

# 赋能新一代物联网的 LoRaWAN 技术

顾超杰, 谭睿

(新加坡南洋理工大学, 新加坡 639798)

**摘要:** LoRaWAN 是一种具有代表性的低功耗广域网 (LPWAN, low power wide area network) 技术, 受到了业界和学术界的高度关注。在物联网 (IoT, Internet of things) 新时代, LoRaWAN 可以极大地提高海量边缘设备的连接能力。简要回顾了 LoRaWAN 的基础知识, 并从通信性能、目标定位、无线网络安全和混合网络 4 个方面调研了 LoRaWAN 的最新研究成果。还从商业模式、监管制度、技术创新和新兴应用 4 个方面讨论了 LoRaWAN 在中国发展所面临的机遇和挑战。

**关键词:** LoRaWAN; 低功耗广域网; 低功耗; 物联网

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:**10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00231

## LoRaWAN technologies for enabling new generation Internet of things

GU Chaojie, TAN Rui

Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore

**Abstract:** LoRaWAN is a representative low power wide area networking technology that has attracted significant attention from both the industry and academia. It can improve the connectivity of massive edge devices greatly in the era of Internet of things (IoT). The basics of LoRaWAN were reviewed briefly and the latest LoRaWAN research results were surveyed in four aspects, i.e., communication performance target localization, wireless network security, and heterogeneous network. The opportunities and challenges were also discussed regarding the wide adoption of LoRaWAN in China's context in four aspects, i.e., business models, supervision methods, technology innovations, and emerging applications.

**Key words:** LoRaWAN, LPWAN, low power, IoT

### 1 引言

物联网是在互联网基础上延伸和扩展的网络, 将各种信息传感设备与互联网相结合, 实现人、机、物的泛在互联互通, 物联网将会成为重要的全球基础设施之一。赛门铁克 (Symantec) 公司预计, 到 2025 年年底, 全球物联网设备的数量将超过 21 亿。同时, 物联网市场拥有良好前景和重大价值。全球移动通信系统协会 (GSMA) 智库预测, 到 2025 年, 全球物联网市场的收入将达到 1.1 万亿美元。

低功耗广域网 (LPWAN, low power wide area network) 是一种新兴的物联网技术, 其目的是维持受功率限制的终端设备 (如基于电池的设备) 运行多年, 同时以低速率与几千米外的网关进行通信。LPWAN 技术显著提高了物联网的连接性能, 并加大了物联网的覆盖深度。目前发展较好的 LPWAN 技术有窄带物联网 (NB-IoT, narrow band Internet of things)、Sigfox、Weightless-P 及 LoRaWAN 等。物联网技术通信距离与功耗示意图如图 1 所示。LPWAN 凭借其兼具长通信距离和低功耗的特性, 成为物联网技术中的重要部分。

收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-04-15

通信作者: 谭睿, tanrui@ntu.edu.sg

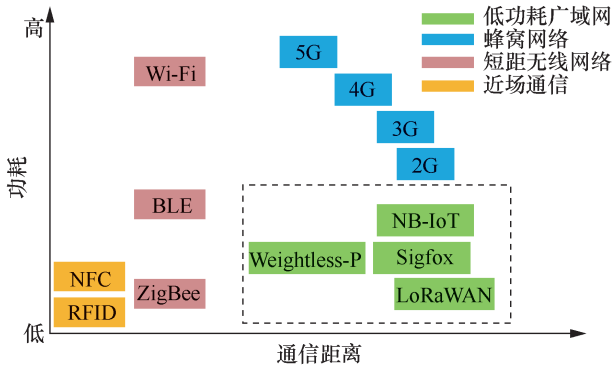


图 1 物联网技术通信距离与功耗示意图

LoRaWAN 作为 LPWAN 的代表技术之一，有以下 3 个特点。

1) 非授权频谱：LoRaWAN 运行在 ISM (industrial scientific medical) 频段，用户可以按需自行布设，不同于 NB-IoT 等使用授权频谱的 LPWAN 技术，LoRaWAN 不依赖于服务供应商所提供的网络基础设施。

2) 低功耗：LoRaWAN 终端设备的休眠电流仅为 1 μA。对于某些特定的应用，LoRaWAN 终端设备可 10 年不需要更换电池。

3) 抗干扰：LoRaWAN 采用啁啾扩频 (CSS, chirp spreading spectrum) 技术调制信号，该调制方式有极强的抗干扰能力，一些安装在低信噪比环境 (如地下室) 的终端设备也可以正常通信。

