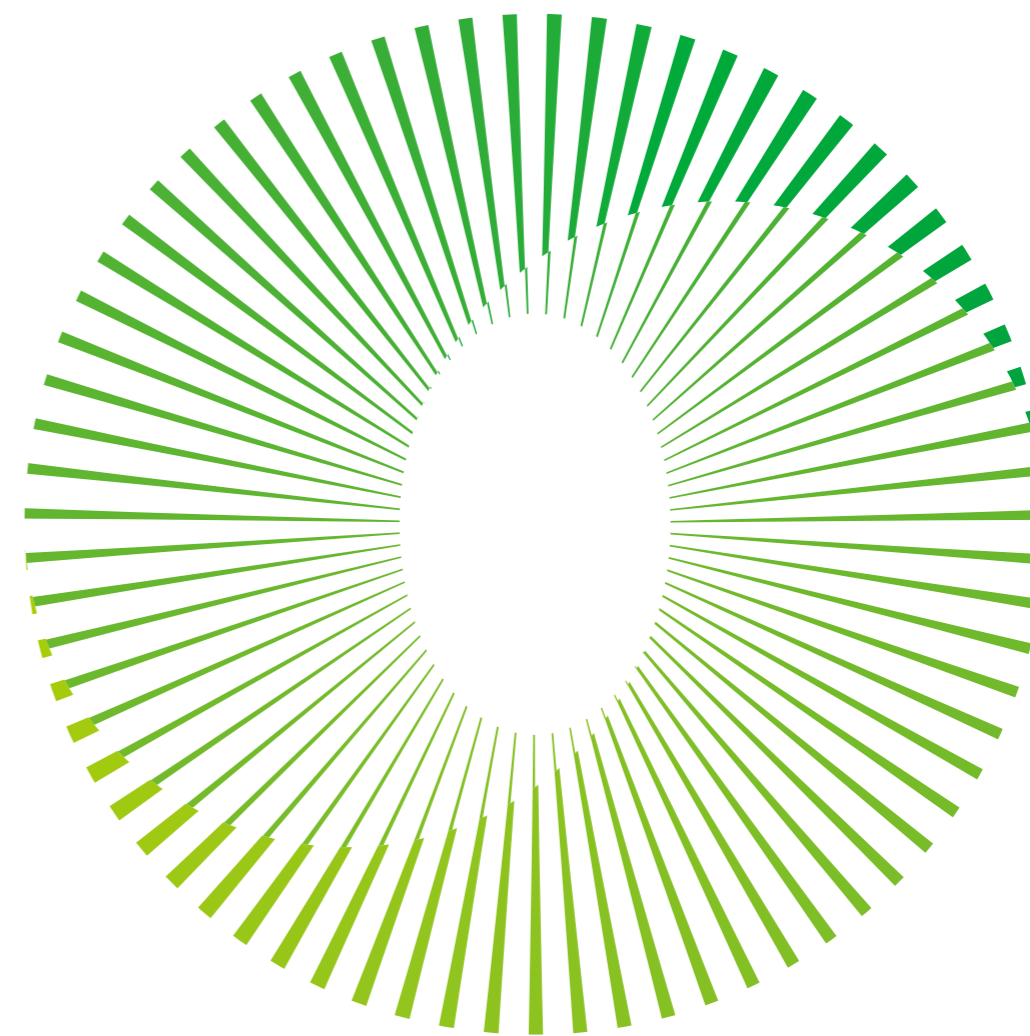


oppo



零功耗通信

oppo

目录

01.	引言	01
02.	零功耗通信的典型应用场景	04
03.	零功耗通信技术原理	17
04.	零功耗通信系统总体设计	26
05.	零功耗通信关键技术和挑战	36
06.	零功耗通信与6G关键技术的融合	54
07.	结语	67

引言

历经 10 余年发展，3GPP 标准化了多项物联网技术，实现了低成本、低功耗、大连接以及深覆盖的设计目标，较好满足了多样化的物联网通信场景需求。然而，仍有较多的物联网通信场景需要超低功耗甚至零功耗、超低成本、极小尺寸等特性的物联网终端形态。零功耗通信借助于能量采集、反向散射以及低功耗计算，可满足这些新的物联网通信需求。鉴于其优良特性，零功耗通信有望发展成为下一代物联网技术。

01

1.1 物联网发展现状

自 20 世纪 90 年代以来，移动通信技术蓬勃发展。数字移动通信经历 2G、3G、4G 一直到当前的 5G，很好的满足了人们在语音通信、数字移动通信和移动宽带互联网通信等方面的需求。然而，随着社会和经济的发展，物联网通信需求逐渐兴起。从 2010 年开始，物联网通信相关的技术与标准逐步得以发展。其中，3GPP（3rd Generation Partnership Project，第三代移动通信标准化组织）标准化了 MTC(Machine Type Communications，机器类通信)、NB-IoT(Narrow Band IoT，窄带物联网)和 RedCap (Reduced Capability UE，缩减能力终端)等一系列的物联网技术。其中，MTC/NB-IoT 采用小带宽、单天线、降低峰值速率、半双工、降低发射功率等技术显著降低了物联网终端的成本。进一步地，通过引入 eDRX (enhanced Discontinuous Reception，增强的非连续接收)、PSM (Power Saving Mode，节能模式)极大降低了物联网终端的功耗。同时，MTC/NB-IoT 可以支持大量物联网终端接入网络，从而满足大连接的需求。

1.2 未满足的物联网通信需求

现有物联网技术如 MTC、NB-IoT 等技术虽然实现了物联网终端的低成本、低功耗和大连接，进而满足了众多场景下的物联网通信需求，但仍有很多场景下的物联网通信需求无法使用现有技术得到满足，例如：

严苛的通信环境

某些物联网场景，可能面临高温、极低温、高湿、高压、高辐射或高速运动等极端环境。如超高压电站、高速运动的列车车轨监测、高寒地带环境监测、工业产线等。在这些场景中，受限于常规电源的工作环境限制，现有物联网终端将无法工作。另外，极端的工作环境也不利于物联网的维护，如更换电池。

极小尺寸的终端形态需求

某些物联网通信场景，如食品溯源、商品流通以及智能可穿戴等要求终端具备极小的尺寸以方便在这些场景下使用。例如，用于流通环节上商品管理的物联网终端通常使用电子标签的形式，以非常小巧的形态嵌入到商品包装。再例如，轻巧的可穿戴设备可以在满足用户需求的同时提升用户使用体验。

极低成本物联网通信需求

众多的物联网通信场景要求物联网终端的成本足够低廉，从而提升相对于其他可替代的技术的竞争力。如物流或仓储场景，为了便于管理大量流通的物品，可以将物联网终端附着在每一件物品上，从而通过该终端与物流网络之间的通信完成物流全过程、全周期的精确管理。这些场景要求物联网终端价格具备足够竞争力。

因此，以上述场景为代表的物联网通信场景要求支持具备免电池、超低功耗、极小尺寸和极低成本特性的物联网通信终端。现有的物联网通信技术难以满足这些需求，如何解决这些未满足的物联网通信需求，更好服务经济与社会发展，是一个值得探讨和研究的问题。

1.3 零功耗通信的技术定位与发展愿景

零功耗通信技术使用射频能量采集、反向散射和低功耗计算等关键技术。零功耗通信通过采集空间中的无线电波获得能量以驱动终端工作，因此零功耗通信终端可不使用常规电池。进一步地，可采用反向散射和低功耗计算技术使得零功耗终端实现极其简单的射频和基带电路结构，从而极大降低了终端的终端成本、尺寸和电路能量功耗。因此，零功耗通信有望实现免电池终端，满足超低功耗、极小尺寸和极低成本物联网通信需求。正是基于终端免电池的优良特性，我们称之为零功耗终端，对应的通信过程称之为零功耗通信。

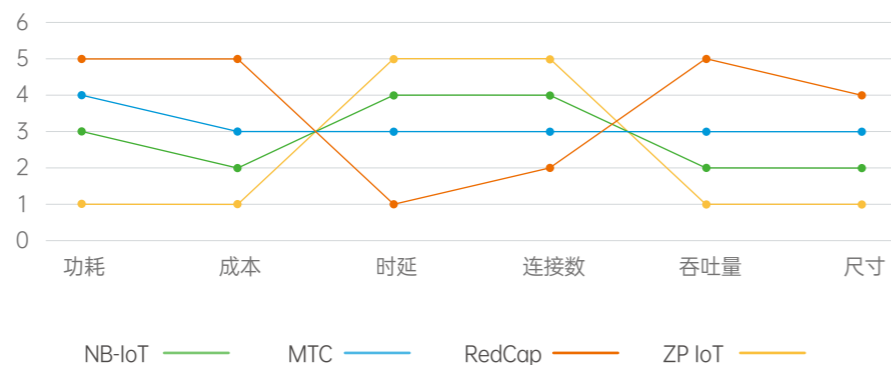


图 1.3-1 物联网技术对比

如图 1.3-1 所示，相对于现有的 MTC、NB-IoT 以及 RedCap 等技术，零功耗通信在终端的功耗、终端尺寸以及终端成本等方面将具有显著优势。例如，从功耗上有望将终端功耗从 NB-IoT 终端的数十毫瓦降低至几十微瓦甚至数微瓦；从成本上有望将终端通信模组成本从上述技术中最便宜的 NB-IoT 终端的十几元降低至 1 元甚至更低。因此，基于上述与其他物联网技术明显的差异化特性，零功耗通信技术有望成为下一代物联网技术的重要候选技术。

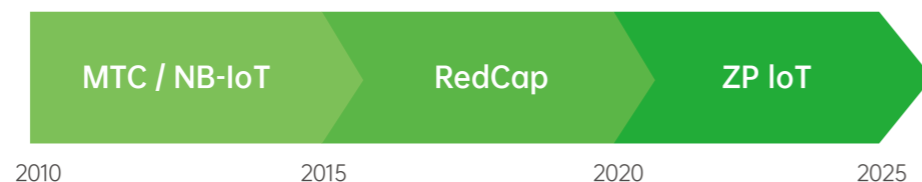


图 1.3-2 物联网技术发展路线

综上，零功耗通信将致力于满足现有的物联网通信技术仍无法满足的通信场景，实现与现有物联网通信技术的良好互补，从而满足多层次多维度的物联网通信需求。

零功耗通信的典型应用场景

零功耗通信的突出技术优势是免电池通信。由于使用射频能量采集、反向散射和低功耗计算等关键技术，终端可以做到免电池，支持极低硬件复杂度，因此零功耗通信能够满足超低功耗、极小尺寸和极低成本的需求。可以预见，零功耗技术在广泛的应用领域将具有显著的应用优势。例如面向垂直行业的工业传感器网络、智能交通、智慧物流、智能仓储、智慧农业、智慧城市、能源领域等应用以及面向个人消费者的智能穿戴、智能家居以及医疗护理等方面的应用。本节我们将选取其中部分典型场景说明零功耗通信在这些领域的应用潜力。



2.1 工业传感网

工业传感网 (IWSN, Industrial Wireless Sensor Network) 的应用范围非常广泛, 包括建筑自动化、工业过程自动化、电力设施自动化、自动抄表和库存管理、环境传感、安全、生产线监控等。应用场景中往往会部署大量的传感器节点, 这些节点用于温度、湿度、振动监测、生产线监测、工业自动化和数值化管理、危险事件监测等方面。紧凑、低成本的传感器设备是实现 IWSN 大规模部署的关键, 为了应对技术挑战并满足各种 IWSN 应用的需求, 需要遵循低成本、小传感器节点的设计目标。

鉴于前述零功耗通信终端所具有的超低功耗、极小尺寸和极低成本的优点, 零功耗通信在 IWSN 场景下将具有广泛的应用潜力。特别需要指出的是, 零功耗终端免电池通信的特点, 也可使得零功耗通信拓展到传统的物联网通信技术无法涉及的应用场景。例如, 在某些 IWSN 应用中, 工业传感器节点可能部署在恶劣的环境和特殊的位置空间, 甚至是在极端危险环境中进行部署 (例如高 / 低温、移动或旋转部件、高振动条件、高湿度环境等)。在这些应用场景下, 一方面受限于工作环境, 普通电池终端可能无法正常工作 (受限于电池的理化特性对工作环境的要求)。另一方面使用传统电源终端时高昂的网络维护成本或工作环境的限制使得网络维护无法执行, 因此使用常规电池终端无法满足这类应用场景下的使用需求。

在 IWSN 中应用零功耗通信技术, 借助于能量采集和反向散射等技术, 传感器节点可以做到免电池、超低功耗, 这将极大程度解决传感器节点的生命周期问题, 大大延长使用寿命。同时零功耗通信的免电池特性, 也将大大降低传感器节点的维护成本甚至做到免维护。

因此, 将零功耗通信技术与 IWSN 结合, 能够极大的拓展工业传感网络的应用场景, 增加传感器节点使用时间, 降低部署、维护成本。

● 工业传感网的典型场景：

轮胎管理

在轮胎中嵌入零功耗标签 (或搭载相应传感器), 利用标签收集和记录轮胎的基本信息^[1] (如轮胎气压、轮胎寿命、品牌、工厂等), 便于轮胎的生产、售后和使用管理。使用零功耗终端的显著优势是可以做到在不破坏轮胎、不移除轮胎的情况下进行数据收集和记录。

铁路轨道测量

在铁轨下部署零功耗设备^[2], 配备相应的传感器, 用来进行铁路轨道诸如压力、温度和其他信息的监测和采集。

环境信息采集

在一些特殊环境 (例如高温、高压、极寒、辐射等) 下进行信息收集。例如特高压电站、变电站等应用环境。



图 2.1-1 零功耗技术在工业传感网中的应用示例

● 工业传感网的典型需求：

终端需求：

零功耗物联网终端形态为电子标签, 可集成存储器用于数据存取或集成传感器用于传感信息采集。由于一般是大规模应用 (每个资产或者设备都会贴一个标签), 其成本、功耗都需要重点考虑。

标签功耗: 终端功耗小于 1mw, 无源免电池, 免维护;

工作环境: 能够匹配特殊环境, 在高温、高压、极寒、辐射等特殊环境下正常工作;

标签体积: 极小体积, 便于大规模应用;

通信距离: 能够支持数十米到数百米范围的通信;

标签类型: 纸质标签和抗金属标签。

网络需求：

基于蜂窝网基础设施, 灵活部署: 网络设备可部署于室外杆站, 室内同 DIS (Digital Indoor System, 室内数字系统) 站间距部署, 提供基础覆盖; 可按需部署补盲或扩展覆盖;

覆盖要求: 单站的覆盖距离要求 (室内 >30m 室外 >100m);

网络安全: 基于授权的标签读取, 保护隐私和数据安全;

连接需求: 支持足够的系统容量, 支持大量终端的数据读取。

2.2

物流和仓储

随着中国经济的持续稳定发展，经济体量越来越大，随之而来的便是物流规模的进一步扩大。物流是商品流通供应链中非常重要的环节，在国民经济中占据重要地位，而仓储是现代物流的核心环节。

在物流和仓储应用场景中，大量的包装 / 货物需要频繁的在物流站或仓库（数万平方米）进行转移、储存、装卸和盘存。伴随着仓库订货、货物入库、货物管理和货物出库的发生，会产生大量的仓储信息，这些信息一般具有数据读取操作频繁、数据量大等特点。

为了对物流包裹 / 货物进行数字化信息管理，提升物流和仓储的管理效率，通常需要将通信终端标识贴在包裹 / 货物的包装表面用于物流信息的获取和物流全流程管理。因此，小巧的终端尺寸更加有利于行业应用。同时，由于货物的数目巨大以及考虑使用的经济性和竞争力，快递或仓库供应商只能接受极低成本的通信终端。

零功耗设备本身具有成本极低、体积小、免维护、耐用、寿命长等特点。在物流和仓储中，利用零功耗设备来记录、保存、更新货物的信息，构建基于零功耗物联网的物流、仓储系统，能够进一步降低运营成本，显著提高物流和仓储管理的效率，有助于智慧物流和智慧仓储的实现。

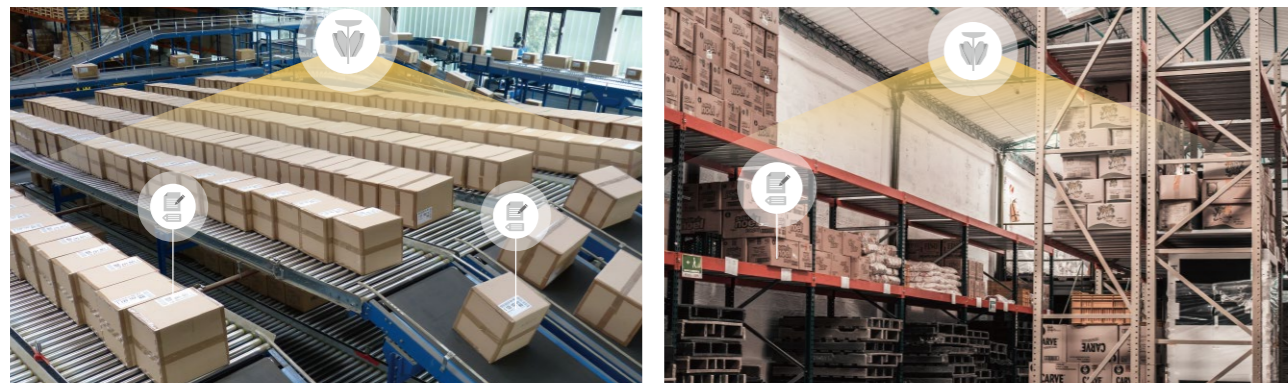
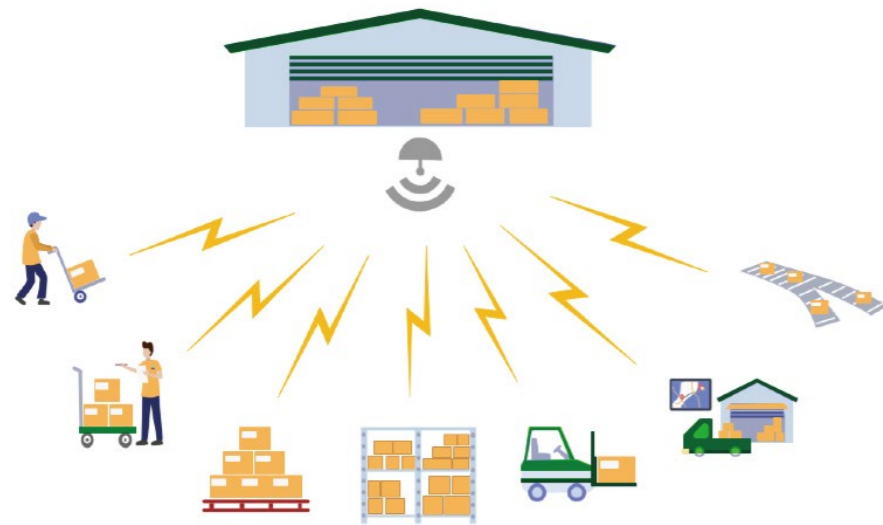


图 2.2-1 智慧物流和智慧仓储中的零功耗标签

● 具体的，零功耗技术可以通过以下几个方面实现智慧仓储管理并提高仓库效率和生产力：

批量读取

支持更大的零功耗标签同时读取数目。当货物到达仓库时，可以批量读取贴在货物上的无线标签（例如每秒读取千级标签），以准确获取商品信息，例如尺寸 / 重量、制造商、有效期、序列号编号、生产线等，可以帮助提高物流仓储效率和准确性。

大范围读写

支持更大的读写范围^[3]。在仓库内，部署一个或少数个网络设备，即可实现整个仓库的零功耗标签通信覆盖。在货物或容器上贴的无线标签，会保存其基本信息和在仓库内的位置信息，通过在仓库内设置中心网络节点，能够及时快速的对仓库中所有的货物进行识别，帮助快速盘点，便于管理者及时了解库存分布和总量以及实现存储需求的快速预测。

搬运管理

能够对标签进行定位和信息更新^[4]。货物在仓库内移动时，网络设备能够及时识别并进行标签信息的更新。当需要挑拣相应货物时，在整个仓库范围内能够快速定位货物位置，大大提高货物的分拣效率。

