃增长, 物联网

设备的供能、续航等问题正在成为新挑战<sup>[1]</sup>。

为降低物联网节点功耗, 低功耗物联网技术从2010年开始萌芽, 经过十多年的发展, 形成了以低功耗蓝牙 (BLE, bluetooth low energy)、远距离无线电 (LoRa, long range radio)、窄带物联网 (NB-IoT,

收稿日期: 2022-08-25; 修回日期: 2023-03-21

通信作者: 张雨露, zhangyulu@chinamobile.com

基金项目: 中国移动研究院-中关村创新院联合研发项目 (No.2022H002)

**Foundation Item:** The Joint Project of China Mobile Research Institute& X-NET (No.2022H002)

narrow band-internet of things)、5G RedCap (reduced capacity) 等为代表的一系列成熟的低功耗物联网技术。此类低功耗物联网技术虽然在一定程度上实现了物联网终端低功耗、大连接的愿景,但随着技术的不断迭代,一方面,低功耗终端在成本、尺寸等方面逐渐出现瓶颈,在面对食品溯源、商品流通等对单品跟踪管理需求高的应用场景时,不具备明显优势;另一方面,受限于常规电源的理化特性,此类低功耗终端无法在严苛的通信环境中正常工作,应用场景受限。

为解决上述问题,无源物联网通信技术近年来受到产业界及学术界的广泛关注。无源物联网通信是指利用环境能量采集技术将周围可利用的信号与能量转化为可驱动自身电路的电能,并利用以反向散射为核心的通信模式实现向目标节点传递信息的技术。无源物联网通信技术最显著的特征是工作完全不依赖电池供电,能够很好地解决物联网发展过程中面临的传感器供电模块需要人工维护的瓶颈问题,是未来物联网发展的关键技术。

无源物联网因其超低功耗、超低成本、极小终端体积的特点,能够很好地克服 BLE、LoRa、NB-IoT、5G RedCap 等低功耗物联网技术在发展过程中面临的瓶颈问题。可以广泛应用于各类资产盘点、低频次传感采集、物品/人员粗定位等领域,赋能仓储、物流、制造、交通、医疗、家居<sup>[2-4]</sup>等领域,创造物联网千亿级市场的突破。据统计,中国超高频射频识别 (RFID, radio frequency identification) 标签销量从 2017 年约 35 亿枚增长至 2019 年约 45 亿枚,预计将于 2024 年达 115 亿枚<sup>[5]</sup>,以超高频 RFID 为代表的无源物联网具有巨大的应用潜力与研究价值。

不断拓展的应用场景为无源物联网带来了新的发展契机,也提出了新的技术挑战,推动无源物联网技术持续演进。本文首先介绍无源物联网的概念及主要特点。其次,对无源物联网的主要通信方式进行阐述。然后,从能量利用与高效通信两个维度,对无源物联网领域最新研究进展进行归纳提炼。最后,分析现有无源物联网通信系统面临的技术挑战,并提出未来无源物联网重要演进方向——与蜂窝网络深度融合的新型无源物联网系统,基于此,对蜂窝无源物联网系统的空中接口(以下简称空口)架构、网络架构以及关键技术进行深入研究。

## 1 无源物联网通信方式

根据是否具有环境能量收集、存储能力及是否具有主动载波生成能力,无源物联网通信方式如图 1 所示,分别是反向散射通信、环境能量采集辅助式通信,以及兼具上述两种通信方式特点的环境反向散射通信。

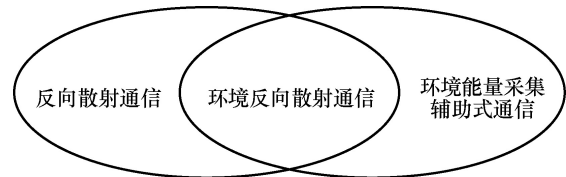


图 1 无源物联网通信方式

反向散射通信的代表技术为超高频 RFID。超高频 RFID 起源于 20 世纪 40 年代<sup>[6]</sup>,最先用于军事领域,后经探索期、试点期、蓬勃发展期<sup>[7]</sup>,在 2010 年前后达到规模化推广阶段,ISO/IEC 等标准组织形成了以 18000 系列为主的超高频 RFID 技术标准,更加促进了该技术的应用与推广。传统无源反向散射 RFID 系统架构如图 2 所示,系统包含无源标签和读写器两部分。其中,无源标签(以下简称标签)是指以 RFID 为代表的一类不依赖电池供电的物联网终端,读写器发射激励信号激活标签,并接收来自标签的反射信号,完成系统信息读取。