同时，横向比较图 1 中这几种 LPWAN 技术可以发现，LoRaWAN 有最长的通信距离和最低的功耗，近年来在工业界和学术界受到了广泛的关注。2015 年，Semtech、Hewlett-Packard、Cisco 和 IBM 等公司成立了 LoRa Alliance。LoRa Alliance 是一个开放、非营利组织，旨在推进长距广域网的标准化，并同时推动广域物联网的发展，最终构建一个以 LoRaWAN 为标准的生态系统。国内互联网企业如深圳市腾讯计算机系统有限公司 (以下简称“腾讯”)、阿里巴巴集团控股有限公司 (以下简称“阿里巴巴”) 等也相继加入了该联盟。2016 年，在中兴通讯股份有限公司主导下成立了中国 LoRa 应用联盟 (CLAA, China LoRa Application Alliance)，该联盟旨在推动 LoRa 产业链在全球的应用和发展，建设低功耗、广覆盖、多业务共享的 LPWAN 物联网。截至 2019 年 11 月，该联盟已有 1 300 多个正式成员。2017 年 6 月，阿里巴巴联合多家公司共同成立事实标准联盟 ICA (IoT Connectivity Alliance)，旨在快速使能合作伙伴连接设备、低成本构建应

用，快速复制解决方案，LoRa 也被纳入该联盟的标准化协议。截至 2018 年 9 月，ICA 成员已经超过 350 个。

除了工业界，LoRaWAN 也受到学术界的青睐，本文将着重介绍 LoRaWAN 在学术界的研究现状与应用情况。首先介绍 LoRaWAN 的基本原理，包括物理层和数据链路层，然后回顾近年来学术界对 LoRaWAN 的研究与应用，最后展望 LoRaWAN 在中国发展所面临的挑战和机遇。

## 2 LoRaWAN 技术

### 2.1 LoRa

LoRa 是 LoRaWAN 中使用的物理层协议。不同国家 (地区) 的无线监管机构会在 ISM 频段上给 LoRa 分配一定带宽的无线电频谱。这些被分配给 LoRa 的无线电频谱被划分为多个频率信道，LoRa 终端设备可以选择频率信道进行数据通信。LoRa 采用啁啾扩频调制技术，每一个啁啾都会线性地随时间扫过所使用频率信道的整个带宽。

### 2.2 LoRaWAN

LoRaWAN 是基于 LoRa 的数据链路层规范协议。一个典型的 LoRaWAN 帧如图 2 所示，共由 4 个部分组成：8 个上行啁啾构成的前导、2 个上行啁啾构成的同步字、 $1 + \frac{1}{4}$  个下行啁啾构成的起始帧分隔符 (SFD, start frame delimiter) 和多个数据啁啾所构成的有效载荷。

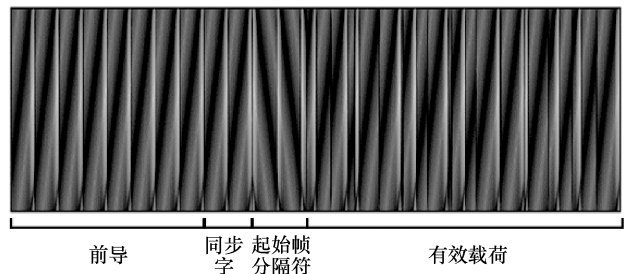


图 2 一个典型的 LoRaWAN 帧

LoRaWAN 共定义了 3 类设备，包括 A 类、B 类和 C 类。这 3 类设备类型具有不同的特性，以满足实际应用的各种需求。LoRaWAN 的默认设备类型为 A 类，所有通信会话必须由终端设备发起。B 类设备在 A 类设备的基础上，增加了对同步功能支持，网关通过广播信标来同步网络中的所有终端设备。通过同步，网关可以在规定的时刻主动向终端

设备发送下行数据，与此同时，同步也使 B 类设备的耗电量比 A 类设备高。C 类终端设备在上传数据之余一直监听网关传来的下行数据，实时性最好，耗电量最大。

用户可以根据实际需求来灵活决定 LoRaWAN 使用的设备类型。A 类设备主要以上传数据为主，面向低功耗的感知类型传感器，如温湿度检测器、烟雾感知器、PM2.5 检测器等。B 类设备主要针对需要下行控制且对实时性要求不高的应用，网关可以定时控制终端设备，如智能门锁、智能灌溉、智能路灯。C 类设备兼顾上传数据和下行控制，针对适用于有一定实时性要求的引用场景，如智能家居、停车位监控等。

另外，LoRaWAN 根据不同地区的法律法规，有着不同的地区参数。地区参数规定了 LoRaWAN 在当地所被允许使用的频段、发射功率、任务周期和最大有效载荷等。用户需要在使用前查阅注册，注意遵守法律法规。