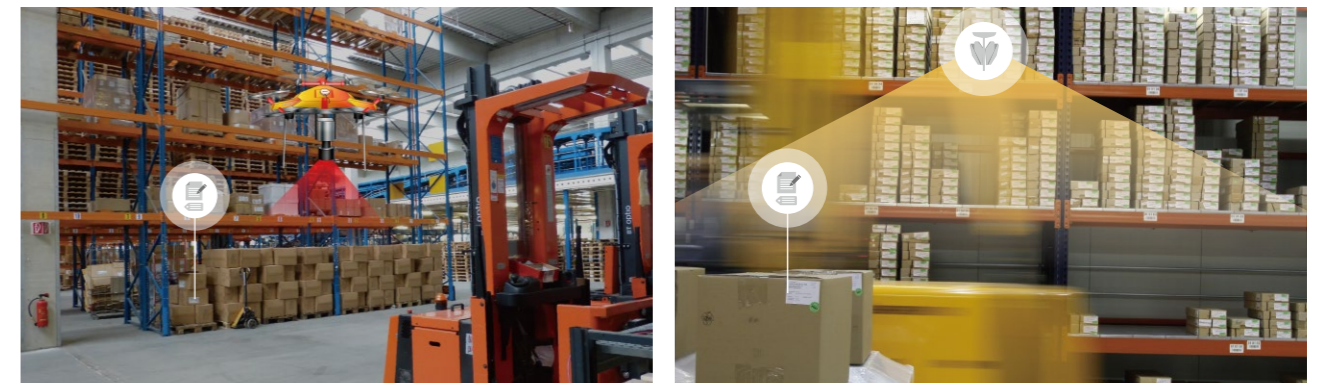


图 2.2-2 零功耗技术在智慧仓储中的应用

- 智慧物流和智慧仓储的典型需求：

终端需求： 零功耗物联网终端形态一般为简单电子标签；由于一般是大规模应用（每件货物都会贴一个标签），其成本、尺寸、功耗等方面需要重点考虑。

标签功耗： 无源标签，不涉及更换电池等相关维护问题；

标签成本： 由于物流和仓储中的货物数目巨大，需要极低成本；

标签体积： 极小体积，便于大规模应用；

通信距离： 能够支持数十米到数百米范围的通信。

网络需求： 基于蜂窝网基础设施，灵活部署：网络设备可部署于室外杆站，室内同 DIS (Digital Indoor System, 室内数字系统) 站间距部署，提供基础覆盖；可按需部署补盲或扩展覆盖；

覆盖要求： 单站的覆盖距离要求（室内 >30m 室外 >100m）；

网络安全： 基于授权的标签读取，保护隐私和数据安全；

连接需求： 货物数量巨大，需要同时检测大量标签（如每秒千级）。

2.3

智能家居

智能家居以住宅为平台，通过物联网将家中的各种设备连接到一起，构建高效的宜居系统，智能家居利用家电的自动控制、照明控制、温度控制、防盗和报警控制等多种功能和手段，使家居环境更加安全、便利、舒适。智能家居中的传感器和小型设备可以基于反向散射技术^[5]来进行通信。

零功耗通信可以实现免电池，不需要充电，能够极大增加智能家居中相应设备的使用时间，降低维护成本。同时由于其超低成本、极小体积、可清洗、灵活 / 折叠的外形因素等特点，可以在智能家居中非常灵活的进行部署，例如嵌在墙壁、天花板和家具中，或者贴在钥匙、护照、衣服、鞋子上。基于上述优点，零功耗通信能够扩展智能家居场景的应用，对智能家居领域有着极大吸引力。



图 2.3-1 零功耗技术在智能家居中的应用

- 智能家居的典型应用场景：

物品寻找 极小体积、可清洗、灵活可折叠的零功耗设备，可以贴在家庭中一些容易丢失的物品上，例如钥匙、护照、银行卡、钱包等。当需要寻找这些物品时，可以快速定位、找到丢失的物品。

环境监测、告警 零功耗设备与传感器集成，用于监测房屋的温度、湿度等，也可以用于紧急情况如燃气泄漏时的告警。零功耗设备的免电池特性，可以极大增加设备的使用时间，实现免维护。

智能控制 零功耗设备与传感器集成，可以实现家庭设备的智能控制。例如控制洗衣机、空调、电视、窗帘等的开关。也可以通过嵌在 / 贴在门和家具上的标签，为家庭机器人进行导航，提供更加精细的控制^[6]。

- 智能家居的典型需求：

终端需求： 零功耗物联网终端形态为电子标签，可集成存储器用于数据存取或集成传感器用于传感信息采集。家庭应用中，其成本、功耗、体积、防水和可折叠性都需要重点考虑。

标签功耗： 无源标签，不涉及更换电池等相关维护问题；

通信时延： 智能家用电器调节：十毫秒至百毫秒级别；家居定位：百毫秒至秒级别；

标签类型： 纸质标签和抗金属标签，支持清洗、具备灵活可折叠的外形；

标签体积： 极小体积，便于家庭中进行应用；

通信距离： 能够支持数十米到数百米范围的通信（室内）；

连接数： 支持数十到数百的设备连接。

网络需求： 灵活部署：使用智能终端作为网关设备，或者与基站直连；
覆盖要求： 单站的覆盖距离要求（室内 10-30m（与智能设备连接情况）室外 >100m（与基站直连情况））；

网络安全： 基于授权的标签读取，保护隐私和数据安全；

大连接需求： 室内零功耗终端数目众多，数十到数百；

激励信号： 将家庭室内的智能设备例如智能手机、CPE (Customer Premise Equipment, 客户前置设备)、WIFI 的信号作为无源终端的能量激励信号，无需额外的激励信号，简化网络布局。

2.4

智能可穿戴

智能可穿戴场景以消费者为中心，通过物联网技术将消费者所穿戴的各种设备进行无线连接，在多个领域中（例如健康监测^[7]、活动识别^{[8][9]}、辅助生活^[10]、移动感知^[11]、智能服装^[12]、室内定位^[13]等）均得到了应用。目前主流的产品形态有以手腕为支撑的手表类（包括手表和腕带等产品），以脚为支撑的鞋子类（包括鞋、袜子或者将来的其他腿上佩戴产品），以头部为支撑的眼镜类（包括眼镜、头盔、头带等）。此外还有智能服装、书包、拐杖、配饰等各类非主流产品形态。

由电池驱动的智能可穿戴设备，续航时间往往比较短。如果开启更多功能，耗电量会进一步增加，使用者往往需要频繁的进行充电才能保证设备的正常使用。这将极大程度上影响用户的使用体验。

低功耗物联网终端具有极低成本、极小体积、极低功耗（免电池）、柔性可折叠、可水洗等优良的特性，特别适合智能可穿戴场景，易于为消费者相关行业（如幼儿园，服装厂等）所接受。一方面，低功耗设备通过能量采集的方式获取能量，不需要电池，这将从根本上解决智能可穿戴设备需要频繁充电的问题；另一方面，低功耗设备成本低，体积小，并且材质柔软，可水洗可折叠，极大的提升了佩戴的舒适度和用户体验。



图 2.4-1 低功耗技术在可穿戴领域中的应用

● 智能可穿戴场景的典型应用：

健康监测	低功耗设备与传感器集成，镶嵌在腕带 ^[14] 或者鞋子、袜子等佩戴产品上，进行健康监测，及时反馈人的身体状况，对睡眠状况、体重信息、心率、血压等数据进行监测和收集。
定位、追踪	低功耗设备可以与定位结合 ^[15] ，用于老人、儿童或者医院病人的监护，当发生走失时进行定位和追踪。更舒适的材质可以优化佩戴体验，同时无源超低功耗的特征能够极大的延长使用时间。
便携支付	与个人信息绑定，能够用于进行乘坐公交、地铁、购物等的便携支付。

● 智能可穿戴场景的典型需求：

终端需求：	<p>低功耗物联网终端形态为电子标签，可集成存储器用于数据存取或集成传感器用于传感信息采集。从穿戴角度考虑，应该具备小尺寸、免电池、防水性、灵活可折叠的外形。</p> <p>标签功耗：无源标签，不涉及更换电池等相关维护问题；</p> <p>标签类型：纸质标签和抗金属标签，支持清洗、具备灵活可折叠的外形；</p> <p>标签体积：极小体积，便于穿戴；</p> <p>通信距离：能够支持数十米范围的通信；使用智能终端作为中继：1~2m 的通信距离；</p> <p>业务连续性要求：满足周期性的传输需求，业务周期为数秒至数分钟；</p> <p>连接数：支持数十到数百的设备连接。</p>
网络需求：	<p>灵活部署：对于可穿戴场景，由于使用者在大多使用场景同时携带可穿戴设备以及传统智能终端，因此可以考虑使用智能终端作为中继设备或网关设备用于收集和传输可穿戴设备采集的数据；或者与基站直连；</p> <p>网络安全：基于授权的标签读取，保护隐私和数据安全；</p> <p>激励信号：将用户携带的智能设备作为无源终端的能量激励信号，无需额外的激励信号，简化网络布局。</p>

2.5

医疗健康

医疗健康领域涉及病患信息管理、健康数据监测和管理、医疗急救管理、药品存储、血液信息管理、药品制剂防误、医疗器械与药品追溯、信息共享互联等方方面面。在就医过程中，需要确保病人使用正确的药物、正确的剂量、在正确的时间使用正确的用药方法，同时临床医疗过程中需要全程高质量的监控及管理。

低功耗物联网终端具有极低成本、极小体积、极低功耗（免电池）、柔性可折叠、可水洗等优良的特性，能够帮助医院实现对人的智能化医疗和对物的智能化管理工作，支持医院内部医疗信息、设备信息、药品信息、人员信息、管理信息的数字化采集、处理、存储、传输、共享等。此外，低功耗技术的优良特性使得体内通信、植入治疗等成为可能，业界在基于反向散射的体内通信上也有相关研究^{[16][17]}。

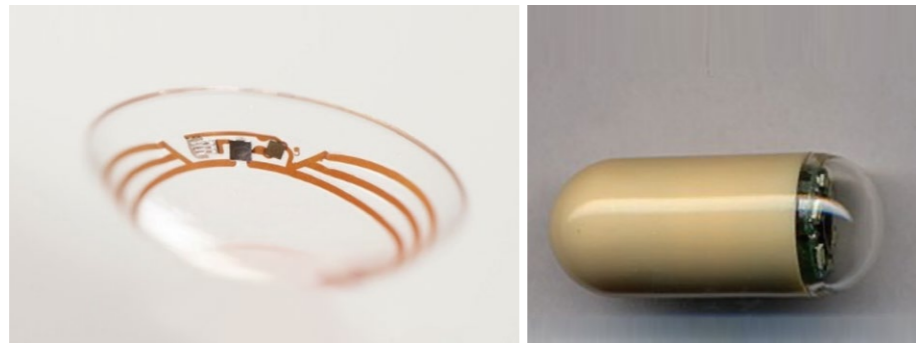


图 2.5-1 低功耗技术在医疗健康领域中的应用

● 医疗健康场景的典型应用：

特殊器械监测

低功耗终端的极小体积、极低功耗（免电池）特性，能够辅助特殊器械的监测，例如一些植入人体的设备，可以利用低功耗终端进行重要参数的监测，确保相关器械的正常运行，做到及时更换故障设备。由于是对人体内的器械进行监测，免电池的零功耗设备能够做到免维护，具有非常长的使用寿命，很好的完成器械监测的任务。

皮下/体内健康数据采集

低功耗设备与传感器集成，可以用于健康数据采集。例如谷歌智能隐形眼镜^[18]（Google Contact Lens），通过无线控制器采集射频能量，并将测得的血糖水平反向散射到无线控制器进行传输，从而免去糖尿病患者取血化验的痛苦；由于免电池、具有防水性、体积极小，甚至可以将低功耗设备植入人体，用于体内健康数据采集，例如胶囊内镜^[19]，通过低功耗设备与传感器结合，可以记录胃肠道内部图像，用于医学诊断，在整个胃肠道的特定位置进行活组织检查和释放药物，在实现更精细检查的同时，也能避免患者做胃镜的痛苦。

患者数据收集校验

极小体积的零功耗设备，可以嵌在腕带或者衣服中，用于数据收集和校验。患者诊断、取药、治疗等过程中，可以在不打扰患者的情况下进行数据的收集，实现高效就医管理。也可以帮助确保患者在适当的时间服用适当剂量的药物、校验输液、注射药物的品名、规格是否正确、已完成过的治疗事项以及是否会有不良反应等等。

药品、医疗器械的管理

零功耗设备体积极小，可以贴在器械、药品的瓶子上，用于药品和医疗器械的管理、追踪管制。大型医疗中心一般都拥有大批重要医用资产和医用物品存储基地，后勤人员每天都要根据订单从成千上万件物资中找出所需的物品。由于这些医用物品的外包装高度相似，用途差异很大，因此，医院后勤部门往往要耗费巨大的人力物力查找、核对这些物品。此外，在库房调整或腾挪过程中很可能发生医用物品误置事件，导致物品大范围损坏或者流通到市场后产生药品事故。通过粘贴零功耗标签，能够便于进行管理，提高药品和医疗器械的管理效率和可靠性。

● 医疗健康场景的典型需求：

终端需求：

零功耗物联网终端形态为简单标签或者与传感器集成。

标签功耗：无源标签，不涉及更换电池等相关维护问题；

通信时延：百毫秒至秒级别；

标签类型：纸质标签和抗金属标签，支持清洗、具备灵活可折叠的外形；

标签体积：极小体积；

通信距离：能够支持数米到数百米范围的通信；

连接数：支持数百到数千的设备连接。

网络需求：

灵活部署：网络设备可部署于室外杆站，室内同 DIS 站间距部署，提供基础覆盖；可按需部署补盲或扩展覆盖；单站的覆盖距离要求（室内 >30m 室外 >100m）；

网络安全：基于授权的标签读取，保护隐私和数据安全。

2.6

参考文献

- [1] Bharat P V, Sihna N, Pujitha K E. Tire pressure monitoring system using ambient backscatter technology containing RF harvesting circuitry[J]. International journal of advance engineering and research development, 2014, 1(6): 1-11.
- [2] Papp A, Wiesmeyr C, Litzemberger M, et al. A real-time algorithm for train position monitoring using optical time-domain reflectometry[C]//2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). IEEE, 2016: 89-93.
- [3] Akbar M B, Morys M M, Valenta C R, et al. Range improvement of backscatter radio systems at 5.8 GHz using tags with multiple antennas[C]//Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. IEEE, 2012: 1-2.
- [4] Liu W, Huang K, Zhou X, et al. Next generation backscatter communication: systems, techniques, and applications[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019(1): 1-11.
- [5] Maselli G, Piva M, Stankovic J A. Adaptive communication for battery-free devices in smart homes[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6977-6988.
- [6] J. J. Pomárico-Franquiz, Y. S. Shmaliy, Accurate self-localization in RFID tag information grids using FIR filtering. IEEE Trans. Ind. Informat. 10(2), 1317-1326 (2014)
- [7] A. Pantelopoulos and N. G. Bourbakis, "A survey on wearable sensorbased systems for health monitoring and prognosis," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev., vol. 40, no. 1, pp. 1-12, Jan. 2010.
- [8] E. Sazonov, Wearable Sensors: Fundamentals, Implementation and Applications. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2014.
- [9] O. D. Lara and M. A. Labrador, "A survey on human activity recognition using wearable sensors," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 15, no. 3, pp. 1192-1209, 3rd Quart., 2013.
- [10] D. Dakopoulos and N. G. Bourbakis, "Wearable obstacle avoidance electronic travel aids for blind: A survey," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev., vol. 40, no. 1, pp. 25-35, Jan. 2010.
- [11] X. Zhang, Z. Yang, W. Sun, Y. Liu, S. Tang, K. Xing, and X. Mao, "Incentives for mobile crowd sensing: A survey," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 18, no. 1, pp. 54-67, 1st Quart., 2016.
- [12] K. Hartman, Make: Wearable Electronics: Design, Prototype, and Wear Your Own Interactive Garments. Sebastopol, CA, USA: Maker Media, 2014.

- [13] R. Harle, "A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 15, no. 3, pp. 1281-1293, 3rd Quart., 2013.
- [14] Yetisen A K, Martinez - Hurtado J L, Ünal B, et al. Wearables in medicine [J]. Advanced Materials, 2018, 30(33): 1706910.
- [15] Wang K, Gu J F, Ren F, et al. A multitarget active backscattering 2-d positioning system with superresolution time series post-processing technique[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(5): 1751-1766.
- [16] Vasisht D, Zhang G, Abari O, et al. In-body backscatter communication and localization[C]//Proceedings of the 2018 Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. 2018: 132-146.
- [17] Voigt T, Rohner C, Yan W, et al. Towards secure backscatter-based in-body sensor networks[C]//Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. 2020: 741-742.
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Google_Contact_Lens
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Capsule_endoscopy

零功耗通信 技术原理

零功耗设备主要结合射频能量采集技术、反向散射技术和低功耗运算技术，以实现设备节点不携带供电电池的优势。如图 3-1 所示，终端通过能量采集方式获得驱动自身工作的能量。采用低功耗计算和反向散射技术实现信号的解调和调制。

其中，射频能量采集的核心是将射频能量转化为直流，能量可以存储在储能单元（如电容）里，也可以采集后直接用于驱动逻辑电路、数字芯片或传感器器件等，完成对反向散射信号的调制和发射以及传感信息的采集与处理等功能。

03

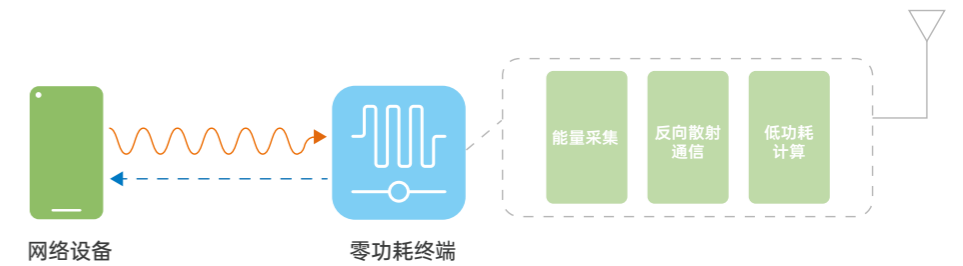


图 3-1 零功耗通信基本原理图

在基于反向散射的零功耗通信系统中，反向散射发射机调制和反射接收到的 RF（Radio Frequency，射频）信号以传输数据，而不是自己生成 RF 信号。该技术已在实践生产中得到了广泛的应用，例如 RFID（Radio Frequency Identification，射频识别技术）^[1]、跟踪设备、远程开关、医疗遥测和低成本传感器网络等。

3.1 射频能量 采集

射频能量采集的基本原理是通过电磁感应实现对空间电磁波能量的采集。射频能量采集的本质就是将射频能量转化为直流电压（RF-DC）。应用于零功耗通信中，射频采集能量的核心需求是将采集到的能量有效地用于对负载电路的驱动（低功耗运算、传感器等），以实现免电池的通信。

随着技术的发展，射频能量采集的工艺和效率都有所提升，但是仍面临几个方面的挑战：

- 1) 由于电磁波多径传播效应、能量在空间和时间上不均匀分布以及各种干扰，无线环境中能够采集到的射频能量密度极低（小于 $10\text{nW}/\text{cm}^2$ ），真正能够有效采集的射频能量需要满足一定的输入功率。
- 2) 为驱动逻辑电路或芯片等运算单元，一般采集到能量后转化的直流电压，需要满足最低输出电压要求，并转化为稳定的直流电压。如何提升能量采集效率，特别是在低输入电压的条件下，采集到的能量仍能驱动电路是需要着重解决的问题。
- 3) 采集或储存的能量如何合理管理，用于驱动终端工作。

低功率下 RF 能量采集转化为 DC 能量的效率是零功耗设备设计的挑战。目前很多实验研究表明，一般系统输入功率（input power）低于 -30dBm 的射频信号很难有效的采集并整流为可用的直流电压。而不同的输入功率和能量采集电路设计下的射频能量转化效率有所差别^[2]，如 -20dBm 的低输入功率下的能量转化效率往往都不足 10%， -1dBm 左右的输入功率下转化效率接近 50%。而基于目前的工艺实现驱动低功耗计算电路的功率需要 $10\mu\text{w}$ 左右，为满足最简单的低功耗的计算和反向散射通信需求，在低输入功率的情况下提升能量采集效率是零功耗通信系统研发中最重要的工作之一。

表 3.1-1 输入功率与能量转换效率的关系图 [2]

能量转换效率(%)	输入功率(dBm)	中心频率(MHz)	整流单元
10	-22.6	906	0.25- μ m CMOS 转换器
11	-14	915	90- μ m CMOS 转换器
12.8	-19.5	900	0.18- μ m CMOS, CoSi ₂ -Si Schottky
13	-14.7	900	0.35- μ m CMOS 转换器
16.4	-9	963	0.35- μ m CMOS 转换器
18	-19	869	0.5- μ m CMOS 转换器
26.5	-11.1	900	0.18- μ m CMOS 转换器
36.6	-6	963	0.35- μ m CMOS 转换器
47	-8	915	0.18- μ m CMOS 转换器
49	-1	900	Skyworks SMS7630 Si Schottky

射频能量采集电路的研究经历了很多年的发展探索，提升效率一直是电路设计中最关注的问题。从射频能量到直流电源的转换，不同电路设计和工艺对效率的影响较大。整流器的恰当使用可以让射频能量更好地转化为稳定的直流电压 (RF-DC)，而一般输出电压较低时还需要进一步地直流转换升压 (DC-DC)，以产生可供驱动数字逻辑电路的电压水平。电压调节器和电压监控器也是常用到帮助升压和稳压的器件，常使用级联二极管 - 电容器的方式将电压升至可用水平。基于二极管的整流电路 (diode-based rectifier circuits) 是最基本的能量采集方法。采用分离式器件和 CMOS 工艺的设备对射频输入功率的要求差别很大。CMOS 工艺的定制电子设备与微控制器或其他外部数字设备相比，往往效率更高、工作电压更低，所以输入信号的能量可以做到 -20dBm 甚至更好。

