



5G-ACIA白皮书

5G工业物联网 (IIoT) : 核心能力、关键特性与应用潜力

5G工业与自动化联盟

目录

1	执行摘要	3
2	引言	4
3	部署模式: 非公用网络模式 (NPN)	4
4	频谱接入	6
5	5G能力	8
5.1	引言	8
5.2	容量、可靠性与时延	9
5.3	移动性与覆盖	9
5.4	用户设备与5G系统时间同步	10
6	网络能力开放	11
7	支持基于以太网的工业通信	12
7.1	作为逻辑以太网桥的5G系统	12
7.2	服务质量及对时间敏感网络的支持	13
7.2.1	服务质量	13
7.2.2	对时间敏感网络的支持	13
7.3	对时间同步的支持	14
8	定位	15
9	网络安全(资安)	17
10	标准化、一致性与测试	18
11	结论	19
12	主要术语及定义	19
13	缩略语	20
14	参考文献	21
15	5G-ACIA会员	24

1 执行摘要

5G对工业物联网(IIoT)产生的深远影响,已成为业界讨论的焦点。在智能工厂与工业4.0的演进过程中,无线通信因其能够为设备、人员、传感器以及移动机器人、自动导引车(AGV)和无人机等移动实体提供无缝、泛在、可扩展的连接而不可或缺。其优势还体现在能够为固定、旋转及其他移动性受限的对象“剪辫子”,从而大幅提升部署灵活性。

5G的一大核心优势是超高通信可靠性,为无线等时实时运动控制、关键流程传感监测以及增强现实/虚拟现实应用奠定了基础,且所有业务均可依托同一套无线通信系统承载。

当然,这并非5G适配工业物联网应用的唯一特性。依托5G工业与自动化联盟发布的各类应用案例,5G标准在多个版本迭代中持续演进,对这类业务的支持能力不断增强。

本白皮书除介绍无线通信能力外,还阐述了5G面向工业物联网的各项关键能力,包括以太网融合、时间敏感网络以及专用网络安全等方面的支持特性。同时也讲解了各垂直行业如何落地部署5G、获取频谱资源,以此推动工业物联网发展。

本白皮书旨在帮助业界深入理解5G面向工业自动化的核心能力与特性。鉴于5G设备可配置不同等级的功能规格,文中针对各类业务场景,明确了对应的设备能力要求,同时也梳理了基础设施融合所需的关键功能。

关于5G工业与自动化联盟

5G工业与自动化联盟(5G-ACIA)成立的目的是,致力于成为解决、讨论和评估在工业领域中使用5G技术时的相关技术、法规及商业等议题的主要全球性平台。联盟汇聚了整个5G生态系统及其所有相关利益方;成员包括但不限于运营技术(OT)行业(工业自动化公司、工程公司、生产系统制造商、终端用户等)、信息与通信技术(ICT)行业(芯片制造商、网络基础设施供应商、移动网络运营商等),以及大学、政府机构、研究机构和工业协会。5G-ACIA的总体目标是推广工业5G的最佳实践,同时最大化5G技术及5G网络在工业领域的价值。这包括确保正在进行的5G标准化与监管工作能够充分考虑工业界的兴趣和需求,并将5G的最新进展有效传达给工业界,同时确保他们能够准确理解这些新的进展。

2 引言

当我们在选择一套通信解决方案时,务必要明确其在目标应用场景中的实际表现。若从传统有线或无线系统全面切换至5G,往往会面临挑战:新旧体系的技术指标与专业术语差异巨大。本白皮书旨在助力用户完成技术过渡:梳理工业物联网场景下无线系统的核心评估指标,阐释各项指标的实际意义及对应适用场景;同时针对每项指标给出5G基准参考,说明标准所支持的能力与可选方案,并指导用户如何挑选适配的5G解决方案。本文主要聚焦第三代合作伙伴计划(3GPP) R16版本定义的5G技术特性,同时也介绍了部分R17版本的新增能力。