一个典型的 LoRaWAN 架构如图 3 所示。LoRaWAN 网关接收来自物联网设备的 LoRa 调制射频消息，并将数据转发到 LoRaWAN 网络服务器。网络服务器对网络上每个传感器的身份和消息的完整性进行验证。应用服务器负责安全地处理终端设备上传的应用数据。用户可以通过网页上的控制面板或移动应用来访问应用程序。

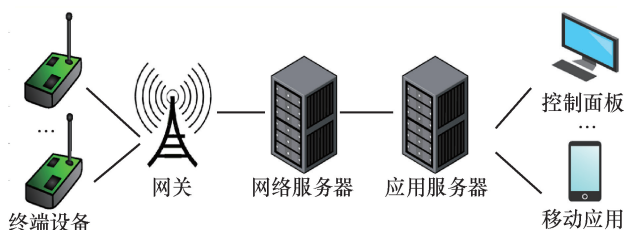


图 3 一个典型的 LoRaWAN 架构

### 3 LoRaWAN 相关研究

近年来，LoRaWAN 受到学术界的广泛关注。已有工作主要集中在提升通信性能、实现目标定位、保障无线网络安全和赋能混合网络 4 个方向。本节将介绍近年来在这 4 个方向中较为突出的研究成果，并简要分析其优劣。

#### 3.1 通信性能

现有的提升 LoRaWAN 通信性能的研究可根据优化的网络层大致分为两类：物理层和介质访问控

制层。

##### 3.1.1 物理层优化和新设计

Choir 系统<sup>[1]</sup>利用终端设备有频偏这一特性来区分碰撞的多个 LoRa 帧，以减少因为传输冲撞导致的丢包、坏包。终端设备上用于生成载波的晶体振荡器并不是完美的，各个终端设备所生成的帧也会有对应的频偏。由于 Choir 系统运作在物理层，该系统的网关必须使用 USRP (universal software radio peripheral) 等软件定义无线电设备，并采用软件解调来解码。因此，Choir 系统不能像普通 LoRaWAN 网关一样快速完成解码。类似地，还有如 FTrack<sup>[2]</sup>、SCLoRa<sup>[3]</sup>、mLoRa<sup>[4]</sup>等系统，它们通过不同的方法使用软件定义无线电设备实现对多个 LoRa 冲撞帧的解码，以提高通信速率。NetScatter 系统<sup>[5]</sup>将 LoRa 调制改为开—关键控 (OOK, on-off keying)，以简化在反向散射设备上的调制解调过程。该系统可以对多个设备反向散射的 LoRa 信号进行并发解调。然而，NetScatter 系统中所采用的开—关键控调制并不符合 LoRa 标准调制。因此，该系统不能和现有的设备良好兼容。一些被部署在大型建筑中的 LoRaWAN 终端设备因遮挡面临着传输信号衰减的问题，为了解决这一问题，Charm 系统<sup>[6]</sup>同时结合多个网关所接收的信号，以提高接收信号的信噪比和 LoRaWAN 的覆盖率。虽然 Charm 系统不要求使用功能强大、价格昂贵的软件定义无线电设备，但仍然需要高度定制的可编程设备来采集信号。为了解决多个终端设备信道争用的问题，Chime 系统<sup>[7]</sup>利用多个网关分析来自同一个终端设备节点的帧，并通过多网关同步和最优信道估计，将选择最优传输信道的建议回传给终端设备。Chime 系统要求使用软件定义无线电设备作为网关来收集信号数据，且这些网关之间需要严格同步，增加了硬件和软件方面的额外成本。

总的来说，通过在物理层进行优化，利用上述大部分技术都能成倍地提高 LoRaWAN 的吞吐量。相对应地，由于市场上可以购买的商用设备不提供物理层的信号信息，实现以上物理层优化需要引入额外的设备成本，如 USRP 等软件定义无线电设备。