典型的能量采集电路包括：半波整流器 (如图 3.1-1 所示)、单并联整流天线、单级电压倍增器 (如图 3.1-2 所示)、Cockcroft-Walton/Greinacher 电荷泵、Dickson 电荷泵和改进的 Cockcroft-walton/greinacher 电荷泵。

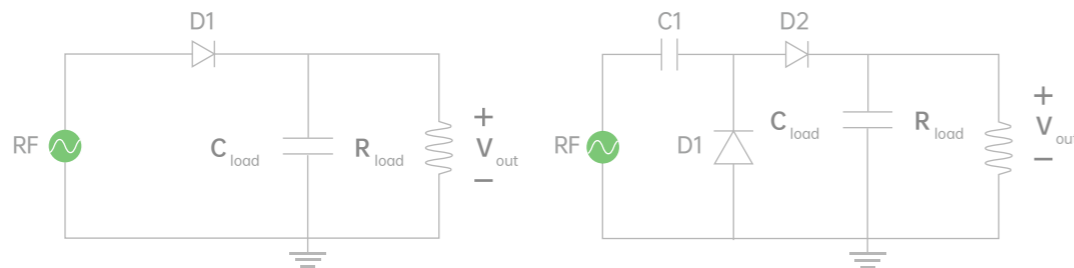


图 3.1-1 能量采集电路—半波整流器

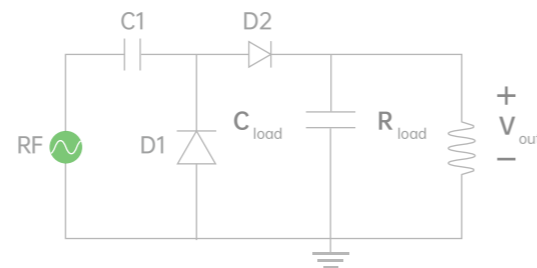


图 3.1-2 能量采集电路—单级电压倍增器

3.2 反向散射

反向散射技术是一种无需有源发射机而实现信号传输与编码的无线技术。类似于雷达原理，电磁波在到达物体表面时有一部分会被反射，被反射信号的强弱取决于此物体的形状、材质与距离，从雷达的角度讲每个物体有其雷达截面 (RCS, Radar Cross-Section)^[3]，标签 (tag) 通过改变其 RCS 实现对反射信号的调制。反向散射发射机调制接收到的 RF 信号以传输数据，而无须自己生成 RF 信号。

反向散射技术 (Back Scattering) 于 1948 年由 Stockman 首次提出^[4]。但由于如下一些限制，传统的反向散射通信不能广泛应用于数据密集型无线通信系统：

- 1) 首先，传统的反向散射通信需要将反向散射发射器放置在其射频源附近，从而限制了设备的使用和覆盖区域。
- 2) 其次，在传统的反向散射通信中，反向散射接收器和射频发射源位于同一设备中，即阅读器 (reader)，这会导致接收和发射天线之间的自干扰，从而降低通信性能。
- 3) 此外，传统的反向散射通信系统是被动操作的，即反向散射发射机仅在反向散射接收机询问时才传输数据。

最近，环境反向散射通信 (Ambient Backscatter Communication, AmBC) [5] 已经成为使能低功耗通信的一项更有前途的技术，它可以有效地解决传统反向散射通信系统中的上述局限性使得 AmBC 技术在实际应用中得到更广泛采用。

环境反向散射通信系统一般包括三个部分：环境射频源 (ambient radio-frequency (RF) source)、反向散射设备 (backscatter device (BD)) 和读写器 (reader)。在环境反向散射通信系统中，反向散射设备可以通过利用从环境 RF 源 (例如电视塔、FM 塔、蜂窝基站和 Wi-Fi 接入点 (AP)) 广播的无线信号来相互通信。进一步地，通过分离载波发射器和反向散射接收器，反向散射设备的 RF 组件数量被最小化，并且设备可以主动运行，即反向散射发射器可以在从 RF 源采集足够能量时无需接收机启动即可发送数据。

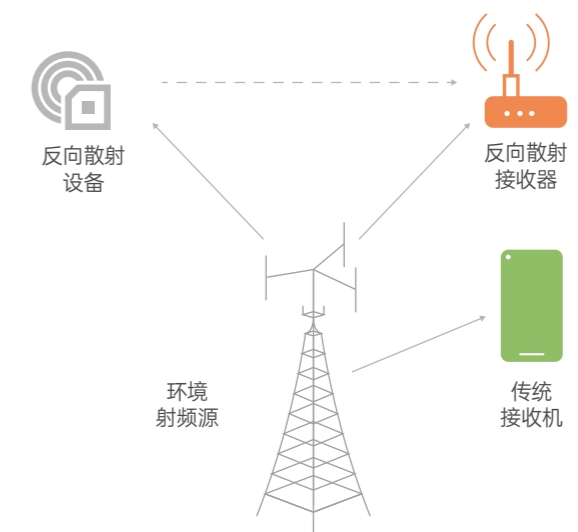


图 3.2-1 AmBC 系统示意图 [6]

零功耗设备（如反向散射标签）接收读写器发送的载波信号，通过 RF 能量采集模块采集能量，用于低功耗处理模块的供电。获取能量后，反向散射标签驱动相应电路对来波信号进行调制，并进行反向散射。

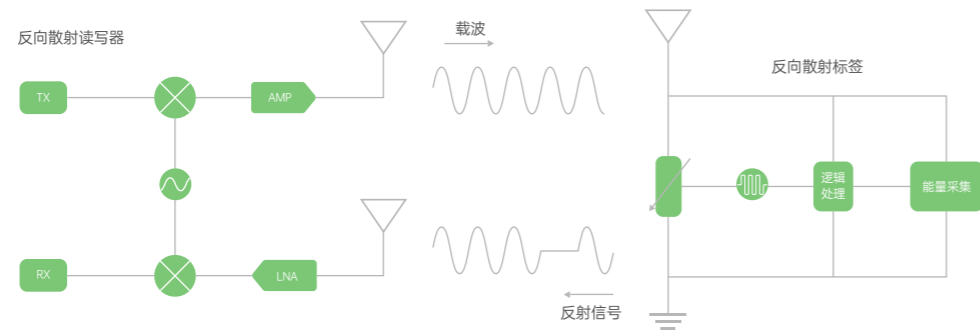


图 3.2-2 反向散射通信原理图

在反向散射通信系统中，负载调制是电子标签经常使用的传输数据方法。负载调制通过对电子标签振荡回路的电参数（如电阻或电容）按照数据流的节拍进行调节，使电子标签阻抗的大小和相位随之改变，从而完成调制过程。

负载调制技术主要有电阻负载调制和电容负载调制两种方式。在电阻负载调制中，负载并联一个电阻，称为负载调制电阻，该电阻按数据流的时钟接通和断开，开关 S 的通断由二进制数据编码控制。在电容负载调制中，负载并联一个电容，取代了由二进制数据编码控制的负载调制电阻。

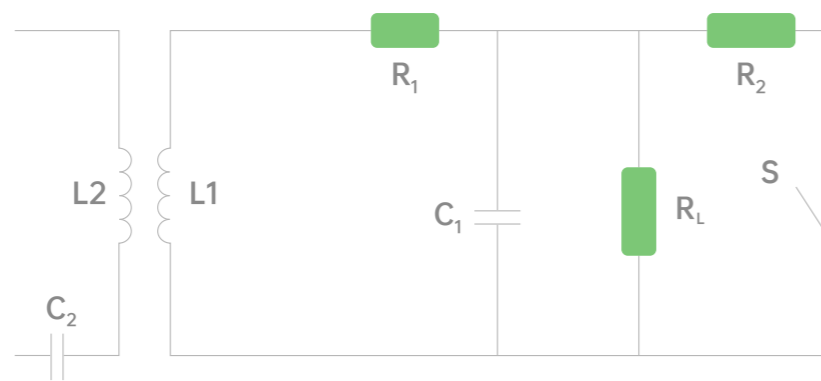


图 3.2-3 电阻负载调制的电路原理图

以电阻调制实现 ASK（Amplitude Shift Keying，振幅键控）调制的过程为例，终端通过切换负载反射系数可以在吸收和反射状态之间转换。在吸收状态，即终端实现了阻抗匹配，射频信号完全被终端吸收，使得终端不向空间辐射射频信号，接收侧接收到的信号将是低电平信号，该状态可代表位 '0'。相反，在反射状态下，即终端通过切换电路阻抗，使得电路阻抗不匹配，部分 RF 信号被反射，接收侧接收到的信号将是高电平信号，因此该状态表示位 "1"，ASK 调制信号过程如图 3.2-4 所示。可见，终端以简易的阻抗切换的方式即可实现对入射射频信号的 ASK 调制，从而实现与接收机的通信。从接收机角度，ASK 信号可以通过低复杂度包络检测和比较器实现信号检测。

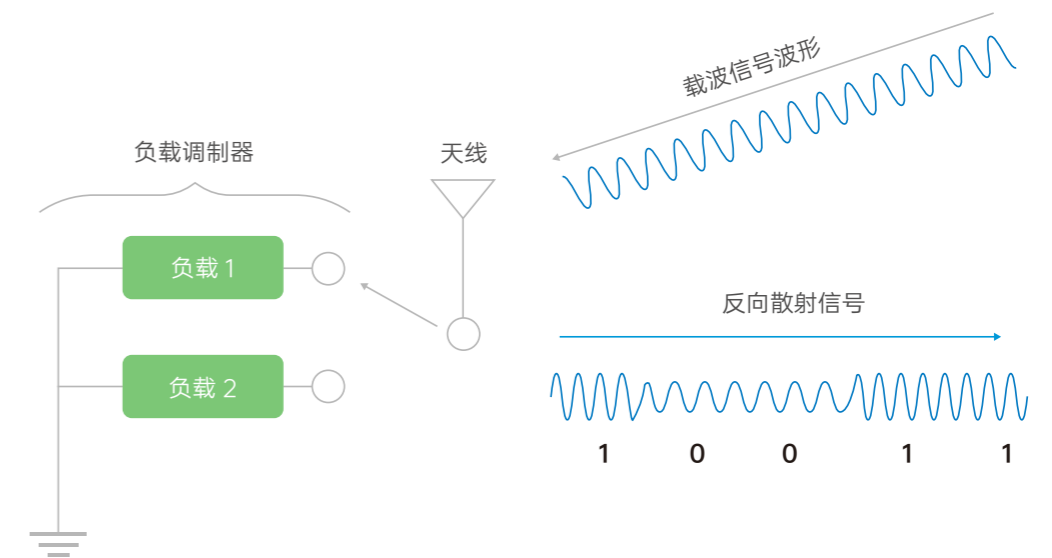


图 3.2-4 ASK 调制示意图

类似地，终端也可以通过调整电路的电容，实现对电路调谐频率的改变，使得终端辐射的信号频率随着电容的变化而变化，从而实现 FSK（Frequency Shift Keying，频移键控）调制。尽管与 ASK 相比，FSK 需要额外的残余频偏估计处理，但它在 BER（Bit error ratio，误码率）性能方面优于 ASK。此外，FSK 可实现多个设备频分使用。

因此，反向散射通信巧妙利用阻抗调制实现了极低复杂度的信号调制和传输。相对而言，反向散射终端无需复杂的射频结构，如 PA（Power Amplifier，功率放大器）、高精度晶振、双工器以及高精度滤波器。也不需要复杂的基带处理，例如仅需要对信号进行包络检测而不需要复杂信道估计和均衡运算。因此，反射散射技术使得简易的终端实现成为可能。

3.3

低功耗计算

零功耗通信技术的主要特点是通过调制来波信号实现反向散射通信，同时它还可以通过能量采集获得能量以驱动数字逻辑电路或芯片（如 MCU（Microcontroller Unit，微控制单元）或传感器芯片），实现对信号的编码，加密或简单计算等功能。

从 3.1 节中可以看到，射频能量的转化效率往往不足 10%，决定了驱动数字逻辑电路或芯片用于计算的功耗要求不能太高。如下图示出 1 微焦耳能量可支持计算的次数。虽然随着工艺的改进和设计的优化有所提高，每微焦耳能量可适用于计算的次数增多，但是仍不能满足复杂的计算。

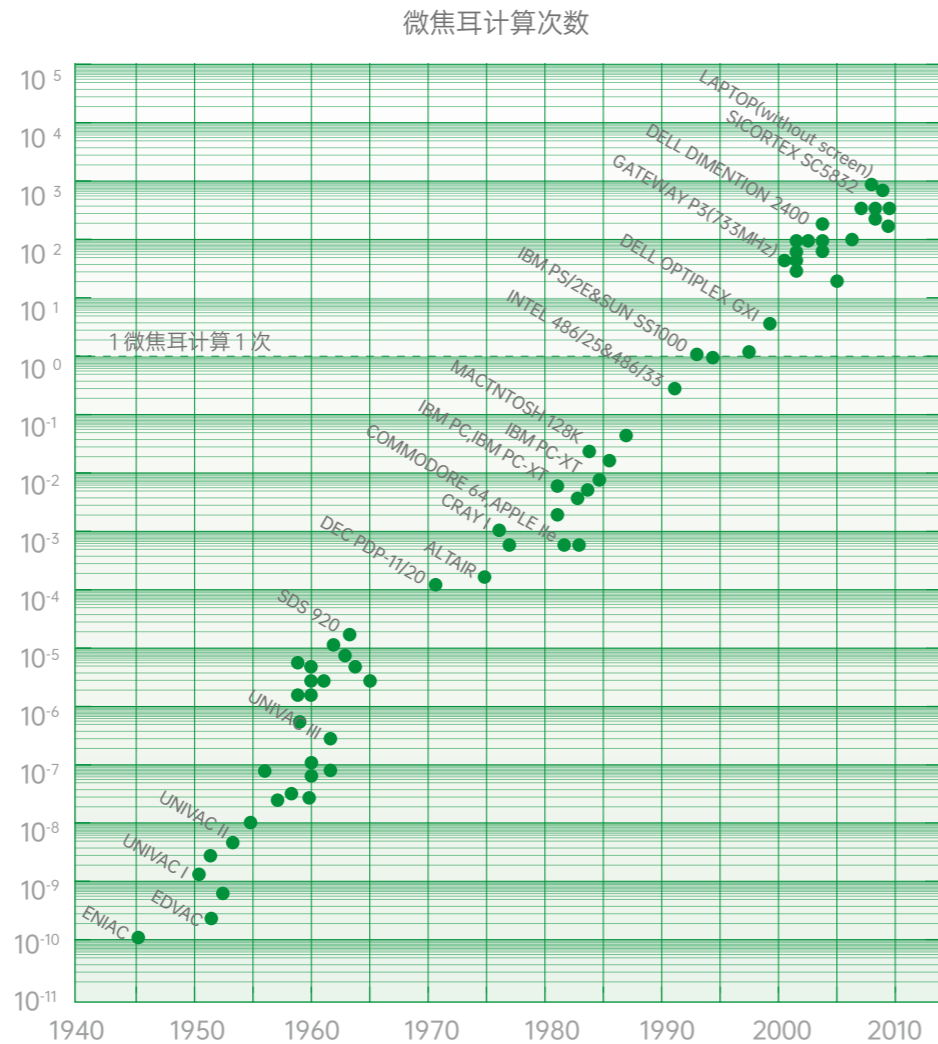


图 3.3-1 计算能力向低功耗方向发展^[7]

- 针对零功耗通信系统，可从以下几个方面考虑实现低功耗计算：

低功耗接收机

零功耗设备从功能需求上可以分为两类，一类主要功能是类似 beacon 的广播发射，为降低结构复杂度和降低功耗，可以不实现接收机功能；另一类是考虑设计简单低功耗的接收机，例如采用比较器（如下图 3.3-2 所示）实现简单的 ASK/ 解码功能。

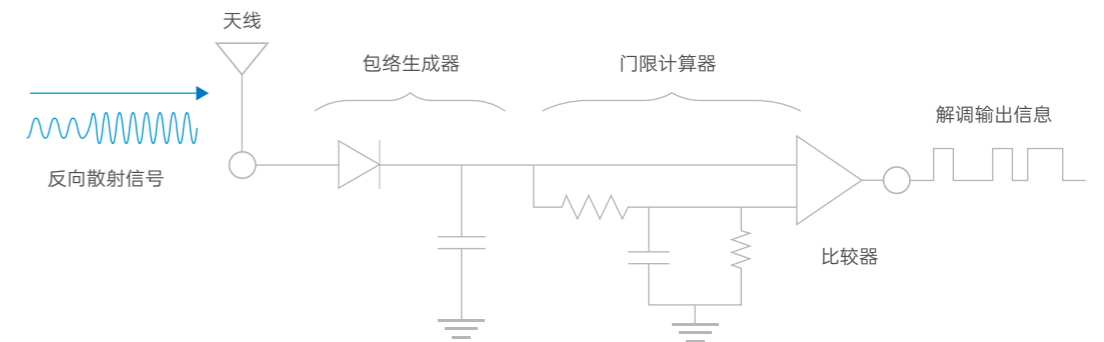


图 3.3-2 包络检测解调流程图

低功耗芯片

低功耗的芯片一般包括 MCU 和传感器等。驱动数字处理芯片的电路一般有最低的输入电压要求。这就要求采集到的能量满足一定的电压要求。往往采集到的能量，并不能完全用于反向散射和低功耗计算。目前比较成熟的用于低功耗计算的 MCU 一般的功耗在 μW 级别。选择低功耗的 MCU 和传感器芯片，实现低压驱动的电路设计，是实现低功耗计算的关键和挑战。

简单编码和调制

在第 3.2 节中提到了反向散射常采用的 ASK, FSK 的方式，可由简单的电路设计即可实现。对于编码技术，反向不归零、曼彻斯特编码是反向散射系统中最常用的两种编码方式。除外，还有单极性归零（Unipolar RZ）编码、差动双相（DBP）编码、米勒（Miller）编码，FMO 编码等简单易于实现的编码方式也比较适合于反向散射通信。采用简单的编码和调制，也可在很大程度降低零功耗通信的计算功耗。

3.4

参考文献

- [1] Dobkin D. The rf in RFID: uhf RFID in practice[M]. Newnes, 2012.
- [2] Valenta C R, Durgin G D. Harvesting wireless power: Survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems[J]. IEEE Microwave Magazine, 2014, 15(4): 108-120.
- [3] Nikitin P V, Rao K V S, Martinez R D. Differential RCS of RFID tag[J]. Electronics Letters, 2007, 43(8): 431-432.
- [4] H. Stockman, "Communication by means of reflected power", Proc. IRE, vol. 36, no. 10, pp. 1196-1204, Oct. 1948.
- [5] Van Huynh N, Hoang D T, Lu X, et al. Ambient backscatter communications: A contemporary survey[J]. IEEE Communications surveys & tutorials, 2018, 20(4): 2889-2922.
- [6] Lu X, Niyato D, Jiang H, et al. Ambient backscatter assisted wireless powered communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 170-177.
- [7] Radio-Frequency Rectifier for Electromagnetic Energy Harvesting: Development Path and Future Outlook, Simon Hemour; Ke Wu, Proceedings of the IEEE;2014;102;11;10.1109/JPROC.2014.2358691.