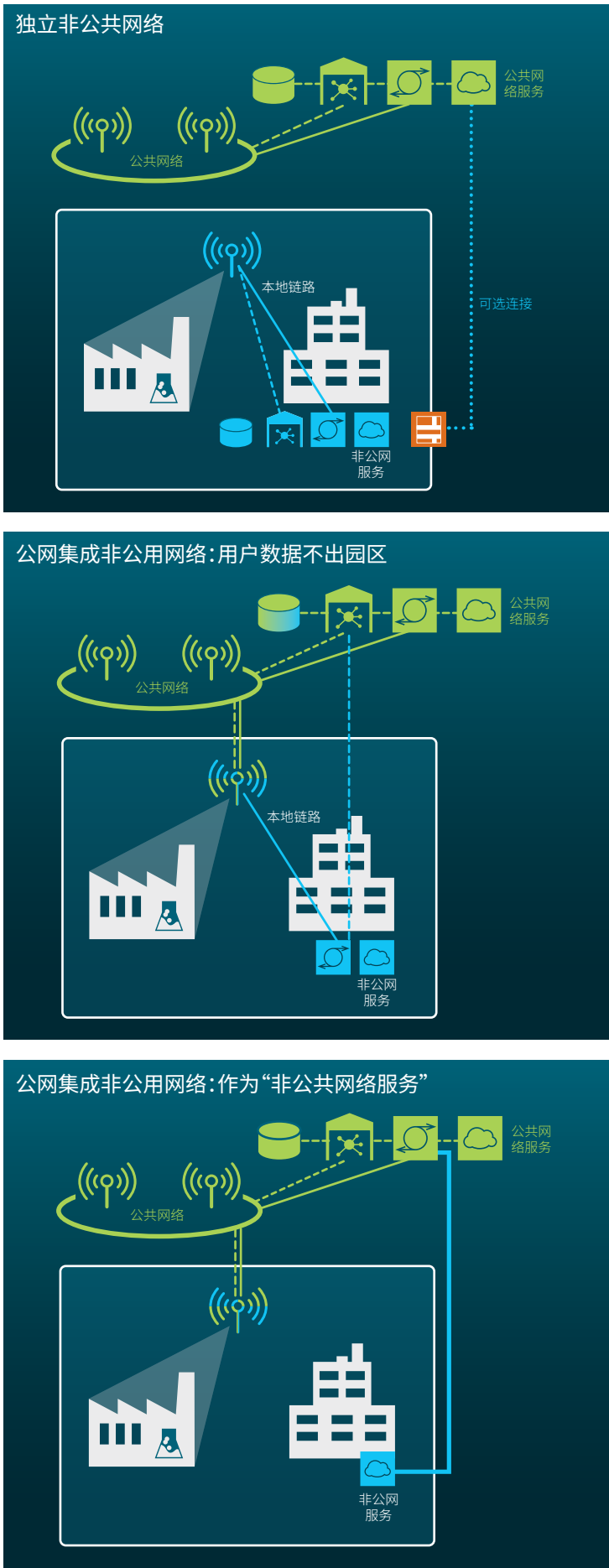
本文按技术主题划分章节,具体结构如下:第3章介绍5G的灵活性,其既可支撑多样化应用场景,也可针对特定业务定制适配。第4章讲解5G的频谱接入方式,包括全国/区域授权频谱、本地授权频谱及免授权频谱,并分析各类频谱对系统性能的影响。第5章阐述5G的核心特性,说明其如何在满足工业物联网严苛性能要求的同时,发挥无线系统可移动等优势。第6章介绍5G系统向用户呈现自身能力的方式。第7章讲解5G在服务质量、时间敏感网络,以及各类通用工业以太网协议方面的支撑能力。第8章概述5G的定位相关功能。第9章梳理基于5G无线接口开展工业通信时的安全防护机制。无线系统组件需符合规范才能稳定合规运行,第10章介绍5G相关标准的制定与测试方法。第11章对全文技术内容进行总结,并推荐5G工业自动化联盟的相关文献,以供读者深入了解各细分技术领域。

3 部署模式: 非公用网络模式 (NPN)

5G系统架构具备灵活性,可适配不同覆盖范围与用户规模。一套物理网络能够承载多个逻辑网络,各逻辑网络可按需提供差异化能力。这使得5G能够满足各类工业物联网应用需求:既可以选用覆盖近乎全球的通用蜂窝数据业务,也可搭建专属定制的5G工业物联网专网,全面满足厂区本地的无线通信需求。