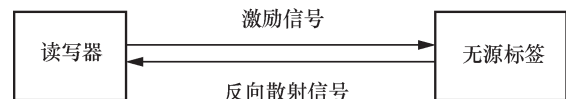


图 2 传统无源反向散射 RFID 系统架构

环境反向散射通信是无源物联网通信技术领域新兴热点研究方向,兼具反向散射与环境能量采集两个特点,被认为是无源物联网通信系统中最具发展潜质的通信方式。环境反向散射系统架构如图 3 所示,与 RFID 系统不同,环境反向散射通信系统可利用环境中射频信号(如蜂窝、蓝牙信号等)作为标签的供能与激励信号,并使用特定接收机对标签反向散射信号进行接收。

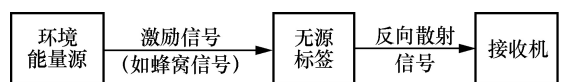


图 3 环境反向散射系统架构

环境能量采集辅助式通信是在反向散射通信系统基础上,对标签硬件电路进行升级改造,衍生

出的新型无源物联网通信系统。环境能量采集辅助式通信系统架构如图 4 所示，与环境反向散射系统相似，该系统复用环境能量源并部署接收机以完成数据回传，但增加了能量采集、能量存储、转换等核心模块以驱动自身电路，可支持反向信号放大、主动载波生成等传统无源 RFID 标签不具备的能力，提升通信距离。

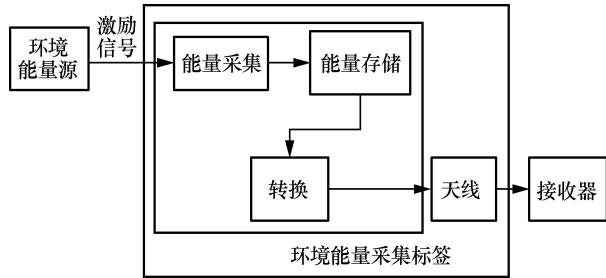


图 4 环境能量采集辅助式通信系统架构

## 2 最新研究进展

目前，学术界对无源物联网通信系统的研究主要围绕能量受限下的可靠通信展开，从能量利用及高效通信两个维度支持“无源”的实现，无源物联网通信系统技术研究热点如图 5 所示。具体地，能量利用部分旨在满足行业内多种场景需求，确保系统在不同环境下的供能稳定，其核心技术包括环境反向散射、环境能量采集技术，主要涵盖的研究方向有多天线技术、宽带射频能量采集技术、复合能

量供能技术等；高效通信以提升链路预算、增强系统抗干扰性为目的，主要研究方向包括调制-编码方式、多址方式等。无源物联网通信领域的热点研究方向及最新研究进展见表 1。

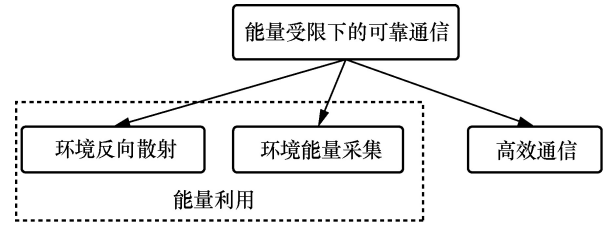


图 5 无源物联网通信系统技术研究热点

### 2.1 环境反向散射

环境反向散射技术旨在利用环境中多种射频信号，完成基于反向散射通信的标签数据回传，该技术能够有效地补偿环境中单一射频能量分布密度低的问题，扩充无源物联网的应用场景。环境反向散射技术的实现主要依托多天线技术与宽带射频能量采集技术。

#### 2.1.1 多天线技术

多天线技术能够深度挖掘空间维度资源，提供阵列增益、复用增益和分集增益，并具有较强的干扰抑制功能。将多天线技术应用于标签中，实现同步能量收集与数据传输，将显著增强接收信号强度和分集增益，进而改善系统通信距离和吞吐率。但同时，当读写器和标签配置多个天线时，其信号检

表 1 无源物联网通信领域的热点研究方向及最新研究进展

研究方向	关键技术	文献	主要工作
环境反向散射	多天线技术	[8-9]	多天线选择方案
		[10]	用于同步能量收集与信息传输的波束成形方法
	宽带射频能量采集技术	[11-12]	频率搬移与载波干扰消除
环境能量采集	复合能量供能技术	[13]	太阳能、静电能、射频能组合供能系统
	能量利用优化	[14]	收发分离反向散射系统能量分配优化算法
	中断点标识	[15]	最佳系统中断点标识与存储算法
高效通信	调制-编码方式	[16]	基于二进制相移键控 (BPSK, binary phase shift keying) 的反向散射调制
		[17]	基于正交振幅调制 (QAM, quadrature amplitude modulation) 的反向散射调制
	[18-19]	基于正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing) 的无源多载波调制	
	[20]	反向散射系统中的高效编码方式	
	多址接入方式	[21-22]	时分多路访问 (TDMA, time division multiple access) 与非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 相结合的混合接入方案
	[23]	基于 NOMA 的反向散射系统带宽资源分配方法	