零功耗通信系统总体设计

针对不同的应用场景，零功耗通信可采用不同的工作频段。针对不同的通信需求，可以采用不同的网络部署形态。零功耗通信的部署也应考虑与现有通信系统的共存。

04

对表 4.1-1 进行分析，可以得到如下结论：

1) 在零功耗工作频段为 700MHz 时，考虑基本假设，即网络节点下行信号发送功率为 36dBm，天线增益为 8dBi，零功耗设备的接收机灵敏度为 -20dBm（对无线供能信号强度的要求），天线增益为 2dBi。通过计算可以得到最大前向链路的通信距离（即通过对网络节点的下行信号进行能量采集以驱动零功耗设备工作的最大距离）为 68m（如 case2 所示）；

2) 在其他条件相同的情况下，使用更低的频段能够增大覆盖范围。如 case1 和 case2 所示，使用 2.4GHz 的工作频段，最大前向链路通信距离为 20m，当零功耗终端接收到的信号强度刚好可以满足工作（接收信号强度为 -20dBm）时，最大后向链路通信距离为 176m；而使用 700MHz 的工作频段时，最大前向链路通信距离增大到 68m，最大后向链路通信距离增大到 606m；

3) 采用储能单元，降低零功耗设备对接收信号强度要求的阈值，可以增加最大前向链路的通信距离。如 case2 和 case3 所示，当工作频段、网络节点天线发射功率、天线增益等条件一致时，具有储能功能的零功耗设备的接收机灵敏度为 -30dBm，此时最大前向链路通信距离可以从 68m 增加到 215m，扩展了约 3 倍；

4) 使用高增益的天线，能够有效提升前向链路的覆盖。如 case3 和 case5 所示，使用高增益的接收天线（case5 使用 12dBi 的接收天线增益），最大前向链路通信距离可以从 215m 增加到 680m，扩展了约 3 倍；

5) 随着零功耗设备的接收机灵敏度进一步提高，前向链路的覆盖可以得到提升，但是后向链路（即从零功耗终端到网络节点的上行链路）的通信距离逐渐降低，如 case2 和 case6 所示，接收机灵敏度从 -20dBm 提高到 -40dBm（此情况下终端是有源零功耗终端，终端不再受制于供能信号强度的约束，而是取决于下行接收机灵敏度），最大前向链路通信距离从 68m 增加到 680m，扩展了约 9 倍，但最大后向链路通信距离也缩小为约 1/10。这是由于零功耗设备接收到的信号，在进行反向散射传输时，会进一步发生损耗，导致上行信号（即零功耗终端反向散射发送给网络节点的信号）的信号强度过低；

6) 在具备高灵敏度接收机的零功耗设备中集成低噪声放大器（Low Noise Amplifier, LNA），能够有效弥补后向链路的通信距离，如 case7 相比 case6 而言，集成了 LNA，能够使得最大后向链路通信距离从 60m 增加到 600m。

应注意，在表 4.1-1 中的最大后向链路通信距离，是考虑零功耗设备接收机灵敏度阈值处的情况，即零功耗设备接收到的信号刚好可以通过能量采集驱动设备工作时，此时反向散射通信的最大距离。当接收信号的信号强度增大时，能够支持的最大后向链路的通信距离是大于表 4.1-1 中计算的值的。

4.2 零功耗通信的系统框架

4.2.1 基于蜂窝的零功耗通信系统

零功耗通信系统主要包括三种类型：基于蜂窝的、基于侧行通信的、和基于蜂窝与侧行通信混合的零功耗通信系统。

基于蜂窝的零功耗通信系统可以支持零功耗终端的大规模部署和集中控制，旨在解决点对点、点对多点通信需求的传统技术（如 RFID）的通信距离短、部署成本高、系统效率低的问题。得益于蜂窝网络在覆盖和资源利用上的优势，基于蜂窝的零功耗通信系统可以大范围、集中式的管理网络中的零功耗终端，可以极大的提高系统效率，节省部署成本。因此，基于蜂窝的零功耗通信系统特别适合于某些应用场景。在工业传感器网络场景中，终端的部署环境严苛、数量巨大、使用传统有源终端部署和维护成本高。基于蜂窝的零功耗通信可以远程、集中式的管理零功耗终端，进行控制和信息交互。在物流和仓储场景中，大量货物需要进行识别、跟踪、盘点等。相比于现有的基于二维码或 RFID 的方式，基于蜂窝的零功耗通信系统可以克服现有的光学识别、短距识别的低效和低可靠性，极大地简化识别过程，节省了人力和设备的投入，降低了成本。在智慧农牧业场景中，通过蜂窝网络可以在农场内管理携带零功耗终端的牲畜，包括统计、定位、追踪等。其他基于蜂窝的零功耗通信系统适用的场景还包括可穿戴、医疗、交通等。

● 如图 4.2-1 所示，基于蜂窝的零功耗通信系统可以包括以下几种通信方式：

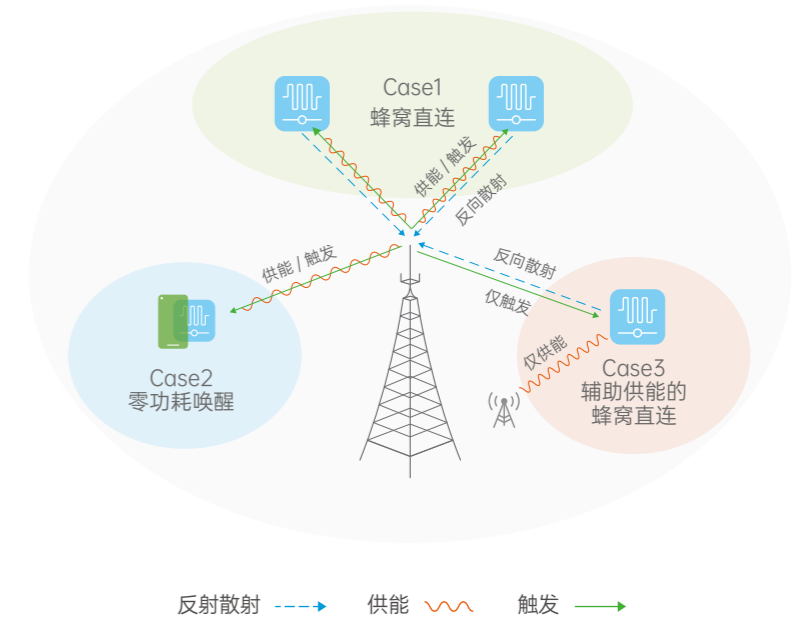


图 4.2-1 基于蜂窝的零功耗通信系统

Case1 蜂窝直连

基站和零功耗终端直接进行通信。基站向零功耗终端提供无线供能信号和触发信号。无线供能信号用于向零功耗终端提供能量, 触发信号可以携带发给零功耗终端的控制信息; 零功耗终端通过反向散射的方式将信息传输给基站。

Case2 零功耗唤醒

鉴于零功耗终端的极低功耗的优良特性, 零功耗终端可以与传统终端进行结合并承担和完成一些低功耗操作从而辅助实现传统终端的节能, 例如零功耗终端可以作为传统终端唤醒接收机 (WUR, Wake-Up Radio)。其中, 基站在需要与传统终端通信时, 首先发送唤醒信号, 零功耗终端在检测到此唤醒信号时唤醒传统终端。对于传统终端来说 (特别是大多数时间处于 RRC idle/RRC inactive 的 IoT 终端), 通过这种方式可以节省传统的监听寻呼等操作带来的功耗, 从而可以实现显著的节电效果。

Case3 辅助供能的 蜂窝直连

零功耗终端不仅可以从与其通信的基站获得无线供能, 也可以从第三方设备获得供能。通过无线供能的方式获得能量, 供能信号到达终端的强度需要满足一定的门限, 如 -20dBm 或 -30dBm (终端具备储能能力时), 这就造成了在供能信号发射功率受限的情况下, 网络设备发射的供能信号覆盖的范围较小, 一般在几十米到 100 米的范围。从蜂窝小区的覆盖来看, 无线供能的覆盖范围远小于信息传输信号的覆盖范围。因此, 无线供能信号的覆盖范围是瓶颈。通过更多的网络节点实现无线供能可以显著提高覆盖范围, 从而尽可能提升零功耗通信的小区覆盖。为此, 可以使用网络中的其他节点用于无线供能, 潜在可以使用的供能节点包括网络中的智能手机、Relay (中继) 节点、CPE 等。在必要的情况下, 也可以部署专用供能节点。这些节点发送的传统无线通信信号 (如同步信号、广播信号、数据信道等) 可以用于为零功耗终端提供无线供能, 或者, 基于合理的调度方式, 这些供能节点也可以发送专用的无线供能信号。基站和零功耗终端之间通过下行的触发信息和上行的反向散射进行信息的交互。

4.2.2 基于侧行通信的 零功耗通信系统

基于侧行通信 (Sidelink) 的零功耗通信可以实现零功耗终端与其他类型终端 (如智能手机、CPE 或其他 IoT 终端设备) 之间的侧行通信。终端之间的侧行通信可以不依赖于蜂窝网络而进行直连通信。基于侧行通信的零功耗通信也具有广泛的应用场景, 特别适合低成本短距通信需求的场景。例如在智能家居场景中, 智能终端与零功耗终端之间的侧行链路直连, 可以实现寻物、家庭资产管理、环境监测、智能控制等功能。在智能可穿戴场景中, 零功耗侧行通信也可以实现对零功耗可穿戴设备数据的信息读取或智能控制。

- 基于侧行通信的零功耗通信系统可以包括以下几种通信方式:

Case1 Sidelink直连

零功耗终端与智能设备直接进行通信。智能设备向零功耗终端发送供能信号和触发信号。零功耗终端通过反向散射的方式将信息传输给智能设备, 实现侧行通信。其中, 智能设备可以是手机或者控制节点 (如 CPE), 对应基于侧行通信的零功耗通信系统框图中的 Case1-1 和 Case1-2

Case2 辅助供能的 Sidelink直连

为了实现零功耗终端与智能设备的 Sidelink 直连, 零功耗终端的无线供能信号可以不直接来源于智能设备, 而是来源于第三方设备。如图中 Case2 所示, 零功耗终端与手机的 Sidelink 直连所需要的无线供能信号来源于控制节点 (如图中 CPE), 零功耗终端接收智能设备发送的触发信号并通过反向散射的方式将信息传输给智能设备。

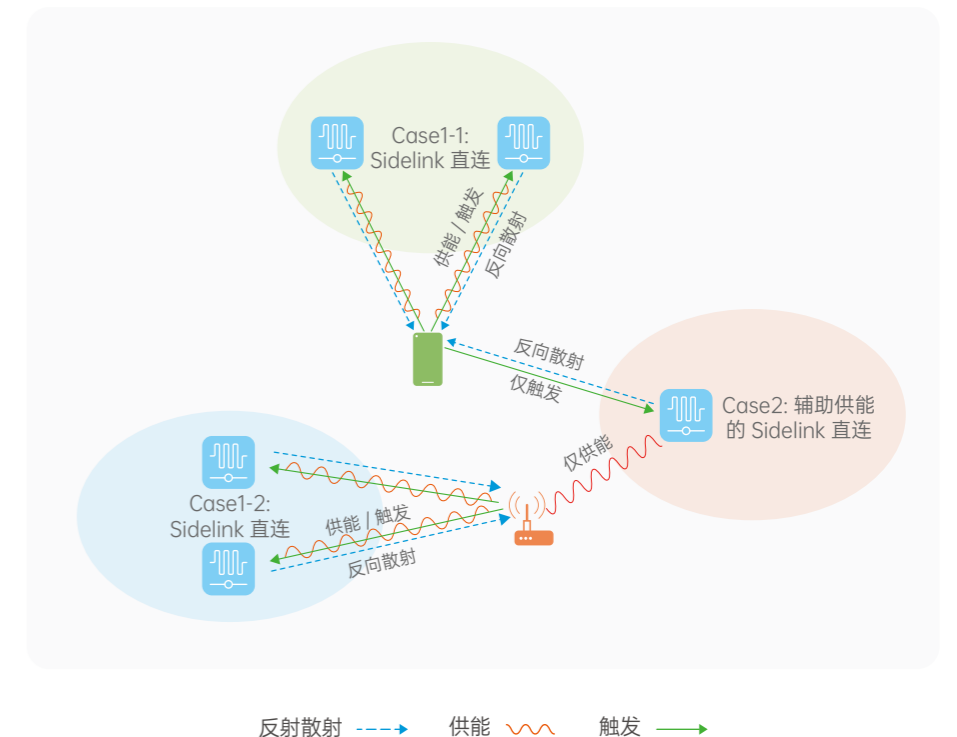


图 4.2-2 基于侧行通信的零功耗通信系统

4.2.3 基于蜂窝和侧行通信混合的零功耗通信系统

在零功耗系统的实际部署中，上述基于蜂窝和侧行通信的零功耗通信系统也可灵活共存或组合使用，从而匹配更多的潜在应用场景。基于蜂窝和侧行通信的混合零功耗通信系统的系统框图如下所示。其中可以包括多种通信方式，例如图 4.2-3 所示：

Case1 智能终端辅助供能触发的零功耗通信 零功耗终端由网络中的智能终端供能和触发，零功耗终端的反向散射信号由基站接收。其中，智能终端供能和触发供能和触发操作可以由基站通过空口信令进行控制。

Case2 网络供能/触发的零功耗Sidelink通信 基站向零功耗终端提供无线供能和发送触发信令，零功耗终端的反向散射信号由智能终端接收，完成 Sidelink 通信。进一步地，智能终端向基站发送空口数据。

Case3 智能终端辅助供能的零功耗通信 网络中的智能终端为零功耗终端提供辅助供能，基站发送触发信息给零功耗终端，并接收零功耗终端的反向散射信号。智能终端为零功耗终端进行辅助供能过程可由基站通过空口信令控制。

Case4 网络控制的零功耗 Sidelink通信 智能终端接收网络的空口信令和数据。智能终端为零功耗终端供能和触发，并接收零功耗终端的反向散射信号，完成 Sidelink 通信。

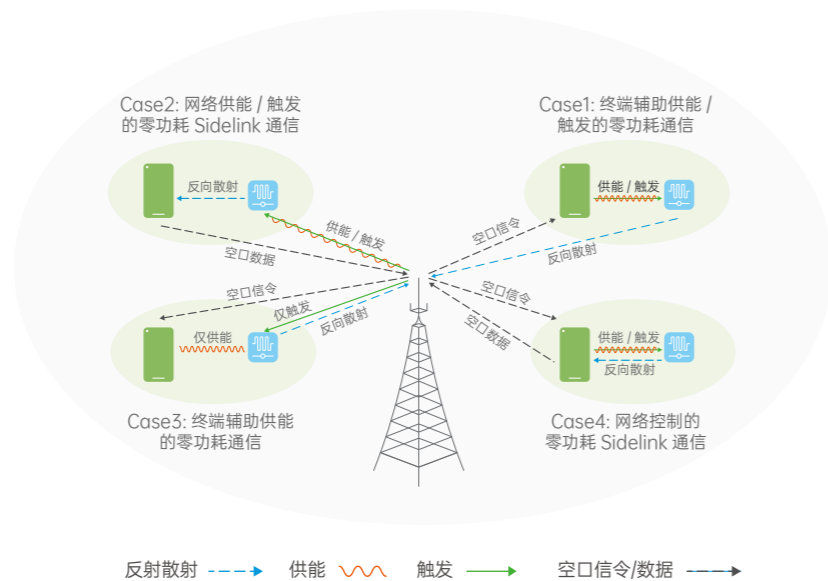


图 4.2-3 基于蜂窝和侧行通信的混合零功耗通信系统

由本节讨论可见，不同的应用场景下基于实际的需求可以考虑不同的零功耗通信方式。我们需要进一步研究各种部署场景和通信方式的特点，从而最大发挥零功耗通信系统的应用潜能。

4.3 零功耗通信与传统通信的共存

参考窄带物联网的系统共存方式，NB-IoT/eMTC 与 NR 也可能有三种系统共存的方式：带内部署、保护带部署和独立部署模式。由于传统 4G/5G 终端的接收机灵敏度相对零功耗终端要低很多，研究零功耗通信系统与现有 4G/5G 蜂窝通信网络的共存干扰问题十分必要。

由前述零功耗设备能量采集和反向散射等特性可以发现，零功耗通信系统与现有 4G/5G 系统共存研究，最重要地是分析共存对二者接收机性能的影响，包括带内灵敏度 (ICS, in channel sensitivity)、最大输入功率 (Maximum input level)、邻带选择性 (ACS, Adjacent channel selectivity)、阻塞 (In-band, out-of-band and narrow-band blocking) 以及杂散 (Spurious response) 等指标要求。

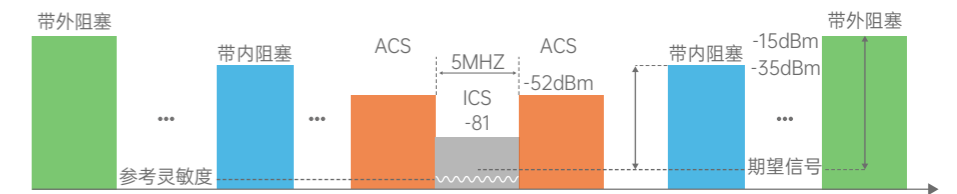


图 4.3-1 基本接收机射频指标要求示意图

不论零功耗设备采用带内部署，保护带部署或独立部署模式，向零功耗终端发送的下行信号或零功耗终端的反射信号，都可能会落到 4G/5G 终端的邻带或者带内，形成邻带干扰或带内阻塞。此时干扰信号应满足 4G/5G 终端的接收机射频指标要求，否则将降低接收机性能，导致接收机灵敏度的回退 (MSD)。

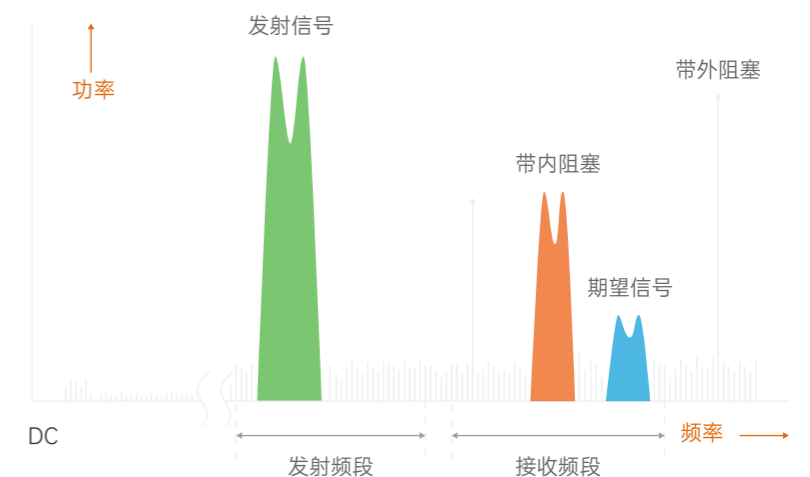


图 4.3-2 接收机阻塞示意图

特别地，若采用带内模式，首先需要避免系统间的同频干扰，也即带内干扰。目前的研究发现，零功耗终端采集无线能量的入射功率（input power）一般至少需要大于 -20dBm，能量源的发射信号和反向散射的信号，是否会对同频段上的其他 4G/5G 终端造成同频干扰需要评估。例如，从无线供能的角度，网络需要发送较强的信号以使得零功耗终端的接收功率在 -20dBm 以上，如此强的信号可能导致在使用带内部署时，可能会影响现有终端的最大输入功率，如现有协议要求的最大输入功率为 -15dBm。因此需要评估对现有终端的影响以及如何规避相关影响。

如果零功耗设备与 4G/5G 终端共设备部署，那么共存问题会更加复杂，还需要考虑谐波和互调等信号带来的额外干扰，对二者接收机性能的影响。此外，还有与其他 WiFi、蓝牙、北斗 GPS 等系统的共存问题，也需要更根据实际工作频段和模式具体分析。如果零功耗设备以独立设备的形式存在，那么上述共存问题会简单很多，只需要满足上述发射机 / 接收机邻带和带外杂散辐射的射频指标要求即可。

4.4

参考文献

- [1] Ayers J, Mayaram K, Fiez T S. An ultralow-power receiver for wireless sensor networks[J]. IEEE Journal of solid-state circuits, 2010, 45(9): 1759-1769.
- [2] Moody J, Bassirian P, Roy A, et al. A- 76dBm 7.4 nW wakeup radio with automatic offset compensation[C]//2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC). IEEE, 2018: 452-454.
- [3] Salazar C, Kaiser A, Cathelin A, et al. 13.5 A- 97dBm-sensitivity interferer-resilient 2.4 GHz wake-up receiver using dual-IF multi-N-Path architecture in 65nm CMOS[C]//2015 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC) Digest of Technical Papers. IEEE, 2015: 1-3.
- [4] Durante M S, Mahlknecht S. An ultra low power wakeup receiver for wireless sensor nodes[C]//2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications. IEEE, 2009: 167-170.
- [5] Magno M, Benini L. An ultra low power high sensitivity wake-up radio receiver with addressing capability[C]//2014 IEEE 10th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). IEEE, 2014: 92-99.
- [6] 3GPP TR 38.104 v2.0.0 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR Base Station (BS) radio transmission and reception. (Release 16), 2020-06, pp. 159,2020.

