



综述

5G+行业现场网技术与产业发展综述

郑师应, 李源, 杨博涵, 马帅, 肖善鹏
(中国移动通信有限公司研究院, 北京 100033)

摘要:近年来, 物联网技术在新零售、智慧物流、智慧园区、智能制造等行业领域广泛应用, 主要包含基于 RFID 的商品管理、基于短距通信的设备数据采集、基于确定性传输的工业设备远程控制等。这些用于行业现场网络连接、数据互通的通信技术被称为行业现场网。重点介绍了行业现场网的概念和发展历程, 通过分析行业数智化转型对现场网与蜂窝网络融合的需求, 引出 5G+行业现场网的架构、技术优势、发展趋势和应用场景, 希望为行业现场网的产业及技术发展提供新思路。

关键词: 物联网; 现场网; 5G; 行业智能; 工业互联网

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022104

Technology evolution and industry development of 5G + industrial proximity network

ZHENG Shiying, LI Yuan, YANG Bohan, MA Shuai, XIAO Shanpeng
China Mobile Research Institute, Beijing 100033, China

Abstract: In recent years, IoT technology had been widely used in new retail, smart logistics, smart parks, smart manufacturing and other industries, including product management based on RFID, equipment data collection based on short-distance communication, equipment remote control based on deterministic transmission, etc. These communication technologies used for equipment connection and data intercommunication were called industrial proximity network. The concept, development history of proximity network was introduced, and demand for the integration of proximity network and cellular network in the digital and intelligent transformation of verticals was analyzed. Then the architecture, technical advantages and development trends of 5G+ industrial proximity network and its typical applications were expounded, which aimed to provide new ideas for the developing of industrial proximity network.

Key words: IoT, proximity network, 5G, industry intelligence, industrial internet

0 引言

行业现场网是物联网技术在企业内网的应用落地, 为满足企业数智化转型的需求, 其研究范围正

在不断延伸。2013 年国际标准化组织 (international organization for standardization, ISO) 在 ISO.23247 数字孪生标准中首次提出了邻近网络 (proximity network, PN) 的概念, 被业界认为是最早的行业



现场网定义,即实现现场设备与数据采集器和控制器的网络连接和数据互通方式,主要用于工业领域。

随后,产业将对现场网的概念进行细化,具体指面向工业生产和管理的工业总线、工业以太网、工业无线等技术的组合。工业总线、工业以太网主要基于有线连接,由工业龙头企业针对特定场景设计,以解决生产中的数据采集、可靠设备控制等问题,如博世为解决控制系统与测试仪器之间的数据通信提出 CAN 总线技术^[1]。工业无线包括主要用于生产场景的 WirelessHART、WIA-PA/FA、ISA100.11a 等协议,也包括 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee 等短距离技术以及 NB-IoT、LoRa、SigFox 等低功耗广域通信技术,以解决设备无线通信的需求。

但目前业界对现场网的定义还未形成统一认知。机械工业仪器仪表综合技术经济研究所提出了工业测控网的概念,包含了与“测”(数据采集)与“控”(控制系统)关联的所有网络,实现现场设备与控制设备之间的互联互通,主要包括工业总线、工业以太网、工业无线网、时间敏感网络和 5G 网络等^[2]。原工业和信息化部电信研究院(即中国信息通信研究院)明确了工业物联网的定义,即实现工业资源的网络互连、数据互通和系统互操作,实现制造资源的灵活配置、制造过程的按需执行、制造工艺的合理优化和制造环境的快速适应,达到高效利用资源的通信方式^[3]。中国信息通信研究院还提出工业内网的概念,即在工厂或园区内部,满足工厂内部生产、办公、管理和安防等连接需求,用于生产要素互联以及企业 IT 管理系统之间连接的网络^[4]。不难看出,虽然业界对现场网的定义有所不同,但总体来看,现场网呈现满足多样化业务需求、互联互通、灵活配置和 OICT 融合的趋势。

面向行业数智化转型提质、降本、增效的核心诉求,以及柔性制造、移动设备协同、网络及

业务全生命周期管理等新业务需求,工业无线技术可采集移动设备数据,灵活且易部署,其在工业领域的新装节点数量不断增加,从 2016 年至 2021 年,每年呈约 30% 的增长态势,大幅超过工业以太网和工业总线的新增节点数量。同时,随着 5G 3GPP Release16 (Rel-16) 标准的冻结,5G URLLC 支持 1 μ s 同步精度、0.5~1 ms 的空口时延、99.999 9% 的可靠性和灵活的终端组管理,已在智慧钢铁(如无人天车)、智慧港口(如无人塔吊)等场景应用。虽然工业无线和 5G 在工业领域的应用不断增长和拓展,但主要用于解决难以敷设电缆区域的数据采集、监测和控制业务等难题,即工业无线、5G 等技术现阶段仅用在不得不使用无线通信技术的场景,还未真正深入工业核心生产业务。