许多工业物联网用例,尤其是在制造业领域,需要为特定的IIoT用户群量身定制网络,并需要与公网用户及其他IIoT用户隔离。这类5G网络被称为非公用网络(NPN)。5G标准支持两种主要类型的NPN:独立非公用网络(SNPN),这是为IIoT应用构建的5G专用网络;以及基于公网能力集成的非公用网络(PNI-NPN)。PNI-NPN网络部署在公网内部,但在操作时逻辑上与公网分离。PNI-NPN可以使用称为网络切片(Network Slicing)的5G特定架构来创建逻辑网络。上述两类专用网络支持多种部署形态。更多典型部署案例可参阅5G工业自动化联盟的另一篇白皮书(见参考文献[1]),下文图1也做了简要汇总。

图1：独立非公共网络与公网集成非公用网络部署场景示意



SNPN 是一个专用的、完整的5G网络。它可以由用户专有和运营,也可以全部或部分网络从第三方透过服务采购而来。它可以按用户的预期用途进行适当缩放,通常是用于本地网络服务。通常网络还提供复杂的自动化和自优化的功能,用于促进SNPN的运营和使用。对于PNI-NPN,它至少部分属于公网,从所属的电信运营商处取得入网许可并提供服务。这让用户有大范围网络接入需求时,确保可以通过公网而有更大的服务区域。虽然要通过公网,PNI-NPN用户可以有选项,就是可将用户的关键数据完全控制在工业现场的业主手中。

5G边缘计算能力也可以包含在上述所有这些场景中。将边缘云基础设施,装设在使用边缘云装置的临近网络上,有助于实现低延迟响应,并能有效的利用网络资源和带宽。分布式边缘计算框架可依托多源聚合数据,搭建各类高阶应用服务。借助该框架,可将终端设备的海量计算与协同任务迁移至集中节点,进而实现更低响应时延、提升带宽利用率。

在需要的情况下,5G系统也可以为满足当地监管要求做相应的配置,例如合法监听或紧急呼叫的需求。如果没有此类的监管要求,这些功能也可以剔除。

4 频谱接入

5G系统可以灵活支持不同的频谱接入授权方式。表1列出了可用于5G专用IIoT部署的各种频谱许可模型,并指出了它们的主要特性和典型参数。在频谱状态允许的情况下,

单个5G网络部署可以使用多种类型的频谱。此处,“低频段”指最高达1 GHz的部署频谱,“中频段”值得是可高达7 GHz的频谱范围,“高频段”则指高于7 GHz的频段。

表1： 频谱许可 (授权) 模型

所需授权			
	国家或区域许可 (授权)	本地许可 (授权)	免许可 (授权)
定义	采用单一主体全域授权模式:在全国或特定区域内,仅向一家持证方(如移动网络运营商)发放许可,该频谱块仅限此主体使用。(*)	采用个体属地授权模式:即不同授权方可在划定地理范围内,独家使用指定频段资源。(*)	只要遵循规范的接入程序,任何主体都可以使用该频谱资源。
每个网络可用带宽(典型值,取决于国家法规)	频分双工(FDD): 多个2x10-2x20 MHz, 中低频段 时分双工(TDD): 20至≥100 MHz, 中频段 200至≥1000 MHz, 高频段(例如24-47GHz 范围)	时分双工TDD: 40至≥100 MHz, 中频段 200至≥1000 MHz, 高频段	时分双工TDD: 高达500 MHz, 中频段 高达数GHz, 高频段(例如R-17中的52.7-71GHz 范围)

(*) 注:在部分监管辖区内,频谱使用权可采用共享分配模式,保障该频段内既有业务(如卫星固定业务地球站、回传专用固定链路)与新业务共存运行。

在部署私有IIoT网络时,每种频谱许可模型在适用度和性能上的考虑因素方面会各不相同。

国家或区域许可频谱:此频谱许可通常只发放给移动网络运营商(MNO),公营或特许的垂直行业(即在特定行业运营的公司、工业和公共部门组织)。在操作上可以使用PNI-NPN或SNPN模型(直接或通过第三方)或通过公共5G网络进行访问。如果监管机关允许,一个垂直行业可以从MNO租赁一段频谱。因为5G NR使用专用频谱,会在延迟和可靠性方面有更好的性能表现,因为系统通过专用信道接入,可以将来自其他网络的干扰影响降至最低。

