



专题：5G 演进技术

5G-Advanced 低功耗唤醒接收机和唤醒信号技术

潘学明, 曲鑫

(维沃移动通信有限公司, 北京 110105)

摘要: 对于可穿戴设备和物联网终端来说, 设备的功耗至关重要。低功耗唤醒接收机和唤醒信号技术能够实现微瓦级的终端待机功耗, 大幅度提升终端设备的电池寿命, 可广泛适用于智能可穿戴设备、物联网设备、智能手机等终端类型。该技术已经被 3GPP 标准组织立项研究, 有望成为 5G-Advanced 中终端侧的标志性技术之一。对低功耗唤醒接收机和唤醒信号技术进行了初步探讨, 包括低功耗唤醒接收机的应用场景和需求、电路结构、唤醒信号设计、移动性和测量、与现有系统共存、干扰抑制等方面。

关键词: 5G-Advanced; 低功耗接收机; 唤醒信号; 可穿戴设备

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022058

Low power wake-up receiver and wake-up signal technology in 5G-Advanced

PAN Xueming, QU Xin

vivo Mobile Communication Co., Ltd., Beijing 110105, China

Abstract: Power consumption is critical for wearable and IoT (Internet of things) devices. Device standby with micro-watt level power consumption can be enabled by using low-power wake-up receiver/wake-up signal technology, which can increase the device battery life and are widely applicable to smart wearables, Internet of things, smart phones, etc. Study item on low power wake-up receiver and wake-up signal technology has been approved in 3GPP, and was considered as one of the iconic technologies for mobile devices in 5G-Advanced. Preliminary discussion on low power wake-up receiver and wake-up signal technology were provided, including use case and requirements, low power wake-up receiver structure, wake-up signal design, mobility and measurement aspects, co-existence with legacy system, anti-interference design.

Key words: 5G-Advanced, low-power receiver, wake-up signal, wearable device

0 引言

2017 年 12 月, 第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 发布 5G Re-

lease 15(Rel-15)第一个非独立组网(non-standalone, NSA)版本标准, 并在 2018 年 6 月进一步发布 Rel-15 独立组网(standalone, SA)标准^[1-4]。2020 年 6 月, 3GPP 完成了 5G 第一个增强版本 Rel-16 的标准化工

作^[5-8]。5G Rel-15 和 Rel-16 主要完成面向增强型移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB) 和超可靠低时延通信 (ultra-reliable & low-latency communication, URLLC) 场景的设计, 较好地完成了对高数据速率、高频谱效率、高速移动速度、低时延和高可靠性等方面的支持。

从 2020 年开始, 3GPP 开启了 5G 的进一步增强版本 Rel-17, 其中一个重要的方向是优化 5G 系统设计, 更好地支持物联网场景的需求。工业物联网是其中一个主要的应用场景, 如工业传感器、实时监控、工业控制等。随着科技的进步, 可穿戴设备等各种形态的物联网终端受到消费者的青睐, 典型设备/应用包括智能手表、智能眼镜、智能手环、健康穿戴、体感控制、物品追踪等。这些设备应用要求终端有较低的成本, 因此需要降低终端的复杂度。此外, 还需要满足可穿戴终端对设备尺寸、功耗的苛刻限制。

3GPP Rel-17 立项了降低能力 (reduced capability, RedCap) NR 终端项目, 项目采用标准化的方式降低了终端的成本和复杂度, 包括降低终端带宽能力、减少终端接收天线数、支持频分双工 (frequency division duplexing, FDD) 半双工操作等。根据 Rel-17 RedCap 的研究结论^[9], 终端成本和复杂度降低技术手段及可实现的增益见表 1。

考虑标准化的工作量, Rel-17 最终仅对降低终端带宽能力 (FR1 20 MHz, FR2 100 MHz)、减少终端接收天线数、支持 FDD 半双工操作等技术完成了标准化。在 Rel-18 中, 将继续降低终端带宽能力到 5 MHz、放松终端处理时间、减少混合自动重传请求 (hybrid automatic repeat request, HARQ) 进程数量、降低终端发射功率等级等研究和标准化, 更好地满足物联网场景对终端低成本、低复杂度、小尺寸的要求^[10]。

物联网终端的另一个重要挑战是设备功耗。从 Rel-16 以来, 3GPP 一直在研究 5G 终端节能技术, 已标准化的终端节能特性见表 2。已有的终端节能技术虽然能大幅度降低 5G 终端的功耗, 但距离物联网终端的功耗需求, 如工业传感器终端 1 年以上、可穿戴终端 2 周以上的待机时长需求, 还有较大的差距。

受限于设备尺寸, 智能手表通常配备小容量 (200~600 mAh) 电池。智能手表的 idle 态功耗和待机时长分析见表 3, 其中, 非连续接收 (discontinuous reception, DRX) 周期为 1.28 s。不同 DRX 周期 (0.64 s、1.28 s、2.56 s) 情况的 5G 智能手表的待机时长分析如图 1 所示。5G 智能手表的待机时长相比 2 周的目标, 还有较大的差距。需要说明的是, 这里假设终端始终处于 idle