零功耗通信关键技术和挑战

零功耗通信利用终端获得的外部能源驱动终端进行工作。因此为了支持零功耗通信，网络设备首先需要为零功耗终端提供无线供能功能，我们在 5.1 节将分析支撑零功耗通信时无线供能的需求和挑战。进一步地，为了适配零功耗终端极简的硬件结构和极低的处理复杂度，我们将在 5.2 节分析零功耗终端数据传输的挑战，包括潜在的调制方式、编码方式、多址方式和资源分配与时钟同步等方面。对无线供能的依赖以及终端极简的软硬件结构也要求支持轻量化的协议栈和轻量化的安全机制，这些将在 5.3、5.4 节分别阐述。最后，零功耗通信对网络架构也提出新的需求，我们将在 5.5 节讨论适配零功耗通信的简化网络架构。

05

5.1

无线供能的需求和挑战

如 3.1 节所述，零功耗终端自身不需携带电池，因此在通信之前，零功耗终端需要接收无线供能信号进行能量采集以获取工作所需要的能量。为了支持零功耗终端在 5G 网络中进行通信，5G 网络需要提供向零功耗终端进行无线供能的功能。相对于传统通信网络，如何采用合理的方式向零功耗终端有效供能，从而提供合适的网络覆盖是零功耗通信的新挑战。

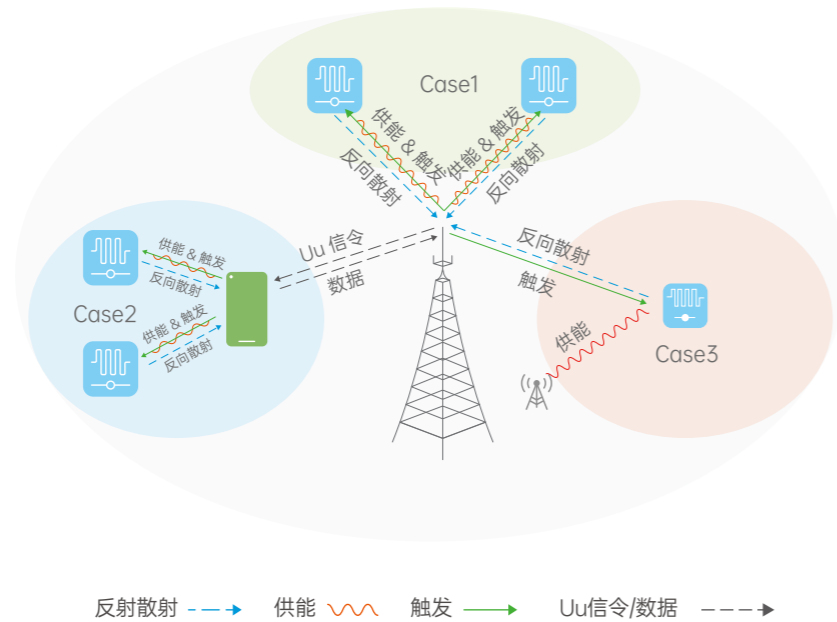


图 5.1-1 多种无线供能方式

所幸的是，由于 5G 网络中有丰富的网络节点，如基站设备、终端设备、中继设备等，这些网络节点均具备无线信号的发射功能，因此可以利用这些设备向零功耗终端进行无线供能。

如图 5.1-1 所示，当零功耗终端部署于蜂窝网络时，可以采用基站直接向零功耗终端发送供能信号，如图中 case1 所示。在这种情况下，基站设备每一次与零功耗终端通信之前，均需要向零功耗终端设备发送无线供能信号以使得终端获得足够的能量从而处于激活状态。在通信过程中，无线供能信号也需要持续发送以使得终端获得维持正常工作所需的能量。例如，在下行通信过程中，终端一方面接收基站发送的下行信号进行下行信号接收，另一方面也需要接收无线供能信号获得维持终端进行下行信号接收、信号解调等操作所必需的能量。当然，由于携带信息的下行信号本身也携带无线能量，因此也可以用作无线供能信号。同样地，在零功耗终端向网络设备发送数据的上行通信过程中，也需要持续向零功耗终端发送无线供能信号。此时，一方面无线供能信号提供零功耗终端进行数据获取（如从传感器或存储器读取数据）、编码等操作所需要能量。另一方面无线供能信号也用作终端反向散射的载波信号，使得终端可以在无线供能信号基础上进行反向散射，从而完成上行信号传输。

无线供能信号既要经历下行信道，经过反向散射后，反向散射的上行信号又要经历上行信道。特别是对于无源零功耗终端，无线供能信号在到达终端时，其信号强度不能小于 $-20/-30\text{dBm}$ 。这些要求和限制使得提供满足需求的网络覆盖范围成为构建零功耗通信网络的重要挑战。如 4.1 节的分析，采用基站直接向零功耗终端供能的方式时，网络的覆盖距离相对较短，通常适应于构建小区半径几十米至 100 米的蜂窝小区。这样的小区形态适合于覆盖物流中心、仓储站、工业厂房等场景。

为了进一步提升网络覆盖，从而拓展在更多场景下的物联网应用，如大型工业厂房、农牧业应用场景，可考虑部署专用的无线供能节点对零功耗终端进行供能。如图 5.1-1 中 case3 所示。专用的无线供能节点负责在基站与零功耗终端通信时发送无线供能信号从而执行网络的无线供能功能。采用这样的设计，无线供能与零功耗通信两个功能实现了解耦。通过蜂窝网络中分布式部署的无线供能节点提供无线供能，缓解了无线供能对网络覆盖带来的挑战，从而可以提供相对较大的网络覆盖。此外，专用供能节点主要用于完成无线供能的功能，因此其设备复杂度和部署成本将远低于基站设备。因此，总体上，使用专用供能节点形成了一种较为经济地部署大覆盖范围的零功耗通信网络的方式。

针对面向个人消费者的智能可穿戴网络或智能家居网络等应用场景，这些场景一般为短距通信，如智能可穿戴网络小于 5m 的覆盖距离要求，智能家居一般为 10 米左右的覆盖范围。以智能终端或 CPE 等节点为中心的零功耗通信网络提供了一种非常有吸引力的短距个人通信网络。如 5.1-1 中 case2 所示，在这些场景下，可使用智能终端或 CPE 这些中心节点向零功耗终端提供无线供能。采用智能终端或 CPE 等节点，使用满足规范要求的发射功率也足以提供足够的零功耗通信覆盖范围（参考 4.1 节计算）。

- 从供能信号设计的角度，无线供能信号至少需要满足如下要求：

提供足够的无线电能

其中对于无源零功耗终端，无线供能信号在到达终端时，其信号强度不能小于一定的强度如 -20 或 -30dBm （终端具备储能能力时）。

无线供能的效率

从信号波形上看，虽然任何波形的无线电波均可以为零功耗终端提供能量，但可以进一步探讨针对零功耗终端不同的波形进行无线供能的效率的差异，并基于此设计合理的波形。

无线供能的稳定性

在零功耗终端工作时，需要向其提供稳定的无线供能。连续的正弦波由于幅度恒定，可以提供稳定功率的无线电波。而有些情况下，例如使用携带信息的下行信号进行无线供能的情况，此时供能信号为调制波形。基于信源比特的变化对信息比特进行编码导致下行调制波形难免出现信号幅度的变化。从供能稳定性角度要求供能信号的调制波形不能出现过长时间的低功率水平的信号。因此，这客观上要求在编码方式和调制方式的选择上需要考虑对供能的影响，从而设计合理的供能信号保证无线供能的稳定性。

与其他系统的兼容

当零功耗通信系统与其他系统同频段部署时，需要考虑对其他系统的影响。例如，通常无线供能信号需要以较高的功率发送，因此对邻系统的干扰需要考虑。在蜂窝系统部署时，特别是与其他系统共存时，当可以使用现有其他系统的无线信号波形进行无线供能时，可以扩大无线供能的信号来源，也可以使得基站或智能终端不改变信号波形即可实施无线供能。因此从无线供能角度，与其他系统的兼容性也是值得研究的问题。

与反向散射调制的兼容

当无线供能信号用作反向散射的载波信号时，无线供能信号的波形设计一方面需要考虑提供足够的无线电能。另一方面也要考虑对反向散射时调制的上行信号影响。例如当反向散射调制使用 ASK 或 PSK (Phase Shift Keying, 相移键控) 时，单一频点的正弦波信号是较为理想的选择。而已经经历幅度或相位调制的供能信号再进一步经历反向散射 (如 ASK 或 PSK) 调制时，将产生更复杂的混合波形，需要仔细评估其对基站解调的影响。再例如，当反向散射采用 FSK 调制时，供能信号保持稳定的频率对于 FSK 调制可能是必要的。

无线供能的功能的引入将对无线网络资源管理和分配产生重要影响。与现有无线网络中的时域资源、频域资源以及码域资源等资源维度一样，无线能量也成为零功耗通信网络一个新的资源维度。零功耗通信中的网络节点可基于通信需求按需分配 (发送) 或调度无线电能，从而使得免电池的零功耗终端形态依然可以完成无线通信功能。从能源的管理来看，零功耗通信网络使得传统的网络中各终端均自备电源的分布式供能形态演化为由网络中心节点集中式供能的形态。从能源消耗的角度，集中式供能使得无线网络的能源利用更加高效，规避了在无通信业务时无谓的能量浪费，真正做到按需分配和使用能量。我们将来可以探索如何最大化零功耗通信网络集中式供能的优势，从而使能绿色低碳通信网络。

5.2

零功耗终端数据传输的挑战

5.2.1 零功耗通信的调制和与编码

在零功耗通信场景中，由于零功耗终端极简的终端结构、极低的终端能力以及极低的数据传输功耗约束，因此需要设计合理的调制与编码方式。针对零功耗终端的数据资源分配一方面需要考虑上述因素的限制，另一方面也要考虑多样化通信场景带来的挑战。

随着无线通信技术和元器件工艺的提升，越来越复杂的信号调制技术得以在新的通信系统中使用。例如，除了支持 BPSK、QPSK 等低阶调制方式以及 16QAM、64QAM 等高阶调制方式，256QAM 甚至 1024QAM 等超高阶的信号调制技术也得以在 LTE、NR^[3] 系统中得以采用。类似地，以前向纠错为特征的信道编码技术也得以快速发展，卷积码、Turbo 码、LDPC 码以及 polar 码^[2] 相继在 LTE、NR 系统中得以采用。这些调制和编码技术为支持 LTE、NR 实现超宽带超高速的数据传输起了关键作用。

在面向物联网的 MTC、NB-IoT 以及 RedCap 等技术中，虽然终端的能力相对 LTE 终端或 NR 终端有显著的降低，但基本继承了这些传统的调制或编码方式。例如 MTC/NB-IoT 可以支持 BPSK、QPSK 和 16QAM 等调制方式以及 Turbo 码和卷积码，而 RedCap 也可以支持 BPSK、QPSK、16QAM 和 64QAM 以及 LDPC 码和 Polar 码。

然而，这些对于普通的终端常用的调制和编码方式，对于零功耗终端而言却是极大的挑战。如第 3 章所述，零功耗终端具有极简的射频和基带结构，同时零功耗终端需要以超低功耗的方式进行数据传输。因此，对于零功耗终端可使用的信号调制和编码方式均会带来较强约束与限制。具体而言，极简的射频和基带结构使得零功耗终端难以同时实现相位和幅度调制和解调制，因此 QPSK、QAM 调制难以支持。而尽管具备出色的信号编译码性能，Turbo、LDPC、Polar 以及 Convolutional 等前向纠错信道编码方式对于追求极低复杂度和极低功耗的零功耗终端，也难以支持。

如第 3 章所述，开关调制技术可以与反向散射技术有机结合起来，使得终端以极其简单的硬件结构实现 ASK、FSK 或 PSK 等调制方式，从而实现反向散射的方式的数据传输。使用开关调制技术，零功耗终端在硬件上仅需要具备调整其电路阻抗、电容或相位延迟的能力，即可实现信号的调制与反向散射传输。另一方面，简单的 ASK、FSK 或 PSK 等信号也使得信号解调制也可以通过简易的硬件结构即可实现，例如可以通过一个比较器即可实现对 ASK 信号的解调制，在规避了复杂的基带信号处理的同时，也极大地降低了终端功耗。

零功耗终端的信道编码也需要与零功耗终端的软硬件能力匹配。因此，较为合适的编码方式为基础的二进制编码，包括反向不归零 (NRZ) 编码、曼彻斯特 (Manchester) 编码、单极性归零 (Unipolar RZ) 编码、差动双相 (DBP) 编码、米勒 (Miller) 编码，脉冲间隔编码 (PIE) 等编码方式。这些编码方式基带处理简单，一般使用高低电平转换的方式来表示比特 "0" 和 "1"，因此也可以很好地与 ASK、FSK 或 PSK 这些简易的调制方式结合。

在此基础上，我们也可以进一步探索在满足终端极简硬件和极低功耗约束的条件下，是否能够进一步支持更复杂的信号调制技术以及编码方式，如 QPSK 等。

5.2.2 多址方式

针对于不同的应用场景，零功耗通信系统需要支持不同数量的终端。在零功耗网络的覆盖范围内，多个终端可能被同时激活并与网络设备通信，因此，如果不引入合理的多址方式，多个终端的反向散射信号在同频点上会产生相互干扰，此时网络无法区分不同的终端和正确解调各终端的反向散射信号。因此，零功耗通信系统需要支持高效多址方式，常用的多址方式包括 TDMA (Time Division Multiple Access, 时分多址复用接入)、FDMA (Frequency Division Multiple Access, 频分多址复用接入)、CDMA (Code Division Multiple Access, 码分多址复用接入) 以及 NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access, 非正交多址复用) 等，这一节我们将探讨适合于零功耗通信的多址方式。

如图 5.2-1 所示，TDM 可以作为零功耗通信的一种候选多址方式。零功耗通信系统在时域上划分多个时间单元。不同终端可以基于不同时间延迟在不同的时间单元上进行反向散射通信。不同的时间单元会将不同的终端的反向散射信号隔离，从而避免了终端反射信号之间的相互干扰。TDM 仅需要确定一定的时间延迟并基于该时间延迟进行通信，因此对于零功耗终端而言，TDM 是简易可行的多址方式。

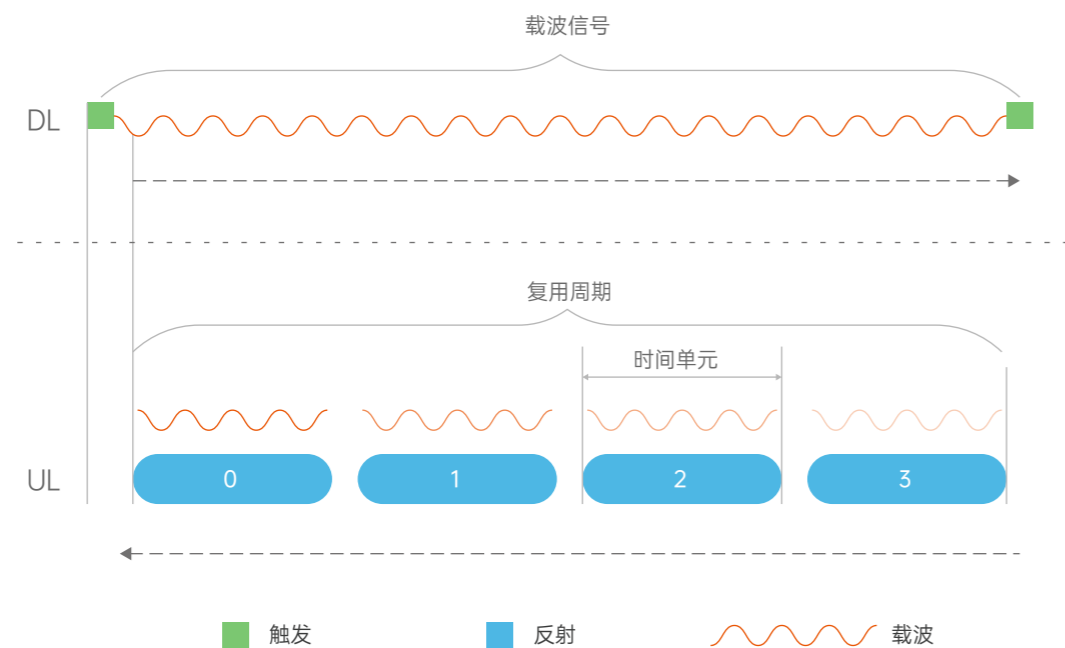


图 5.2-1 基于 TDMA 的零功耗通信多址方式

频分多址 (FDMA) 是在频域上划分若干具备不同频率的信道，不同的用户使用不同频率信道资源进行通信的方式。对于零功耗通信，我们需要探讨使用 FDMA 方式的可行性。例如，我们需要考虑如下方面：

零功耗终端设备的硬件是否具备在不同的频率信道上工作的能力？

使用 FDMA 的方式进行多用户复用的前提是终端具备在不同的频率信道上工作的能力。这个对于普通的终端很简单的要求对于零功耗终端可能具备一定的挑战。受限于硬件复杂度的要求和超低功耗的约束，零功耗终端不易使用高精度晶振和高精度锁相环结构。因此，如何实现低复杂度和低功耗的频率生成并基于此实现在不同的频点工作的能力将是零功耗终端面临的重要挑战。

不同频率信道上终端之间的信号干扰水平

零功耗终端基于反向散射向网络设备发送信号。同样受限于器件和电路的复杂度，反向散射信号在离开零功耗终端之前一般不会经过复杂的成型滤波，因此对相邻信道的终端可能会带来潜在的邻道干扰。如何在允许这些低复杂度终端实现时产生的邻道干扰存在的情况下，保证多信道同时可靠通信，也将是值得探讨的问题。例如可考虑合理预留信道间频率保护带、合理的接收机设计等。

对终端接入过程的影响

众多的物联网通信场景要求物联网终端的成本足够低廉，从而提升相对于其他可替代的技术的竞争力。如物流或仓储场景，为了便于管理大量流通的物品，可以将物联网终端附着在每一件物品上，从而通过该终端与物流网络之间的通信完成物流全过程、全周期的精确管理。这些场景要求物联网终端价格具备足够竞争力。

当不同的终端支持在不同的频率信道上工作时，网络设备如何高效地触发通信过程是需要考虑的问题。例如，网络设备如何高效地搜索终端所在的信道并与之开展后续的通信过程？如何提供合理的供能？

码分多址 (CDM) 方式是我们传统通信系统常用的多址方式，在相同的时频资源上支持多个用户使用正交复用的码字进行通信。因此 CDMA 通信具有抗干扰能力强，抗衰落能力强，保密性好，系统容量大等优点。对于零功耗通信，如果可以采用 CDMA，对于消除用户间干扰，有效提升系统容量以及有效提升通信性能是有益的。特别地，零功耗通信由于使用反向散射通信的方式，其信号功率水平一般较弱，使用 CDMA 扩频通信也有助于提升其通信的覆盖距离。

然而，零功耗通信采用 CDMA 传输也可能遇到显著的技术挑战。例如 CDMA 系统对多个终端之间的同步有较高的要求，对接收多个终端的反射信号时的功率差的限值也有一定的要求。此外，受限于超低复杂度的终端实现，零功耗终端不具备高精度的时钟产生结构，因此保持同步的能力较弱。受限于反向散射的基本信号产生机制，也难以实施信号发送前的灵活功率控制。因此如何有效实现 CDMA 传输是需要进一步探讨的方向。

5.2.3 数据传输与资源管理

传统的蜂窝移动通信系统支持灵活的双工方式、灵活的多址方式以及多种类型业务的数据传输，因此支持灵活高效的资源管理和资源分配。例如传统蜂窝移动通信系统可支持不同时间域资源颗粒度、不同频域资源颗粒度乃至不同码域资源颗粒度的资源分配。从资源分配的信令来看，可以支持动态的调度授权，也可以支持半静态的资源分配（如 NR 支持免调度传输）。此外，系统也可以根据系统的负荷、终端的数量、业务的类型和优先级灵活控制终端的调度和数据的传输。

如第 2 章所述，在零功耗通信的部署场景，由于低成本、免电池等优势，零功耗终端可以实现大量部署，且其数据传输多以上行数据传输、小数据包为主。而不同的零功耗通信场景有不同的数据传输的需求和特点：针对工业传感器网络场景，主要应用为工业数据的上报和环境监测，其主要特点是以周期性的监测类的数据传输为主。针对智能家居类的业务，如家庭资产管理和开关控制，其主要特点是以一次性的小包突发业务传输为主。针对物流场景和仓储场景，网络需要短时间获取大量其覆盖范围内的零功耗终端的信息，此时上行传输的资源分配和调度需要支持短时间内大量零功耗终端的信息上报，因此其主要特点是短时间大量终端的数据读取和并发传输。

由于零功耗通信的业务类型、供能和终端特性相比传统蜂窝移动通信系统具有不同的特点，对零功耗通信的数据传输和资源管理提出了新的挑战。

零功耗通信的第一个挑战是供能受限。对于传统终端，数据传输取决于通信需求和网络的资源调度，数据传输过程中不需要考虑供能问题。而对于零功耗终端，终端的任何数据传输过程均依赖于外部供能（如网络无线供能）。无线供能的稳定性和可获得性、储能状态、储能能力等都会对数据传输造成影响。资源分配和调度需要考虑这些因素的影响。从而一方面保证无线供能满足数据的可靠传输，另一方面尽可能减少网络侧无线供能的资源开销，实现无线供能的按需供能。为此，从资源管理的角度，一方面，零功耗通信系统的资源分配需要尽量规避用户间的干扰、小区间的干扰和异系统对零功耗通信的干扰，从而使得零功耗数据传输以较为理想的条件下进行，尽量避免数据的重传。另一方面，零功耗通信的数据传输也需要依赖供能信号的合理设计以及供能过程与数据传输过程的良好高效配合。