本地许可频谱:监管机构可以授予组织在限定区域内的特殊频谱的许可证。在德国授予3.7-3.8 GHz频段的本地许可证就是一个例子。通信系统的频谱会由一个机构管理;该机构的功能在于提出规范和措施,以保护在一频段中本地部署的用户免于受相邻频段的用户,或被其他有使用执照的用户的有害干扰。因为5G系统使用特定频段,频谱资源具有排他性可以阻绝未授权的用户接入,因此5G NR在延迟、容量和可靠性方面不但可以实现最佳性能。有些排他性较低的频谱共享管理模型,例如美国用于3550至3700

MHz范围的公民宽带无线电服务(CBRS),其主要目的是保护现有用户,提供一段免许可费的公众频段。但IIoT系统在此类频段中运行时,因为没有使用频谱的排他性保护,运行时可能会遭受干扰中断。

免许可频谱:一种称为5G新空口免许可NR(NR-U)的技术可用于免许可频段。现在有几千兆赫的此类频谱可以使用:5 GHz和6 GHz频段以及R17版中定义的52.7-71 GHz频段。一个缺点是,用户无法保证在免许可频谱中保证不受极低的数据包延迟的干扰(在许多情况下,用户必须使用先听后说(LBT)的机制,确认信道接入成功),除非通信环境是在完全受控的状况下。“完全受控”意味着用户必须确保只有同一网络的NR-U设备,才能使用给定的频率载波,同时还要最小化所有干扰。这在港口、大学校园等相当开放的环境中,可能难以实现。高频段范围的信道接入规则仍处于评估阶段。

5 5G能力

5.1 引言

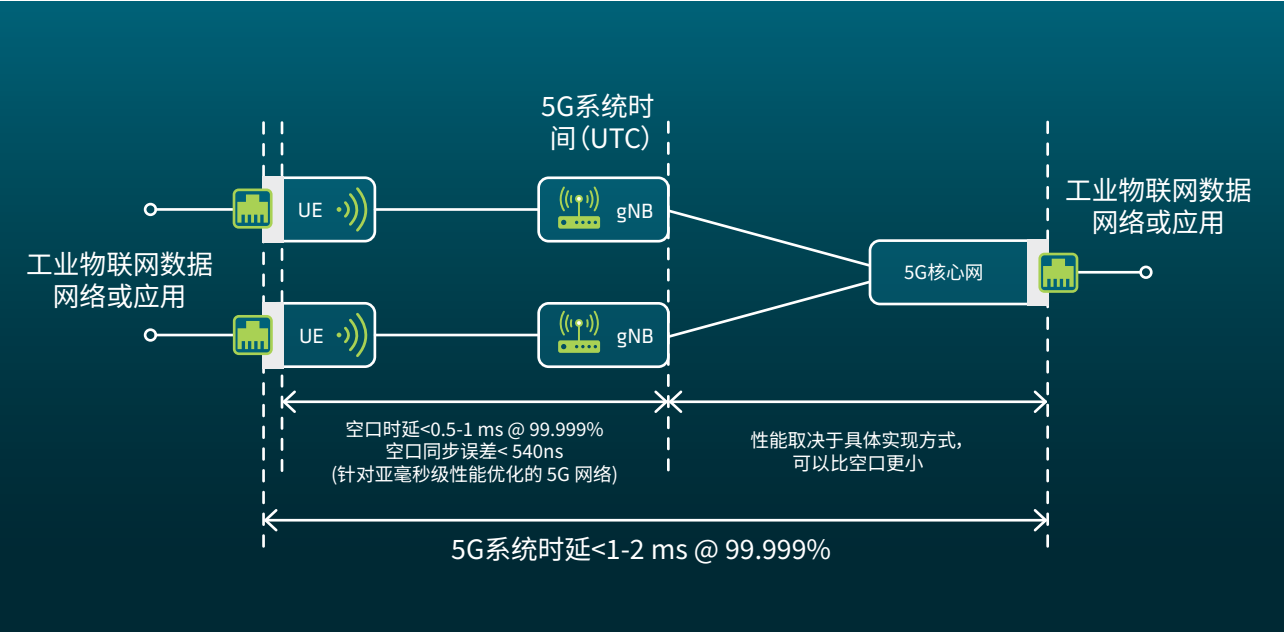
本章介绍为承载工业通信领域的超可靠低时延通信 (URLLC) 与工业物联网 (IIoT) 业务, 5G无线接入网 (RAN) 所需具备的核心能力及无线性能。5G无线接入网标准仍在持续迭代, 不断新增并优化各项功能, 其中部分能力专为工业通信场景定制。