测、天线选择、能量波束成形等问题将变得更加复杂,需要基于传统无线通信网络进行无源物联网通信网络适配性优化。

标签的能量受限,可用于信号检测的训练符号很少,且多天线无源反向散射系统相较于单天线系统,其信道估计更复杂,传统的检测算法,如广义似然比检验算法,无法直接应用于多天线无源反向散射系统<sup>[8]</sup>。基于此,文献[9]基于卡方检验、F 检验和 Bartlett 检验设计了 3 种适用于多天线无源反向散射系统的信号检测器,并提出高检测性能的天线选择方案。文献[10]考虑了能量收集率与信号传输速率之间的限制关系,提出了一种在标签侧使用多天线技术以实现同步能量收集和信息传输的能量波束成形方法。

### 2.1.2 宽带射频能量采集技术

环境射频信号具有时域高度动态变化、空域覆盖不规则和频域带宽不均衡等特点,因此,在特定时间和地点,可能存在特定频率激励源不可用的情况。宽带射频能量采集允许系统使用超宽频域范围内的信号作为激励源,能够有效拓宽环境反向散射通信的应用范围。

文献[11]基于最大干扰比合并算法与载波干扰消除算法,实现了可工作在 80~900 MHz 频段的宽带环境反向散射系统,最高数据传输速率可达 1 kbit/s。文献[12]中提出了一种基于超宽带-冲激无线电的发射机和基于频率平移的接收机组合方案,在接收端,将反向散射宽带脉冲的频谱转换到 150 MHz 中频波段,以降低接收信号恢复的复杂度。

## 2.2 环境能量采集

基于环境能量的无源通信系统通过复用环境能量实现“无源”。然而,由于环境能量具有地域分布不均匀性与运行不稳定性,无法保障系统长时间工作可靠性。

一方面,可以考虑设计多种能量组合供电系统,实现能量“开源”,文献[13]提出了一种基于太阳能、静电能以及射频能的混合环境能量收集系统,并提出一种时域最大功率点动态跟踪方法。另一方面,研究高效率接收整流与电能转化方案,能够实现能量“节流”,文献[14]通过引入辅助变量,将双基地无源物联网通信系统中的能量效率优化问题简化成一个凸函数优化问题,以实现高效能量分配。另外,需要合理标识与存储系统中断点,以便能量恢复后,程序可以从一个确定的状态重新执行。

文献[15]提出了基于控制流图和控制数据流图所提供的信息设置中断检查点的方法,对设置检查点引入的额外开销与重新计算的能量成本进行了综合考虑,实现检查点的最佳插入。

## 2.3 高效通信

高效通信能力的增强旨在研究能够提升通信性能的通用技术,主要包括:实现更高效的调制-编码方式及提升系统上下行链路预算;选择与优化相应接入方式以减少调度指令交互,降低信号干扰。

### 2.3.1 调制-编码方式

传统无源 RFID 标签承载数据量小,多采用振幅键控、相移键控等低阶调制与脉冲编码等简单编码方式,此类方法虽实现简单,但系统吞吐率较低,限制了系统应用范围。

为了提高标签的信息传输速率,可研究对标签上下行信号进行 BPSK、QAM,以及基于 OFDM 的多载波调制方式等。文献[16-17]分别提出了支持 BPSK、16-QAM 调制的 RFID 标签,相似地,文献[18-19]实现了基于 OFDM 载波的反向散射调制方案。

此外,一些更高效的编码方式,如文献[20]提出的一种基于比特能耗差异的编码方式,也有望应用于无源物联网中,以优化调制-编码深度,降低信号反射损耗。然而,受制于标签极简的射频和基带结构,在进行新型调制-编码方式研究时,需要重点评估优化后的调制-编码方式对标签电路复杂度及功耗造成的影响。

### 2.3.2 多址接入方式

随着标签灵敏度的提升、环境能量采集技术的应用以及反向散射系统架构的革新,无源通信距离进一步扩大,在网络覆盖范围内,多标签同时被激活的概率增加,因此,高效的多标签协调多址接入机制愈发重要。一方面,目前主流的无源多址接入方式以 TDMA 为主,该类算法简易可行但对标签时钟精度要求较高,面对海量连接场景时,信号远距离传输造成的高时延问题将在网络边缘设备处显露出来;另一方面,传统通信网络中常用的频分多路访问(FDMA, frequency division multiple access)技术,在频域上划分若干具备不同频率的信道,不同的终端使用不同频率信道资源进行通信。然而,受制于功耗,标签无法支持高精度晶振、高精度锁相环结构及成型滤波电路,因此,难以使用 FDMA 进行多址接入。