究其原因,主要是基于无线的行业现场网技术本身仍面临一定的挑战,各技术之间的兼容性、技术本身的通信性能、网络整体的智能化程度有待进一步提升。兼容性方面,各技术之间需实现互联互通,可提升数据的互操作性,实现跨设备、跨厂区、跨行业、跨地域的业务协同;通信性能方面,进一步降低行业现场无线通信的时延,达到满足生产业务需求的可靠性、确定性,有望加速无线通信技术在生产数据同步采集、过程控制、移动设备协同等行业生产场景的应用落地,提升生产效率,降低生产成本;智能化程度方面,与 AI、边缘计算、数字孪生等技术结合,有望实现网络及业务的智能化分析及全生命周期管理,提升其运维及管理效率。

与面向个人的通信技术不同,面向垂直行业的通信技术需要较长的时间进行需求分析、原型研发、技术验证、产品优化和应用试点,因此传统的行业现场网技术更新换代较慢。但也由于传统技术的稳定可靠、产品丰富、用户接受门槛低等因素,在未来一段时间行业现场网将必然是多

代技术混合应用。

1 行业现场网需求、架构与优势

1.1 行业现场网需求

行业现场网具体需求有以下几点。

(1) 老旧设备数字化

垂直行业存在大量的老旧设备和“哑”终端,不具备联网和通信能力,升级改造难,使用过程中的故障难以发现,管理运维难度高;未使用时其位置无法感知,寻找困难。但考虑成本等因素,企业无法在短时间内替换原有设备。因此,在不改造设备的前提下使老旧设备具备信息化能力是行业数智化转型的基本需求。

(2) 信息设备网络化

垂直行业传统生产场景多基于有线技术,随着机器换人、柔性产线、移动设备协同等数智化转型新场景的发展,行业对无线替代有线、高性能无线通信的需求强烈。一方面,随着工业自动化程度提高,现场仪表和执行机构等设备数量及数据传输量成倍增加,优化和协调控制所需的数据面成倍加宽。传统工业有线技术消耗了大量的铜芯电缆和安装空间,设备材料成本居高不下,而数据传输速率却很低。面向工业现场进行业务拓展,工业总线、工业以太网等基于有线的技术不可能无限制地增加线缆,也无法满足新场景灵活布网、移动性的需求,且有线技术易破损、维护成本高、可能影响生产;另一方面,可靠性、稳定性是行业生产正常运行的首要条件,工业无线和 5G 等通信技术若要服务于生产应用场景,在时延、可靠性和确定性等方面仍需提升,达到对应业务的底线网络服务要求。

(3) 生产管理智能化

一方面,由于智能化生产对预测性维护的需要,除了仪表测量数据和执行机构指令数据,仪表的状态数据、运行数据、网络数据及其他环境数据也需要传输到控制系统,并且按需进行智能

分析和实时控制监控,实现故障预警、故障定位、自动化信息采集、生产过程质量追溯以及全生命周期管理等功能,从而优化对设备和资源的使用,推动生产、运营、管理自动化和智能化,推动企业实现提质、降本、增效。另一方面,随着行业对安全生产重视程度的提高,对设备和人员的高精度定位需求也愈加强烈。设备定位方面,随着无人化生产和“黑灯工厂”的不断发展,生产设备协同、AGV (automated guided vehicle) 运输、无人机巡检等场景等均对设备的高精度定位提出了更高需求。人员定位方面,在地下矿井、钢厂、工地等特殊场所,当施工和操作时,指挥部门需精准地掌握人员位置,一是可以避免非工作人员进入,保障安全生产;二是紧急情况可实时掌握人员位置,并动态掌控救援力量的分布状况,灵活部署救援工作,达到高效救援的目的。

1.2 5G+行业现场网架构

5G+行业现场网是服务于行业生产现场各类业务差异化需求的现场级网络,和支持边缘计算、算力感知、全生命周期管理等功能的蜂窝网络的新型融合网络。5G+行业现场网以网关为中心,南向通过无源射频识别 (radio frequency identification, RFID), 短距、确定性传输,中低速、高精度定位等现场网技术实现现场设备连接与通信;北向通过 5G 网络将行业现场生产及管理数据传输到 5G 核心网或平台,可服务于行业生产现场,满足各类业务的差异化需求。

行业现场网关键技术包括面向资产盘点、出入库管理等场景的无源 RFID 技术,面向较小区域内点对点通信的短距技术,面向数据高可靠确定性通信的确定性传输技术,面向环境监控、低功耗数采等场景的中低速技术,以及面向设备及人员定位的精准定位技术等。行业现场网与 5G 融合,一方面能够满足设备利旧以及不同行业现场业务的高可靠、低时延、确定性通信需求,进一步提升网络的管理和运维能力;另一方面可结合



边缘计算、算力感知等能力,提升网络的智能化能力。5G+行业现场网技术架构如图1所示。

1.2.1 无源 RFID

RFID 基于射频信号反射原理实现物品识别^[5],是物联网最早采用的通信技术之一。RFID 可以实现设备定位及信息的查询等,而无需对设备进行改造,可满足行业新旧设备的信息化管理需求。基于零功耗、易部署等特性,传统收发一体的无源 RFID 广泛应用于零售、商超等行业,之后逐步扩展到工业、物流、医疗、交通等领域的资产管理、设备追踪等场景。但传统 RFID 的收发一体架构,信号发送链路和接收链路相同,系统内存在自干扰,导致收发距离近,通常为 10 m 左右。同时,由于单个 RFID 读写器可单独作为一个局域网使用,不同读写器工作在同一频段,因此系统间存在互干扰,导致单个 RFID 系统只能在较小范围内工作。

