

物联网无线接入技术研究

朱剑驰, 杨蓓, 陈鹏, 余小明, 毕奇

(中国电信股份有限公司技术创新中心, 北京 102209)

摘要: 移动互联网和物联网是未来移动通信发展的两大主要驱动力, 将为 5G 提供广阔的前景。物联网扩展了移动通信的服务范围, 从“人的互联”向“万物互联”演进, 低功耗大连接和低时延高可靠场景是 5G 物联网的两大场景。低功耗大连接场景具有小数据分组、低功耗、海量连接等特点。低功耗大连接场景不仅要求网络具备超千亿连接的支持能力, 而且还要保证终端的超低功耗和超低成本。低时延高可靠场景主要面向车联网、自动驾驶、工业控制与远程医疗等应用。这类应用对时延和可靠性具有极高的指标要求, 需要为用户提供毫秒级的端到端时延和接近 100% 的业务可靠性保证。首先, 介绍了面向低功耗大连接应用场景的各项技术, 包括工作于未授权频谱的 LoRa、SigFox 等技术和工作于授权频谱的 EC-GSM、LTE-M 和 NB-IoT 等技术; 然后, 给出了低时延高可靠场景的业务需求与性能指标; 最后, 描述了 3GPP V2X 和 IEEE DSRC 两大标准体系 ITS 技术的发展。

关键词: 5G; 物联网; 低功耗大连接; 低时延高可靠

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00056

Research on wireless access technologies for Internet of things

ZHU Jianchi, YANG Bei, CHEN Peng, SHE Xiaoming, BI Qi

China Telecom Technology Innovation Center, Beijing 102209, China

Abstract: Mobile Internet and Internet of things (IoT) are two major driving forces for the future development of mobile communications and will provide broad prospects for 5G. IoT expands the range of mobile communications services, evolving from “Internet of people” to “Internet of everything”. 5G IoT scenarios include low-power massive-connections and low-latency high-reliability. Low-power massive-connections scenario has the characteristics of small data packets, low power consumption, mass connections. It not only requires the network to have the ability to support over a hundred billion connections, but also ensures the terminal’s ultra-low power consumption and ultra-low cost. Low-latency high-reliability scenario is primarily for applications, such as Internet of vehicle, autonomous driving, industrial control and remote medical. Such applications requires extremely high requirements on latency and reliability. They require to provide millisecond-level end-to-end latency and be close to 100% service reliability. Firstly, the technologies for low-power massive-connections scenario were introduced, including LoRa (long range wide area network) and SigFox operating on unlicensed spectrum and EC-GSM (extended coverage-GSM), LTE-M and NB-IoT (narrow band Internet of things) operating on licensed spectrum. Then, an overview of service requirements and performance metrics for ultra-reliable low latency communications was presented. Finally, the development of ITS (intelligent transport system) technologies for both 3GPP V2X (vehicle-to-everything) and IEEE DSRC (dedicated short range communication) standards was described.

Key words: 5G, Internet of things, low-power massive-connections, low-latency high-reliability

1 引言

5G 移动通信技术为用户提供了前所未有的体

验和物联网连接能力。面向 2020 年及以后移动数据流量的爆炸式增长、物联网设备的海量连接以及垂直行业应用的广泛需求, 5G 移动通信技术在提

升峰值速率、移动性、时延和频谱效率等传统指标的基础上,新增加用户体验速率、连接数密度、流量密度和能效 4 个关键能力指标^[1]。具体来看,5G 用户体验速率可达 100 Mbit/s~1 Gbit/s,支持移动虚拟现实等极致业务体验;连接数密度可达 1 000 000 个/平方千米,有效支持海量的物联网设备接入;流量密度可达 $10 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$,支持未来千倍以上移动业务流量增长;传输时延可达毫秒级,满足车联网和工业控制的严苛要求。4G 与 5G 关键能力对比^[2]如图 1 所示。

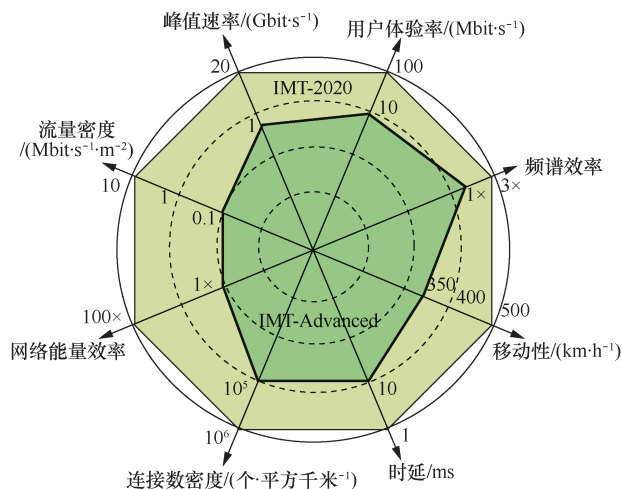


图 1 4G 与 5G 关键能力对比

移动互联网和物联网是未来移动通信发展的两大主要驱动力,将为 5G 提供广阔的前景。移动互联网颠覆了传统移动通信业务模式,为用户提供前所未有的使用体验,深刻影响着人们工作生活的方方面面。物联网扩展了移动通信的服务范围,从人与人通信延伸到物与物、人与物智能互联,使移动通信技术渗透至更加广阔的行业和领域。

国际电信联盟无线电通信局 (ITU-R) 确定未来 5G 具有以下 3 个主要的应用场景^[2]:增强型移动宽带、低功耗大连接、低时延高可靠,如图 2 所示。

低功耗大连接和低时延高可靠场景主要面向物联网业务,是 5G 新拓展的场景,重点解决传统移动通信无法很好支持的物联网及垂直行业应用^[3]。低功耗大连接场景主要面向智慧城市、智能家居、环境监测等以传感和数据采集为目标的应用场景,具有小数据分组、低功耗、海量连接等特点。这类终端分布范围广、数量众多,不仅要求网络具备超

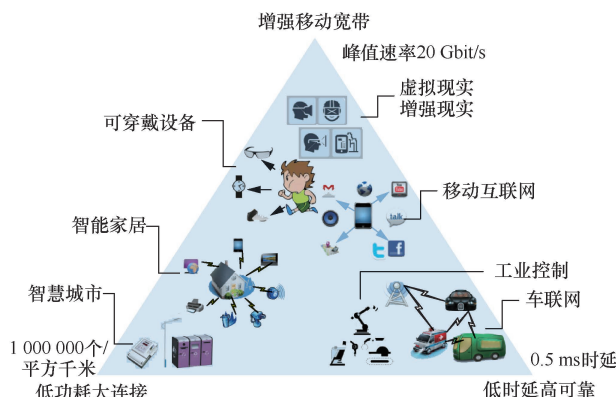


图 2 5G 的 3 个应用场景

千亿连接的支持能力,满足 1 000 000 个/平方千米连接数密度指标要求,而且还要保证终端的超低功耗和超低成本。低时延高可靠场景主要面向车联网、工业控制、远程医疗等垂直行业的特殊应用需求,这类应用对时延和可靠性具有极高的指标要求,需要为用户提供毫秒级的端到端时延和接近 100% 的业务可靠性保证。