近年兴起的 NOMA 技术，相较上述 TDMA 及 FDMA，其对信号同步到达要求低，可使系统免除上行信号传输前的调度信令，可应用于上行反向散射链路，提升覆盖、效率、容量等多方面关键性能指标。文献[21-22]提出反向散射终端混合接入方案，即将下行 TDMA 与上行功率域 NOMA 相结合，在不显著增加终端复杂度的前提下，提高了网络容量。文献[23]提出了一种保证服务质量(QoS, quality of service)的 NOMA 增强反向散射系统，并以非凸优化模型求解能量最大化分配方法，提高了系统的能量利用效率。

### 3 技术挑战与未来方向

#### 3.1 技术挑战

随着行业应用的不断演进，尽管无源物联网技术已在能量利用率以及信息传输效率提升方面取得重大进展，但是，由于系统架构与使能方式的限制，无源 RFID 反向散射系统与环境能量使能的无源物联网通信系统仍然面临着诸多技术挑战。

首先，现有无源物联网通信系统多采用收发一体的全双工架构，接收端信号经历双重路径损耗，上下行信号自干扰严重<sup>[24-25]</sup>，且受限接收机间干扰，接收端接收灵敏度低，系统通信距离难以进一步突破。其次，现有无源物联网通信系统难以大规模组网与统一调度，进而导致其功能单一，仅支持低速标签盘存、无广域定位功能或定位精度差。

近年来，业界开始研究长距离收发分离方案<sup>[26-27]</sup>，将传统收发一体 RFID 读写器分为激励器和接收器两个设备，使系统通信距离和效率明显提升，且在一定程度上解决了信号自干扰问题，但系统仍然存在时延风险、收发距离不对称等技术问题，限制了系统整体部署。

#### 3.2 未来方向

基于上述技术挑战，目前学术界在积极探寻无源物联网演进方向，以实现技术突破。蜂窝网络具有良好的网络覆盖与优质的通信性能，5G 与无源物联网深度融合，将充分发挥蜂窝基础设施和授权频谱的优势，复用蜂窝网络的广覆盖技术，抑制系统自干扰和互干扰，提升通信距离，增强系统运维管理能力；同时，还可以拓展系统功能，支持广域组网与定位追踪。蜂窝无源物联网技术目前已受到国内外通信协会与组织的普遍认可<sup>[28-30]</sup>，成为无源物联网技术发展的重要方向。

##### 3.2.1 蜂窝无源物联网通信系统潜在空口架构

蜂窝无源物联网通信系统潜在空口架构如图 6 所示，蜂窝无源物联网通信系统有两类主要潜在空口架构：一是蜂窝基站和标签直接通信，基站同时支持下行信号激励和上行数据接收，此类架构硬件部署成本低，适用于户外大规模部署场景；二是通过中继设备实现激励信号发送与反向散射信号接收，可满足区域标签定点激励，数据汇总、再加密、统一上报等需求。

##### 1) 直连式空口架构

直连式空口架构的特点为基站直接管理标签，借助基站在频段、发射功率、接收灵敏度等方面的优势，直连式空口架构可显著改善标签收发距离不对称的问题，提升系统整体通信距离，使无源物联网技术应用到更多室外场景。如图 6(a)和图 6(b)所示，根据应用场景不同，此类架构可衍化出两种主要变形。

##### Case 1: 蜂窝直连式

蜂窝直连式架构中，蜂窝基站直接与标签进行通信，向标签发送射频载波信号和指令信号，其中，射频载波信号用于向标签提供能量，指令信号携带

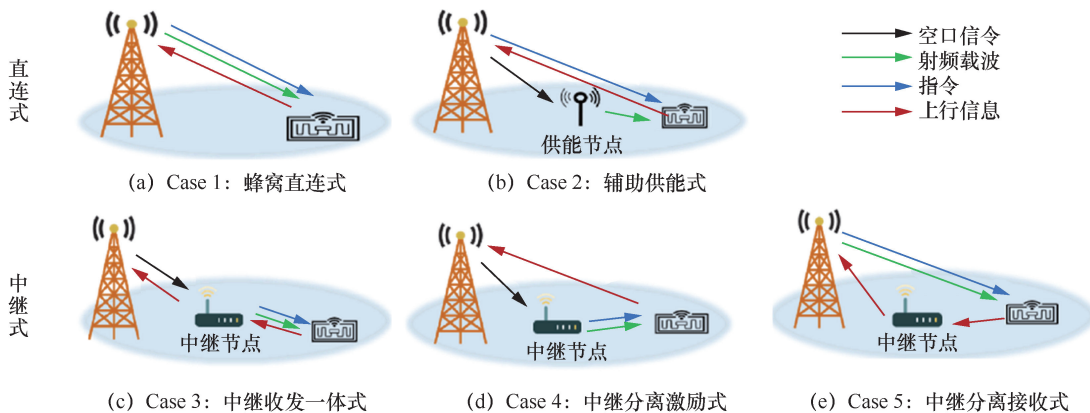


图 6 蜂窝无源物联网通信系统潜在空口架构

标签的控制信息；标签通过反向散射的方式将信息传输给基站。此类架构为所有架构变形的的基础，且涉及硬件设备少、通信时延低、组网方案相对简单，但受限于下行射频载波信号灵敏度，下行链路预算小于上行链路预算。一般适用于物流、畜牧、交通等空旷的室外应用场景。