随着行业数字化转型和业务拓展,资产数量增多、库房面积增大、运输范围变广使行业资产管理对远距离数据采集、自动化盘点等方面的需求越来越强。因此业界于 2014 年提出了基于分离式架构的 RFID 系统,将一体式的读写器按功能拆分为接收器和激励器,结合非相干设计,有效

解决了系统自干扰和互干扰的问题。实验证明,通过分离式架构和全向天线,在 20 mW 载波的功率下,接收距离可达 130 m^[6]。基于分离式架构的 RFID 系统可通过连续组网拓展覆盖范围、提升 RFID 标签的长距离连接能力。基于分离式架构的无源 RFID 系统通过功能解耦,通信距离大幅提升,但前向覆盖增强、系统效率、可靠性、移动性、安全性等技术及解决方案仍需提升和完善。蜂窝通信系统在系统效率、稳健性、覆盖、移动性支持等方面具有明显的优势^[7],且技术已较为成熟,可与分离式架构 RFID 形成良好的互补。

目前,第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP) Rel-19 已完成基于蜂窝的无源物联网需求及应用场景讨论,并完成了“Ambient Power-Enabled Internet of Thing”项目立项。目前,产业已提出了基于蜂窝网络的无源物联网系统架构,如图2所示。该系统架构主要有3种架构方式:基站承载读写器功能,即为无源物联网用户提供电源供应,发送前向工作指令,也接收用户返回的数据;蜂窝网络终端,如手机,承载读写器功能,可接收基站调度。基站通过 Uu 口发送工作指令,蜂窝网络终端即为无源物联网用户提供电源供应,发送前向工作指令,也接收