零功耗通信的第二个挑战是支持在极短的通信时长内大量终端的数据传输。例如针对物流场景，需要在数秒内完成数千甚至上万个零功耗终端的数据读取和上报。这类场景下，如何合理的控制大量终端的接入，使得不同的终端在不同的资源上有序传输，同时避免零功耗终端数据的碰撞和相互之间的干扰是需要解决的问题。另外，在这类场景下，在网络触发零功耗通信之前，所有的待传输数据的终端对于系统而言均是未知身份的陌生终端，如何设计合理的系统接入和通信流程使得在网络设备发起通信之后，使得大量的零功耗终端的身份得以快速识别进而有效传输数据，是另外一个需要解决的技术挑战。为此，在零功耗通信系统中，一方面需要考虑在终端能力允许的情况下尽可能复用较多用户。典型的方式是支持多种多址方式，如前节所述，在 TDMA 基础上，可以考虑支持 FDMA、CDMA 等多址方式，从而提供足够的系统资源用于零功耗通信。

如图 5.2-2 所示，不同的零功耗终端用户的数据传输被有效分配至不同的资源单元上，从而规避了用户间干扰。另一方面，零功耗通信过程要引入合理的接入控制机制，零功耗通信网络可以基于网络的负载情况实时有效控制终端的接入，从而在保证终端业务传输需求的前提下实现高效的资源管理。



图 5.2-2 零功耗通信的资源分配

零功耗通信的第三个挑战是极低成本、复杂度的零功耗终端对数据传输的影响。

首先，零功耗终端的资源利用能力对数据传输有影响。传统蜂窝系统中，灵活的资源分配可以满足不同数据量的传输需求，提高资源的使用效率，提高频谱效率。传统终端也具备灵活的利用资源进行数据传输的能力。对于具有极低成本、复杂度特点的零功耗终端，受限于传输带宽、通信时长、供能、频谱搬移、时频同步等能力，其能够支持的资源分配的灵活程度会大大降低。资源分配的灵活性和零功耗终端的能力之间需要一定的折中。网络可以为零功耗终端的数据传输分配相对低灵活性的资源。如图 5.2-2 所示，网络为零功耗终端配置多个相对固定资源单元，零功耗终端按照一定的方式映射到其对应的资源单元，而避免在大量资源单元中灵活的变化，减少资源分配的复杂度。

其次，零功耗终端的弱同步能力对数据传输有影响。在传统的蜂窝移动通信系统中，为了减少多用户之间的干扰、TDD 系统上下行之间的干扰等，信号传输过程中终端需要维持较高的同步精度。传统终端，如智能手机、MTC 设备甚至 IoT 设备均可满足蜂窝系统对同步的要求。而零功耗终端受限于成本、体积、形态、功耗等，一般无法采用高精度晶体振荡器，而是通常使用简易振荡器来获取时钟。常用的简易振荡器如 RC 振荡器虽然价格低廉，具备体积小功耗低的优势，但 RC 振荡器的精度较差，误差可达 1% 甚至更高^[1]。如此大误差时钟精度是否能够满足零功耗通信对定时的要求，以及如何在放松同步需求和保证业务性能之间取得平衡，是需要进一步研究的问题。

更进一步地，对于无源的零功耗终端，其不具备电池。它的电路的工作所需要的能量来源于无线供能。由于无线供能获得的不稳定性，即使零功耗终端具有简易振荡器，但当网络停止无线供能时，振荡器也会停止工作，导致振荡器不能持续的工作来提供稳定和持续的时钟。

- 零功耗终端无法获得稳定和高精度的时钟，在蜂窝系统中支持可能会带来若干问题：

上行信号传输造成干扰

传统的终端通过高精度晶振提供的时钟，可以做到上行信号传输时间的严格定时。这有利用上行资源的多用户复用，减少用户间干扰。在 TDD 系统下，还可以避免上下行传输之间的干扰。零功耗终端无法做到上行信号传输的起始和结束的严格定时，可能导致零功耗用户的上行传输超出网络为该终端调度的传输时间位置，造成对其他终端的信号干扰。另外，如果上行信号传输之前零功耗终端处于“失电”状态导致完全丢失定时，从而导致无法做到上行信号传输的严格定时。

影响下行信号的接收性能

蜂窝系统中，传统的终端会根据自己的定时，在下行信号的监听时机上检测下行信号，如参考信号、控制和数据等。零功耗终端的低精度和易丢失的时钟，并不能支持其在准确的下行信号的监听时机上进行下行信号的接收。由于不能维持下行的准确同步，零功耗终端对下行信号进行采样的时域位置可能与网络发送的下行信号的时域位置出现较大的偏差，导致影响下行信号的接收性能。

零功耗终端的极低成本、复杂度限制了其获得本地高精度时钟的能力。由于蜂窝系统对终端定时的要求和零功耗终端的较差的定时能力之间的矛盾，为了在蜂窝系统中支持零功耗终端，需要研究如何让零功耗终端获得满足要求的定时。

5.3 轻量化协议栈的需求和挑战

在零功耗通信系统中，零功耗终端需要采集网络节点发送的无线电波获得能量后才可以驱动自身进行工作。因此，在获得能量之前，零功耗终端通常处于“关机”状态，即脱网状态。

在有些场景下，零功耗网络系统的部署可能是孤岛覆盖方式，不能做到全覆盖。所以有覆盖缺失也会导致零功耗终端处于脱网状态，例如物流和仓储场景。

所以零功耗终端脱网可能由于没有电，也可能因为没有网络覆盖。在这种通信环境苛刻的条件，零功耗通信系统需要支持更短传输时长，更低内存消耗，更便捷终端管理的数据通信方式以尽快完成数据通信过程。

5.3.1 通信状态管理

传统通信系统中，终端业务复杂多样，一般对业务连续性有较高要求，并且数据量大。针对存在业务传输的和没有业务传输的情况下，网络对终端的资源分配和终端管理是不同的，所以定义 RRC (Radio Resource Control, 无线资源控制) 状态以及 NAS (Non Access Stratum 非接入层) 状态以便于终端管理和资源分配。例如 RRC 空闲态主要满足移动性管理和寻呼接收，而没有业务发送和接收需求，不需要网络侧分配专用资源。而 RRC 连接态主要是由于存在业务发送和接收需求，需要网络侧分配专用资源。同时对于在网的用户，核心网通过 NAS 流程来管理 UE，而基站则通过 RRC 来管理连接态的 UE。

由于零功耗终端具有低内存，低处理能力，低电量，小数据传输，海量投放的特点，传统的分层控制面，以及复杂的终端状态管理不再适合零功耗终端。

对于仓储和物流，这种单包数据发送的场景，终端不需要复杂的终端状态管理和转换过程。无状态管理模式或者弱状态管理更有助于高效的小数据传输，同时也降低了终端的成本和复杂度。

5.3.2 轻量化协议栈和便捷数据传输

海量零功耗终端的入网投放使得 IP 地址分配成为瓶颈之一，所以基于 non-IP 的终端数据通信是潜在可行的选择。使用 non-IP 通信方式既可以简化数据通信过程，又可以避免不必要的 session 管理过程。

传统通信系统中，假设是终端电力充足，定义多层的协议栈架构，实现功能模块化。例如 SDAP (Service Data Adaptation Protocol, 业务数据适配协议) 主要用于 Qos (Quality of Service, 服务质量) flow 到 DRB (Data Radio Bearer, 数据无线承载) 的映射；PDCP (Packet Data Convergence Protocol, 分组数据汇聚协议) 主要用于头压缩，数据安全，数据按序递交等；RLC (Radio Link Control, 无线链路控制) 主要实现 ARQ (Automatic Repeat reQuest, 自动重传请求)，数据分割等；MAC (Media Access Control, 媒体接入控制) 主要是为了数据复用和解复用等。功能模块化的多层协议栈架构主要是为了满足业务 Qos 需求多样性，业务模型复杂性以及业务数据连续大量传输。

在零功耗数据通信过程中，由于终端工作时对无线供能的依赖以及终端能力的限制（如仅支持较小的内存，支持低功耗的简易计算），因此终端需要设计轻量化的协议栈以减少协议栈处理过程中的能量消耗和降低对计算复杂度的要求。另一方面，零功耗终端的所需要支持的业务一般具有小数据量、不频繁以及及时延不敏感等特点。针对上述需求和特点，扁平化、下沉式协议栈是值得考虑的方向，同时控制面和用户面融合架构，可以进一步降低 UE 的复杂度，加快数据传输过程。

另外，零功耗终端可以根据不同的使用场景或者使用需求来适当简化协议栈结构。零功耗终端对于数据发送的需求比较小，如在仓储物流环境中，零功耗终端只是为了上报自身的状态或者搜集的信息，所以复杂的协议栈变得没有必要。对于这种简单上报状态的零功耗终端，可以不实现会话管理层功能，而只实现移动性管理层。对于上报自身状态等较小数据的发送，零功耗终端可以直接在移动性管理层实现数据发送。考虑到零功耗终端对于移动性的需求差异化，还可以进一步研究如何降低移动性管理的协议栈。

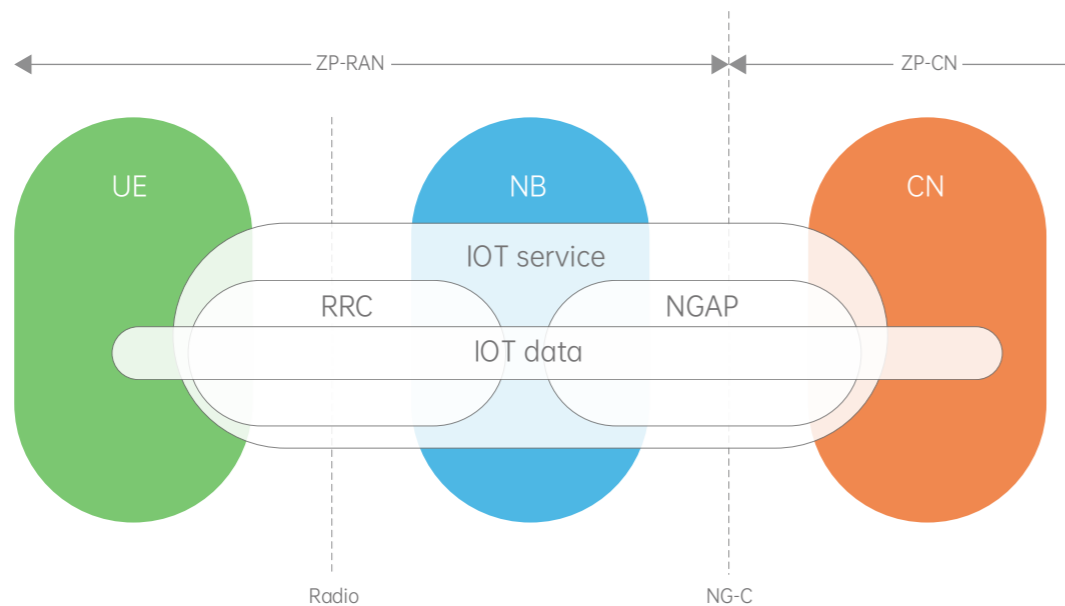


图 5.3-1 轻量化协议栈

在数据传输过程中，基于非状态转换、非专用承载的方式进行数据传输，零功耗终端标识可以用于进行接收数据的识别和路由转发，可以进一步简化数据传输过程，实现便捷数据传输。

进一步，在零功耗通信系统中，服务多种业务形态：例如物流和仓储，智能可穿戴等。不同业务形态对于业务传输的协议栈需求可能不同：例如仓储物流场景下，业务数据量极小，单包数据发送，业务发送间隔时间长，所以不需要数据分割，数据复用等。再例如智能可穿戴场景，业务数据具有业务数据连续传输的特点，所以需要考虑数据包的按序递交。因此，自适应灵活可变的协议栈更能符合未来通信系统的需求。

5.3.3 移动性管理

针对不同的应用场景，零功耗终端对于移动性的需求基于 UE 移动特点以及业务 QoS 需求不同也有所不同。针对前述大多数零功耗通信的场景，如工业监测、智能家居、仓储等，零功耗终端一般处于静止状态。对于这些场景，零功耗通信没有移动性需求。

而有些场景，如物流、货品追踪、工业产线监测等应用场景，零功耗通信对于移动性将有一定的要求。例如在移动的工业流水产线上，网络需要频繁地与移动的零功耗终端进行通信。但相较于传统 NR 通信，如果零功耗终端的业务没有时延需求和无损需求，则移动性需求也比较有限，仅需要支持有限的移动性管理。

在传统通信系统中，移动性分为基于网络控制的移动性和基于 UE 控制的移动性。基于网络控制的移动性主要为了满足业务连续性的需求。基于 UE 控制的移动性主要为了满足负载均衡和最佳小区驻留的需求。无论何种移动性，主要基于终端基于网络发送的参考信号的执行的下行测量结果，实时完成移动性管理。

在零功耗通信场景，由于零功耗终端难以获得持续的稳定的无线供能。可能出现零功耗终端频繁的脱网的现象，使得零功耗终端的移动性管理难以像传统通信系统中网络可以时刻获知 UE 的位置信息，传统的周期性位置更新也不再适用零功耗终端。

因此，如何在零功耗终端通信场景，零功耗终端的移动性需求需要进一步探索。然后，在定义零功耗终端的移动性需求的基础上，需进一步探索和研究如何对零功耗终端进行必要的有限的移动性管理。

5.4

轻量化安全机制的需求和挑战

5.4.1

资源受限条件下的可信接入与安全传输

与其他物联网通信场景一样，在零功耗通信场景中，可信的接入和安全的数据传输依然十分重要。然而，受限于零功耗终端极其有限的软硬件能力、极小的内存容量、极低的功耗预算以及通过程对外部供能的依赖等因素，零功耗终端难以使用现有 3GPP 系统（如 NR 或 LTE）中复杂的安全机制。因此，需要研究适用于零功耗通信的轻量化安全机制。

6G 时代，网络和设备的安全、可信越来越受到重视，无论是个人设备、家庭设备或者是工业设备，在进行零功耗通信时，都希望能得到可信的接入和安全的传输。

4G/5G 时代的安全机制很好的保证了上述两点^{[4][5]}：

1) 为保证可信的接入，终端侧在 USIM 卡中，根据预先存储的 256 位根密钥 K，使用 f1-f5 函数，进行了认证向量和密钥 IK CK 的计算，基于认证向量，在认证流程中终端和网络进行双向认证。

2) 为保证安全的传输，终端侧在 ME 中，使用 KDF 函数，根据密钥 IK CK，以及不同通信场景的需要，生成数十个密钥，并使用这些密钥进行运算，保证数据和信令传输的机密性和完整性。

然而在零功耗场景下，零功耗设备能支持的计算、存储和传输资源都非常有限，传统的安全机制受到资源限制的挑战，需要研究如何在资源受限的条件下仍然为用户提供可信的接入与安全的传输。

零功耗通信具有下行信号触发数据传输、上行进行数据传输的特点，因此，零功耗通信的安全威胁可分为：

1) 下行威胁：错误触发。如果伪基站设备错误地触发零功耗设备进行上行数据传输，或者伪造的触发信号错误地触发零功耗设备进行上行数据传输，造成的危害不仅可能会导致传输资源和能源的浪费，还可能会造成数据泄露，甚至破坏用户的隐私。

2) 上行威胁：数据泄密。如果上行传输数据被窃听或泄露，恶意的攻击者可能会获取到敏感数据或个人隐私数据，不仅仅损害了数据的拥有者的权利，也可能造成业务运营者或网络运营者的合规风险或法律风险。

5.4.2

低成本与分布式的安全需求

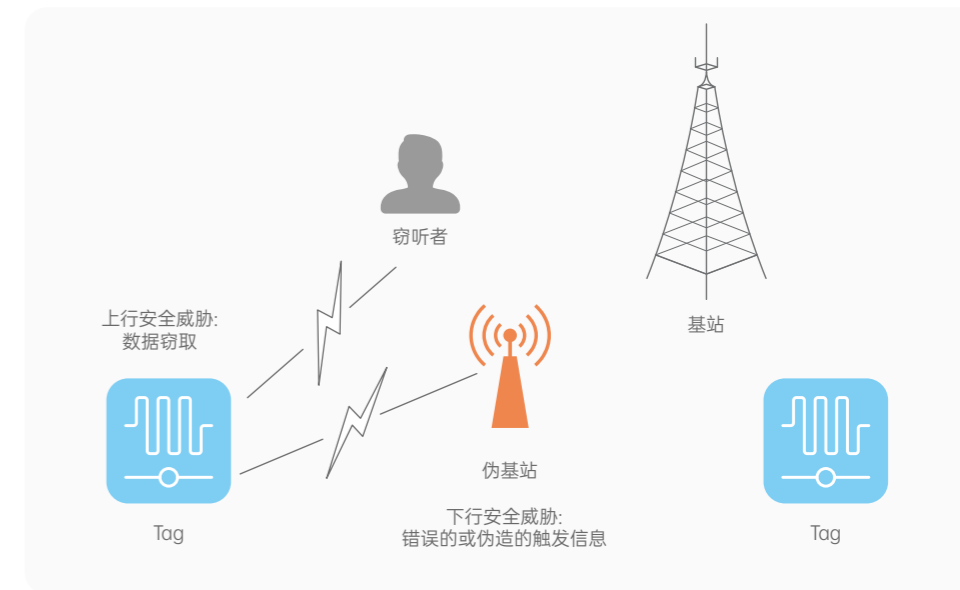


图 5.4-1 零功耗通信面临的安全威胁

零功耗设备具有体积小、轻便、低成本的优势，也具备广阔的应用场景，零功耗通信可广泛应用于智慧家庭、物流制造、个人穿戴等等场景中，为万物互融提供万亿数量级的链接。

因此，零功耗的安全需求分为：

1) 低成本安全需求：零功耗场景下，终端设备趋向极简，功耗极低，成本、协议栈设计与计算能力跟当前终端比较会大大降低。因此，需要研究与极低复杂度终端能力相适配的低成本安全可信接入方案与安全传输方案，在零功耗终端侧需要对认证计算进行简化，对传输安全保护的密钥管理及机密性、完整性保护计算进行简化。

2) 分布式 / 分场景认证授权需求：对于物流 / 制造等园区场景，设备在特定厂区范围内进行接入，具有分布式认证的特点，同时需要考虑针对不同场景的业务授权。

5.4.3 零功耗通信的安全思路

面向 6G 万物互融的海量链接与设备，高效的分布式认证授权需要在当前集中式的信任机制上进行重新设计，以保证可信的身份、灵活的授权及分布式认证。区块链是较好的技术选择，但需要基础设施的建设和生态的成熟等方面考虑以支持多场景、多业务、多用户的可信安全机制。

对于零功耗设备，可信的身份管理、可靠的安全传输是保证业务、网络、用户权益的必要条件，需要在传统的安全机制基础上，结合设备成本低特点进行优化传输安全机制，考虑数据传输的分层分级保护机制，研究物理层、传输层结合的增强安全方案。

5.5

简化的网络架构的需求和挑战

一方面，在众多零功耗通信场景中，要求网络可以灵活高效管理零功耗终端，从而使能和保障网络通信功能（如远程控制、远程定位以及环境监测等）的实现以及便于零功耗通信业务的运营；另一方面，对于具有极简终端能力、极低功耗需求以及依赖无线供能的零功耗终端，难以重用现有复杂的网络架构。因此，需要研究适配于零功耗通信的简化网络架构。

5.5.1

网络架构简化需求

随着用户数量增加以及海量物联网设备的使用，网络规模得到了快速扩展，业务需求也呈现了多样化的特征，这样导致网络架构越来越复杂。但是，现有复杂的网络架构已经不能适应零功耗通信的特性，主要原因如下：

- 1) 复杂的网络架构会给零功耗通信带来高额的运营成本，从而阻碍了零功耗通信的发展；
- 2) 复杂的网络架构也会影响零功耗终端的功耗消耗，从而对零功耗终端的能耗提出了新的挑战；
- 3) 复杂的网络架构也使网络部署过程复杂，灵活性差，不利于零功耗通信网络的简单快速部署。

为了降低网络的部署成本、功耗以及运营成本，零功耗通信的网络架构需要采用简化的网络架构。简化的网络架构可以精简网元的类型合并网络功能，使得符合零功耗通信的需求的网络架构网元部署简单，不同网元类型之间的接口协议也尽量精简。

以下，介绍适合零功耗通信的网络架构需要具有的特征。

5.5.2

支持简化的信令控制或者传输通道架构

首先，零功耗通信不需要有个性的 QoS 需求，信令交互大幅减少，对于需要发送的小数据，又可以在移动性管理中进行发送，这样就可以实现减少单独的数据通道建立等信令交互。

或者，采用在零功耗终端上配置缺省目的数据中心，那么零功耗终端可以采用无状态的方式进行发送，进而在网络的触发下才发送上行数据。网络则针对零功耗通信或业务建立专用数据通道，从而避免针对每个终端建立专属的零功耗数据通道。

零功耗通信很多时候只需要进行简单的局部通信，为了实现这样的功能，可以在基站上部署简单的非接入层处理功能，这样可以实现与空口的一体化通信。

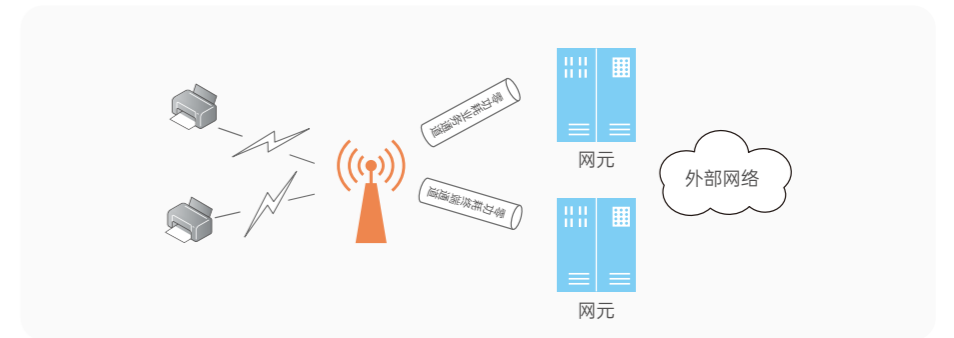


图 5.5-1 简化的网络传输通道

5.5.3

支持分级控制的网络架构

零功耗终端可以应用在物流和仓储中，零功耗终端由于功耗受限，零功耗终端可以采用分级的网络架构。例如：零功耗终端先将数据发送到物流或者仓储的某个数据缓存点（数据缓存点可以安装或者部署在物流的交通工具或者仓储内部），物流或者仓储的数据缓存点定期或者定量将零功耗终端上报的数据集中上报至网络中。对于下行数据，也可以由网络先将数据发送至物流或者仓储的数据缓存点进行缓存，再由数据缓存点定时或者通过寻呼触发将下行数据发送至一组零功耗终端。

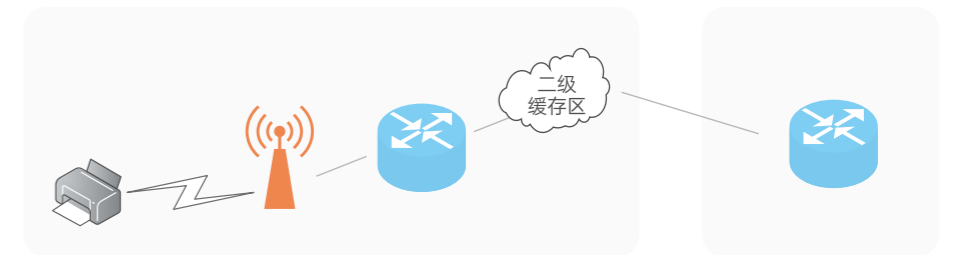


图 5.5-2 分级控制的网络架构

5.5.4

支持灵活高效的网络选择功能

零功耗通信主要使用在工业传感网，物流及智能家居中，所以零功耗通信可以不考虑漫游场景等复杂的网络环境，选网需求减弱。因此零功耗终端可以执行灵活高效的网络选择功能，从而最小化零功耗终端的功耗。

5.6

参考文献

[1] Jinhai Zhang, Bo Wang, Yi Peng, Tongning Hu and Xin'an Wang, "A 800nW high-accuracy RC oscillator with resistor calibration for RFID," 2013 IEEE 10th International Conference on ASIC, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/ASI-CON.2013.6811876.