1) 低功耗大连接场景

物联网通信技术有很多种,从传输距离上可以分为 2 类:一类是短距离通信技术,如 ZigBee、Wi-Fi、蓝牙、Z-wave 等,典型的应用场景为智能家居;另一类是广域网通信技术——低功耗广域网 (LPWAN, low-power wide-area network)^[4],典型应用为智能抄表。LPWAN 主要面向低功耗大连接场景,可被分为授权频段及非授权频段 2 类,不同的 LPWAN 技术在接入网络、部署方式、技术特点、功耗性能及服务模式上都有所差异。工作于未授权频谱的技术包括 LoRa、SigFox 等;工作于授权频谱的技术包括 EC-GSM、LTE-M、NB-IoT 等。

远程广域网 (LoRa, long range wide area network) 是 LPWAN 通信技术中的一种,是美国 Semtech 公司采用和推广的一种基于扩频技术的超远距离无线传输方案^[5]。这一方案为用户提供一种简单的能实现远距离、长电池寿命、大容量的通信系统。LoRa 技术具有远距离、低功耗 (电池寿命长)、多节点、低成本的特性。

SigFox 是一种商用化速度较快的 LPWAN 技术,它采用超窄带技术,主要打造低功耗、低成本的无线物联网专用网络^[6]。SigFox 是一家法国窄带物联网公司,成立于 2009 年。SigFox 公司不仅是标准的制定者,同时也是网络运营者和云平台提供商,目标是与合作伙伴使用旗下的 SigFox 技术建造

一个覆盖全球的 IoT 网络, 独立于现有电信运营商的移动蜂窝网络。

EC-GSM 即扩展覆盖 GSM 技术 (extended coverage-GSM)。随着各种 LPWAN 技术的兴起, 传统 GPRS 应用于物联网的劣势凸显。2014 年 3 月, 3GPP GERAN #62 会议“支持低复杂度和低速率物联网应用的蜂窝系统”研究项目提出, 将窄带 (200 kHz) 物联网技术迁移到 GSM 上, 寻求比传统 GPRS 高 20 dB 的更广的覆盖范围, 并提出了 EC-GSM 技术, 满足 5 个目标: 提升室内覆盖性能、支持大规模设备连接、减小设备复杂性、减小功耗和时延。

LTE-M 即 LTE M2M 或 MTC (machine type communication) 是基于 LTE 演进的物联网技术^[7-8]。LTE-M 在 LTE 系统基础上, 为低功耗、广覆盖物联网业务拓展新功能, 可在 LTE 系统上实现软件升级。3GPP Release 12 版本定义了低成本 MTC, 引入 Cat-0 类别 UE; Release 13 版本进一步降低成本, 引入 Cat-M 类别 UE, 并为低速率 MTC 应用提供显著的覆盖扩展, 实现至少 15 dB 增益; Release 14 和 Release 15 版本对 MTC 进一步增强。

NB-IoT (narrow band Internet of things) 是基于蜂窝的窄带 (200 kHz) 物联网技术^[9]。NB-IoT 构建于蜂窝网络, 可直接部署于 GSM 网络或 LTE 网络, 以降低部署成本、实现平滑升级, 比传统 GPRS 高 20 dB 的更广的覆盖范围。NB-IoT 是 IoT 领域的一种新兴技术, 支持低功耗设备在广域网的蜂窝数据连接。NB-IoT 支持待机时间短、对网络连接要求较高设备的高效连接。

2) 低时延高可靠场景

低时延高可靠场景 (URLLC, ultra-reliable low latency communication) 主要面向车联网、自动驾驶、工业控制与远程医疗等。现有通信技术主要面向车联网等应用场景, 可以分为 2 类: 一类是基于 IEEE 标准的专用短距离通信 (DSRC, dedicated short range communication), 另一类是基于 3GPP 标准的车联网技术 (V2X, vehicle-to-everything)。另外, 3GPP 目前也开启了针对蜂窝网络基站与终端通信接口的 URLLC 技术的标准研究与制定工作。

国际标准组织 3GPP 于 2015 年初启动了基于 LTE 标准的 V2X 技术研究工作。3GPP 首先完成了 LTE V2X 业务需求的研究工作。为与国际上 DSRC/IEEE802.11p 等车联网标准抗衡, 支持产业

界尽快开展 LTE V2X 产品研发, 后续 3GPP 分 2 个阶段完成 LTE-V 标准制定。第一阶段优先完成基于 3GPP Release 12 和 13 D2D (device-to-device) 技术的车车通信 (V2V, vehicle-to-vehicle) 的标准化工作。该阶段工作已于 2016 年 9 月完成, 在大唐和华为等国内公司的积极推动下, LTE-V 被正式纳入 LTE Release 14 标准当中, 并成为了国际首份具有我国自主知识产权的基于 LTE 的车联网标准。第二阶段完成 LTE V2X 完整标准, 包括 V2V、V2I/N (vehicle-to-infrastructure/network) 和 V2P (vehicle-to-pedestrian), 已于 2017 年 3 月完成。

随着基于 3GPP 标准的车联网技术的发展, 在 2016 年 12 月 3GPP TSG SA 第一工作组开启针对 5G V2X 业务需求研究工作。一方面, 基于 LTE V2X 标准进行增强; 另一方面, 基于 3GPP 面向 5G 制定的 NR 标准进行 NR eV2X (enhanced V2X) 的标准研究与制定工作。其中, 终端与基站端通信会考虑 NR URLLC 技术的标准进展。

国际上车联网通信技术另一大主流路线是专用短距离通信标准。DSRC 发展较早, 目前典型的代表有美国 ASTM/IEEE、欧洲 CEN、日本 ARIB、韩国 TTA 和新加坡 IMDA 等 DSRC 标准体系^[10]。DSRC 标准主要基于 IEEE 1609 网络的架构和流程标准《车载环境无线接入标准系列 (WAVE)》、车车信息交互协议 SAE J2735 和 SAE J2945 标准以及 IEEE 802.11p 物理标准。

2 低功耗大连接场景

2.1 LoRa

LoRa 是 LPWAN 通信技术中的一种, 是美国 Semtech 公司采用和推广的一种基于扩频技术的超远距离无线传输方案^[5]。这一方案为用户提供一种简单的能实现远距离、长电池寿命、大容量的系统。LoRa 技术具有远距离、低功耗 (电池寿命长)、多节点、低成本的特性。

LoRa 系统为非授权频段技术, 主要工作在 1 GHz 以下免许可频段, 在欧洲常用频段为 433 MHz 和 868 MHz, 在美国常用频段为 915 MHz。

LoRa 调制解调: LoRa 是一种调制技术, 与同类技术相比, 提供更长的通信距离^[5]。其调制是基于扩频技术, 属于线性调制扩频 (CSS) 的一个变种, 具有前向纠错 (FEC) 性能。LoRa 的通信距离可达 15 km 以上, 可以是空旷地方甚至更远。相比

其他广域低功耗物联网技术,如 SigFox、LoRa 终端节点在相同的发射功率下可通信的距离会更远。LoRa 显著地提高了接收灵敏度,与其他扩频技术一样,使用了整个信道带宽广播一个信号,可以有效对抗信道噪声和低成本晶振引起的频偏。