图2列出了面向毫秒级超可靠低时延通信 (URLLC) 工业物联网场景优化的5G关键性能指标。gNB为5G基站, UE (用户设备) 即终端模组。评估整套5G系统性能时, 还需考量传输网与核心网处理环节带来的时延。

若用户面功能部署在本地 (例如厂区内), 其产生的时延会低于无线接口时延。在启用并正确配置URLLC相关功能后, 5G系统可实现1~2 毫秒端到端时延与99.999%的可靠性。系统容量与性能也取决于所用频谱及时分双工 (TDD) 时隙配比等各类参数。

系统容量与时延、可靠性等性能指标之间始终存在取舍关系。同时, 5G也可适配要求相对宽松的应用场景。

图2：针对工业物联网 (IIoT) 用例进行优化、以实现亚毫秒级URLLC性能的5G系统关键性能指标。
(分别展示了无线接入网与5G系统各项指标的贡献度)



5.2 容量、可靠性与时延

5G可承载超可靠低时延通信 (URLLC) 业务, 这代表工业物联网全新无线应用场景的重大突破。URLLC能够为业务流提供无线传输能力: 其空中接口的最大允许数据包时延低于1毫秒, 数据包传输可靠性可达99.999%, 在特定部署场景下更是能达到99.9999%。5G可稳定实现甚至超越上述可靠性指标。

5G URLLC基于自5G R15版本以来所引入的大量5G特性, 以满足ITU-R M.2083的要求 (详见[2]和[3])。

超可靠低时延通信 (URLLC) 是5G系统的核心支柱之一。3GPP针对无线接入网与核心网研发了多项全新技术特性, 使整个5G系统可支撑此类通信业务。其中包括先进多天线技术, 以及可在无线接入网中对用户业务进行动态调度的灵活架构, 以此实现超低时延与高可靠性。

为最大限度提升可靠性与可用度, 5G通过多收发节点 (multi TRP) 传输用户业务。在设备密集的工厂场景中, 可借助无线接入网与核心网的数据包复制功能实现空间分集。

针对5G-ACIA定义的工业物联网场景开展仿真评估 (见文献 [4]), 结果表明: 采用进阶半静态或动态5G无线接入网资源协同机制, 能显著提升达标用户设备的承载容量, 同时优化资源利用率。尤其在工业自动化环境的确定性业务场景下, 相邻无线接入网节点间采用半静态资源协同策略, 可大幅提升系统性能。

实测验证表明, 5G系统可在实际场景中实现超低时延通信 (见文献[5])。研究还针对5G-ACIA定义的工业物联网场景开展仿真分析: 该场景数据包大小为48字节, 且要求严格满足1毫秒超可靠低时延通信指标 (见文献[4]), 结果证实, 配置合理的5G系统能够达标。

通过进一步调优参数与配置, 空中接口的数据包传输时延可降至0.5毫秒, 同时保持99.999%的传输可靠性 (见文献[6])。若要实现终端到网络的上行高速传输, 需提前预留无线资源; 当网络掌握确定性业务的时间特征等信息时, 便可完成资源预分配, 而这一能力依托5G R16版本引入的时间敏感通信 (TSC) 框架实现。

借助高阶多输入多输出 (MIMO)、波束赋形、提升发射功率等5G技术特性, 还能进一步提升单位兆赫兹频谱的整体传输性能。

5G另一项重要特性是对服务质量 (QoS) 流的完善支撑, 可让低服务质量要求业务与超可靠低时延通信 (URLLC) 等高要求业务共存, 实现资源利用最大化。

为在不影响URLLC业务的前提下实现该能力, 5G引入了抢占式调度机制 (见文献[7])。该机制优化了增强型移动宽带 (eMBB) 与时延敏感业务的下行复用效率: gNB (即新一代基站, 是符合3GPP标准的5G新空口基站) 可使用优先级更高、长度更短的URLLC数据包, 对正在传输的低优先级数据进行部分覆盖 (即抢占)。