##### 3.1.2 介质访问控制层优化和新设计

LoRaWAN 默认使用 ALOHA 作为介质访问控制层协议。ALOHA 协议采用了随机接入的机制，

设备之间很容易发生传输碰撞,严重影响整个网络的可用性和可靠性。为缓解这一问题,分段 ALOHA 和时分多址 (TDMA, time division multiple access) 是两种可行的办法。具体来说,终端节点会基于同步时钟,在规定的时段内进行传输,而不是完全随机地接入网络。已有多项研究<sup>[8-10]</sup>都讨论了分段 ALOHA 或 TDMA 在 LoRaWAN 中的性能与应用。然而,由于 LoRa 自身的通信带宽有限<sup>[11]</sup>,时钟同步所需的通信量给 LoRaWAN 增加了负担。为了避免时钟同步引入的通信负担,有些研究工作提倡使用载波侦听多路访问 (CSMA, carrier sense multiple access) 来替代 ALOHA 或者 TMDA。Beltramelli 等<sup>[12]</sup>提出了一个基于随机几何的模型,从理论上分析得出 CSMA 在可靠性和能效方面优于 ALOHA。为了实现载波侦听,DeepSense<sup>[13]</sup>使用预先训练好的人工神经网络对频谱图进行信号识别,探测信号传输。然而,该系统需要软件定义无线电设备来接入物理层,并需要机器学习加速器来加速神经网络的识别速度。为了实现和现有设备兼容的 CSMA,之前的一项工作<sup>[14]</sup>将 802.11 CSMA 协议移植到 LoRa 中,并通过给每个终端设备额外添加一个带有该功能的设备的方法来实现 CSMA。然而,这种方法增加了硬件设备开销和系统复杂性,不适用于生产环境。Gamage 等<sup>[15]</sup>利用信道活动检测 (CAD, channel activity detection) 功能在 LoRa 终端设备上进行载波侦听,并设计 LMAC (LoRa MAC) 介质访问控制协议来提高 LoRaWAN 的吞吐量和包到达率。该协议不需要修改 LoRaWAN 的物理层,并且可以和 LoRaWAN 终端设备、网关兼容,可以轻松部署到现有的 LoRaWAN 中。

## 3.2 目标定位

由于 LoRa 具有通信距离长、抗衰减能力强等特点,许多学者都对终端设备在 LoRaWAN 中的定位进行了研究。从实现的方法来看,相关工作可分为基于接收信号强度指示 (RSSI, received signal strength indication) 指纹的定位、基于路径损耗模型的定位和基于到达时间差 (TDoA, time difference of arrival) 的定位。

### 3.2.1 基于接收信号强度指示指纹的定位

接收信号强度指示表示接收端的信号强度。在 LoRaWAN 中,用户可以从网关读取不同终端设备在网关处的 RSSI。这一类方法将有关终端设备的 RSSI 测量值与提前在已知位置收集的 RSSI 测量值

(位置指纹) 进行匹配,确定终端设备在运行时的位置。现有研究一般使用各种不同的机器学习算法来实现位置指纹的匹配,如  $K$ -近邻<sup>[16]</sup>、支持向量机<sup>[17]</sup>和高斯过程<sup>[18]</sup>等。文献[16]将这一方法在同属于 LPWAN 的 Sigfox 上进行了尝试,实验结果表明,该方法在城市地区有 400 m 的平均误差。文献[17]实现了定位误差为几十米。然而,这一类方法有个共同的问题就是需要对几乎所有目标位置进行提前测量,实际部署成本大。

### 3.2.2 基于路径损耗模型的定位

电磁波在空间传播过程中会产生功率损耗,信号的传播距离和损耗功率存在一定关系,学术界已经有许多路径损耗模型来描述这种关系。因此,可以根据路径损耗功率即发射功率和接收功率之差,配合路径损耗模型反推出传播路径长度来实现目标定位。文献[19]提出了各种技术来减少 RSSI 测量中高斯噪声和非高斯噪声所引入的定位误差。在有 6~8 个室外基站的情况下,该方法的平均定位误差在几十米的范围内。在半室外空间中,该方法的平均定位误差波动较大,从十米到数百米不等。不同的地表覆盖类型,如城市、森林、草地等,对无线信号传播有着不同的影响。文献[20]考虑了这一问题,通过卫星图像来识别信号传播路径上的土地覆盖类型,对在不同土地覆盖类型传播的信号匹配对应的路径损耗模型。实验结果表明,在接近 23 万平方米的城市区域内,该方法定位误差的中位数为 47.1 m。

从以上研究来看<sup>[19-20]</sup>,在室外环境中,基于 RSSI 和路径损耗模型定位 LoRa 终端设备的定位精度一般为几十米,并且会受到终端设备和基站之间距离长短的影响。在室内环境中,周围墙壁的反射和障碍物造成的衰减给建模增添了难度,之前在半室外环境中高达数百米的定位误差<sup>[19]</sup>也体现了这一难点。

### 3.2.3 基于到达时间差的定位

到达时间差是一种通过检测信号到达两个基站的时间差来确定目标的位置的定位方法。一些研究<sup>[21-23]</sup>已经开始尝试使用 TDoA 来定位 LoRaWAN 终端设备,这些研究均使用 LoRaWAN 网关给出的帧到达时间戳,并把该时间戳等同于信号到达网关的时间戳。然而,信号真实到达网关的时间戳不等于网关在应用层给出的时间戳。此外,微秒精度的时间戳无法支持精确的测距和定位,所以这些方法