LoRaWAN: LoRaWAN 是 MAC 地址协议。LoRa 采用星形网络架构,与网状网络架构相比,它是具有最低时延、最简单的网络结构。基于 LoRa 的扩频芯片,可以实现节点与集中器直接组网连接,构成星形。对于远距离的节点,可使用网关设备进行中继组网连接。LoRaWAN 协议针对低功耗、电池供电的传感器进行了优化,包括不同级别的终端节点以优化网络延迟和电池寿命间的平衡关系。LoRaWAN 主要满足安全的双向通信、移动化和本地化服务等物联网需求。LoRaWAN 规范提供智能设备间无缝的互操作性,不需要复杂的本地安装,给用户、开发者、企业以自由,使其在物联网中发挥作用。

功耗和性能方面,LoRa 终端接收电流仅为 10 mA,睡眠电流为 200 nA,电池寿命可达 10 年。LoRa 还有网络层和应用层及设备的多重加密方式。LoRa 基于测量多点对一点的空中传输时间差试点定位,使在 10 km 的范围内终端的定位精度可达 5 m。

从成本和市场推广上看,LoRa 终端通信模块成本约 5 美元,适用于具备功耗低、距离远、容量大以及可定位跟踪等特点的物联网应用。LoRa 联盟成立于 2015 年 3 月,在一年多的时间里吸引了全球 300 多家企业加盟,推动了产业链的成熟。目前,LoRa 网络已经在全球多地进行试点或部署。

2.2 SigFox

SigFox 是商用化速度较快的一种 LPWAN 技术,它采用超窄带技术,主要打造低功耗、低成本的无线物联网专用网络^[6]。SigFox 是一家法国窄带物联网公司,成立于 2009 年。SigFox 公司不仅是标准的制定者,同时也是网络运营者和云平台提供商,目标是与合作伙伴使用旗下的 SigFox 技术建造一个覆盖全球的 IoT 网络,独立于现有电信运营商的移动蜂窝网络。从接入网络上,看 SigFox 技术工作在 1 GHz 以下的免许可 ISM 射频频段,频率根据国家法规有所不同,在欧洲广泛使用 868 MHz,在美国则使用 915 MHz,每个载波占用 100 Hz。从技术上看,SigFox 具有成本低、功耗低的特点。

1) 成本低

SigFox 采用的 UNB 技术,该技术每秒只能处理 10~1 000 bit 的数据,能支持成千上万的连接。基于该技术的网络,其成本远低于传统的蜂窝网络。

2) 功耗低

SigFox 网络设备消耗仅 50~100 MW 的功率。相比较而言,移动电话通信则需要约 5 000 MW。这就意味着,接入 SigFox 网络的设备每条消息最大的长度大约为 12 B,并且每天每个设备所能发送的消息不能超过 140 条。

从成本和市场推广上看,SigFox 使用的通信芯片成本低于 1 美元,每个基站可以连接 100 万个终端。据估算,建设 10 000 个基站,建成覆盖全球的物联网就需数百亿欧元。

2.3 LTE-M

LTE-M 即 LTE M2M 或 MTC (machine type communication) 是基于 LTE 演进的物联网技术。2011 年 9 月,3GPP 开展针对 MTC 的研究项目。该研究确定了用于 RF 和基带复杂度降低的各种技术。复杂度降低的研究针对不需要高数据速率和/或低延迟的 MTC 设备。该项目还研究了覆盖增强技术,以覆盖增强 15 dB 为目标^[7-8]。

为了实现 MTC 应用的低成本设备,3GPP LTE Release 12 引入了新的较低速率的 UE 类别,新的 UE 类别被标记为 Cat-0 (类别 0)。为了进一步降低复杂性/降低成本,LTE Release 12 引入了一种新的半双工模式,即 B 类 (Type B) 半双工,特别针对 Cat-0 的设备。为了进一步降低针对大规模 MTC 应用的设备复杂性,Cat-0 设备的性能要求使它们可以在设备端使用单个接收天线。为了降低功耗,引入节电模式 (PSM, power-saving mode)。3GPP Release 12 研究了 MTC 覆盖增强技术,包括 TTI 绑定、重复、HARQ 增强、功率增强等。由于时间关系,覆盖增强技术的标准制定延后至 Release 13 完成。

Release 13 版本的 LTE-M 被称为 eMTC。进一步降低 MTC 设备成本,要求低于 Release 12 的 UE Cat-0 所实现的成本,引入新的 UE 类别 Cat-M。Cat-M UE 器件侧的 RF 带宽更窄,可进一步降低器件复杂性和相应的成本。Cat-M UE 只需要通过与最小 LTE 载波带宽相对应的带宽 (即大约 1.4 MHz) 来支持传输和接收。Release 13 的第二个目标是为低速率 MTC 应用提供显著的覆盖扩展。Release 13 设计的明确目标是与 Release 12 的设备相比,能够

实现与最大耦合损耗至少 15 dB 的增益。Release 13 采用广泛的重复下行链路和上行链路收发，实现低速率服务的扩展覆盖；Release 14 版本引入了以下增强技术：定位增强（如 E-CID、OTDOA 等）、多播增强、移动性增强、高速率增强，支持 VoLTE 功能。Release 15 版本计划在功耗、时延、频谱效率和负载控制等方面进一步增强。目前，Release 15 标准正在制定中。

表 1 总结了 LTE-M 不同终端类别的性能特征。

2.4 NB-IoT

2014 年 5 月，由沃达丰、中国移动、Orange、Telecom Italy、华为、诺基亚等公司支持的 SI “支持低复杂度和低速率物联网应用的蜂窝系统”在 3GPP GERAN 工作组立项，名为 Cellular IoT，简称 CIoT。2015 年 4 月，PCG（Project Coordination Group）会议上做了一个重要的决定：CIoT 在 GERAN 做完 SI 之后，WI 阶段要到 RAN 立项并完成相关协议。2015 年 5 月，华为和高通在共识的基础上，共同宣布了一种融合的方案，即上行采用 FDMA 多址方式，下行采用 OFDM 多址方式，融合之后的方案名字叫作 NB-CIoT（narrow band cellular IoT）。2015 年 8 月 10 日，在 GERAN SI 最后阶段，爱立信、中兴和诺基亚等公司提出了 NB-LTE（narrow band LTE）的概念。2015 年 9 月，RAN#69 次会议上经过激烈讨论，各方最终达成了一致，NB-CIoT 和 NB-LTE 这 2 个技术方案进行融合形成了 NB-IoT WID，这标志着 NB-IoT（narrow band IoT）正式诞生。2016 年 6 月，NB-IoT 核心协议在 RAN1、RAN2、RAN3、RAN4 这 4 个工作组均冻结。2016 年 9 月，NB-IoT 性能规范在 3GPP RAN4 工作组冻结。

3GPP Release 13 是 NB-IoT 的基础版本，支持 3 种部署场景：独立部署（stand-alone）、保护带部署（guard-band）、带内部署（in-band）^[9]，如图 3

所示。stand-alone 模式：可以利用单独的频带，或 GSM 频段的重耕；guard-band 模式：可以利用 LTE 系统中边缘无用频段；in-band 模式：可以利用 LTE 载波中间的任何资源块。