表 1 终端成本和复杂度降低技术手段及可实现的增益

技术手段	终端的成本/复杂度降低	其他效果
降低终端带宽能力	FR1, 由 100 MHz 降低至 20 MHz, 约 32% FR2, 由 200 MHz 降低至 100 MHz, 约 16%	降低终端功耗
减少终端接收天线 (Rx)	由 2Rx 降低至 1Rx 或由 4Rx 降低至 2Rx, 约 30% 由 4Rx 降低至 1Rx, 约 46%	减小终端尺寸、降低终端功耗
支持 FDD 半双工操作	约 7%	无
放松终端处理时间	终端物理层业务信道处理时间放松一倍, 约 6%	降低终端功耗
降低终端带宽能力、减少终端接收天线 (Rx)	58%	减小终端尺寸、降低功耗
降低终端带宽能力、减少终端接收天线 (Rx)、支持 FDD 半双工操作	63%	减小终端尺寸、降低功耗
降低终端带宽能力、减少终端接收天线 (Rx)、支持 FDD 半双工操作、放松终端处理时间	67%	减小终端尺寸、降低功耗

注: FR1 是指 3GPP 5G 标准定义的 Frequency range 1, 频率范围为 450~6 000 MHz; FR2 是指 3GPP 5G 标准定义的 Frequency range 2, 频率范围为 24 250~52 600 MHz。



表 2 5G Rel-16/Rel-17 中的终端节能特征

标准版本	终端节能特性
Rel-16	用于无线资源控制连接态非连续接收的唤醒信号 连接态下行多输入多输出层数自适应 用户设备辅助信息上报 辅载波休眠 idle（空闲态）或 inactive（非激活态）状态无线资源管理测量放松
Rel-17	寻呼提前指示 扩展的非连续接收 进一步 RRM 测量放松 连接态物理下行控制信道监听节能 连接态无线链路监控/波束失败检测测量放松 idle/inactive 态测量信号 inactive 态小数据传输

表 3 5G 智能手表的 idle 态功耗和待机时长分析（DRX 周期为 1.28 s）

终端类型	idle 态平均电流	idle 态平均功耗	待机时长（200 mAh）	待机时长（400 mAh）	待机时长（600 mAh）
4G 智能手表	4 mA	16 mW	2.08 天	4.16 天	6.25 天
5G 智能手表	7 mA	28 mW	1.19 天	2.38 天	3.57 天

待机状态，没有上下行业务，实际场景中考虑业务收/发的需求，待机时间会更短。因此，有必要在 5G-Advanced 中继续探索能够成倍提升终端待机时长的技术方案。面向这一需求，低功耗唤醒接收机和唤醒信号技术被提出，本文将对 5G-Advanced 终端的重要技术进行介绍。

1 现有 5G 终端节能技术

能耗效率是 5G 系统重要技术指标之一。3GPP 自 Rel-16 开始对 5G 终端节能技术持续展开研究和标准化，如非连续性接收、寻呼提前指示、连接态唤醒信号等。

（1）非连续接收（DRX）和扩展的非连续接收（eDRX）

为降低空闲态或非激活态终端的功耗，终端周期性监听寻呼消息确定是否有下行数据到达。

当监听到对该 UE 的寻呼消息时，UE 准备开始数据通信；否则，继续停留在休眠状态。终端在每个 DRX 周期监听一次寻呼时刻（paging occasion, PO），即一个周期内的小部分时间进行监听，在其余时刻处于休眠，实现省电。

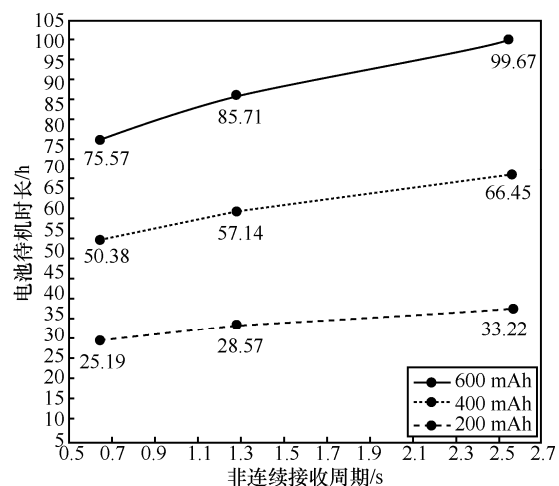


图 1 智能 5G 手表的待机时长分析（不同 DRX 周期）

为进一步省电, 3GPP 设计了 eDRX 机制。eDRX 机制如图 2 所示, 一个 eDRX 周期包含一个寻呼时间窗 (paging time window, PTW), 一个 PTW 包含多个 DRX 周期, UE 在每个 DRX 周期监听一次 PO, PTW 外的时间不进行监听寻呼信道, 从而可以关闭接收机省电。因此, 在 eDRX 机制中, 功耗大小主要取决于配置的 eDRX 周期。周期越长, 则在给定时间段内, 终端醒来的时间越短, 功耗越小, 但长周期却带来很大的时延, 不适宜作为对时延有需求的业务终端的节能技术方案。当把 eDRX 周期设置很短, 或直接使用 DRX 周期时, 可以实现较小时延, 但因终端频繁醒来, 功耗较大, 因此能够有效降低功耗并保持较低时延的节能技术将成为后续研究的关键方向。