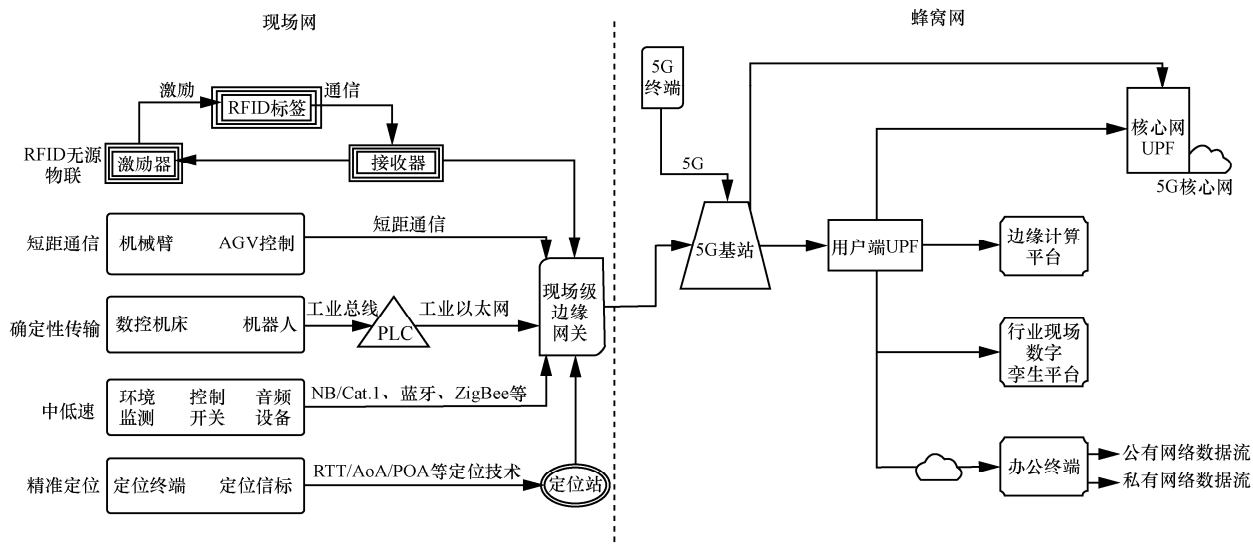


图1 5G+行业现场网技术架构

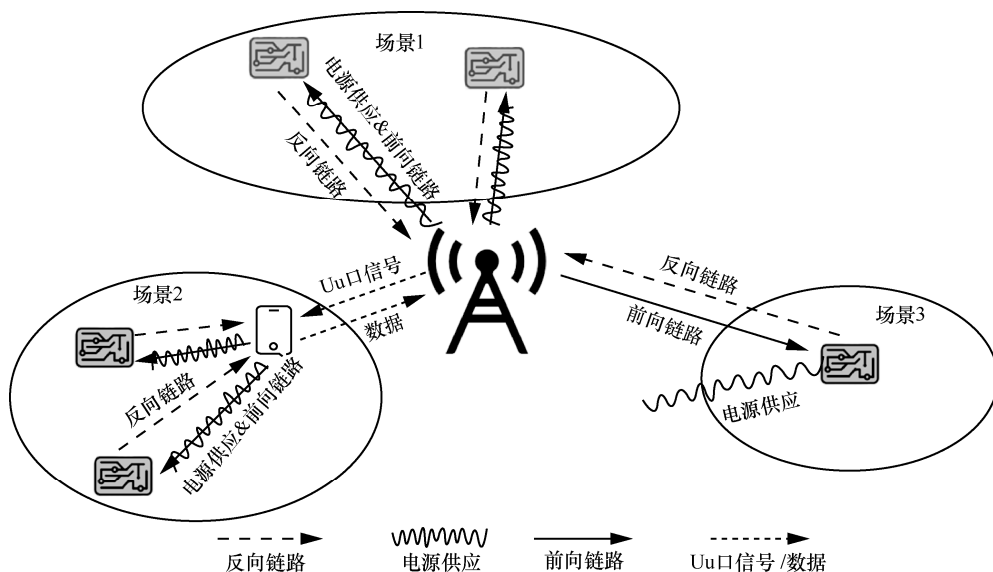


图2 基于蜂窝网络的无源物联网系统架构

用户返回的数据，并通过蜂窝网络回传；基站供电能力与工作能力分离，部分基站单独为无源物联网用户提供电源信号，另一部分基站通过前向链路通知无源物联网用户工作，并接受用户返回数据。

基于分离式架构的无源 RFID 系统与蜂窝网络融合有如下优势：第一，授权频段许可的发射功率可增加 10 dB，前向覆盖范围可提升 3 倍^[7]；第二，通过蜂窝网络调度和接入控制等，可有效缓解 RFID 标签碰撞问题，提升系统整体效率；第三，基于蜂窝网络的无缝覆盖，可以有效支持产线物品识别、物流追踪等场景下的 RFID 标签移动性。基于蜂窝网络的无源物联网系统架构如图 2 所示。

1.2.2 短距通信

短距通信泛指在较小的区域内（通常小于 100 m）的点对点无线通信，主要用于设备间的小范围互连，具有部署简单、成本低等优势，如目前工厂内广泛使用的 Wi-Fi、蓝牙等技术。随着智能泛在连接的快速发展，智能汽车、智能制造等场景对大带宽、抗干扰、高可靠通信方面已经提出了极致性能的需求，然而现有的短距通信

技术多采用非授权频段,并受限于基于竞争的资源分配机制,难以实现微秒级低时延、抗突发干扰等特性。

在此背景下，国内“星闪联盟”主导制定了基于全新无线空口设计的新型短距通信技术（简称 SparkLink），可以更好地支持超低时延、高可靠、精同步、高并发、高效率和高安全等需求，包括 G 节点（管理节点）和 T 节点（通信节点）两类设备。SparkLink 提供了星闪基础（SparkLink basic, SLB）接入技术和星闪低功耗（SparkLink low energy, SLE）接入技术两种无线通信接口，可面向不同场景提供差异化服务。例如，SLB 采用超短帧、多点同步、双向认证加密、跨层调度优化等多项技术，可实现 20 μ s 的单向时延、大于 99.999% 的可靠性、小于 1 μ s 的同步精度、大于 70 dB 的邻频干扰等性能，可满足工业生产伺服电机同步控制、智慧汽车车机互联等场景的超低时延、超高可靠的无线通信需求；SLE 使用单载波传输，采用 Polar 信道编码提升数据传输可靠性，减少重传节省功耗，支持 250 μ s 的周期完成一次交互，可满足设备监测、设备管理等具备低功耗要求的行业业务场景^[8]。SLB 和 SLE 性能指标见表 1。



表 1 SLB 和 SLE 性能指标

项目	SLB 性能指标	SLE 性能指标
峰值速率	G 链路峰值大于 900 Mbit/s（单载波 20 Mbit/s 带宽） T 链路峰值大于 450 Mbit/s（单载波 20 Mbit/s 带宽）	支持 12 Mbit/s 数据传输
时延	20 μ s	支持 250 μ s 完成一次交互
可靠性	>99.999%	/
同步精度	<1 μ s	/
多用户能力	支持 4 096 用户接入 支持 1 ms 内 80 个用户数据并发	支持 256 用户接入
抗干扰能力	Polar 数据信道编码 最小工作信噪比-5 dB 邻频干扰抑制比大于 70 dB	/
安全性	高（双向认证，算法协调保障）	高（双向认证，算法协调保障）

SparkLink 本身的性能实现了现场级无线通信的微秒级时延、超高可靠性等突破，但面向行业对通信节点本身的数据采集和网络统一管理的需求，现阶段 SparkLink 还无法实现 T 节点和 G 节点工作数据的实时采集和调度配置。若 SparkLink 与 5G 融合，使 G 节点作为路由或网桥将 T 节点与 5G 网络连接，5G 核心网可通过协议适配层感知所有 T 节点设备状态，实现网络状态、业务等信息的实时监测；同时可通过在非接入层上做适配，定义数据面和控制面协议的数据格式、数据集，并实现数据转发。同时 G 节点可部署在边缘用户端口功能（user port function, UPF）、归属用户服务器（home subscriber server, HSS）等位置，实现现场级的数据上云，并通过 5G 网络实现对 SparkLink 短距通信域中 G 节点和 T 节点的可达、可管理以及可配置。