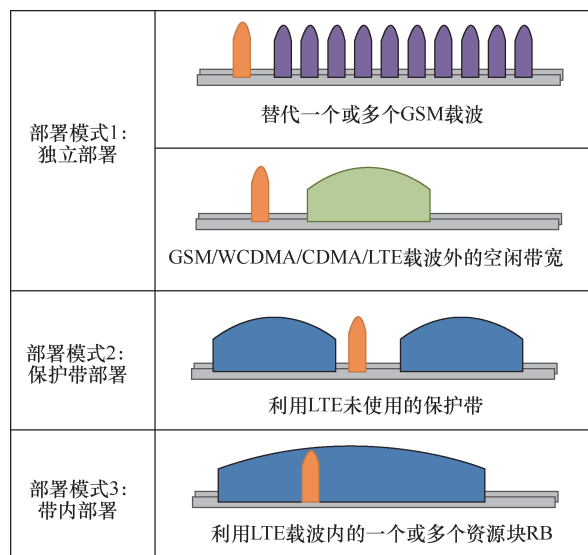


图 3 NB-IoT 部署场景

NB-IoT 工作于授权频段，系统带宽是 200 kHz，基带带宽是 180 kHz，采用半双工 FDD。下行采用 OFDMA，子载波间隔为 15 kHz；上行采用 single-tone 和 multi-tone 这 2 种传输方式^[9]。当采用 single-tone 时，子载波间隔为 3.75 kHz 或 15 kHz，采用 multi-tone 时，子载波间隔为 15 kHz。下行峰值速率约为 27 kbit/s；采用 single-tone 传输时，上行峰值速率约为 17 kbit/s，采用 multi-tone 传输时，上行峰值约为 62.5 kbit/s。覆盖范围比传统 GPRS 高 20 dB。支持 PSM 和 eDRX 省电模式。

Release 14 版本在 Release 13 基础上增加了一些功能：包括定位功能、软件升级更新、峰值速率提升、多载波扩容、定义了新的终端类型。Release 13 已经有软件升级更新功能，用单播实现，故而频谱

表 1

LTE-M 不同终端类别的性能特征

比较项	Cat-1 2Rx	Cat-1 1Rx	Release 12 Cat-0	Release 13 Cat-M
下行峰值速率/(Mbit·s ⁻¹)	10	10	1	1
上行峰值速率/(Mbit·s ⁻¹)	5	5	1	1
接收天线	2	1	1	1
双工方式	FDD/FD-FDD/TDD	FDD/FD-FDD/TDD	FDD/FD-FDD/TDD	FDD/FD-FDD/TDD
最大带宽/MHz	20	20	20	1.4
最大发送功率/dBm	23	23	23	23/20

效率低。而 Release 14 采用多播, 同一个小区可以一次升级多个设备, 例如, 一个小区有几百个水表, 升级的时候一次完成, 可以节省空口时延, 提升频谱效率。Release 14 提升了 NB-IoT 的传输速率, 采用 2 个 HARQ 进程和加大的 TB Size, 上下行都达到 100 kbit/s 以上。Release 14 增加了多载波扩容。例如, 当物联网发展到几十亿、上百亿连接的时候, 一个小区 200 kHz 频谱不够, 就需要扩容。多载波扩容就是解决这个问题。此外, Release 14 引入了新的终端类别 Cat-M2。

Release 15 NB-IoT 增强在 2017 年 3 月立项, 到 2018 年 6 月完成标准制定。在 Release 15 版本中的增强功能包括功耗时延进一步增强、测量等方面的优化、支持 TDD 等。

2.5 LoRa VS NB-IoT

本节从不同角度分析比较了 LoRa 技术和 NB-IoT 技术。

1) 频段对比

LoRa 理论上可以使用 150 MHz~1 GHz 频段中的任何频率。但是, Semtech 的 LoRa 芯片并不是所有的 sub-GHz 的频段都可以使用, 在常用频段 (如 433 MHz、470~510 MHz、780 MHz 以及欧美常用的 868 MHz 和 915 MHz 都属于常用频段) 以外的一些频率并不能很好地支持。3GPP 定义了 NB-IoT 的工作频段, 如 band 1、band 2、band 3、band 5、band 8、band 12、band 13、band 17、band 18、band 19、band 20、band 26、band 28、band 66, 并明确规定了各个频段的射频指标要求。

2) 组网架构对比

LoRa 网络主要由终端 (内置 LoRa 模块)、网关 (或称基站)、服务器和云这 4 个部分组成。不需要经过运营商的核心网, 企业可以部署私有的网络。NB-IoT 网络主要由终端、基站、核心网和 IoT 平台组成。需要经过运营商的核心网, 由运营商管理维护 IoT 平台, 对接垂直行业应用。

3) 容量覆盖对比

LoRa 理论可容纳 2 000~50 000 个终端; NB-IoT 理论可容纳 50 000 个终端。LoRa 技术的最大耦合损耗 (MCL, maximum coupling loss) 为 157 dB, 典型覆盖距离为城区 2~5 km, 郊区 15 km。NB-IoT 技术的最大耦合损耗 MCL 比 GPRS 增强 20 dB, 达 164 dB, 典型覆盖距离为城区 1~8 km, 郊区 25 km。

4) 电池寿命

影响电池寿命的 2 个重要的因素: 电流消耗和协议内容。LoRa 在休眠状态下的典型工作电流仅为 0.2 μ A, 接收工作模式下功耗电流为 10 mA 左右, 而发射工作模式下功耗电流为 20~120 mA。LoRa 协议简单, 基于 ALOHA 的异步协议, 节点可以根据具体应用场景需求进行或长或短的睡眠。NB-IoT 的调制机制和协议比较复杂, 电路相应比较复杂, 消耗电流大。NB-IoT 虽然采用了 PSM, 但是仍然要与网络进行定期同步, 会额外地消耗电池的电量。

5) 终端成本

LoRa 联盟没有版权和税费的限制, 市场上已经有低成本、技术相对成熟的 LoRa 模块, 模块价格一般在 2~5 美元。NB-IoT 前期芯片和模块价格会较高, 运营商需要提供较大的运营补贴, 后期芯片和模块价格预计低于 5 美元。

6) 安全

LoRa 工作于非授权频谱, 通过加密和扩频提高安全性, 用户认证鉴权由应用层完成。NB-IoT 工作于授权频谱, 基于 SIM 卡鉴权, 有成熟的核心网认证鉴权机制, 安全性高。

7) 产业链对比

LoRa 的产业链中 (包括终端硬件产商、芯片产商、模块网关产商、软件厂商、系统集成商、网络运营商) 的每一环均有大量的企业, 构成了 LoRa 的完整生态系统, 促使了 LoRa 的快速发展与生态繁盛。

纵观以上分析, 从技术性能角度看, NB-IoT 和 LoRa 两者各有优劣。NB-IoT 支持多个频段, LoRa 仅支持小于 1 GHz 的若干个频段; NB-IoT 和 LoRa 的容量相当; 网络覆盖 NB-IoT 优于 LoRa; 电池寿命 LoRa 优于 NB-IoT; 终端成本目前 LoRa 较 NB-IoT 有优势, 但后期 NB-IoT 成本有望接近于 LoRa; LoRa 支持定位功能, Release 13 版本的 NB-IoT 不支持定位功能, Release 14 版本支持定位功能; LoRa 的接收机灵敏度优于 NB-IoT; NB-IoT 采用授权频段, 安全性高于 LoRa。