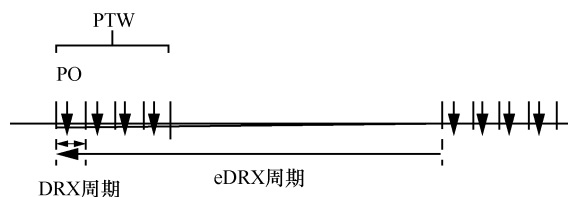


图 2 eDRX 机制

(2) 连接态 DRX 唤醒信号

为了进一步减少连接态 C-DRX 中的终端功耗, 在 3GPP Rel-16 的新空口 (new radio, NR) 标准中引入了唤醒信号 (wake-up signal, WUS)。终端在每个 DRX OnDuration (监听时间段) 周期之前通过检测唤醒信号, 得知是否需要在 DRX OnDuration 开启下行控制信道的监听。终端检测唤醒信号所需的能耗比开启一个完整的 DRX OnDuration 小, 因此节能唤醒信号能有效地节约终端功耗。目前, WUS 采用 PDCCH 方式发送, 定义了下行控制信息 (downlink control information, DCI) 格式 2_6 (DCI format 2_6)。基于 3GPP 的研究评估, 不同业务下连接态唤醒信号 WUS 的节能增益在 30%~50%, 是一个较为客观的增益。对于可穿戴和物联网设备, 其连接态业务相对稀疏, idle 态占比大, 一些统计数据表明智能手表的 idle 态时长占比可以达 90%以

上。因此, 连接态 WUS 对增加此类 idle 态占比大的终端类型待机时长实际增益有限。

(3) 寻呼提前指示信号

空闲态或非激活态终端在接收寻呼消息之前, 需要处理一个或多个同步信号块 (synchronization signal block, SSB) 完成下行自动增益控制 (automatic gain control, AGC) 调整、下行时频同步和 RRM 测量等以满足 paging 消息的有效检测和小区重选的判断。这些处理需基于 SSB 信号, NR 中 SSB 发送周期为 20 ms, 因此, 终端可能需要在 PO 之前保持较长时间的接收状态完成 SSB 的处理, 使 5G 终端的待机功耗较高。

为了降低空闲态或非激活态终端的功耗, Rel-17 引入寻呼提前指示 (paging early indication, PEI) 特性: 即终端在对应的 PO 之前, 首先检测 PEI。如果终端检测到 PEI, 则继续在对对应 PO 监听 paging 消息, 否则跳过 paging 消息的监听。检测 PEI 所需的同步精度需求较低, 因此终端在检测 PEI 前需要处理的 SSB 个数少于终端直接检测 paging 消息需要处理的 SSB 个数, 又由于大部分时间段终端并没有实际被寻呼, 因此, PEI 的引入可以减少终端的 SSB 的处理, 达到省电的效果。目前 PEI 采用 PDCCH 方式发送, 定义了 DCI 格式 2_7。PEI 可以降低终端 idle 态功耗 10%~30%, 但距离数倍的待机时长提升目标, 还有较大差距。

除上述特性外, 3GPP Rel-16/Rel-17 还引入了 radio resource management (RRM) 测量放松、空闲态或非激活态测量信号、无线链路故障 (radio link failure, RLF) 或波束故障检测 (beam failure detection, BFD) 测量放松、UE 辅助信息、PDCCH 监听自适应等终端节能增强方案。这些特性虽然能够不同程度地减少终端功耗, 但现有技术的功耗水平, 相比用户的预期, 特别是待机时长方面, 还有数倍的差距。因此, 需要继续探索具有超低能耗、较低时延的终端唤醒方案。



2 现有低功耗唤醒接收机技术进展

为降低现有终端接收机功耗,可以采用较长的休眠周期,使终端周期性地开启进行通信,但由此带来了较大的通信时延。如果能够按需唤醒终端,则可以同时兼顾低功耗性能和时延需求。低功耗唤醒接收机可实现按需唤醒功能,在现有终端接收机上增加该辅助唤醒模块,使得在没有通信需求时终端接收机处于关闭或休眠状态,仅开启唤醒接收机,用来监听唤醒信号并及时唤醒终端接收机,低功耗唤醒接收机因其采用简单的硬件,使功耗降至微瓦量级,得到了业界的广泛关注。其中,IEEE 802.11ba 于 2017 年 1 月开始启动低功耗唤醒接收机的技术标准工作,在 2020 年 12 月结束主要标准工作并输出技术规范^[11],其主要技术参数见表 4,IEEE 802.11ba 技术规范支持低功耗唤醒接收机的工作频点为 2.4 GHz 和 5 GHz,工作带宽约为 4.06 MHz,其中,低功耗唤醒信号采用多载波开关键控(on-off keying, OOK)调制方式,并复用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)信号生成结构生成 OOK 信号,一个 OOK 符号长度对应载波间隔为 312.5 kHz 的一个 OFDM 符号长度或一半,即 2 μ s 或 4 μ s,并支持高低两种速率传输。且在低速率下灵敏度可达到-82 dBm,高速率下灵敏度可达到-77 dBm。IEEE 802.11ba 接入点(access point, AP)沿用 IEEE 802.11 系列的竞争接入机制确定唤醒信号发送资源,因此天然具有较好的抗干扰性能。

表 4 IEEE 802.11ba 低功耗唤醒信号主要技术参数

调制方式	多载波 OOK
信道编码	曼彻斯特码
带宽	312.5 kHz $\times$ 13
载频	2.4 GHz/5 GHz
数据率	62.5 kbit/s/250 kbit/s
符号长度	2 μ s/4 μ s
功耗	<100 μ W