的定位误差一般在几十米到几百米之间。文献[24]设计了一种 LoRa 反向散射设备, 基于 TDoA 原理实现了米级精度的三维定位。然而, 该方法需要定制的无线散射 LoRa 终端设备并不能直接应用到现有的 LoRaWAN 终端设备和网络中。

### 3.3 无线网络安全

Aras 等<sup>[25]</sup>讨论了几种针对 LoRaWAN 的攻击, 包括网络密钥泄露和网络干扰。然而, 攻击者需要事先取得网关的物理权限, 以便进一步进行内存提取攻击, 可行性较低。文献[26]中研究了针对某些接收设备或某些帧的选择性干扰攻击。与不考虑干扰和攻击隐蔽性的研究<sup>[25-26]</sup>不同, 文献[27]通过实验证明了 LoRaWAN 容易受到一种由帧碰撞和帧重放组成的攻击。该攻击的隐匿性极高, 现有的终端设备和网关无法察觉自身遭受了攻击。实验结果表明, 攻击者只需使用窃听器和重放器各一个, 即可覆盖攻击约 5 万平方米区域内的所有终端设备。在文献[28]中, Robyns 等基于接收到的 LoRa 信号, 应用有监督机器学习进行终端设备分类。从文献[27]的测量结果来看, 原始信号和重放信号之间的差异性远低于不同终端设备的原始信号之间的差异性。因此, 该方法在攻击检测方面是不可靠的。为有效地解决这一安全威胁, 文献[27]进一步提出了一种名为 LoRaTS 的网关设计, 它集成了一个商用 LoRaWAN 网关和一个低成本软件定义无线电设备, 以跟踪各个终端设备的频偏。LoRaTS 基于对 LoRaWAN 物理层的啁啾扩频调制的分析, 开发了一种高精度估计终端设备频偏的信号处理算法。实验表明, 其估计精度超过了 LoRaWAN 物理层默认的解调精度, 并可以进一步检测到窃听器和重放器引入的额外频偏。在 LoRaTS 的基础上, 文献[29]引入了和地理位置有关的连接特征估计, 进一步提升了约 2% 的攻击检测性能。

### 3.4 混合网络

在传统的无线传感器网络 (如 ZigBee、Bluetooth、WirelessHART 等) 中, 传感器一般只拥有单一的网络接口, 在遇到强干扰等情况时, 链路可能会彻底断连, 无法恢复。在生产环境中, 这样的情况会严重影响生产效率和生产成本。为解决这一问题, 文献[8]提出在传感器上增加 LoRaWAN 的网络接口, 并设计和实现了 LoRaCP 系统。在该系统中, 传感器上原来的网络接口接入数据网络负责传输数据, 新增的 LoRaWAN 网络接口接入控制网

络负责调整路由、控制和优化数据网络。这样做可以从两方面对网络进行改进, 首先, 多个网络接口可以形成多宿主网络, 增强了系统的可伸缩性和冗余性; 其次, 软件定义网络 (SDN, software-defined networking) 提倡通过控制平面和数据平面分离 (SCDP, separation of control and data planes) 来实现数据的高效传输和网络的高效管理。现有的 SCDP 网络一般采用带内控制方案, 即控制平面和数据平面共用一个网络传递数据, 数据平面网络中产生的问题同时也会影响网络平面。如果数据平面和控制平面分别单独使用网络接口, 可以从根本上避免两个网络平面的物理耦合, 构成带外控制。此外, 为了解决 LoRaWAN 具有上下行不对称、使用 ALOHA 作为介质访问控制层等问题, LoRaCP 采用了一种基于 TDMA 的多信道传输控制方法来提高控制平面网络的传输效率和稳定性。在有 16 个终端节点的测试平台上, LoRaCP 系统将集合树协议 (CTP, collection tree protocol) 的控制平面与数据平面进行物理分离。实验结果表明, LoRaCP 系统在有外部干扰的情况下, 可将 CTP 的数据包传输到达率从 65% 提高到 80%, 同时, 每个节点仅增加了 2.97 mW 额外功率。近年来, 类似的长短距混合网络多射频平台已经商业化 (如 TI CC1350 和 OpenMote B), 在这些平台上使用 LoRaWAN 构建混合网络变得十分便利。

## 4 机遇与挑战

### 4.1 商业模式

近年来, 国内 LoRaWAN 产业发展迅速, 逐渐形成了包括设备供应、平台提供、终端服务等环节在内的产业链, 并不断有企业加入。值得注意的是, 由于 LoRaWAN 应用场景和组网模式的特殊性, LoRaWAN 在国内的商业化仍然面临着两大挑战: 硬件复用率低和个人用户参与率低。