从网络运营角度看, NB-IoT 采用的是运营商统一部署覆盖的网络运营方式, NB-IoT 需要经过运营商的核心网, 由运营商管理维护 IoT 平台, 对接垂直行业应用, 而 LoRa 可以使企业搭建属于自己的网络实现业务运营。NB-IoT 网络定位于公用网络, 有标准化的资费 and 统一的商业模式; LoRa 网络定

位于政企行业专网,以定制化、个性化的模式提供服务。两者的应用范围没有太大区别,都可应用于智能抄表、智能停车、智慧物流、智能路灯、智慧农业、环境监测等低数据量的采集。

从产业链角度看,LoRa 相对 NB-IoT 的好处是已经有成熟的商用。LoRa 的产业链中的每一环均有大量的企业,构成了 LoRa 的完整生态系统,促使了 LoRa 的快速发展与生态繁盛。NB-IoT 标准得到了许多主流运营商的响应,中国电信建成全球首个覆盖最广的商用 NB-IoT 网络,中国移动、中国联通、沃达丰、德国电信、阿联酋电信、意大利电信、AT&T 等全球顶尖运营商都已围绕 NB-IoT 发布了各自的发展方略,展开实验和部署。

2.6 挑战与展望

基于蜂窝的窄带物联网技术 NB-IoT 得到了运营商的支持,但由于 NB-IoT 是一个全新标准的技术,受到了来自 SigFox 和 LoRa 技术的竞争压力。NB-IoT 面临的最大挑战是产业链和成本,目前,运营商还需要投入大量补贴促进产业链的成熟。其次是应用和商业模式。为了建立 NB-IoT 应用和商业模式,移动通信行业需要尽快建立合作伙伴生态圈。

基于蜂窝物联网的 2 种制式——LTE-M 与 NB-IoT 存在一定竞争关系。从双方的技术特征可以看出,NB-IoT 在覆盖、功耗、成本、连接数等方面性能占优,通常使用在追求更低成本、更广深覆盖和长续航的静态场景下。LTE-M 基于 LTE 协议演进而来,和 NB-IoT 相比,具有高速率、高移动性、超强传输能力。LTE-M 在覆盖及模组成本方面目前弱于 NB-IoT,但其在峰值速率、移动性、语音能力方面存在优势,更适合应用在有语音通话、高带宽速率以及有移动需求的场景下。在实际部署,双方可以形成互补关系。

LoRa 技术自出现以来,作为一项解决无线抄表的解决方案,正好赶上了物联网以及 LPWAN 的大风口,目前已经遍地开花,获得了广泛的关注与认可。LoRa 虽然不像 NB-IoT 与 LTE-M 得到了运营商的布网支持,但是,它因为成本低、布网灵活、进入市场较早等众多优势,成为了一个不可忽视的 LPWAN 技术。当然,LoRa 同样也会面临很多挑战。LoRa 没有运营商的支持,布网方面存在先天弱势。LoRa 采用免费频段,可能存在干扰问题,尽管 LoRa 本身抗干扰能力强,LoRaWAN 协议本身也有规避干扰的措施,但物

理干扰难以完全避免。

从技术性能角度看,NB-IoT 和 LoRa 两者各有优劣。NB-IoT 网络定位于公用网络,有标准化的资费 and 统一的商业模式;LoRa 网络定位于政企行业专网,以定制化、个性化的模式提供服务。总体来说,LoRa 是 NB-IoT 的有力补充。

与其他技术相比,SigFox 拥有巨大的成本优势,然而由于 SigFox 对技术生态系统的严格控制,受到了来自拥有“开放的”生态系统和商业模式的 Lora 技术的挑战,同时还有来自新兴蜂窝技术标准 NB-IoT 和 LTE-M 的挑战。目前,SigFox 的前景正变得暗淡起来。

3 低时延高可靠场景

3.1 URLLC 业务需求

工业控制和车联网是 5G 低时延高可靠场景的两大主要应用场景。

对于工业控制场景可以分为工厂自动化和过程自动化,从工业控制应用举例类别考虑,运动控制对时延和分组丢失率的需求更高,而定期检测诊断等对时延和可靠性的要求会较低。现有的无线工业通信技术主要基于 IEEE 标准系列,如 IEEE 802.11 系列标准、Bluetooth 系列标准、IEEE 802.15.4 系列标准等。

低时延高可靠场景的另外一大类应用是车联网场景,车联网应用场景示意如图 4 所示。2015 年 3 月,3GPP TSG SA 第一工作组率先开始对 V2X 业务的研究工作。其主要研究内容包括识别 V2V、V2P 和 V2I/N 这 3 类通信的应用场景和相关需求^[11]。V2V 表示车辆间通信;V2P (vehicle-to-pedestrian) 表示车辆和个人终端(如行人的手持终端、骑自行车的车手或驾驶员和乘客等)间进行通信;V2I/N 表示使用蜂窝网络进行车辆和路边单元/网络的通信,其中,路边单元(RSU, roadside unit)是交通运输的设备实体,可以是基站类型或静态 UE 类型。

V2X 业务分类中主要包括 2 类应用。安全相关 V2X 业务,即关键事件警告(如碰撞警告、紧急事件警告等)。非安全相关 V2X 业务,例如,作为业务补充帮助驾驶员/乘客获得先进的 V2X 服务,如自动停车助手、路线导航等信息支持等。

随着基于 3GPP 标准的车联网技术的发展,在 2016 年 12 月,3GPP TSG SA 第一工作组开启针对 5G V2X 业务研究项目为 5G eV2X 定义了 5 类共计

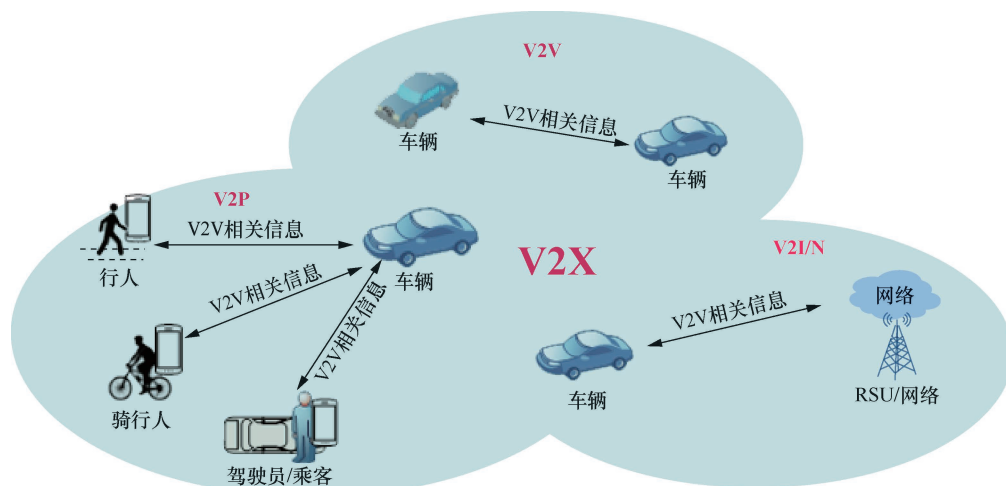


图4 车联网应用场景示意

25 个应用例。3GPP TS22.886^[12]包括自动排队驾驶、半/全自动驾驶、支持扩展传感、远程驾驶和基本需求。

V2X (如图4所示)的5类业务介绍如下。

1) 自动排队驾驶 (vehicle platooning): 车辆动态排队前行, 所有队列中的车辆从队头车辆获取信息, 队列中的后续车辆可以通过这些信息与前车保持较通常更短的距离, 车与车之间通过协作的方式同向列队行驶。