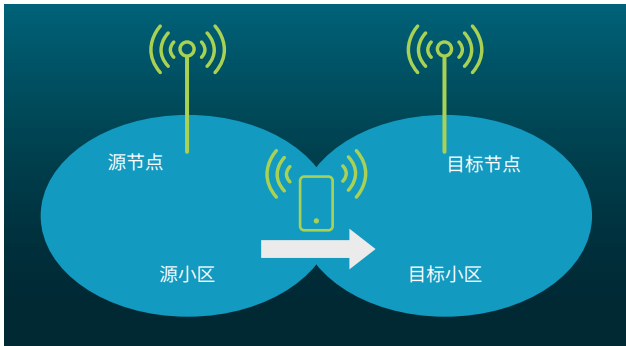
总体而言, 大规模超低时延高要求业务的涌入, 通常会降低无线网络的整体容量。

5.3 移动性与覆盖

移动性支持是众多工业物联网应用的必备能力。具体可分为两种场景: 一是终端在保持接入同一基站 (gNB) 的前提下自由移动; 二是终端在不同基站、或同一基站下不同小区间无缝切换, 同时保障业务不中断。

当覆盖范围受限或容量需求较高, 需要在同一覆盖区域内部署多座基站时, 移动性支持就显得尤为关键。需要注意的是, 切换的触发原因不只是终端在小区间移动, 部署环境中强烈的信号散射 (例如机械设备、车辆移动引发的散射) 也会触发切换。

如图3所示, 终端将正在进行的传输业务由源基站切换至目标基站, 即为无缝切换。切换过程必须快速、高效, 避免服务质量出现严重恶化。

图3：移动终端从原小区到目标小区的切换过程

5G网络统一管控切换流程，以此保障移动过程快速、稳定，该能力同样需要终端设备配合实现。终端会向网络上报测量报告，网络依据报告判断是否将终端从服务小区切换至邻小区。

相较于4G，5G新增多项技术以优化切换性能。例如条件切换技术，可提升移动稳定性并规避无效切换（见文献[8]）。另一项关键技术为双激活协议栈（DAPS）：终端在成功接入目标小区前，会始终保持与源小区的连接，依靠这种无缝衔接机制，可避免切换过程出现瞬时业务中断（见文献[9]）。

结合多收发节点（multi TRP）传输方案实现空间分集，也是5G的重要优化点，能够防止终端连接因自身移动或周边物体运动而中断。

总体而言，无论是在同一基站内切换波束、载波，还是同频载波下跨基站切换，5G均可实现无缝移动，并在切换过程中保障超可靠低时延通信业务正常运行（见文献[19]、[11]）。

免授权新空口（NR-U）沿用了传统新空口（NR）的全套无缝切换功能，二者主要区别在于：免授权频段的信道接入可靠性相对更低。

在依托完整无缝移动性保障业务需求的前提下，无线系统的整体最大覆盖范围等于所有基站（gNB）覆盖区域之和。由此延伸来看，5G理论上可实现近乎无限的覆盖扩容。

但对于部分应用场景，单座基站的最大覆盖能力同样具备参考价值。例如，针对覆盖区边缘的最低容量与时延指标进行系统设计，方案会更加简洁，所需基础设施更少，进而降低部署成本。

终端与接入点天线之间的最大通信距离（或路径损耗），受发射功率与接收灵敏度制约，而这两项指标均取决于频谱管理规则及设备自身性能。

此外，还可通过基站扇区化、基站与终端采用先进天线技术、抬高天线架设高度，以及结合各类链路自适应机制，进一步提升5G网络的覆盖能力。

5.4 用户设备与5G系统时间同步

自R16版本起，5G开始支持空中接口绝对时间同步。该技术除了是实现第7.3节所述的IEEE时间敏感网络（TSN）与IEEE 802.1AS标准的核心基础外，还可将独立5G终端同步至5G系统时域（系统时域通常采用协调世界时，即UTC）。

终端设备与5G系统时钟的同步精度，受信道环境、小区覆盖范围及移动性等多项因素影响。工业物联网场景的小区半径通常不足百米，在完成传播时延补偿后，当前单空中接口的同步精度可优于540纳秒（见文献[12]）。

目前，采用R16标准的设备厂商可自主使用私有方案实现传播时延补偿；而R17版本将针对数公里级广覆盖小区，推出标准化补偿机制。在3GPP统一的传播时延补偿方案落地前，大型宏小区的同步精度通常可控制在5微秒以内。