**Case 2: 辅助供能式**

在直连式通信的基础上，为解决下行覆盖收缩的问题，引入供能节点形成辅助供能式架构。基站向标签发送下行射频载波信号，接收标签上行反向散射信息，并通过空口信令统一调度分布式供能节点，实现标签近距离提供射频载波。此类架构供能节点功能单一，因此，可复用已有网络设备的传统无线通信信号，无须额外升级；同时，也可以作为环境能量源，增强环境能量密度，提升标签端能量转化及存储效率，拓展标签通信距离。此类架构适用于家居、零售等已存在可复用供能节点的场景，以及仓储、工厂、电力电缆监测等多径干扰强，需要提升发射功率以弥补穿透损耗的场景。

2) 中继式空口架构

中继式空口架构的特点为基站与标签间存在中继节点，基站仅对标签进行弱管理。中继节点可实现标签定点、近距离激励，同时对标签上行信息进行统一汇总上报，减少带宽资源占用，也可以对数据进行二次加密，保障远距离传输数据安全。但受限于中继收发的工作模式，此类架构基站与中继节点通信往往存在 1/10 毫秒级固有时延。如图 6(c)~图 6(e)所示，根据应用场景不同，相应地，中继式空口架构也可衍生出 3 种主要变形。

**Case 3: 中继收发一体式**

中继收发一体式架构引入中继设备（如微基站、用户终端、网关等），对基站空口信令进行中继、转发，同时对标签信息进行上报。基站与中继节点可采用 5G NR/有线回传，中继节点与标签间可沿用现有 RFID 通信协议。中继设备的近距离激励可改善下行传输距离，保障网络连续覆盖。同时，由于中继设备的覆盖范围远小于基站，因此，可实现定点激励（例如，仅激励某车间特定流水线上的标签）。此外，中继设备可具备协议转换功能，能够兼容传统 RFID 标签/无源终端，保证技术平滑演进。因此，中继收发一体式架构适用于大型仓储、零售、家居、医疗等存在传统标签或可复用中继设备的室内场景，以及工厂、零

售等需定点激励的场景。

**Case 4: 中继分离激励式**

中继分离激励式架构中，中继设备接受基站的统一调度，发送射频载波以及指令信号完成标签激活，标签反向散射信号由基站接收。该架构合理利用标签上行链路预算大于下行链路预算的特点，将标签反射信号的收发端进行拆分，降低了中继设备的复杂度，适用场景与中继收发一体式类似。

**Case 5: 中继分离接收式**

中继分离接收式架构中，基站向标签发送射频载波、下行指令信号，标签上行反向散射信息由中继设备接收、回传。此类架构涉及的中继设备功能简单、成本低，但由于基站侧上下行交互信息不对等，蜂窝网络难以对标签进行认证、鉴权、移动性等管理。因此，中继分离接收式架构仅适用于广告推送、博物馆展品讲解等盲激励需求的场景。

3.2.2 蜂窝无源物联网通信系统潜在网络架构

考虑无源物联网相较于传统蜂窝通信系统，传输的数据信息以标识信息与小数据量传感信息为主，且通信交互逻辑较简单，控制调度信令远没有蜂窝系统复杂，因此，其网络架构设计也将在蜂窝系统的基础上作出自适应更新优化，以实现更加轻量化、便捷化的端到端架构。蜂窝无源物联网通信系统潜在网络架构如图 7 所示，蜂窝无源物联网通信系统有两种潜在网络架构，分别满足不同应用需求。一是完整版网络架构，基于核心网网元，对标签进行认证、鉴权、移动性管理；二是简化版网络架构，将核心网部分能力下沉至代理节点，以完成本地化的标签识别等基本流程。