2) 支持扩展传感 (extended sensor): 在车、RSU、行人和 V2X 应用服务器间传输传感器数据或实时视频图像, 以便于车辆能够增强对其所处环境的整体感知。高数据速率是此类业务的一个显著特征。

3) 半/全自动驾驶 (advanced driving): 通过近距离内车辆和/或 RSU 间共享各自传感设备获知的感知数据进行同步和协作车辆的运行轨迹和驾驶策略。

4) 远程驾驶 (remote driving): 远程驾驶员或通过 V2X 应用为那些无法自己驾驶车辆或者在危险环境下进行远程驾驶。例如, 公共交通运输中, 由于路线较固定可基于云计算采用远程驾驶进行公共交通运输。此类业务高可靠性和低时延是主要需求。

5) 基本需求 (general): 基本需求包括车辆可以在不同的 3GPP 无线接入技术间通信、多网络应用场景、在没有 5G 覆盖下进行车联网通信和安全软件升级等。

根据 SA1 eV2X 工作, TSG RAN 已经将 eV2X

的需求纳入 5G NR 需求中并写入 TR38.913。

与 LTE Release 14 V2X 满足 20~100 ms 的时延需求不同, 5G eV2X 需要时延减少到 3~5 ms。除时延之外, 与 V2X 相比, eV2X 还在以下 4 个方面提出了更高的要求。

1) 可靠性: 基础 V2X 业务的最大可靠性需求是 80%~95%传输可靠性。目前的 3GPP Release 14 V2X 的设计通过多次重传来保证可靠性需求。对于 5G eV2X, 可靠性提高到 90%~99.999%。

2) 消息大小: LTE V2X 支持大小为 50~1 200 B 的消息类型。而 eV2X 需要支持 50~6 500 B, 个别情况会到 12 000 B。

3) 数据速率: 根据估算, V2X 需求的最大数据速率约 0.1 Gbit/s, eV2X 需要的最大数据速率则高达 1 Gbit/s。

4) 传输距离: V2X 通信距离 100~320 m, eV2X 通信范围扩展到支持 1 000 m。

3.2 V2X

3GPP V2X 标准制定分为以下 3 个阶段。

1) 阶段 1

2015 年 6 月—2016 年 9 月, 由 RAN1 主导开启了对 LTE-V2X 标准的研究和制定工作, 根据 SA1 工作组给出的建议, 首先针对基于终端直通技术的车车 (V2V) 通信进行标准制定, 完成首份 LTE V2V 标准制定工作。2016 年 9 月—2017 年 3 月, 3GPP 完成 LTE Release 14 V2X (包括 V2P 和 V2I/N) 全部标准, 满足 LTE-V2X 业务场景的需求。

V2V 终端直通技术是基于 LTE Release 12 和 Release 13 中的 D2D 技术。当时在 D2D 的标准化

过程中向 LTE 引入了 PC5 端口作为终端直接通信端口。在针对 LTE based V2V 技术进行研究时, 现有的 D2D 技术并不能满足车车通信的需求, 因此, 需要在基于 PC5 端口的 D2D 技术的基础上针对车联网高速移动和连接点数众多等特点进行增强。主要技术增强包括如下 3 个方面。

① DMRS 增强

为了应对车辆高速移动的高多普勒场景(相对速度达 500 km/h)且车联网工作的专用 ITS 频段在 5.9 GHz 的较高频段。在原有 D2D DMRS 的基础上进行了增强, 将 V2V 子帧的 DMRS 符号设定为 4 个。此外, 为在高速移动场景下更好地进行信道状态的跟踪将每个 V2V 子帧的最后一个符号用于发送接收转换和定时提前符号。

② SA 及数据资源分配增强

由于 V2V 通信节点数量较 D2D 多, 为了满足 V2V 通信对低时延的要求, 从而提升整个系统性能, 标准规定了调度分配指令在特定子信道中使用特定 RB 进行传输, 数据资源与调度分配指令占用同一子帧内的相邻 RB 进行传输, 从而降低接收端的处理时延。另外, 3GPP 标准也纳入了调度分配指令与数据资源可以使用不相邻的 RB 进行传输。

③ 引入新的传输模式

V2V 终端直通支持 2 种传输模式: 传输模式 3 和传输模式 4。

传输模式 3 由基站控制该模式, 与传统 LTE 调度类似, 在 E-UTRAN 覆盖范围内, 车辆在 RRC_CONNECTED 状态下, 通过向基站发送传输请求, 由基站为车车通信动态分配直通传输控制信息和数据信息所需的时频资源, 从而进行整个车联网状态下的干扰管理。上述基站与车辆间的信令传输需要通过 Uu 接口。

传输模式 4 为分布式调度, 主要是车辆/UE 通过在专用频段上探测资源占用情况执行半持续调度的传输机制。该模式的好处是由于 V2V 业务具有周期性的特点, UE 可以通过监听避免拥塞并根据 V2X 周期性业务模型预估出未来可能发生的拥塞情况, 从而进行资源的占用和预留。在该传输模式下, 由发送 UE 的调度器根据基站的高层信令或者 UE 内部预设定义的 MCS 范围来确定传输所使用的调制编码方式。该机制的设计可灵活适用于不同带宽, 例如 10 MHz 或 20 MHz 带宽。

由于是 UE 间通过 PC5 直通端口进行 V2V 传输, 该传输模式适用于有 LTE 接入网覆盖和没有 LTE 接入网覆盖 2 种情况。为了提升该传输模式的性能, 在该传输模式中还纳入对车辆地理信息的考虑, 从而减少/规避由于带内散射带来的远近效应。为支持基于 Uu 接口的 V2P 和 V2I/N 传输, 下行 SC-PTM 和 MBSFN 传输支持更短的调度周期以缩短时延。为节省终端功耗, 在传输模式 4 基础上支持部分监听或随机选择传输资源等。此外, 标准还支持同时在多个载波上进行通信, 比如用户在一个载波上通过 Uu 接口通信在另一个载波上通过 PC5 通信, 或用户在 2 个载波上通过 PC5 进行通信^[13]。

2) 阶段 2

根据前文所述 3GPP SA1 工作组开展了对 5G V2X 业务应用与需求的识别工作。因此, 从 2017 年 3 月—2018 年 6 月, 3GPP RAN1 主导完成 LTE Release 15 V2X 标准的制定工作, 其目的在于对 LTE-V 3GPP Release 14 标准进行增强以满足部分 5G eV2X 场景的业务需求^[14]。相关增强技术与 Release 14 V2X 技术后向兼容, 包括引入载波聚合, 支持 64QAM 高阶调制, 支持发送分集和减少时延等。