学术界对低功耗唤醒接收机展开了广泛的研究和讨论,主要通过低功耗唤醒接收机的硬件结构设计^[12-13],接收机主要器件及工艺设计^[14-15]、抗干扰技术设计^[16-19]等实现降低功耗与提升灵敏度和传输速率的平衡。文献[20]汇总了近 20 年低功耗唤醒接收机的主要工作并按不同性能指标进行分类与性能对比。根据统计结果可知,目前学术界的低功耗唤醒接收机研究涉及多种载波频点:1 GHz 以下、1~3 GHz、3~10 GHz、大于 10 GHz。已公开的低功耗唤醒信号检测方法主要包含相干检测和非相干检测两类。其中,相干检测通过晶振将接收到的唤醒信号变换到中频或低频进行处理,具有较好的抗干扰性能和较高的灵敏度,但晶振带来的功耗较大。非相干检测则通过包络检波直接将唤醒信号变换到低频处理,可有效降低功耗,因包络检波带来的灵敏度损失及抗干扰性能较差,需要考虑性能补偿方案。从统计结果来看,采用非相干检测的低功耗接收机功耗在 10 μ W 以下时,灵敏度范围主要集中在-60~80 dBm,而当功耗提高到 10~100 μ W 时,灵敏度可进一步提高到-80~100 dBm。进一步地,功耗在 10 μ W 以下时,数据传输速率最高可以达到 100 kbit/s,而当功耗提高到 10~100 μ W 时,数据传输速率最高可以达到 1 000 kbit/s。值得注意的是,以上描述的统计结果均为统计文献中的单个性能指标的最好值,并不代表多个性能指标可以同时达到最好值。

3 低功耗唤醒技术的应用场景与需求

3GPP 低功耗唤醒接收机/唤醒信号(low-power wake-up receiver/signal, LP WUR/WUS)研究项目^[21]主要针对功耗敏感、小尺寸的终端应用场景,研究高效可行的节能技术方案,主要包含可穿戴设备场景和物联网(Internet of things, IoT)场景。另外,还可以考虑其他应用场景的需求,如 XR(extended reality)智能眼镜、智能手机等。

可穿戴终端包含智能手表、健康状态跟踪终端以及医学监测终端等，典型的可穿戴设备场景如图 3 所示。为便于人体穿戴，通常采用较小的可充电电池或纽扣电池，因此，需要在较小电池容量条件下保持较长的待机时间，高效的节能技术尤为重要。在文献[9]中，确定可穿戴终端的电池需要维持 1~2 周终端使用时间，参照市场上典型智能手表采用的小于 500 mAh 电池容量，根据现有的终端节能技术和本文第 1 节的分析，可以看出已有技术的功耗性能无法支撑目标待机时长，并具有数倍的差距。

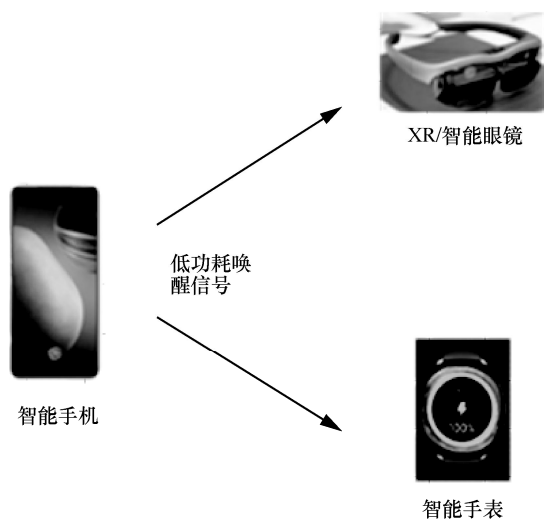


图 3 典型的可穿戴设备场景

物联网场景包含工业传感器、控制器、制动器等广泛应用于工业生产的设备，因其高危的作业环境，通常不便于频繁充电或更换电池。在文献[9]中，确定工业传感器的电池需要维持数年的使用时间，需要研究更高效的节能技术。另一方面，在物联网应用场景中，还需要保持较低的时延，如在火灾检测和报警场景，要求传感器检测到火灾 1~2 s 后触发控制器控制防火帘关闭和灭火装置自动喷水开启。现有蜂窝节能技术（如 eDRX），往往采用较长的监测周期来实现节能，带来很高的时延，无法支持低时延唤醒需求的业务，因此需要考虑新的低功耗机制满足节能和时延需求。

4 低功耗唤醒技术挑战

现有标准及学术研究较少涉及 5G 系统引入低功耗唤醒机制的研究设计，因此本节将主要针对 5G-Advanced 引入低功耗唤醒接收机/唤醒信号带来的新问题与初步解决思路进行探讨，主要包含唤醒接收机电路设计、唤醒信号设计、唤醒信号覆盖范围增强、唤醒信号移动性和测量机制设计、如何与现有系统共存、干扰抑制设计、机制设计以及与现有 5G 终端节能机制的有效结合。

5G 移动终端在现有通信单元基础上，引入低功耗唤醒接收机处理唤醒信号，可在降低功耗的同时保持较低时延。为便于描述，可将终端拆分为主通信单元和唤醒接收机单元，低功耗唤醒机制如图 4 所示。在无业务需求时，终端关闭主通信单元，仅开启唤醒接收机单元；当网络需要与终端通信时，可发送低功耗唤醒信号，终端侧唤醒接收机单元在成功检测唤醒信号后，触发主通信单元打开，建立与网络的通信连接完成业务的收发。