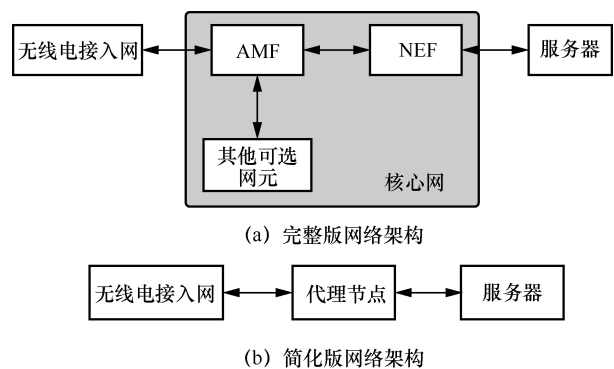


图 7 蜂窝无源物联网通信系统潜在网络架构

1) 完整版网络架构

完整版网络架构继承了部分核心网网元，如

图 7(a)所示。用户指令由无源物联服务器发起，经过核心网后下发至基站，由基站执行盘存操作和接入控制操作，并将获取到的盘存信息、标签数据等交由核心网后，通过网络开放功能（NEF, network exposure function）完成向用户平台的上报。

此类网络架构可基于接入管理功能（AMF, access management function）等核心网网元完成对标签的流动性管理，实现标签的全流程追踪，应用于交通、物流、畜牧等场景中。同时，核心网能够实现认证、授权、计费、加密等操作。

因涉及核心网，此类架构功能完整，但同时，标签需要支持非接入层协议，复杂度较高。由于无源标签承载数据量小，后续可以考虑进行新型会话管理设计，基于统一数据管理功能网元签约、策略控制功能网元下发策略等方式，实现群组、深度神经网络、切片等粒度的多标签会话共用技术；通过通用分组无线电业务隧道-用户协议实现用户面资源共用，通过以群组为颗粒度的能力开放、位置管理、流动性管理等流程实现控制面网元之间的资源共用，提升网络资源利用率。

## 2) 简化版网络架构

简化版网络架构是考虑无源应用的轻量化需求后，将核心网的路由功能下沉至边缘代理节点，并通过代理节点和用户应用服务器的交互，获取用户指令，以此调度基站完成盘存操作和接入控制操作，并将基站上报的标签数据等转发至服务器的新型网络架构，如图 7(b)所示。由于代理节点和基站绑定，属于本地化部署，因此，此类架构适用于仓储、家居、工厂等本地化应用。代理节点除具备路由功能外，也需要支持中间件的功能，实现基站的调度控制以及数据的初步处理。

该架构下，标签的认证、授权，以及流动性管理等均在用户平台侧完成，由于本地化通信，标签仅需支持“无线资源控制层-媒体接入控制层-物理层”3层协议，功能较简单，功耗也相对较低。

### 3.2.3 蜂窝无源物联网关键技术方向

针对现有无源物联网通信距离近、吞吐率低、难以大规模组网，以及定位精度低的痛点问题，可研究蜂窝无源物网站间联合干扰抑制方法、随机接入及非竞争接入方法、可拓展的通用性架构、以及轻量化的流动性管理和定位等关键技术，以实现系统通信距离提升、盘存效率优化、兼容性增强以及功能拓展。

#### 1) 通信距离提升

现有无源物联网通信系统中，读写器端存在较强的载波泄露自干扰和激励信号间干扰，限制了读写器和标签之间的通信距离，已成为无源物联网在实际应用中的技术瓶颈<sup>[25-26]</sup>。

蜂窝无源物联网通信系统中，可以基于站间协调调度，即网络获取基站时频信息，采用时分、频分交错的方式，控制基站发送盘存指令，以规避激励信号间干扰；同时，可以使用集中式收发与分布式激励方式，即辅助供能式架构（如图 6(b)所示），拆分射频载波信号与盘存指令的发送端，降低载波泄露自干扰。此外，在授权频段上使能无源物联网将有效提升约 10 dB 的下行链路预算；通过反向放大、窄带传输、全双工干扰消除等技术，将显著提升系统上行链路预算，最终实现系统通信距离从米级到百米级的突破。

#### 2) 盘存效率优化

随着蜂窝无源物联网通信距离的提升，系统内标签数量也将以次方倍增长，标签碰撞概率将显著增加，因此，面向广域蜂窝组网，需要优化无源物联网通信系统盘存效率，提升系统性能。

一方面，可以基于基站对标签数量的估计，以及标签碰撞检测机制，灵活配置随机接入流程中竞争窗口的大小；另一方面，对于固定资产盘点等应用场景，由于标签数量相对静态，因此，可以针对此特点，设计适用于蜂窝无源物联网通信系统的非竞争接入方法，基站通过感知标签的到达和离开，动态调整空口资源分配，以降低标签碰撞概率。此外，面向蜂窝无源新标签，可研究标签并发接入机制，基于频分复用或多进程盘存的思想，提升标签盘存效率。