一方面, LoRaWAN 允许自组网的特性使得网关可以按需布设, 应用可以快速落地, 这种垂直集成的特性在不同公司间知识产权、协议接口等技术壁垒的作用下, 会造成网关复用率低。举例来说, 一个小区需要安装智能电表、智能路灯、灾害监控等系统, 如果这些系统由不同公司负责, 当出现网关、终端等硬件和产品接口、用户面板等软件的兼容性问题时, 会造成重复布设网关、终端覆盖同一片区域等硬件复用率低的情况。如何推动

LoRaWAN 的平台化, 提高设备利用率, 降低硬件布设成本, 形成良好的生态系统, 这些问题仍亟待研究和解决。

另一方面, LoRaWAN 在国内商户端 (2B, to business) 的业务近年来蓬勃发展, 但在用户端 (2C, to customer) 的商业前景仍不明朗。LoRaWAN 被设计用于连接物联网设备, 相较于 Wi-Fi 和蜂窝网络等技术, 有需求的用户基数小。LoRaWAN 的布设成本虽然远低于蜂窝网络, 但是仍然高于 Wi-Fi, 因此, 不易形成类似于蜂窝网络的“用户付费—厂商布网”和 Wi-Fi 的“成本低—用户布网”的商业模式。为提高个人用户的参与率, 国外一家名为 Helium 的公司进行了尝试, Helium 是一家致力于创建全球首个个人对个人 (P2P, peer to peer) 无线网络的公司。为了激励用户部署网关来扩大网络覆盖范围, 该公司发行了一种叫 HNT 的加密数字货币。用户可以通过购买定制的 LoRa 网关来提供物联网相关服务, 同时定制网关也具有“挖矿”功能, 用户在提供网络服务的同时可以通过“挖矿”获得加密数字货币作为报酬。利用区块链技术刺激大量的个人用户来部署网关, 提高用户参与度, 同时对于企业来说也可能是一种可行的营利模式。截至目前, 公司如何激励用户参与 LoRaWAN 组网并找到合理的营利模式仍然没有标准的答案, 该问题在国内的工业界和学术界还没有相关的讨论和尝试。

## 4.2 监管制度

近年来, 不法分子不断尝试使用射频技术进行犯罪<sup>[30]</sup>, 例如, “黑广播”“伪基站”。“黑广播”是不法分子私自设置未经审批的广播电台, 通过广播非法药物广告等内容进行诈骗等非法牟利活动。由于“黑广播”所使用的设备多为三无产品, 发射功率往往是正规无线电台的数百倍, “黑广播”会对军事通信和航空通信造成干扰, 影响国防、飞行安全。“伪基站”是不法分子利用设备功率优势, 掩盖合法基站的信号, 引导覆盖区域内手机接受“伪基站”服务, 并冒充公众服务号码对移动电话用户进行钓鱼、诈骗等非法活动。令人欣慰的是, 各地无线电管理机构配合相关职能部门不断加大对该类犯罪的打击力度, 构建了预警和监控系统, 对有关设备的生产、销售、使用进行了整治。与此同时, 需要注意防范不法分子利用 LoRaWAN 进行犯罪和攻击合法 LoRaWAN 设施。一方面, 由于 LoRaWAN 运作在 ISM 频段, 用户不需要官方授权也可以使用

该频段, 且 LoRaWAN 允许自建网络和消息加密, 用户可以自行购买网关和终端设备进行加密通信, 不法分子很容易利用 LoRaWAN 从事非法活动。另一方面, LoRaWAN 对于发射功率和传输周期有限制, 不法分子可以阻塞、干扰、攻击正常设施。因此, 补充和完善对于 LoRaWAN 的监管和保护制度也是推动 LoRaWAN 在中国发展的题中之意。

## 4.3 技术创新

### 4.3.1 安全机制

安全机制是一个网络正常运行的基本保障。相较于其他方面, 有关 LoRaWAN 安全机制的研究较少, 还有许多潜在的风险与问题未能得到讨论。一方面, LoRaWAN 和其他无线网络技术一样, 面临众多网络攻击的风险, 举例来说, LoRaWAN 缺乏对于 DDoS (distributed denial of service) 攻击的有效防御<sup>[31]</sup>。另一方面, 如何平衡网络的安全性与其带来的额外成本也是需要解决的问题。

### 4.3.2 通信性能

近年来, 学术界对如何提高 LoRaWAN 的通信性能进行了持续的研究和讨论, 然而, 这些研究需要对终端设备进行深度定制, 或使用昂贵的软件定义无线电设备。如何在提高 LoRaWAN 通信性能的同时, 降低定制化的程度, 扩大对现有商用设备的兼容性, 仍然需要进一步的研究。