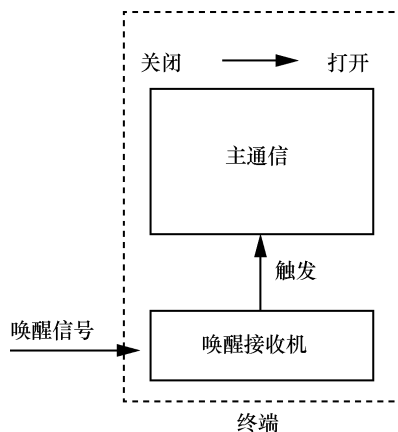


图 4 低功耗唤醒机制

4.1 唤醒接收机电路设计

引入唤醒接收机后，终端在无业务需求时关闭主通信单元，仅唤醒接收机工作耗电，因此，低复杂度低功耗的接收机设计是 5G-Advanced LP-WUR/WUS 研究阶段主要工作目标之一。进一



步地，唤醒信号的传输速率与覆盖范围要求直接影响了唤醒接收机的设计及功耗。例如，在给定发送功率的情况下，当要求唤醒信号覆盖范围比较大时，对应要求唤醒接收机的接收灵敏度较高，从而带来接收机复杂度的上升及功耗的增加；另一方面，当唤醒信号的传输速率较高时，则要求唤醒接收机以较高频率工作，同样带来功耗的增加。

一般而言，能够实现较低功耗的接收机结构包括以下两类。

- **RF 前端接收机**：此类接收机可以仅包含射频前端而不包含数字接收机部分，或直接将射频信号数字化而无须下变频到中频，与常规接收机相比，仅损失较小灵敏度，功耗可以降低至原来的 $1/5 \sim 1/3$ ，例如到毫瓦级。
- **包络检波接收机**：此类接收机主要通过包络检波检测接收信号的幅度，有效降低了接收机射频复杂度，可以将功耗降低至原来的 $1/1\,000 \sim 1/100$ ，例如，降至微瓦级。包络检波接收机的电路示意图如图 5 所示，信号经过二极管后输出电压值，随后经过整流比较器后确定对应的各级幅度值。例如，对于一种最简单的幅移键控调制 (ASK)，OOK 仅包含 0、1 两个幅值，当输出电压值高于比较器门限时，比较器输出 1；当输出电压低于比较器门限时，比较器输出 0，从而在接收端得到唤醒信号。另一方面，包络检波在有效降低功耗的同时带来了接收机灵敏度的损失，因此如何在保持低功耗的同时提升灵敏度成为后续待

研究的方向之一。

因此，在考虑唤醒接收机的硬件电路设计时，可综合考虑唤醒信号传输速率要求，接收机灵敏度要求及功耗要求，以满足不同场景的不同技术指标需求。

4.2 唤醒信号设计

包络检波接收机可将输入的射频信号直接变换得到基带信号，包络检波接收机仅能提取信号的幅值信息，而无法提取信号的频率和相位信息，因此，唤醒信号更适合采用 ASK 这种调制方式，而 OOK 仅包含 0、1 两个幅值是最简单的一种 ASK。采用简单的幅度调制使接收机处理唤醒信号复杂度大幅降低，实现功耗有效降低，但这也导致了唤醒信号覆盖范围变小，因此需要有效提升唤醒信号覆盖范围，以及设计抗干扰性强的唤醒信号。传统的码分多址 (code division multiple access, CDMA) 技术通过扩频是提高覆盖范围的有效手段，对于仅包含 0、1 两个幅值的 OOK 信号，如何设计有效的扩频序列需要后续的研究和验证。

为便于对比理解，对 Rel-18 低功耗唤醒信号与 Rel-15、Rel-16、Rel-17 多种唤醒信号的设计和性能比较见表 5。

4.3 唤醒信号覆盖范围

低功耗唤醒信号采用 OOK 调制，与 5G 下行信号不同，且唤醒接收机采用简化的硬件电路设计，如包络检波方式对唤醒信号进行检测，实现了功耗的大幅降低，但也同时带来了接收灵敏度的损失，因此唤醒信号的覆盖范围要小于 5G 下行信号

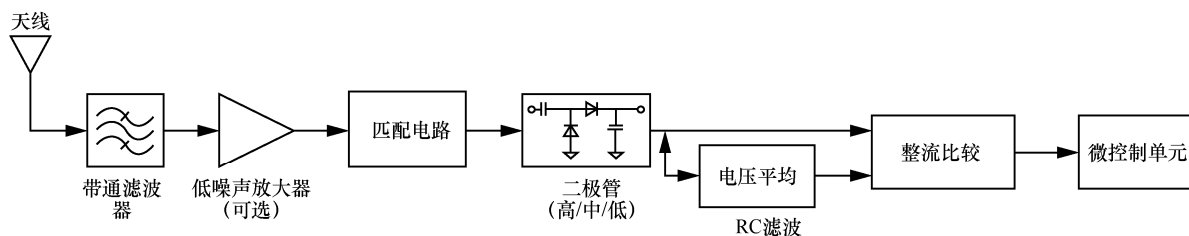


图 5 包络检波接收机的硬件电路示意图

表 5 多种唤醒信号的设计和性能比较

方案	通过能量收集供能	预计覆盖范围	接收灵敏度	功耗	信号设计
Rel-15 空闲态的唤醒信号	不可行	> 500 m	> -100 dBm	基线	
Rel-16 连接态的唤醒信号	不可行	> 500 m	> -100 dBm	降低连接态功耗 10%~20%	PDCCH 结构
Rel-17 空闲态的唤醒信号	不可行	> 500 m	> -100 dBm	降低空闲态功耗 10%~20%	PDCCH 结构
Rel-18 低功耗唤醒信号	可行	> 100 m	> -80 dBm	降低待机功耗为 原来的 1/1 000~ 1/100	独立的接收机, ASK (OOK): 待研究