1.2.3 确定性传输

确定性传输是指保证业务正常运行的通信指标可预期^[9]，如带宽、时延、抖动、丢包率等在确定范围内波动。确定性传输并非是伴随 5G+工业互联网发展而诞生的一种新技术。早在 2002 年，IEEE 发布了精准时钟同步协议。2005 年，IEEE

802.1 成立了 AVB（audio video bridging）工作组，以制定基于以太网架构的音视频传输协议，解决汽车、智能制造领域的高实时、低时延、确定性数据传输需求。为提升确定性网络的灵活性，满足移动设备协同工作、生产线设备远程控制等确定性传输场景中无线替代有线的的需求，3GPP Rel-16 已经考虑并定义了 5G 系统作为 TSN（time-sensitive networking）逻辑网桥的架构，以解决部分场景无线确定性传输的迫切需求。

虽然 5G+TSN 在理论上一定程度解决了无线替代有线、确定性数据传输等需求，但 TSN 技术本身功能复杂，且使用条件较高，与之相关的技术仍处于理论研究和验证阶段，面向广泛的落地应用，5G+TSN 技术及产业发展还有一段距离。例如，基于 IEEE 802.1Qbu 和 IEEE 802.3br 的 TSN 帧抢占技术需要 TSN 交换机识别 7 种类型的数据帧，包括确认对端交换机是否支持帧抢占功能的验证帧、响应是否支持帧抢占功能的响应帧、快速数据帧、可被抢占帧的首片、中间片、末尾片以及未被抢占的完整可被抢占帧^[10]；同时，中间节点均需要支持帧抢占功能。因此，工业生产数据采集、控制等场景若要使用 5G+TSN 功能，需

要将业务所涉及的交换机全部更新,不仅需要中断生产业务,而且替换成本高,这成为现阶段 TSN 推进产业较慢的重要原因。

为满足行业实际应用场景对确定性传输的迫切需求,产业提出了架构简单、轻量化的时间明晰网络(time aware network, TAN)技术。时间明晰网络是一套用于工业通信的有线局域网演进增强技术,其在以太网的基础上,进一步扩展了高精度时钟同步、快速帧抢占传输等特殊能力。一方面, TAN 将高精度时钟与以太网数据通信相结合,以时钟为基准,对数据通信进行调度和控制,使数据通信具备较高的精准度和稳定性;另一方面, TAN 在以太网的数据格式上,增加了 TAN 头部,形成 TAN PDU,并标识出快速、标准、授时等数据帧类型以及断包、进入网络时间和到达目的地址剩余时间等信息,使数据在通信中具备更完整的标识,从而提升网络多业务通信的调度能力和控制能力。TAN 帧格式如图 3 所示。

TAN 技术通过分布式时钟保障全网纳秒级时钟同步,同时通过多通道、多路径实现了任意组网,保障数据传输的可靠性和低时延。但 TAN 技术主要面向基于以太网的现场级确定性通信,对于远程控制、端到端确定性服务等场景, TAN 的兼容性、面向多样化行业业务的可拓展性仍需提升。若 TAN 技术能与 5G 相结合,有望通过数据包映射、流量调度、QoS 保障等机制,增强面向行业业务的端到端确定性,使 5G 可提供与 TAN 对应的资源预留、冗余传输、断包标识与重组等能力,从而解决无线数据传输各层之间的确定性问题,进一步拓展 TAN 技术的应用场景。

1.2.4 中/低速传输

中/低速网络是下行传输速率在 10 Mbit/s 以内,上行传输速率在 5 Mbit/s 以内的物联网技术,包括工作在授权频谱的 NB-IoT、Cat.1、eMTC 等,也包括工作在非授权频谱的 BLE、ZigBee、LoRa 和 Sigfox 等^[11]。中/低速传输主要面向对移动性要求较高、数据采集量大或需要语音功能的业务。典型中/低速物联网技术对比见表 2。

由于中/低速物联网技术繁多、网络制式不统一、性能各不相同,在应用场景上也有所区别。例如,目前 NB-IoT 多用于智能抄表业务, Cat.1 已在部分 POS 机场景应用, LoRa 已在智慧楼宇、智慧工厂等行业场景实现专网部署, Wi-Fi 则在部分行业移动设备数据采集场景使用。面向垂直行业多样化的应用场景,若行业现场中有多种中/低速传输技术应用到同一业务系统,可能面临数据格式不统一的问题,难以满足数据互联互通的需求。

中/低速传输与 5G 结合成为解决不同中/低速传输数据统一接入的潜在方案。通过 5G 网关等设备统一承载行业现场中/低速物联网技术,可通过协议转换等方式实现数据的统一接入与管理,并通过功耗优化、可靠性提升等,进一步拓展中/低速传输技术的应用场景,赋能工业控制、生产线设备数据采集等应用场景。