6 网络能力开放

工业应用可通过开放接口调用5G网络能力。5G系统对外开放的网络能力包括通信业务监测、网络管理等。5G-ACIA发布的另一份白皮书(详见文献[13]),从工业应用角度梳理了接口开放相关需求。

5G网络开放能力主要分为两类:

- 1. 终端通信业务管理
- 2. 网络状态监测

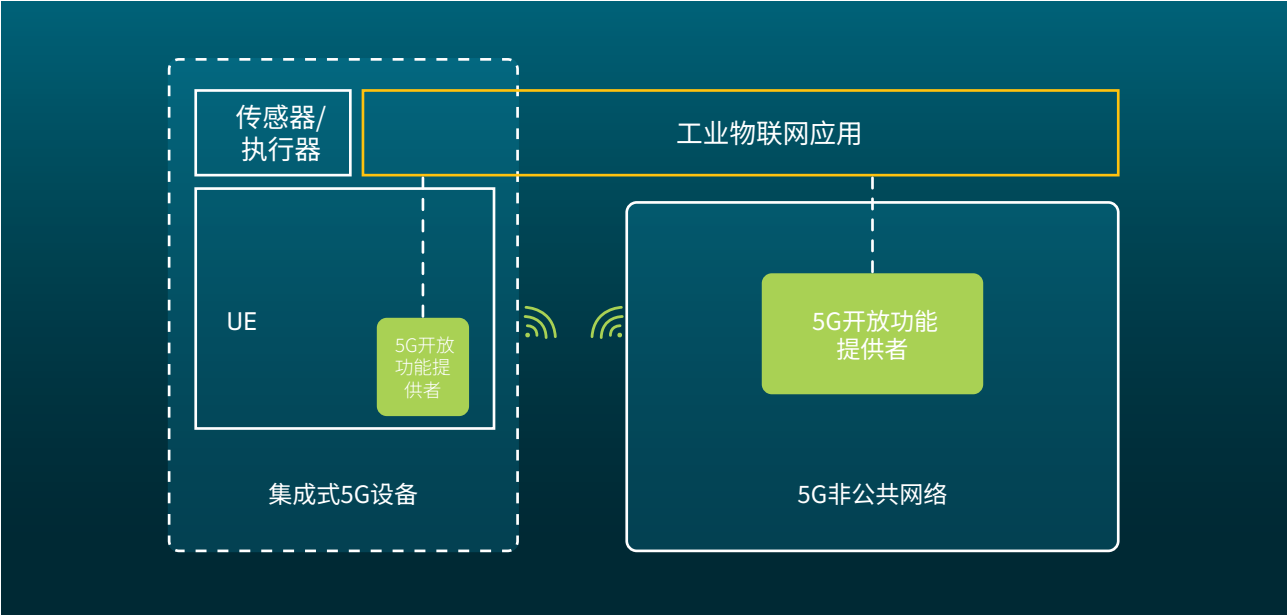
如图4所示,5G系统提供北向应用程序接口(北向API),可实现与运营技术(OT)应用的对接集成。该类能力可依托5G网络原生内置的网络开放功能(NEF)直接实现。网络开放功能在与5G核心网其他功能单元交互的同时,能够安全地向第三方应用功能开放5G网络能力与事件,也支持第三方应用功能与5G内网进行数据交互。

3GPP在R16版本中引入业务使能架构层(SEAL),该架构提供表述性状态转移风格接口(RESTful API)。这类接口屏蔽了5G网络的底层复杂度,便于快速、便捷地完成5G网络与终端设备的集成。

业务使能架构层主要提供以下能力:

- 1. 群组管理服务
- 2. 终端及用户配置文件的配置管理服务
- 3. 基于小区、服务区域与地理坐标的位置管理服务
- 4. 用于用户鉴权与授权的身份及密钥管理服务
- 5. 面向连接与服务质量监测的网络资源管理服务

图4: 5G网络能力开放(来源:[13])



7 支持基于以太网的工业通信

7.1 作为逻辑以太网桥的5G系统

以太网是一类计算机网络技术，在工业及诸多领域应用广泛。在现场级应用场景中，以太网常与多种现场总线通信技术配合使用（见文献[14]）。针对不同场景的实时通信需求，业界还不断推出各类衍生版本，这类版本在一定程度上有别于标准以太网，且已得到大规模应用（见文献[15]）。