[2] 3GPP TS 38.212 V15.9.0

[3] 3GPP TS 38.214 V15.10.0

[4] 3GPP TS 33.401: "System Architecture Evolution (SAE); Security architecture"

[5] 3GPP TS 33.501: "Security architecture and procedures for 5G system"

零功耗通信与 6G关键技术的 融合

6G 技术方兴未艾，目前多种 6G 候选通信技术已经得到产业界的广泛关注。零功耗通信作为一种新型通信技术，有望与其他 6G 候选技术深入融合，从而构建绿色节能、智能高效的下一代移动通信网络。

06

6.1

零功耗通信与智能超表面的融合

智能超表面，也叫做“可重配智能表面”（Reconfigurable Intelligence Surface, RIS），或者智能反射面（Intelligent Reflection Surface, IRS）。智能超表面由精密几何排列的可重构单元（信息超材料）组成，每个可重构单元由含有偏压二极管的微电路，或 PIN 管、三极管、MEMS、石墨烯、温敏器件、光敏器件等其他材料构成。RIS 的可重构单元对电磁波可形成不同的响应，如图 6.1-1 所示，每个可重构单元以受控方式对反射或者折射的电磁波的频率、相位、极化等特征实行操控，从而达到信号极化、反向散射、聚集或吸收能量等效果。RIS 技术，被认为是 6G 关键技术之一，本节我们将探讨 RIS 与零功耗物联网通信的潜在结合点^{[1][2]}。

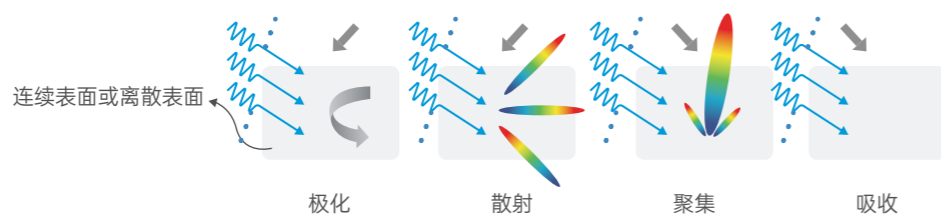


图 6.1-1 智能超表面的特性和功能

如前所述，零功耗通信的关键技术为能量收集和反向散射。如图 6.1-2 所示，将 RIS 与零功耗通信结合时：首先，RIS 可对环境射频信号源 source 的能量进行聚集，为零功耗设备提供方向更准确聚焦的能量波束和更高的入射信号功率，提高零功耗设备的能量采集效率。其次，RIS 还可以接收零功耗设备（如标签 tag）的反射信号，通过对信号的相位、幅度、极化等参数控制实现可控的反向散射，并转发给系统的接收器（如图 6.1-2 中的读写器），从而提升接收性能。

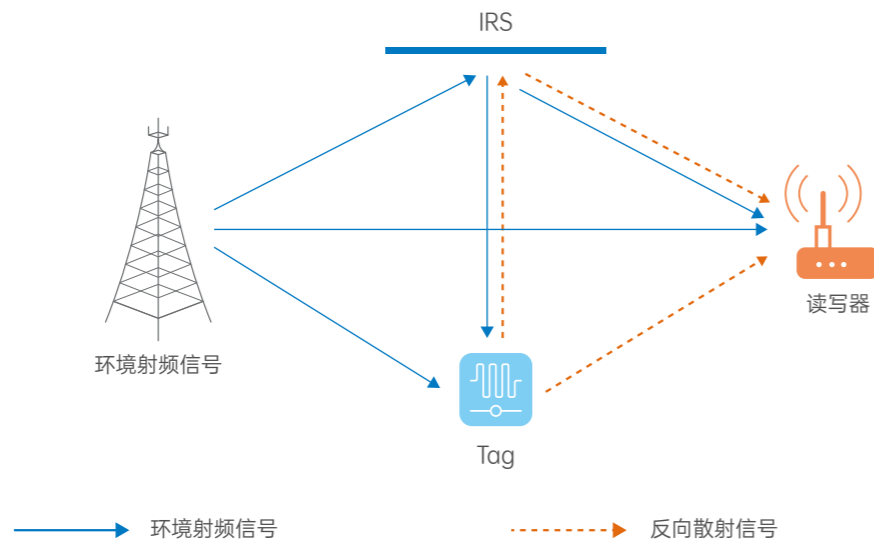


图 6.1-2 IRS 辅助的反向散射通信系统^[1]

所以，在智能超表面使能的反向散射通信系统（IRS-Assisted Ambient Backscatter Communications）中，RIS 可以通过最大化零功耗终端的入射信号或者反射信号来提高零功耗终端到接收设备的链路性能，提高信号接收质量和增加通信距离^{[3][4]}。因此，可以预见 RIS 对零功耗通信系统的提升可以体现在如下方面：

1) RIS 很大程度上可以避免零功耗设备反射给目标设备的反向散射信号被环境信号干扰。利用 RIS 的相位偏置来弥补多径的影响，同时 RIS 的可重构单元对环境信号进行波束成形并在 tag 处形成强波束，以增强反向散射信号的同时避免了入射信号的干扰。如图 6.1-2 中 Source-to-RIS-to-Tag 链路，RIS 的引入增强了 Tag 接收到的无线供能信号的功率。

2) 传统反向散射系统受限于反射信号的低功率以及简单的非相干能量检测（non-coherent energy detector），对接收设备的接收解调能力要求较高。RIS 作为 tag 本身或者转发 tag 的反射信息，增强后的反射信号更容易被接收设备检测和调，也增强了覆盖距离。如图 6.1-2 中 Tag-to-RIS-to-Reader 链路，RIS 的引入增强了反射链路的信号质量，提高了系统接收解调能力，增强了 tag 反射覆盖距离。

3) RIS 可以控制反向散射信号的传播方向，因此也形成了一种物理层安全的实现方案。通过控制反向散射信号的方向，使得合法的接收者可以正确接收信号，而窃听者方向的信号功率被削弱，使得反向散射信号携带的信息得以安全传输。

零功耗通信系统具备能量收集，反向散射和低功耗计算等几大特征。RIS 与零功耗通信在 6G 系统中结合应用，将有助于提供一种超低功耗的物联网解决方案。如何使用 RIS 系统提高能量收集和转化的效率，实现可控的反向散射，提升零功耗通信的性能，是值得进一步探索的重要机会点。

6.2

零功耗通信与共生通信的融合

在一个典型的环境反向散射通信系统（AmBC: Ambient Backscatter Communications）中，零功耗通信终端可以利用空间中的无线电波实现反向散射通信^[4]。如图 6.2-1 所示，一个路由器与一个智能设备构成的主通信系统正在通信，而零功耗终端设备对路由器发送的下行信号进行反向散射调制，从而实现将自身需要发送的信息传输给读写器，零功耗终端与读写器之间构成了以反向散射通信技术为支撑的从通信系统。由于其潜在的应用价值，反向散射通信被评为 2016 年 MIT 科技评论十大技术突破之一。

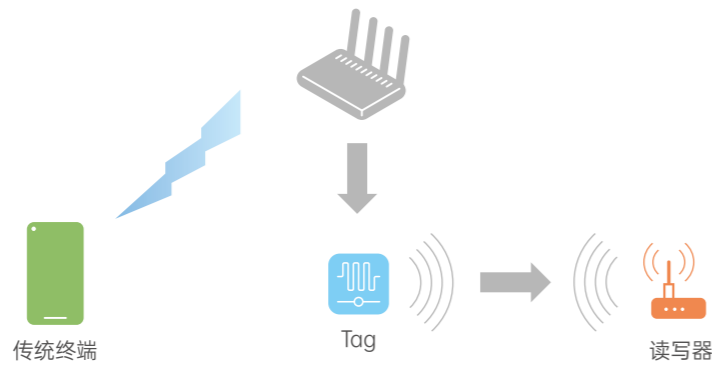


图 6.2-1 环境反向散射系统模型

然而在上述环境反向散射通信系统模型中，由于反向散射与主系统使用相同的频谱，从系统的通信将干扰主系统通信链路，也即零功耗通信终端的反向散射信号将会与主系统信号混叠在一起对主系统接收机形成干扰。此时，虽然使用反向散射的从系统获益，但对主系统的数据传输则可能是有损的。

为解决上述问题，共生通信的概念被提出^[5]。共生通信是在环境反向散射的基础上，通过主从通信系统之间的良好协调，不仅消除了从系统产生的反向散射信号对主系统的干扰，还将反向散射信号转化为对主系统有益的信号。

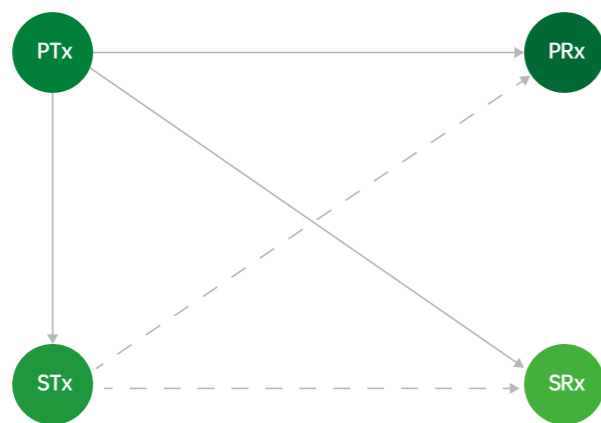


图 6.2-2 共生通信系统模型

在如图 6.2-2 所示的共生通信系统模型中，主发射机 PTx 与主接收机 PRx 构成主通信系统。而从发射机 STx 与从接收机 SRx 构成从通信系统。STx 借助于 PTx 发射的信号实现反射散射调制。其中，最为关键的是从系统反向散射的信号的码片宽度 C_p 与主系统的信号码片宽度 C_s 需要满足 K 倍关系，即 $C_p = K \cdot C_s$ 。因此，反向散射信号在 K 个主系统码片对应的时域区间内并未变化。由此，在主系统以 K 个码片为单位进行相干解调时，从系统的反向散射信号等效于混入主系统的主接收信号之外一个多径信号^[6]。因此，通过这样的约束，从系统在完成依赖主系统的信号进行反向散射完成自身通信的同时，不但对主系统没有干扰，反而通过提供多径信号使得主系统的性能上有所提升^[7]。由于主从通信系统这种微妙的关系类似于生物学上的共生关系，因此上述通信系统模型被命名为共生通信。

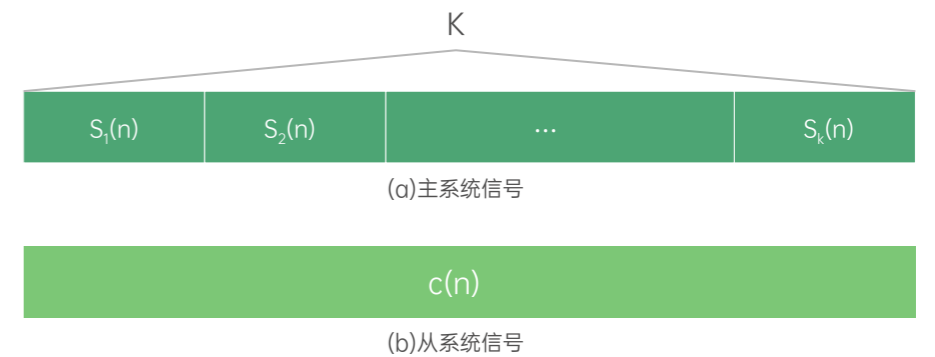


图 6.2-3 共生通信系统中主从系统之间的信号关系

共生通信一方面解决了零功耗通信的无线供能问题，另一方面也解决了零功耗通信的频谱问题，使得零功耗通信可以共享传统通信的频谱且与传统通信在相同频谱上良好共存。因此，共生通信将有望成为零功耗通信的重要实现方式。

6.3 零功耗通信与通信感知一体化技术的融合

通感一体化在无线信道传输信息的同时，通过主动认知并分析信道的特性，利用无线信号感知周围环境的物理特征，能够实现对目标的定位、检测、成像和识别等感知功能，挖掘通信能力，增强用户体验。在硬件架构方面，通信与感知一体化系统面临的一个巨大挑战是需要兼容高精度的感知需求，因此大大增加了硬件系统的动态范围和复杂度，如何设计一个绿色节能又满足通信与感知双向需求的硬件系统架构是未来的重要研究难点之一^[8]。

通感一体化中，需要感知各种用户和环境背景。通常情况下，这些任务是借助专门的传感器来完成的。然而，这些专门的传感器往往需要外部电源来运行，由于电池存储的能量是有限的，因此在设备使用过程中电池要么需要充电，要么需要更换，这不仅不方便、成本高，而且在某些部署（极端环境例如高温、低温、辐射等）中也不可能实现。

将零功耗通信技术（主要使用能量采集和反向散射技术）与通感一体化进行结合，能够显著提高通感一体化网络的能量效率，使得通感一体化的绿色节能目标得到满足^[9]。一方面可以通过能量采集技术从周围环境中获取能量，从根本上消除对电池的依赖。另一方面，在基于反向散射进行通信时，仅需要微瓦级的功耗，实现极低的能量消耗，从而使能高效节能通感一体化网络。目前，反向散射技术已经在多个领域中得到应用，如使用射频（RF）反向散射进行食品和液体质量测试^[10]，使用无电池手机进行通信^[11]，使用反向散射辅助的车辆网络^[5]，使用反向散射进行水下监测^[12]，使用可见光反向散射进行手势传感^[13]等。

零功耗通信也提供了通信感知一体化的有效手段。在目标物体上装配零功耗通信单元，在网络触发对目标物体的感知指令时，可以触发零功耗通信过程，从而将目标物体的信息通过零功耗通信方式报告给网络侧，实现了精确的感知功能。

此外，能量采集模式也可以用来反映进行能量采集的环境特征，目前已经有了基于能量采集对周围环境进行感知的研究。因此，可以将零功耗通信中的能量采集模块作为一个虚拟的传感器，实现对周围环境的检测。基于此，业界对于能量采集的信号进行了应用上的扩展^[14]，除了使用采集到的能量进行电路驱动，还可以通过能量采集信号进行感知。例如，对动能进行能量采集进而驱动电路的可穿戴设备能够检测并计算用户的步数，这是由于能量收集器在每一次脚步着地时都会在能量收集信号中产生可识别的峰值^[15]。同样，热电能采集器能够简单地从产生的能量收集信号的变化中检测到表面温度的变化^{[16][17]}。

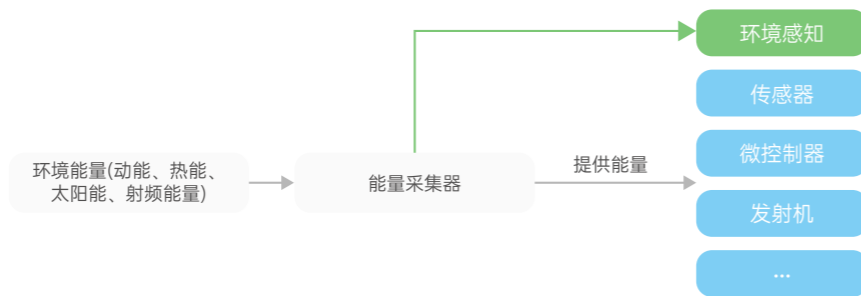


图 6.3-1 能量采集信号的应用扩展

近年来，来自动能、热电、太阳能和射频能量采集器的能量采集模式已经被证明可以用来对各种环境进行检测^[14]。不管进行能量采集的信号类型如何，都有两种主要的方法实现基于能量采集信号进行感知：第一种方法是对能量收集器接收到的信号的瞬时功率进行分析。第二种方法是对在特定时间内能量收集器积累的总能量进行分析。

- 基于能量采集信号进行感知的典型应用^[14]如表 6.3-1 所示：

表 6.3-1 基于能量采集进行感知典型应用

能量采集形式	典型应用
基于动能进行能量采集	人类活动识别(例如行走和跑步); 交通方式识别(例如乘坐汽车、公共汽车、火车等); 卡路里消耗估算; 步数计算; 暖通空调气流监控等
基于热能进行能量采集	水流检测 ^[18] (该方案在热水流经管道时,从管道的热梯度(即管道与室温之间的温差)中收集能量,收集的热能用于唤醒处于深度睡眠模式的传感器,并补偿电池的能量消耗);热设备监控;化学反应检测等
基于太阳能进行能量采集	定位、手势识别、可见光通信等
基于射频信号进行能量采集	加载传感器的 RFID 标签

零功耗技术与通感一体化进行融合，可以实现通信、感知、能量传输的一体化。一方面可以通过能量采集和反向散射技术，实现免电池和绿色节能，便于在一些复杂环境中进行部署。另一方面，也可以基于能量采集模块对周围环境进行感知。

6.4 零功耗通信与非正交多址接入(NOMA)的融合

与正交多址技术相比，NOMA 可以支持在同一频谱 / 时间资源上的多个设备的接入，有望在未来的无线网络中提供高频谱效率和支持大规模连接。另一方面，反向散射通信是一种新兴的技术，在未来的无线网络中，利用环境中的无线电波，使设备之间的通信成为可能，能够实现免电池传输。将零功耗通信与 NOMA 技术结合，有助于在未来的网络中支持低功耗无线设备的大规模连接。由于不需要产生载波信号，零功耗通信的功耗极低，电路结构简单，因此也有望实现极低成本的 NOMA 方案。

一方面，在 NOMA 系统的下行链路中，可以通过与零功耗技术（核心为能量采集和反向散射）相结合，提升 NOMA 系统的性能。目前业界对下行 NOMA 系统与反向散射通信的结合进行了研究。主要可以分为如下两个方案：