1.2.5 高精度定位

人员和设备高精度定位是智慧矿山、智慧钢铁、智慧园区等领域的广泛需求,可保障安全生产,提升管理效率。传统的现场网定位通常采用载波接收信号强度(received signal strength indication, RSSI)、到达角度(angle of arrival, AOA)、

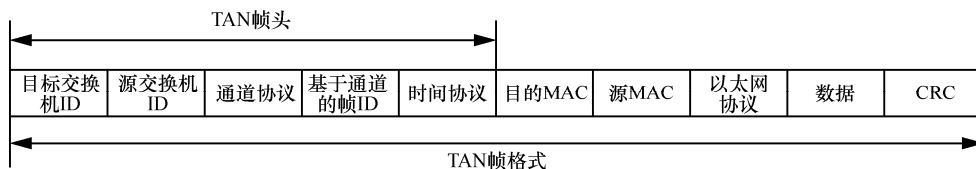


图3 TAN 帧格式



表 2 典型中/低速物联网技术对比

指标	授权频段			非授权频段			
	NB-IoT	Cat.1	eMTC	LoRa	ZigBee	Wi-Fi	蓝牙
覆盖	远距离 (10 km)	短距离 (200~300 m)	远距离 (1~2 km)	远距离 (城市 2 km、 郊区 15 km)	短距离 (10~100 m)	50 m	10 m
功耗	10 年	小于 0.1 年	约 10 年	约 10 年	约 2 年	数小时	数天
接入量	约 50 000	<1 200	约 10 000	<5 000	<300	约 50	8
上行峰值	210 kbit/s (3GPP Rel-17)	5 Mbit/s	655 kbit/s (3GPP Rel-14)	5.4 kbit/s@LoRa 调制 50 kbit/s@FSK	250 kbit/s	9.6 Gbit/s (Wi-Fi 6, 满带宽)	1 Mbit/s
下行峰值	280 kbit/s (3GPP Rel-17)	10 Mbit/s	750 kbit/s (3GPP Rel-14)				
移动性	低速移动	高速移动		低速移动	低速移动	低速移动	低速移动
语音	不支持	支持		不支持	支持	支持	支持

到达时间 (time of arrival, TOA) 等测距技术。这 3 种测距技术各有利弊, 基于 RSSI 的测距技术功耗低、成本低、实用性高, 但是受环境影响大; TOA 需要节点间精确的时间同步; AOA 需要高精度的天线阵列^[12]。受限于无线通信环境、硬件条件等因素, 即使通过算法进行定位精度提升, 实际定位精度也通常为米级及以上, 无法满足行业移动设备协同工作、危险工作环境人员的亚米级甚至分米级定位的需求。因此, 基于超带宽 (ultra wide band, UWB) 的高精度定位技术应运而生。UWB 是通过发送和接收具有纳秒或皮秒以下级别的极窄脉冲来传输数据, 从而在频域上具有 GHz 量级的带宽。与传统的窄带系统相比, UWB 具有穿透力强、功耗低、抗多径效果好、安全性高、系统复杂度低以及能提供精确定位精度等优点, 实际环境测试中精度能达到亚米级, 可满足人员、物资的高精度定位需求。但 UWB 的私有化程度较高, 终端扩展受限, 因此成本较高。

为满足行业低成本、高精度的定位需求, 产业界提出基于到达相位 (phase of arrival, POA) 的高精度定位方法。POA 技术通过计算不同频率、具有相同初始相位的射频信号相位差, 计算发送

设备与接收设备的距离; 结合多个接收设备数据, 可实现发送设备的亚米级精准定位, 具有成本低、精度高等特点。基于 POA 的定位方法多应用于无线网络定位系统中, 其仍可能受无线信道波动的影响。因此, 业界提出了针对到达相位差测距数据的滤波算法, 结合最小二乘法、无迹卡尔曼滤波算法等技术, 实现了接收信号相位非线性到线性的映射, 测距误差可降低近 40%, 应用在 RFID 系统中可实现厘米级定位^[12-13]。若 POA 技术能与 5G、现场网技术结合, 有望在实现高精度定位的情况下, 实现多样化功能融合, 进一步降低应用成本。

1.3 5G+行业现场网技术优势

相较于传统现场网, 5G+行业现场网可通过 RFID、短距通信、确定性传输、高精度定位等技术满足行业新旧设备信息化管理、低时延高可靠通信、数据确定性传输、设备及人员高精度定位等场景差异化应用需求; 同时可通过搭载协议转换、边缘计算、边缘智能等技术的 5G 工业网关, 一是解决网络融合问题, 实现异构网络桥接和数据互联互通; 二是可提升网络的智能化程度, 实现数据智能处理、数据上云等; 三是可提升网络