的覆盖范围, 因此需要解决唤醒信号覆盖范围不够的问题, 唤醒信号覆盖如图 6 所示, 当终端在主通信单元关闭的时间段移出唤醒信号覆盖范围时, 网络将无法唤醒终端。可以通过合适的唤醒信号设计提升覆盖范围, 如采用较长序列或扩频操作等, 还可以通过辅助流程解决这一问题, 如当终端判断出已经移出唤醒信号覆盖范围时, 自动开启主通信单元, 通过主通信单元恢复与网络通信。

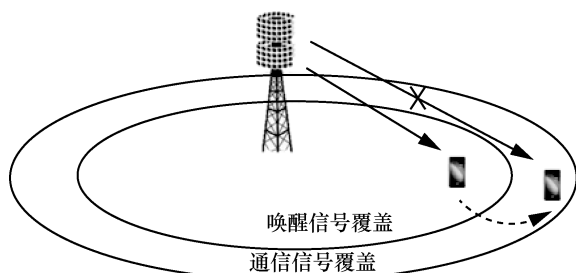


图 6 唤醒信号覆盖

4.4 移动性和测量设计

低功耗唤醒除了适用于终端静止场景, 还应用于移动场景, 因此终端在仅监听唤醒信号下如何实现测量从而支持移动性将是后续待解决的又一问题。5G 移动终端具有很好的移动性, 可以根据 RRM 测量进行小区切换。引入低功耗唤醒接收机, 当主通信单元关闭时, 终端无法执行现有的移动性测量, 需要考虑引入适用于唤醒接收机的新参考信号用于测量, 从而能够更好地支持低功耗和移动性。考虑终端通过唤醒接收机进行测量时, 既不处于现有的终端连接态, 也不处于空闲

或非激活态, 因此是否需要定义一个新的终端状态可以后续在研究阶段讨论。

一般而言, 低功耗唤醒信号可以通过两种方式进行部署: 带内部署和带外部署。带外部署时, 需要划分专用的频带资源用于发送唤醒信号, 因此无须考虑与已有通信系统的相互影响, 可以对唤醒信号进行灵活设计。然而考虑到专用频带资源的利用效率较低和运营商的部署难度大, 带内部署更具优势。低功耗唤醒信号与现有系统共存如图 7 所示, 带内部署允许网络在现有通信系统所在频带发送低功耗唤醒信号, 因此如何实现与现有 5G 通信信号的共存将是后续待解决的又一问题。

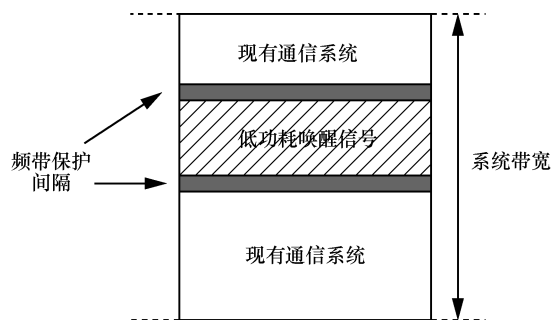


图 7 低功耗唤醒信号与现有系统共存

首先, 为了降低网络侧发送唤醒信号的复杂度, 可以考虑采用现有 OFDM 信号的生成方法来生成低功耗唤醒信号。例如, 复用 OFDM 信号生成架构产生幅值键控调制信号。其次, 如何利用简化的唤醒接收机硬件电路来消除来自已有的 5G 通信信号的干扰影响有待后续研究。



4.5 干扰抑制

唤醒接收机接收目标低功耗唤醒信号的同时也接收到干扰，包含共信道干扰和邻信道干扰。共信道干扰包含来自本小区或相邻小区已有通信系统的数据传输对唤醒信号的干扰，还包含本小区或相邻小区发送的唤醒信号对本终端唤醒信号的干扰。由于唤醒接收机采用简化的硬件电路设计而无法有效地对邻信道信号进行滤除，因此也会受到相邻信道的干扰影响。干扰的存在将导致低功耗唤醒信号误检或漏检，因此需要设计有效的干扰抑制方案。目前可用于低功耗唤醒接收机的抗干扰方案包含以下几类。

(1) 射频/中频/低频滤波器

此类方法适用于消除邻信道干扰，如图 5 所示，低功耗唤醒信号经天线接收经过带通滤波器，匹配网络，可在射频一定程度上抑制邻信道干扰，然而受限于器件成本和大小，带通滤波器与匹配滤波的滤波带宽通常无法做到太小，从而导致经过射频滤波后，滤波带宽内仍然存在一些邻信道干扰。一种改进方法为级联多级带通滤波器，从而获得一个较小合并滤波器带宽。另一种改进方法为将收到的唤醒信号和干扰的混合信号变换到中频或低频进行处理，此时需要晶振产生本地载频信号，此方法可同时抑制共信道干扰和邻信道干扰，但此方法需要研究降低晶振功耗的方法以实现微瓦量级的目标。