3) 阶段 3

在 5G NR 标准制定同时, 3GPP 标准组织也开始基于 5G 标准的 V2X 研究工作。从 2017 年 6 月起, 3GPP RAN 和 RAN1 工作开始对 5G eV2X 仿真方法进行邮件讨论与制定, 持续到 2018 年 6 月, 之后开始进行 5G eV2X (Release 16) 标准的制定工作。对于 NR V2X 的 5G RAN 设计, 需要既能够为 V2X 提供服务也能为 eV2X 提供服务。为提供更先进 V2X 业务, NR V2X 作为 LTE V2X 的补充并且支持与 LTE V2X 的互操作。

3.3 DSRC

在基于 3GPP 标准的 V2X 出现之前, 市场上主要的车联网技术为美国主导的基于 IEEE 标准的 DSRC 标准系列, 包括美国、欧洲、日本、新加坡、韩国等国均基于 DSRC 技术制定了本国的 ITS (intelligent transport system) 标准, 如表 2 所示。从表 2 可以看出, 与 3GPP V2X 标准不同, DSRC 仅支持在 5.9 GHz 频段进行短距离通信^[10]。

而基于 3GPP 标准研究制定的 V2X 技术则是基于现有蜂窝网络技术进行延伸的, 不仅支持 5.9 G 采用终端直通技术进行通信, 还支持通过 Uu 接口

表 2 IEEE DSRC 与 3GPP V2X (Release14)比较

参数	IEEE DSRC	3GPP V2X (Release 14)	
		Uu 接口	PC5 接口
频段	5 850~5 925 MHz	对于 Rel-14 标准, 根据 3GPP TS36.101 规定的除 Band47 外的全部频段 Band 3 UL: 1 710~1 785 MHz DL: 1 805~1 880 MHz Band 7 UL: 2 500~2 570 MHz DL: 2 620~2 690 MHz Band 8 UL: 880~915 MHz DL: 925~960 MHz Band 39 1 880~1 920 MHz Band 41 2 496~2 690 MHz	对于 Release 14 标准, Band 47: 5 855~5 925 MHz
带宽	10 MHz 或 20 MHz	1.4、3、5、10、15 或 20 兆赫兹/信道	10 或 20 兆赫兹/信道
RF 发送功率/EIRP	最大 33 dBm EIRP	eNB: 最大 43 dBm UE: 最大 23 或 33 dBm	最大 23 或 33 dBm
调制方式	64-QAM-OFDM 16-QAM-OFDM QPSK-OFDM BIT/SK-OFDM 52 subcarriers	上行: QPSK SC-FDMA, 16QAM SC-FDMA, 64QAM SC-FDMA; 下行: QPSK OFDMA, 16QAM OFDMA, 64QAM OFDMA	QPSK SC-FDMA, 16QAM SC-FDMA
前向纠错码	卷积码, $rate = \frac{1}{2}, \frac{3}{4}$	卷积码和 Turbo 码	卷积码和 Turbo 码
数据传输速率	10 MHz: 3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24 和 27 Mbit/s 20 MHz: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 和 54 Mbit/s	上行 10 MHz: 1.4~36.7 Mbit/s 下行 10 MHz: 1.4~75.4 Mbit/s	1.3~15.8 Mbit/s
接入控制	CSMA/CA	基站集中调度	集中式调度或分布式调度
双工	TDD	FDD 或 TDD	TDD

在 4G 相应频段进行通信。虽然标准制定起步较晚,但是由于可以依靠传统蜂窝网络现有资源而具有后发优势。与 DSRC 相比,3GPP V2X 具有覆盖距离广、传输可靠性高、时延短和系统容量高等优点。并且从目前标准进展看,3GPP 标准的后续研究路径更加清晰,可以从基于 LTE V2X 平滑演进到 5G eV2X,这也为基于蜂窝网络的 V2X 产业链的发展奠定了良好的基础^[15]。

我国已经批准了 5.9 G 频谱作为 LTE-V2X 测试频谱,欧洲的德、英、法 3 国也立法规定 5.9 G 频谱可用于 LTE-V2X。

3.4 应用与展望

在车联网方面,2017 年 4 月,工业和信息化部国家发展和改革委员会、科学技术部联合发布《汽车产业中长期发展规划》,提出智能网联汽车推进工程,到 2020 年,汽车 DA(驾驶辅助)、PA(部分自动驾驶)、CA(有条件自动驾驶)系统新车装配率超过 50%,网联式驾驶辅助系统装配率达到

10%,满足智慧交通城市建设需求。到 2025 年,汽车 DA、PA、CA 新车装配率达 80%,其中,PA、CA 级新车装配率达 25%,高度和完全自动驾驶汽车开始进入市场。另外,我国通过批复实验频段和组织开展测试示范等工作积极推动智能交通相关行业的技术研发和产业化。工业和信息化部于 2016 年 11 月批复 IMT-2020(5G)推进组和车载信息服务产业应用联盟将 5.905~5.925 GHz(20 MHz 带宽)作为 LTE-V2X 直接通信技术的测试频段,开展通信性能和互操作测试。在跨行业企业合作方面,上海汽车集团、华为等在杭州云栖小镇、上海嘉定开展智能交通 LTE-V2X 主动安全预警应用示范;中国汽车工程研究院、大唐、长安汽车等在重庆智能汽车集成系统实验区开展 LTE-V2X 技术测试及示范,支持车-车交互的安全预警、道路施工预警、交叉路口行人检测等应用。

目前,基于蜂窝移动通信的 V2X 技术标准已先行,而目前运营商对于部署 V2X 网络的商业模

式尚不清晰。由于车辆使用年限与传统手持终端不同且价格昂贵,因此,在 V2X 后续标准演进和技术发展上,应充分考虑成本,鼓励探索行业应用并且与商业应用模式紧密结合。对于国际主流 5.9 G 车联网频段,我国之前虽然已允许在 5.9 G 进行 V2X 技术测试,但是具体分配频段及带宽以及是否为授权频段也尚存在争议。对于 6 GHz 以上毫米波频段使用,ITU-R 推荐 57.0~66.0 GHz 作为 V2V 和 V2X 的使用频段用于 ITS 应用。具体使用频段不同区域由各个国家进行安排。我国尚未对 6 GHz 以上频段用于 ITS 有任何明确规定。

4 结束语

5G 移动通信技术为用户提供了前所未有的体验和物联网连接能力。移动互联网和物联网是未来移动通信发展的两大主要驱动力,将为 5G 提供广阔的前景。移动互联网颠覆了传统移动通信业务模式,为用户提供前所未有的使用体验,深刻影响着人们工作生活的方方面面。物联网扩展了移动通信的服务范围,从人与人通信延伸到物与物、人与物智能互联,使移动通信技术渗透至更加广阔的行业和领域。