### 4.3.3 网关布置

目前大部分研究都集中在如何融合多个 LoRaWAN 网关所得到的信息来提升网络延展性和解码率, 对网关本身的研究较少。如何最优化布置一个或者多个网关, 使每个网关在特定的应用中发挥最大效用也是一个需要讨论的问题。

## 4.4 新兴应用

### 4.4.1 卫星互联网

卫星物联网是一种使用卫星作为物联网基站的组网模式。相较于传统使用地面基站的物联网, 卫星物联网具有覆盖范围广、传感器布设更灵活等优点<sup>[32]</sup>。配合低轨道卫星基站, 将卫星物联网这一模式应用到 LoRaWAN 中, 可以将 LoRaWAN 传播距离长的优势发挥到最大。同时, 卫星物联网基站可以有效提高基站复用率, 降低网络复杂度。Inmarsat 公司在 2017 年推出了针对 LoRaWAN 的卫星物联网业务, 服务范围涵盖了农业监测、矿井监测、交通监测等方面, 该服务目前已覆盖地球上大部分区域。

#### 4.4.2 无线感知

无线感知是一种通过无线信号来感知目标行为为活动的技术，其原理是无线信号的反射信号会被反射物体的活动所影响，对反射信号进行分析可以得到目标的行为信息。无线感知的一大优势就是不需要在目标上安装传感器，举例来说，Wi-Fi 信号可以用来监测人的呼吸、心跳、走动等行为<sup>[33-34]</sup>。相较于 Wi-Fi 信号，LoRa 信号拥有更远的传播距离和更大的感知范围，现有研究将 LoRa 信号用来监测呼吸、识别手势<sup>[35]</sup>。

## 5 结束语

LPWAN 技术是物联网的关键组成部分，LoRaWAN 作为 LPWAN 技术的代表之一，因其部署灵活、标准开放等特点在工业界和学术界均受到了广泛关注。在工业界，越来越多的企业将 LoRaWAN 应用到生产中。在学术界，随着对 LoRaWAN 研究的不断深入，LoRaWAN 的传输性能、安全性能不断提高，应用范围不断扩大。在新技术、新应用出现的同时，LoRaWAN 在中国的发展面临着商业模式不明朗、监管制度亟须补全等挑战。机遇与挑战并存，LoRaWAN 仍然是 LPWAN 技术有力的竞争者。

### 参考文献:

- [1] ELETREBY R, ZHANG D, KUMAR S, et al. Empowering low-power wide area networks in urban settings[C]//Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication. New York: ACM Press, 2017: 309-321.
- [2] XIA X J, ZHENG Y Q, GU T. FTrack: parallel decoding for LoRa transmissions[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(6): 2573-2586.
- [3] HU B, YIN Z M, WANG S, et al. SCLoRa: leveraging multi-dimensionality in decoding collided LoRa transmissions[C]//2020 IEEE 28th International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [4] WANG X, KONG L H, HE L, et al. mLoRa: a multi-packet reception protocol in LoRa networks[C]//2019 IEEE 27th International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [5] HESSAR M, NAJAFI A, GOLLAKOTA S. NetScatter: enabling large-scale backscatter networks[C]//Proceedings of the 16th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. [S.l.: s.n.], 2019: 271-284.
- [6] DONGARE A, NARAYANAN R, GADRE A, et al. Charm: exploiting geographical diversity through coherent combining in low-power wide-area networks[C]//2018 17th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 60-71.
- [7] GADRE A, NARAYANAN R, LUONG A, et al. Frequency configuration for low-power wide-area networks in a heartbeat[C]//Proceedings of the 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. [S.l.: s.n.], 2020: 339-352.
- [8] GU C J, TAN R, LOU X. One-hop out-of-band control planes for multi-hop wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2019, 15(4): 1-29.
- [9] PIYARE R, MURPHY A, MAGNO M, et al. On-demand LoRa: asynchronous TDMA for energy efficient and low latency communication in IoT[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3718.
- [10] ROMAN T, LOTHAR T. Increasing throughput and efficiency of LoRaWAN class a[C]//The Twelfth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. [S.l.: s.n.], 2018.
- [11] GHENA B, ADKINS J, SHANGGUAN L, et al. Challenge: unlicensed LPWANs are not yet the path to ubiquitous connectivity ACM reference format[C]//The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2019(19): 1-12.
- [12] BELTRAMELLI L, MAHMOOD A, ÖSTERBERG P, et al. LoRa beyond ALOHA: an investigation of alternative random access protocols[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5): 3544-3554.
- [13] CHAN J, WANG A, KRISHNAMURTHY A, et al. DeepSense: enabling carrier sense in low-power wide area networks using deep learning[R]. 2019.
- [14] PHAM C. Robust CSMA for long-range LoRa transmissions with image sensing devices[C]//2018 Wireless Days (WD). Piscataway: IEEE Press, 2018: 116-122.
- [15] GAMAGE A, LIANDO J C, GU C J, et al. LMAC: efficient carrier-sense multiple access for LoRa[C]//Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2020: 1-13.
- [16] JANSSEN T, AERNOUTS M, BERKVENNS R, et al. Outdoor fingerprinting localization using sigfox[C]//2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [17] SALLOUHA H, CHIUMENTO A, POLLIN S. Localization in long-range ultra narrow band IoT networks using RSSI[C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [18] HE Z, LI Y, PEI L, et al. Enhanced gaussian process-based localization using a low power wide area network[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(1): 164-167.
- [19] LAM K H, CHEUNG C C, LEE W C. RSSI-based LoRa localization systems for large-scale indoor and outdoor environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 11778-11791.
- [20] LIN Y X, DONG W, GAO Y, et al. SateLoc: a virtual fingerprinting approach to outdoor LoRa localization using satellite images[C]//2020 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Piscataway: IEEE Press, 2020: 13-24.
- [21] BAKKALI W, KIEFFER M, LALAM M, et al. Kalman filter-based localization for Internet of things LoRaWAN end points[C]//2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