#### 3) 兼容性增强

现有无源物联网通信系统间彼此孤立，仅支持连接单个服务提供商的服务器，架构可扩展性差，难以大规模组网。蜂窝无源物联网通信系统中，一方面，可基于新增代理节点，或核心网 NEF 网元，与无线电接入网（RAN, radio access network）进行对接，并对多服务器进行准入管理，以支持多服务商接入，提升系统的可拓展性；另一方面，可对 RAN 进行协议兼容性升级，使之支持 5G NR 与主流 RFID 协议及状态间的转化，兼容业务场景中已部署的无源 RFID 标签，提升系统的通用性。

#### 4) 功能拓展

现有无源物联网通信系统不支持标签流动性管

理,通常,服务器中仅存有标签标识信息。面向大规模组网场景,为便于标签查找与全流程跟踪溯源,蜂窝无源物联网需要支持自动化标签位置更新、单个/群组标签的寻呼和精准定位能力,以拓展系统功能。

针对上述需求,一方面,可以新增空口指令,由 RAN 对标签进行周期性盘存与校验,并结合自身位置,将标签驻留信息上报给上级节点,用于移动性管理与寻呼;另一方面,基于蜂窝小区、基站波束等位置信息,结合到达角度、接收信号强度指示、侧行链路<sup>[31-33]</sup>等定位方法,依靠多终端协作,可联合定位标签位置,提升蜂窝无源物联网定位精度。

作为一种新型通信技术,蜂窝无源物联网通信系统研究尚处于演进探索阶段,面向未来发展,除上述关键技术外,仍可以在诸多方面开展深入挖掘。例如,进一步提升终端集成度,避免硬件冗余造成能量损失;升级系统安全保障机制,研究更适用于蜂窝无源物联网通信系统的轻量化、低功耗安全加密机制;简化协议栈,设计扁平化的协议栈结构,精简信令交互流程,实现最低功耗的信令控制及数据传输。

#### 4 结束语

本文分析了物联网及低功耗物联网技术发展过程中遇到的瓶颈问题,总结了无源物联网通信技术的分类,从能量利用方法优化以及高效通信两个维度,列举了近年来无源物联网热点研究领域的研究进展,剖析了现有无源物联网通信技术面临的挑战,即系统通信距离短、难以大规模组网与统一调度。基于此,本文提出了蜂窝无源物联网通信解决方案,并详细介绍了该解决方案下的潜在空口架构、潜在网络架构,以及关键技术研究方向。与蜂窝网络深度融合,将充分发挥现有蜂窝基础设施在覆盖、收发灵敏度、干扰协调等方面的优势,助力无源物联网解决现有痛点问题,实现飞跃式发展,预计未来将有极大的应用价值与广阔的应用空间。

#### 参考文献:

- [1] 于季弘,刘昊,王帅. 无源物联网综述——从感知通信与管理的视角[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2020, 32(5):16. YU J H, LIU H, WANG S. Survey on passive internet of things: from the perspective of sensing, communications and management[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2020, 32(5):16.
- [2] OPPO 研究院. 零功耗通信白皮书[R]. 2022. OPPO Research Institute. Zero power communication[R]. 2022.
- [3] 崔子琦,王公仆,魏旭昇,等. 反向散射通信的未来应用与技术挑战[J]. 移动通信, 2021, 45(4): 29-36. CUI Z Q, WANG G P, WEI X S, et al. Future applications and technical challenges of backscatter communications[J]. Mobile Communications, 2021, 45(4): 29-36.
- [4] TORO U S, WU K S, LEUNG V C M. Backscatter wireless communications and sensing in green internet of things[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(1): 37-55.
- [5] AIoT 星图研究院. 中国 RFID 无源物联网市场调研报告(2022 版)[R]. 2022. AIoT Xingtu Research Institute. China RFID passive internet of things market research report(2022)[R]. 2022.
- [6] STOCKMAN H. Communication by means of reflected power[J]. Proceedings of the IRE, 1948, 36(10): 1196-1204.
- [7] 黄玉兰. 物联网射频识别(RFID)核心技术详解(第三版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016. HUANG Y L. Radio frequency identification development internals (Version 3)[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [8] HU G, ZHU Y, ZHAO W, et al. Signal detection for batteryless backscatter systems with multiple-antenna tags[C]//Proceedings of 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications Workshops in China (ICCC Workshops). [S.l.:s.n], 2019.
- [9] CHEN C, WANG G P, GUAN H, et al. Transceiver design and signal detection in backscatter communication systems with multiple-antenna tags[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(5): 3273-3288.
- [10] MA W Y, WANG W, JIANG T. Joint energy harvest and information transfer for energy beamforming in backscatter multiuser networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(2): 1317-1328.
- [11] YANG C C, GUMMESON J, SAMPLE A. Riding the airways: ultra-wideband ambient backscatter via commercial broadcast systems[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-9.
- [12] MEKKI K, NECIBI O, DINIS H, et al. Backscatter analysis in UWB chipless RFID based on UWB-IR[C]//Proceedings of 2021 IEEE Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [13] OH S J, KHAN D, IN S H, et al. A solar/thermoelectric/triboelectric/vibration/RF hybrid energy harvesting based high efficiency wireless power receiver[C]//Proceedings of 2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 911-914.
- [14] LIU Y F, SHENG X T, FANG K P, et al. Energy efficiency maximization in bistatic backscatter communications with QoS constraint[C]//Proceedings of 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 920-925.
- [15] RANSFORD B, SORBER J, FU K. Mementos: system support for long-running computation on RFID-scale device[J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 2011, 39(1): 159-170.
- [16] WANG X Y, YIGITLER H, DUAN R F, et al. Coherent multiantenna receiver for BPSK-modulated ambient backscatter tags[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 9(2): 1197-1211.
- [17] THOMAS S J, REYNOLDS M S. A 96 Mbit/sec, 15.5 pJ/bit 16-QAM modulator for UHF backscatter communication[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on RFID (RFID). Piscataway: IEEE Press, 2012: 185-190.
- [18] CORREIA R, CARVALHO N B. OFDM-like high order backscatter modulation[C]//Proceedings of 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-3.