5G 三大主要的应用场景包括增强型移动宽带、低功耗大连接和低时延高可靠。低功耗大连接场景具有小数据分组、低功耗、海量连接等特点。这类终端分布范围广、数量众多,不仅要求网络具备超千亿连接的支持能力,满足 1 000 000 个/平方千米连接数密度指标要求,而且还要保证终端的超低功耗和超低成本。低时延高可靠场景主要面向车联网、工业控制、远程医疗等垂直行业的特殊应用需求,这类应用对时延和可靠性具有极高的指标要求,需要为用户提供毫秒级的端到端时延和接近 100% 的业务可靠性保证。现有通信技术主要面向车联网等应用场景,可以分为基于 IEEE 标准的 DSRC 和基于 3GPP 标准的 V2X 两大类。

面向低功耗大连接应用场景的技术称为广域网通信技术 (LPWAN)。主要分为 2 类:一类是工作于未授权频谱的 LoRa、SigFox 等技术;另一类是工作于授权频谱的 EC-GSM、LTE-M、NB-IoT 等。LoRa 是 LPWAN 通信技术中的一种,工作于非授权频段,是美国 Semtech 公司采用和推广的一种基于扩频技术的超远距离无线传输方案。LoRa 技术具有远距离、低功耗 (电池寿

命长)、多节点、低成本的特性。SigFox 是一种商用化速度较快的 LPWAN 网络技术,它采用超窄带技术,主要打造低功耗、低成本的无线物联网专用网络。LTE-M 是基于 LTE 演进的物联网技术,为低功耗、广覆盖物联网业务拓展新功能,可在 LTE 系统上实现软件升级。NB-IoT 是基于蜂窝的窄带物联网技术,可直接部署于 GSM 网络或 LTE 网络,以降低部署成本、实现平滑升级,比传统 GPRS 高 20 dB 的更广的覆盖范围。分析对比 LoRa 和 NB-IoT 技术,NB-IoT 网络定位于公用网络,有标准化的资费 and 统一的商业模式;LoRa 网络定位于政企行业专网,以定制化、个性化的模式提供服务。

基于蜂窝物联网的 2 种制式 LTE-M 与 NB-IoT 存在一定竞争关系。NB-IoT 在覆盖、功耗、成本、连接数等方面性能占优。LTE-M 其在覆盖及模组成本方面目前弱于 NB-IoT,但其在峰值速率、移动性、语音能力方面存在优势,更适合应用在有语音通话、高带宽速率以及有移动需求的场景下。在实际部署,双方可以形成互补关系。从技术性能角度看,NB-IoT 和 LoRa 两者各有优劣,LoRa 是 NB-IoT 的有力补充。由于 SigFox 对技术生态系统的严格控制,SigFox 的前景正变得暗淡起来。

基于 3GPP 标准的 V2X 业务需求与标准制定工作于 2015 年初启动至今,已完成了 LTE Release 14 版本 V2X 标准,成为了国际首份具有我国自主知识产权的基于 LTE 的车联网标准,并且于 2018 年 6 月完成 LTE V2X 增强标准制定工作。而基于 5G 的 V2X 标准也已于 2017 年启动制定 5G eV2X 的仿真场景与方法。此外,基于 NR 标准的 URLLC 标准研究与制定已于 2018 年 2 月启动,相关技术的制定将满足单程用户面时延 0.5 ms,在 32 B 数据分组可靠性达到 $1-10^{-5}$ 时,时延满足 1 ms。

基于 IEEE 标准的 DSRC 技术发展较早。与 DSRC 相比,3GPP V2X 具有覆盖距离广、传输可靠性高、时延短和系统容量高等优点。从目前标准进展看,3GPP 标准的后续研究路径更加清晰,可以从基于 LTE V2X 平滑演进到 5G eV2X,这也为基于蜂窝网络的 V2X 产业链的发展奠定了良好的基础。

对于国际主流 5.9 G 车联网频段,我国之前虽然已允许在 5.9 G 进行 V2X 技术测试,但是具体分配频段及带宽以及是否为授权频段也尚存在争议。为促进车联网行业快速发展,应尽快落实频谱分

配,促进运营商积极探索车联网等低时延高可靠场景的垂直行业应用。

参考文献:

- [1] 中国信息通信研究院. 5G 经济社会影响白皮书[R]. 2017.
China Academy of Information and Communications Technology. 5G economic and social impact white paper[R].2017.
- [2] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond IMT-2000: M.2083-0[S]. 2015.
- [3] IMT-2020(5G)推进组.5G 技术白皮书[R].2015.
IMT-2020(5G) Promotion Group. White paper on 5G technology[R]. 2015.
- [4] BARDYN J P, MELLY T, SELLER O, et al. IoT: the era of LPWAN is starting now[C]//European Solid-State Circuits Conference. 2016: 25-30.
- [5] VANGELISTA L, ZANELLA A, ZORZI M. Long-range IoT technologies: the dawn of LoRa™ [J].Springer International Publishing, 2015: 51-58.
- [6] VEJLGAARD B, LAURIDSEN M, NGUYEN H, et al. Coverage and capacity analysis of SigFox, LoRa, GPRS, and NB-IoT[C]//IEEE Vehicular Technology Conference: VTC-Spring . 2017:1-5 .
- [7] 3GPP. Study on provision of low-cost machine-type communications (MTC) user equipments (UEs): TR 36.888[S]. 2013.
- [8] RICO-ALVARINO A, VAJAPAYAM M, XU H, et al. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2016,54(6):14-21.
- [9] RATASUK R, VEJLGAARD B, MANGALVEDHE N, et al. NB-IoT system for M2M communication[C]//2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference.2016:428-432.
- [10] ITU-R. Radio interface standards of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communications for intelligent: M.2084-0[S]. 2015.
- [11] CHEN S, HU J, SHI Y, et al. Vehicle-to-everything (v2x) services supported by LTE-based systems and 5G[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(2):70-76.
- [12] 3GPP. Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services: TS 22.886[S].2017.
- [13] LG Electronics, 3GPP RP-170237. Summary for WI “LTE-based V2X Services”[R]. 2017.
- [14] Huawei, CATT, LG Electronics, et al. New WID on 3GPP V2X Phase 2: 3GPP RP-170798[R]. 2017.
- [15] ABBOUD K, OMAR H A, ZHUANG W. Interworking of DSRC and cellular network technologies for V2X communications: a survey[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 7457-9470.

[作者简介]



朱剑驰 (1981-), 男, 中国电信技术创新中心高级工程师, 主要研究方向为无线通信技术与 LTE/5G 标准化。



杨蓓 (1988-), 女, 中国电信技术创新中心工程师, 主要研究方向为 4G/5G 系统的关键技术、物联网技术、3GPP 标准化等。



陈鹏 (1975-), 男, 博士, 中国电信技术创新中心高级工程师、总监, 主要研究方向为无线通信前瞻技术与标准化。



余小明 (1977-), 男, 博士, 中国电信技术创新中心高级工程师, 主要研究方向为无线通信技术与 LTE/5G 标准化。



毕奇, 男, 博士, 中国电信技术创新中心主任, 北京研究院总工程师, 贝尔实验室院士, 国际电机电子工程师学会 IEEE 会士, 2010 年全职回国并入选中央组织部第四批千人计划专家, 无线通信领域的国际知名专家。