可管、可视、可控的能力，助力网络及业务全生命周期管理。

2 行业现场网发展趋势

面向行业转型升级的迫切需求，行业现场网向单技术演进、多技术融合、智能化提升的方向蓬勃发展。

(1) 单技术演进

现场网单点技术正在形成突破，包括 TAN（时间明晰网络）、NC-Link 协议、云化 PLC、SparkLink、新型无源 RFID 以及新型高精度定位技术等。国际领域中，3GPP 等标准组织正积极推动无源物联网、5G+TSN 等行业现场网技术标准的演进，包括环境供能的物联网技术、通感一体、5G 协议层面天然支持 TSN 等，以满足垂直行业各类场景需求；5G-ACIA 等产业组织也在寻求通过工业网关、协议转换、Detnet over 5G 等技术解决工业生产管理业务的数据互通、高可靠确定性传输等问题。国内领域，星闪联盟正积极推动 5G+SparkLink 融合标准，CCSA 也在积极研究基于蜂窝的无源物联网、确定性网络、高精度定位等技术。

(2) 多技术融合

多技术融合体现在以下几个方面。

一是现场网正朝着多技术融合和协同的方向发展。单一网络很难满足各类业务需求，工业现场网既需要考虑设备利旧，又需要满足企业数智化的升级需求，只有持续引入 OT/IT/CT 创新技术，才能逐步推动垂直行业从数字化向信息化、信息化向网络化、网络化向智能化的演进。

二是现场网与蜂窝网络呈现紧密协同的趋势。蜂窝网络具备能力开放、服务水平高、运维管控能力强、本地化服务到位等优势，行业现场网与蜂窝网络协同，可有效降低建网成本。通过网络全生命周期管理实现网络质量可控、网络故障可预测、业务质量有保障，有助于现场网技术从封闭走向开放，数据价值进一步释放。

三是行业现场网与边缘计算结合可保障数据安全性，提升计算能力。垂直行业对数据安全极为关注，数据不出厂是企业数字化的底线，因此本地计算的需求极高；同时，由于生产业务对数据处理时间有苛刻要求，行业现场网设备与承载轻量级 MEP（移动边缘计算平台）结合，可在保障数据安全的同时，实现数据快速处理。

(3) 智能化提升

随着技术的演进和融合，行业现场网未来逐步脱离网的概念，功能也不再局限于连接和通信，而是向更加智能化的方向发展。行业现场网引入 AI、数字孪生、算力感知等新技术的趋势愈加明显，例如与 AI 结合的行业现场网可提供智能分析、故障预警、策略制定等能力，实现网络及业务的智能管理；与数字孪生结合的行业现场网能实现网络的可管、可视、可控；与算力感知结合的行业现场网可实现网络资源的动态感知，实现算力的高效调度。

3 行业现场网应用场景

除了传统行业现场网应用的工业数据传输、远程控制等领域，5G+行业现场网的通信距离、传输性能有了明显提升，同时，结合边缘计算、数字孪生、算力感知等技术，可赋能更多的垂直行业生产应用与管理场景。5G+行业现场网典型应用场景如图 4 所示。

(1) 智慧矿山

矿山开采流程根据开采方式的不同，可分为露天开采和井下开采两种作业方式，在这两种开采作业中的应用场景、业务需求及网络要求均不相同，过去只能针对单个场景部署专用网络和管理系统。若采用行业现场网，可在危险工作区域部署基于 5G+的新型 RFID 电子围栏，有望解决非工作人员误入问题；在井下工作区域部署基于 5G+POA 和 5G+新型短距的定位与通信系统，有望实现设备高精度定位与状态实时监测。多种现

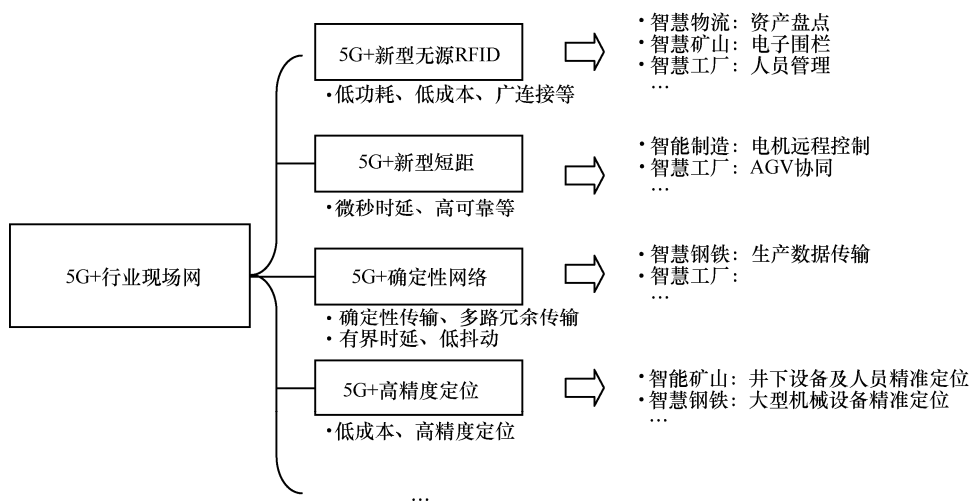


图4 5G+行业现场网典型应用场景

场网通过工业网关、5G 小站等统一接入,有望在实现井上井下全覆盖的同时,满足设备及人员全程实时监控和定位等需求,为解决设备故障无法及时发现、人员进入井下高粉尘且存在有害气体的环境等潜在的安全问题提供了潜在的解决方案,助力矿企安全高效生产。