(2) 比较器门限调节

如图 5 所示，低功耗唤醒信号经过 RC 滤波后会经过比较器，与比较器门限进行比较确定信号幅值水平。一般地，根据比较器的位数可以输出多个不等的幅值水平。例如，1 位比较器可以输出两个幅值水平，当比较器输入信号幅值高于比较器门限时，输出幅值水平 1；当比较器输入信号幅值高于比较器门限时，输出幅值水平 0。比较器的输入信号包含唤醒信号、共信道干扰信号，以及未滤除掉的邻信道干扰信号，经过比较器后，

仅会得到幅值水平，将无法区分唤醒信号和干扰，导致无法在基带继续进行干扰抑制，因此比较器的门限值设置尤为重要。例如，比较器门限如图 8 所示，唤醒信号采用 OOK 调制，OOK 符号为 1 时，假设其对应信号电压为 V_S ，OOK 符号为 0 时，不发送任何信息，假设其对应信号电压为 0，当干扰不存在时，比较器门限值 V_{th} 可以选取为 $V_S/2$ ，当比较器输入信号电压大于 $V_S/2$ 时，比较器输出为 1。否则，比较器输出为 0。然后当干扰存在时，假设有一个持续的干扰，对应信号电压为 V_I ，当 V_I 与 V_S 大小相当时，若比较器门限仍然设置为 $V_S/2$ ，干扰将导致比较器将实际输入信号为符号 0 判断为符号 1。因此比较器门限设置需考虑干扰的影响以达到干扰抑制效果。调整比较器门限的方法包含半静态方法和动态方法，半静态方法可以采用多个比较器设置不同等级的门限值以适应不同的干扰水平，并对多路结果进行序列匹配判断后做逻辑或，动态方法包含对干扰水平的训练，可以根据干扰水平动态调整比较器的值，但需要一定的训练时间。

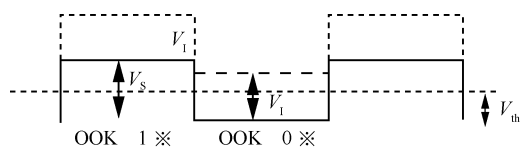


图 8 比较器门限

(3) 唤醒信号扩频设计

扩频技术因其可以提升有用信号的能量并同时降低干扰的能量成为干扰抑制的主要技术之一，对于唤醒信号而言，当采用幅度调制如 OOK 调制，仅包含‘0’和‘1’两个值时，需要研究合适的扩频序列以实现较好的抗干扰性能。另一方面，与蜂窝系统扩频设计不同的是，当唤醒接收机电路采用包络检波和比较器结构对唤醒信号检测时，因仅提取幅值信息，且经过比较器后，唤醒信号和干扰将无法分离，因此，采用数字域的扩频设计无法实现有效的干扰抑制，需要考虑

模拟域的序列扩频设计,且接收机在模拟域进行解扩频操作。

4.6 与现有低功耗技术结合

低功耗唤醒机制还可以考虑与现有节能机制相结合,如与 eDRX 结合使用,低功耗唤醒与 eDRX 结合机制如图 9 所示,在一个 eDRX 周期,终端在 PTW 内每个 DRX 周期监听一次 PO,进行 RRM 测量,在 PTW 以外的位置,关闭主通信单元,进入睡眠状态,仅开启唤醒接收机。与现有 eDRX 机制相比(如图 2 所示),主通信单元关闭时,网络可以在任意时间、位置按需发送低功耗唤醒信号叫醒终端。因此,在保持终端低功耗的基础上,有效缩短了唤醒时延。另一方面,还可以根据 PTW 内的 RRM 测量进行移动性管理,适用于低移动性场景。



图 9 低功耗唤醒与 eDRX 结合机制

综上所述,低功耗唤醒机制可以适用于处于空闲态或非激活态的终端,使得终端在没有业务需求时可以关闭主通信单元,且无须周期性地醒来监听

寻呼消息。在业务到达时,网络可以按需唤醒终端,从而大幅降低终端在空闲态或非激活态的功耗,极大延长了经常处于空闲态或非激活态的终端,如 IoT 设备和可穿戴设备等的待机时间。

低功耗唤醒机制还适用于处于连接态的终端,可以进一步降低终端功耗,采用低功耗唤醒信号解决 XR 终端的功耗问题如图 10 所示,对于 XR 业务中普遍存在的数据抖动问题,即业务实际到达时间与理想到达时间存在随机偏差,通过使用低功耗唤醒信号,使得 XR 终端可以仅监听低功耗唤醒信号,且在终端成功检测到其对应的唤醒信号的情况下,才执行 PDCCH 的监听。低功耗唤醒信号的监听功耗可以降低为微瓦级,因此相比已有的基于 PDCCH 的 C-DRX 唤醒信号也有明显的功耗增益。

最后,低功耗唤醒接收机/唤醒信号的引入除了能有效降低 NR、LTE 的终端功耗外,还可以应用于非授权频谱,同样可以降低终端功耗。另外,还可以考虑将其引入直连通信降低直接通信终端的功耗。这些都是后续待研究的方向。