- [22] PODEVIJN N, PLETS D, TROGH J, et al. TDoA-based outdoor positioning with tracking algorithm in a public LoRa network[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018: 1-9.
- [23] FARGAS B C, PETERSEN M N. GPS-free geolocation using LoRa in low-power WANs[C]//2017 Global Internet of Things Summit (GloTS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [24] NANDAKUMAR R, IYER V, GOLLAKOTA S. 3D localization for sub-centimeter sized devices[C]//Proceedings of the 16th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2018: 108-119.
- [25] ARAS E, RAMACHANDRAN G S, LAWRENCE P, et al. Exploring the security vulnerabilities of LoRa[C]//2017 3rd IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [26] ARAS E, SMALL N, RAMACHANDRAN G S, et al. Selective jamming of LoRaWAN using commodity hardware[C]//Proceedings of the 14th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services. New York: Association for Computing Machinery, 2017: 363-372.
- [27] GU C J, JIANG L S, TAN R, et al. Attack-aware data timestamping in low-power synchronization-free LoRaWAN[C]//2020 IEEE 40th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 100-110.
- [28] ROBYNS P, MARIN E, LAMOTTE W, et al. Physical-layer fingerprinting of LoRa devices using supervised and zero-shot learning[C]//Proceedings of the 10th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks. New York: ACM Press, 2017: 58-63.
- [29] WANG X, KONG L H, WU Z C, et al. SLoRa: towards secure LoRa communications with fine-grained physical layer features[C]//Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. [S.l.: s.n.], 2020: 258-270.
- [30] 王玲, 路建华. “黑广播”和伪基站为何屡禁不止[J]. *中国无线电*, 2019, 1.  
WANG L, LU J H. Why “black broadcasting” and pseudo-base stations are banned so often[J]. *China Radio*, 2019, 1.
- [31] 于小博, 朱红儒, 刘大鹏, 等. LoRa 广域网安全机制剖析[J]. *电信科学*, 2019, 35(8): 152-157.
- YU X B, ZHU H R, LIU D P, et al. Analysis of LoRaWAN security mechanism[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(8): 152-157.
- [32] 张更新, 揭晓, 曲至诚. 低轨卫星物联网的发展现状及面临的挑战[J]. *物联网学报*, 2017, 1(3): 6-9.  
ZHANG G X, JIE X, QU Z C. Development status and challenges of LEO IoT[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2017, 1(3): 6-9.
- [33] ADIB F, KATABI D. See through walls with Wi-Fi[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication. New York: ACM Press, 2013: 75-86.
- [34] ALI K, LIU A X, WANG W, et al. Recognizing keystrokes using Wi-Fi devices[C]//IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [35] ZHANG F S, CHANG Z X, NIU K, et al. Exploring LoRa for long-range through-wall sensing[J]. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2020, 4(2): 1-27.

## [作者简介]



顾超杰 (1994- ), 男, 博士, 新加坡南洋理工大学博士后研究员, 主要研究方向为无线传感器网络、低功耗广域网和边缘计算。



谭睿 (1982- ), 男, 博士, 新加坡南洋理工大学计算机与工程学院副教授, 主要研究方向为物联网系统、信息物理系统、嵌入式人工智能感知以及在上述系统中的安全问题。