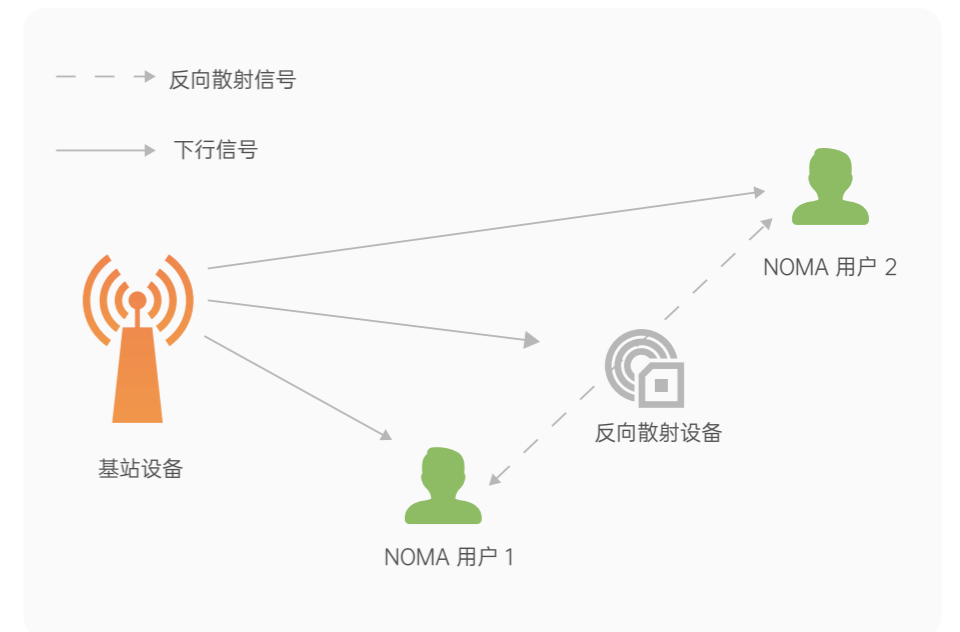


图 6.4-1 下行 NOMA 与反向散射结合：使用单独的反向散射设备

方案 1: 使用一个特定的反向散射设备^{[19][20]}，将下行 NOMA 系统和一个反向散射设备合并在一起，构成了一个反向散射 NOMA 系统，如图 6.4-1 所示。在该系统中，基站在同一资源块中同时向远端的蜂窝用户 2 和近端的蜂窝用户 1 发送信息，与此同时，反向散射设备基于基站下行信号进行能量采集，驱动电路运转，通过反向散射的方式向蜂窝用户传输信息（可以是转发的基站信息，也可以通过调制基站下行信号发送自己的信息）。在进行解码时，远端用户 2 只需要解码自己的信息（由于反向散射信号的信号强度很弱以及衰减，远端用户可以忽略反向散射信号的影响），近端用户 1 需要解码来自基站和反向散射设备的信息。对于多小区场景，可以通过同时优化各个信号源的总功率、用户的功率分配系数和反向散射设备的反射系数^[21]，来实现整个系统的能源效率最大化。

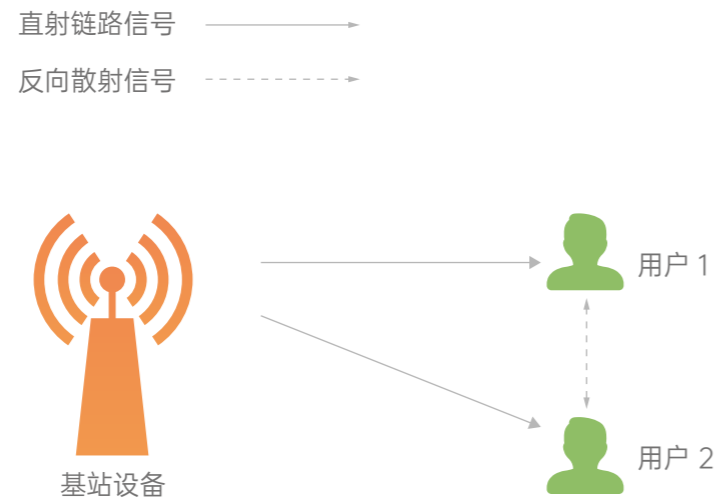


图 6.4-2 反向散射协作的下行 NOMA 系统

方案 2 是直接将接收到的下行信号在用户处的剩余功率（超出解调信号所需的下行信号能量的部分）通过反向散射的方式分享给其他用户，以增强此前无法恢复其信息的用户（如因链路质量较差导致）的接收能力^[22]。基站通过 NOMA 方式在同一资源块中向多个用户发送消息，用户在接收基站发送的信号同时，将一部分剩余功率通过反向散射发送给其他用户。与非协作 NOMA 系统相比，基于反向散射的协作 NOMA 系统有着更高的传输可靠性和传输效率。

另一方面，在零功耗通信中，往往有大量终端进行通信，这些终端的上行传输通常需要在时域或频域进行复用以避免冲突，但仍需要进一步提高系统容量。将 NOMA 技术与零功耗通信的上行传输相结合，能够有效提高系统的频谱效率和吞吐量。目前业界对 NOMA 技术增强反向散射进行了大量研究。

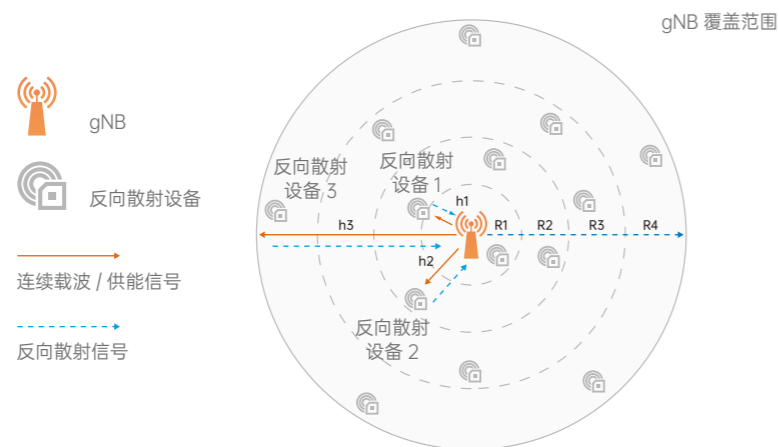


图 6.4-3 功率域 NOMA 增强反向散射通信

例如，通过将时分复用与功率域 NOMA 相结合，使用混合接入方案来增强反向散射通信系统的容量和吞吐量等方面的性能。在反向散射通信时，基站（或者阅读器）往往会接收到来自多个反向散射节点（Backscatter Node, BN）的反射信号，这会导致从反向散射设备到基站（或者阅读器）之间的上行数据传输发生冲突和碰撞，由于碰撞导致数据丢失，则必须进行数据的重传，这将会影响反向散射通信的能效。对此，可以基于区域划分的方法在反向散射通信中实现功率域 NOMA^{[23][24]}，即在不同的区域或不同的后向散射功率水平下复用网络，以提高反向散射通信系统的频谱效率。

进一步的，关于反向散射通信与 NOMA 结合的系统，如何进行干扰消除的优化，以及如何联合优化信号源的发射功率、反向散射通信的发射系数等，以达到提高系统效率^[25]，均有了相关的理论研究。

6.5 零功耗通信与 AI/ML

AI (Artificial Intelligence, 人工智能) 是计算机技术对人类智能过程的模拟，它通常被定义为一门让计算机像人类一样执行智能任务的科学^[26]。机器学习 (ML, Machine Learning) 是目前广泛流行的 AI 实现方式。ML 通过对大量的数据进行学习、推断、拟合及聚类，优化系统性能及对外界的表现能力。ML 通常可以分为监督学习，无监督学习和强化学习。以监督学习为例，常见的算法包括神经网络算法，即基于一组先验的数据，对神经网络节点间的加权系数进行训练，当训练收敛后，分层神经网络可以实现对新数据的辨识和推断。通常，隐层节点越多，越有利于从数据中学习系统本质特征，从而提升分类或预测的准确性，即实现深度学习。可见，AI 技术可以有效的提升系统性能，可靠性以及自适应性。当前，AI 技术已经普遍应用于方方面面，有效提升了不同系统的运行效能。

对于基于反向散射技术的零功耗通信，终端可能面临更加复杂及严苛的通信环境。例如，如 5.2 节所述，在一些场景中如物流或产品线检测，大量终端需要利用有限的信道资源同时与网络进行通信，如何协调终端之间的通信是面临的挑战。此外，由于零功耗终端电量受限，不适合执行复杂的信道测量及上报流程，在未获得充分的信道信息的情况下，如何提升数据传输的性能是面临的另一挑战。因此，在这些场景下，可以考虑使用 AI 技术以提升零功耗通信系统的性能，可能的方向包括：

1) 利用 AI/ML 优化零功耗终端通信策略^{[27][28]}。例如，如图 6.5-1 所示，采用 AI 训练模型以环境信息、网络侧反馈信息（是否正确接收等）以及系统性能指标等因素作为输入，系统以终端通信策略作为输出，优化系统在不同通信环境的操作策略。比如，基于训练结果，零功耗终端可以根据环境自适应地在能量采集、反向散射、信道估计和均衡等操作行为之间灵活适时合理切换，从而实现零功耗通信系统的最佳工作性能。在与网络进行通信时，终端可以借助 AI 结合环境干扰情况及自身电量调整传输时机、传输速率、发射功率及通信时间等参数，从而提升零功耗系统的可靠性和鲁棒性。

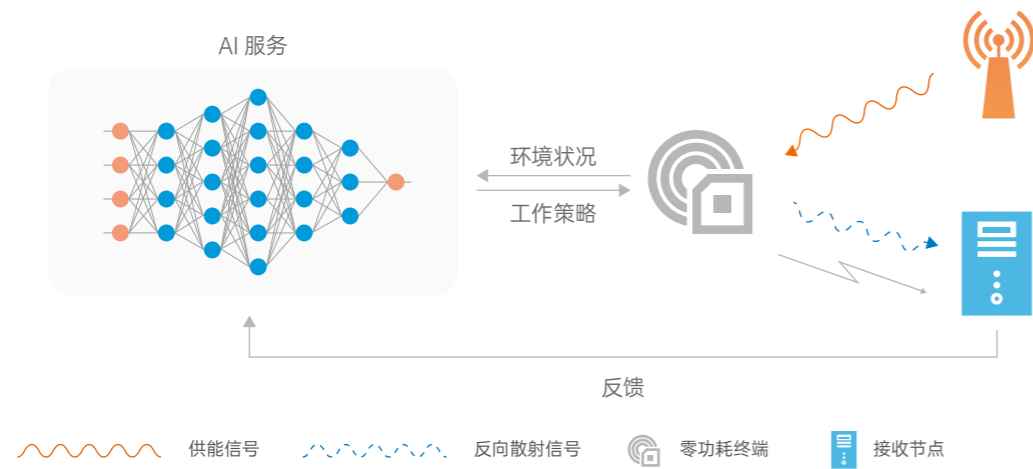


图 6.5-1 利用 AI 技术优化零功耗通信策略

2) 利用 AI/ML 优化网络侧的资源分配及供能策略 [29][30]。例如，零功耗网络节点借助 AI 技术，训练不同零功耗通信场景下的资源分配方式及无线供能策略，调整供能节点和通信节点的位置，选择合适的节点配对策略，确保零功耗终端可以高效的进行能量采集和通信，扩大零功耗通信的覆盖范围。

此外，由于 AI 系统的性能很大程度上依赖于提供充足的数据源。零功耗终端具有体积小、成本低、耗电少以及方便大面积部署等优点特点，因此，零功耗通信提供了一种低成本数据采集方案，也可以促进 AI 技术的发展和提升 AI 系统的性能。例如，在智能工厂场景中，使用零功耗终端采集环境信息，如温度、湿度、压力、运动姿态、震动频率等，通过 AI 提前预测环境变化、预测系统的工作状态变化、触发预警或为其他智能设备提供环境调节指示信息。在智能家居场景中，零功耗终端采集人体位置、生活起居规律、温度、光线等信息，通过 AI 技术实现各种家居设备间的智能联动，提升日常家居生活的智能化和舒适性。

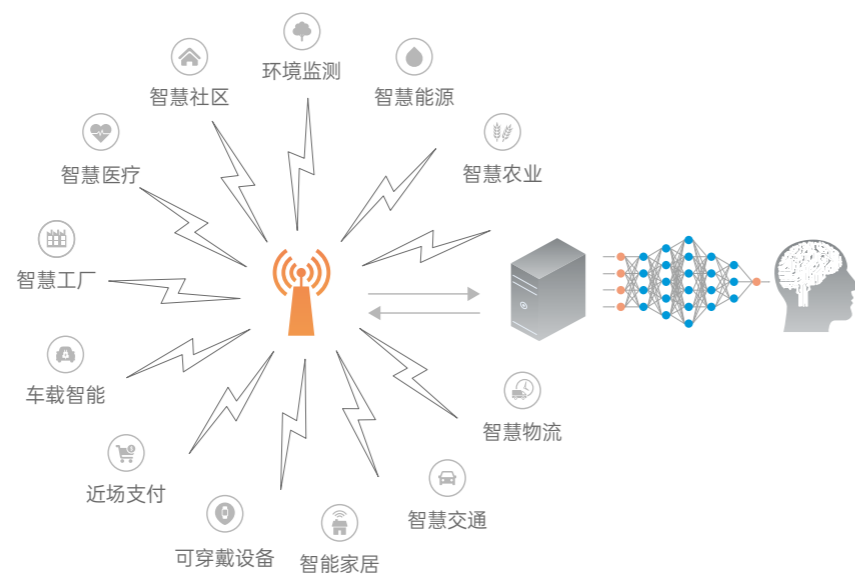


图 6.5-2 利用零功耗通信实现 AI 低成本数据采集

6.6 参考文献

[1] Jia X, Zhou X. IRS-Assisted Ambient Backscatter Communications Utilizing Deep Reinforcement Learning[J]. arXiv preprint arXiv:2103.07083, 2021.

[2] Zelaya R I, Sussman W, Gummesson J, et al. LAVA: fine-grained 3D indoor wireless coverage for small IoT devices[C]//Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference. 2021: 123-136.

[3] R. Fara, D-T. Phan-Huy, P. Ratajczak, A. Ourir, M. Di Renzo, J. de Rosny "Reconfigurable intelligent surface-assisted ambient backscatter communications – Experimental assessment" , arXiv: 2103.08427, 2021.

[4] V. Liu, A. Parks, V. Talla, S. Gollakota, D. Wetherall, and J. R. Smith, "Ambient backscatter: wireless communication out of thin air," in Proc. of ACM SIGCOMM, Hong Kong, China, Jun. 2013, pp. 1-13.

[5] Y.-C. Liang, Q. Zhang, Erik G. Larsson, and G. Y. Li, Symbiotic Radio: Cognitive Backscattering Communications for Future Wireless Networks, IEEE Trans Cognitive Communications and Networking (TCCN), 2020.

[6] W. Liu, Y.-C. Liang, Y. Li, and B. Vucetic, Backscatter Multiplicative Multiple-Access Systems: Fundamental Limits and Practical Design, IEEE Transactions on Wireless Communications, Sept 2018.

[7] R. Long, Y.-C. Liang, H. Guo, G. Yang, and R. Zhang, "Symbiotic radio: A new communication paradigm for passive internet-of-things," IEEE Internet Things J., 2020.

[8] https://mp.weixin.qq.com/s/l2KhygV3Rnzpm4gl7Zb_xg

[9] Toro U S, Wu K, Leung V C M. Backscatter Wireless Communications and Sensing in Green Internet of Things[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021.

[10] U. Ha, J. Leng, A. Khaddaj, and F. Adib, "Food and liquid sensing in practical environments using rfids," in 17th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 20), 2020, pp. 1083-1100.

[11] V. Talla, B. Kellogg, S. Gollakota, and J. R. Smith, "Battery-free cellphone," Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, vol. 1, no. 2, pp. 1-20, 2017. [5] P. Wang, L. Feng, G. Chen, C. Xu, Y. Wu, K. Xu, G. Shen, K. Du, G. Huang, and X. Liu, "Renovating road signs for infrastructure-to-vehicle networking: A visible light backscatter communication and networking approach," in Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2020, pp. 1-13.

- [12] R. Ghaffarivardavagh, S. S. Afzal, O. Rodriguez, and F. Adib, "Ultrawideband underwater backscatter via piezoelectric metamaterials," in Proceedings of the Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication, 2020, pp. 722-734.
- [13] A. Varshney, A. Soleiman, L. Mottola, and T. Voigt, "Battery-free visible light sensing," in Proceedings of the 4th ACM Workshop on Visible Light Communication Systems, 2017, pp. 3-8.
- [14] D. Ma, G. Lan, M. Hassan, W. Hu, and S. K. Das, "Sensing, computing, and communications for energy harvesting iots: A survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2, pp. 1222-1250, 2019.
- [15] S. Khalifa, M. Hassan, and A. Seneviratne, "Step detection from power generation pattern in energy-harvesting wearable devices," in Proc. IEEE Int. Conf. Data Sci. Data Intensive Syst., 2015, pp. 604-610.
- [16] P. Martin, Z. Charbiwala, and M. Srivastava, "DoubleDip: Leveraging thermoelectric harvesting for low power monitoring of sporadic water use," in Proc. 10th ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., 2012, pp. 225-238.
- [17] B. Campbell, B. Ghena, and P. Dutta, "Energy-harvesting thermoelectric sensing for unobtrusive water and appliance metering," in Proc. 2nd Int. Workshop Energy Neutral Sens. Syst., 2014, pp. 7-12.
- [18] P. Martin, Z. Charbiwala, and M. Srivastava, "DoubleDip: Leveraging thermoelectric harvesting for low power monitoring of sporadic water use," in Proc. 10th ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst., 2012, pp. 225-238.
- [19] Zhang Q, Zhang L, Liang Y C, et al. Backscatter-NOMA: A symbiotic system of cellular and Internet-of-Things networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 20000-20013.
- [20] Xu Y, Qin Z, Gui G, et al. Energy efficiency maximization in NOMA enabled backscatter communications with QoS guarantee[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 10(2): 353-357.
- [21] Ahmed M, Khan W U, Ihsan A, et al. Backscatter Sensors Communication for 6G Low-powered NOMA-enabled IoT Networks under Imperfect SIC[J]. arXiv preprint arXiv:2109.12711, 2021.
- [22] Chen W, Ding H, Wang S, et al. Backscatter cooperation in NOMA communications systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(6): 3458-3474.

- [23] Zeb S, Abbas Q, Hassan S A, et al. NOMA enhanced backscatter communication for green IoT networks[C]//2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2019: 640-644.
- [24] Guo J, Zhou X, Durrani S, et al. Design of non-orthogonal multiple access enhanced backscatter communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(10): 6837-6852.
- [25] Khan W U, Li X, Zeng M, et al. Backscatter-enabled NOMA for future 6G systems: A new optimization framework under imperfect SIC[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(5): 1669-1672.
- [26] C. Wang, M. D. Renzo, S. Stanczak, S. Wang and E. G. Larsson, "Artificial Intelligence Enabled Wireless Networking for 5G and Beyond: Recent Advances and Future Challenges," in IEEE Wireless Communications, vol. 27, no. 1, pp. 16-23, February 2020, doi: 10.1109/MWC.001.1900292.
- [27] N. Van Huynh, D. N. Nguyen, D. T. Hoang and E. Dutkiewicz, " "Jam Me If You Can:" Defeating Jammer With Deep Dueling Neural Network Architecture and Ambient Backscattering Augmented Communications," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 37, no. 11, pp. 2603-2620, Nov. 2019, doi: 10.1109/JSAC.2019.2933889.
- [28] F. Jameel, W. U. Khan, S. T. Shah and T. Ristaniemi, "Towards Intelligent IoT Networks: Reinforcement Learning for Reliable Backscatter Communications," 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/GCWkshps45667.2019.9024401.
- [29] Y. Nie, J. Zhao, J. Liu, J. Jiang and R. Ding, "Energy-efficient UAV trajectory design for backscatter communication: A deep reinforcement learning approach," in China Communications, vol. 17, no. 10, pp. 129-141, Oct. 2020, doi: 10.23919/JCC.2020.10.009.
- [30] T. T. Anh, N. C. Luong, D. Niyato, Y. Liang and D. I. Kim, "Deep Reinforcement Learning for Time Scheduling in RF-Powered Backscatter Cognitive Radio Networks," 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/WCNC.2019.8885426.

结语

在 B5G/6G 时代，来自于垂直行业的需求将越来越受到关注。然而，尽管伴随通信技术的快速发展，已经研制了多种物联网通信技术适配相关行业应用，但仍有大量应用场景的相关需求没有得到很好的满足。而使用能量采集和反向散射的零功耗通信技术由于其出色的极低功耗，极小尺寸，极低成本等优良性能，有望成为新一代物联网通信技术，从而解决未满足的物联网通信需求。本书首先系统梳理了零功耗通信的潜在应用场景，进一步梳理了使能零功耗通信的关键技术。其次，对零功耗通信系统设计层面如可使用的频段，系统部署模式以及与传统通信系统的共存进行系统性分析。然后，对零功耗通信的关键技术如无线供能，数据传输，轻量化协议，传输安全以及网络架构等方面也进行了系统的思考和深入分析。最后，对于零功耗通信与当前 6G 热点的潜在融合进行了初步分析。

希望 OPPO 研究院这本《零功耗通信》白皮书起到抛砖引玉的作用。若能触发行业内对零功耗通信相关技术更多的思考以及促进相关产业的更早成熟，则本书作者将会倍感欣慰，深受鼓舞。