5 结束语

随着新通信业务的不断出现,可穿戴和物联

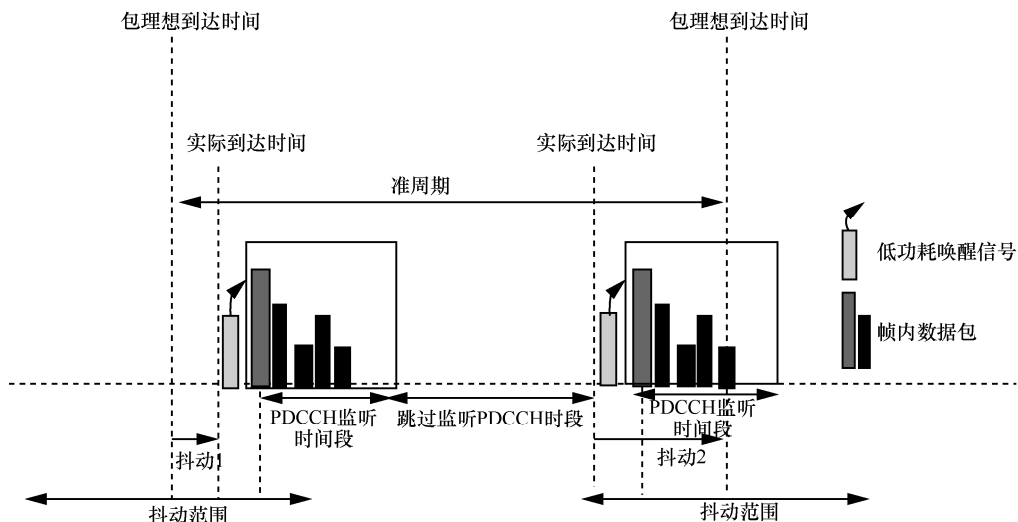


图 10 采用低功耗唤醒信号解决 XR 终端的功耗问题

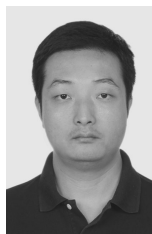


网设备等新终端形态受到产业界的广泛关注。其中设备的成本、功耗、尺寸以及接入和管理方式成为主要的技术挑战。在 3GPP RAN#94 全会上,通过了面向可穿戴和物联网设备的多个新技术研究项目。本文对其中重要的低功耗唤醒接收机和唤醒信号技术进行了介绍,包括背景与需求、现有技术、待解决的技术问题和初步思路等。相关技术预计在 5G-Advanced (Rel-18/Rel-19) 阶段完成标准化,为用户提供更低功耗和更加易用的终端设备和服务。

参考文献:

- [1] 3GPP. Physical channels and modulation (Release 15): TS 38.211[S]. 2019.
- [2] 3GPP. Multiplexing and channel coding (Release 15): TS 38.212[S]. 2019.
- [3] 3GPP. Physical layer procedures for control (Release 15): TS 38.213[S]. 2019.
- [4] 3GPP. Physical layer procedures for data (Release 15): TS 38.214[S]. 2019.
- [5] 3GPP. Physical channels and modulation (Release 16): TS 38.211[S]. 2020.
- [6] 3GPP. Multiplexing and channel coding (Release 16): TS 38.212[S]. 2020.
- [7] 3GPP. Physical layer procedures for control (Release 16): TS 38.213[S]. 2020.
- [8] 3GPP. Physical layer procedures for data (Release 16): TS 38.214[S]. 2020.
- [9] 3GPP. Study on support of reduced capability NR devices (Release 17): TR 38.875[S]. 2021.
- [10] 3GPP, Ericsson. New SID on study on further NR RedCap UE complexity reduction[Z]. 2021.
- [11] Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) Specifications[Z]. 2007.
- [12] PIYARE R, MURPHY A L, KIRALY C, et al. Ultra low power wake-up radios: a hardware and networking survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2117-2157.
- [13] PLETCHER N M, GAMBINI S, RABAEY J M. A 2GHz 52 μ W wake-up receiver with -72dBm sensitivity using uncertain-IF architecture[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference-Digest of Technical Papers. Piscataway: IEEE Press, 2008: 524-633.
- [14] EVIDENTE G I, LORENZO MINDORO S, ALVAREZ A, et al. An ultra-low power direct active-RF detection wake-up receiver with noise-cancelling envelope detector in 65 nm CMOS process[J]. TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 12-15.
- [15] MANGAL V, KINGET P R. An ultra-low-power wake-up receiver with voltage-multiplying self-mixer and interferer-enhanced sensitivity[J]. 2017 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [16] YE D W, TU Y T, GONG W J, et al. A two-tone wake-up receiver with an envelope-detector-first architecture using envelope biasing and active inductor load achieving 41/33dB in-band rejection to CW/AM interference[J]. 2021 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-3.
- [17] MANGAL V, KINGET P R. 28.1 A 0.42nW 434MHz-79.1dBm wake-up receiver with a time-domain integrator[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 438-440.
- [18] BASSIRIAN P, DUVVURI D, TRUESDELL D S, et al. 30.1 A temperature-robust 27.6 nW -65 dBm wakeup receiver at 9.6 GHz X-band[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [19] MOODY J, BASSIRIAN P, ROY A, et al. Interference robust detector-first near-zero power wake-up receiver[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(8): 2149-2162.
- [20] DAVID D. Low power radio survey[Z]. 2020.
- [21] vivo. New SID: study on low-power wake-up signal and receiver for NR[Z]. 2021.

[作者简介]



潘学明 (1982-), 男, 维沃移动通信有限公司通信研究院高级系统工程师, 3GPP RAN 标准化负责人, 主要研究方向为终端节能技术、高性能通信等。



曲鑫 (1985-), 女, 维沃移动通信有限公司通信研究院标准专家, 主要研究方向为低功耗唤醒接收机/唤醒信号和无源物联网。