- [19] TANG A, KIM Y, KIM Y, et al. A 5.8 GHz 1.77mw AFSK-OFDM cmos backscatter transmitter for low power IoT applications[C]// Proceedings of 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS. Piscataway: IEEE Press, 2018: 259-261.
- [20] ZHANG Y F, LI E T, ZHU Y H, et al. Energy-efficient prefix code based backscatter communication for wirelessly powered networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 8(2): 348-351.
- [21] ZHANG D C, WU Q Q, CUI M, et al. Throughput maximization for IRS-assisted wireless powered hybrid NOMA and TDMA[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(9): 1944-1948.
- [22] YANG G, XU X Y, LIANG Y C. Resource allocation in NOMA-enhanced backscatter communication networks for wireless powered IoT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(1): 117-120.
- [23] XU Y J, QIN Z J, GUI G, et al. Energy efficiency maximization in NOMA enabled backscatter communications with QoS guarantee[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(2): 353-357.
- [24] YAO C, LIU Y, WEI X, et al. Backscatter technologies and the future of internet of things: challenges and opportunities[J]. Intelligent and Converged Networks, 2020, 1(2): 170-180.
- [25] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(3): 1091-1104.
- [26] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Bistatic backscatter radio for tag read-range extension[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2013: 356-361.
- [27] YU S C, PENTY R, CRISP M. Analysis of phase noise performance in spatially separated backscatter systems[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Piscataway: IEEE Press, 2021: 169-172.
- [28] 3GPP. Study on ambient power-enabled internet of things: TR 22.840[S]. 2021.
- [29] 3GPP. Motivation for NR passive IoT for automotive industry CMCC, BMW brilliance automotive: RP-211990[S]. 2021.
- [30] 中国通信标准化协会. 基于蜂窝通信的无源物联网应用需求研究: 2021B108[S]. 2021.  
CCSA. Research on application requirements for passive IoT technology based on mobile communications: 2021B108[S]. 2021.
- [31] FU Y Z, ZHANG H Y, ZHANG H. Bluetooth AoA positioning based on backscatter technology[C]//Proceedings of 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 559-565.
- [32] MADRAY I, SUIRE J, DESFORGES J, et al. Relative angle correction for distance estimation using  $K$ -nearest neighbors[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(14): 8155-8163.
- [33] 3GPP. Enhanced NR sidelink relay: RP-213585[S]. 2021.

#### [作者简介]



李源（1990-），女，中国移动通信研究院物联网技术与应用研究所工程师，主要研究方向为无源物联网、车联网、物联网体系架构、无线通信技术等。



张雨露（1997-），女，中国移动通信研究院物联网技术与应用研究所研究员，主要研究方向为无源物联网、行业现场网技术及标准等。



丁郁（1984-），女，博士，中国移动通信研究院物联网技术与应用研究所研究员，主要研究方向为车联网关键技术与应用、物联网通信技术、下一代物联网体系架构等。



马帅（1981-），男，中国移动通信研究院物联网技术与应用研究所副所长，主要研究方向为无源物联网、工业现场网、车联网、物联网感知等。



肖善鹏（1976-），男，中国移动通信研究院物联网技术与应用研究所所长、高级工程师，主要研究方向为物联网新技术和产业数字化等。



肖建明（1967-），男，博士，中国移动通信集团供应链管理中心物流管理与运营部副经理、教授级高级工程师，主要研究方向为电磁场与微波技术、天线和现代供应链数智化转型管理等。



李建（1983-），男，博士，电子科技大学教授，主要研究方向为射频识别、物联网、移动通信等无线通信核心芯片与集成系统。