(2) 智慧工厂

在智慧工厂的各个环节中,需要进出库物料、现场设备、出入工厂人员进行盘点和管理,如采用传统 RFID 标签并通过人工扫描进行管理。若采用行业现场网中 5G+新型 RFID 方案,可在生产现场和人员、物料出入口部署激励器和接收器,有望实现设备、资产及人员信息远距离读取和自动化统计,而无需人工辅助。

(3) 智慧钢铁

在智慧钢铁的核心生产环节,需要行业现场网对各个联动的大型机械设备和危险工作设备精准定位并保障高可靠、确定性通信,如采用工业以太网或工业总线。若采用 5G+确定性网络数据传输,有望通过双无线链路冗余通信、流量调度等技术提升无线通信可靠性;采用 5G+POA 融合定位,通过精准建立定位模型,为钢铁企业提供低成本、高精度的室内定位解决方案。

4 结束语

行业现场网在行业生产信息化升级、产业数智化转型的重要性日益突出,本文对传统行业现场网技术的发展现状及问题进行了重点分析,介绍了行业现场网的概念、架构、技术优势,并给出发展趋势和典型应用场景。后续研究将基于行业刚需场景,关注行业现场网融合发展与能力提升,包括行业现场网与蜂窝网络融合、5G+新型 RFID 时延优化方案、5G+新型短距可靠度提升技术、5G+确定性网络精准时钟同步机制、5G+POA 高精度融合定位等方面,为有效开展行业现场网技术研究提供理论参考。针对行业现场网的进一步研究有利于完善我国全行业发展的新一代网络基础设施,以推动工业生产信息化升级、加速产业数智化转型发展。

参考文献:

- [1] 胡小国. CAN 总线控制器的接口 IP 核设计与实现[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
HU X G. Design and implementation of interface IP core for CAN bus controller[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2011.
- [2] 欧阳劲松, 刘丹, 方毅芳, 等. 测控网、物联网、互联网, 于

- 工业“是什么”与“干什么”(二)[J]. 中国仪器仪表, 2020(8): 26-31.
- OUYANG J S, LIU D, FANG Y F, et al. What are measurement & control network, IoT and Internet for industry? and how do they work? (II)[J]. China Instrumentation, 2020(8): 26-31.
- [3] 工业和信息化部电信研究院. 工业物联网白皮书[R]. 2017. CAICT. Industrial IoT white paper[R]. 2017.
- [4] 工业互联网产业联盟. 工业互联网网络连接白皮书 2.0[R]. 2021. AII. Industrial internet network connectivity white paper 2.0[R]. 2021.
- [5] 徐雷达, 王志刚, 蔡东松, 等. 高速数控工具系统 RFID 自动识别技术综述[J]. 工具技术, 2011, 45(2): 24-27. XU L D, WANG Z G, CAI D S, et al. Review on RFID automatic identification technology of high speed NC tool system[J]. Tool Engineering, 2011, 45(2): 24-27.
- [6] KIMIONIS J, BLETSAS A, SAHALOS J N. Increased range bistatic scatter radio[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(3): 1091-1104.
- [7] XU W J, ZUO Z S, HE C F, et al. Opportunities, challenges and feasibilities of zero-power IoT in 5G advanced[C]//Proceedings of 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 374-378.
- [8] 星闪联盟. 星闪技术在智能网联汽车领域应用白皮书[R]. 2021. SparkLink. Application of SparkLink technology in intelligent connected vehicle field white paper[R]. 2021.
- [9] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176. HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [10] 曾磊. TSN 帧抢占及循环队列调度研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020. ZENG L. Research on TSN frame preemption and cyclic queuing forwarding[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [11] 中国移动. 中低速物联网业务白皮书[R]. 2021. CMCC. Medium and low speed IoT business white paper[R]. 2021.
- [12] 陶偲, 姚飞, 刘守印. 基于相位差测距的 WSN 节点测距数据滤波和定位算法的研究[J]. 电子设计工程, 2017, 25(7): 35-40. TAO C, YAO F, LIU S Y. Research on measurement processing and node localization based on POA for WSN[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(7): 35-40.
- [13] 蓝威涛, 张卫强, 罗健宇, 等. 基于相位差测距的 RFID 室内定位系统设计[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(10): 85-88, 91. LAN W T, ZHANG W Q, LUO J Y, et al. Design of RFID indoor positioning system based on phase difference ranging[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(10): 85-88, 91.

[作者简介]



郑师应(1992—), 女, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为行业物联网、现场网技术及标准等。

李源(1990—), 女, 中国移动通信有限公司研究院工程师、研究员, 主要研究方向为物联网、车联网、行业现场网、无线通信技术研究及标准化等。

杨博涵(1990—), 男, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 主要研究方向为行业网络及工业互联网等。

马帅(1981—), 男, 现就职于中国移动通信有限公司研究院, 长期从事 3G/4G/5G 终端技术、物联网技术研究, 目前主要从事行业现场级网络技术研究。

肖善鹏(1976—), 男, 中国移动通信有限公司研究院物联网技术与应用研究所所长, 长期从事 3G/4G/5G 无线通信技术、终端技术、物联网等方面的技术研究。