5G对以太网的适配能力，完全契合工业自动化相关IEEE标准的技术特性，可与工业场景中现有的以太网部署方案（如局域网、时间敏感网络）实现无缝融合。

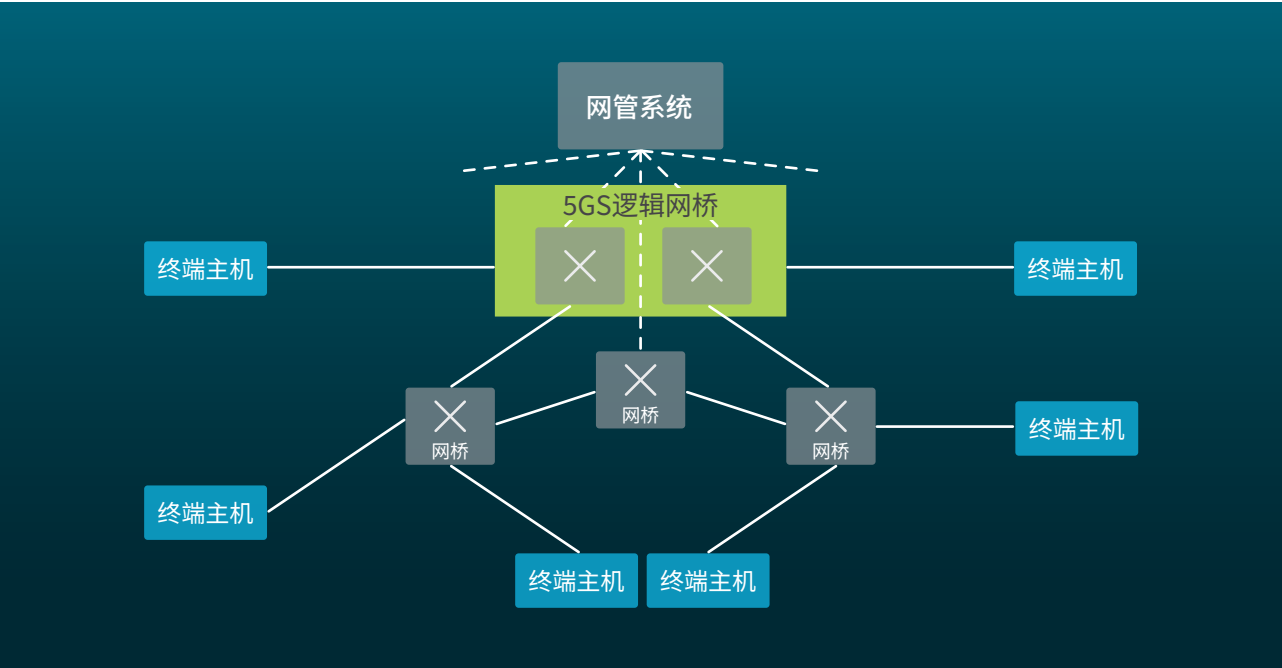
5G支持传输标准IEEE 802.3以太网数据流。为此，5G系统可作为虚拟网桥，对接现有网络管理系统。如图5所示，网络管理系统通常采用简单网络管理协议（SNMP）与管理信息库（MIB）开展运维工作。

部署在融合以太网架构中的5G系统，可包含多个5G逻辑以太网网桥（见文献[16]）。同时，5G也兼容泛洪、MAC地址学习等以太网默认转发机制。

5G逻辑网桥可对外开放自身能力，包括链路层发现协议（LLDP）、虚拟局域网（VLAN）等网桥及端口管理信息，以此从网络管理系统（NMS）获取配置信息，其中也涵盖IEEE802.1Q标准相关配置。

5G系统会建立以太网协议数据单元（PDU）会话，用于转发以太网数据流。该类会话可传输以太网帧、对接各类实时以太网设备，从而为实时以太网通信系统提供支撑。

图5：5G融合以太网络架构



由于5G系统以逻辑以太网网桥为架构模型, 因此可与现有以太网网络管理系统实现融合。5G依据工业自动化TSN规范 (IEC/IEEE 60802) 支持时间敏感网络 (TSN), 进而可承载OPC统一架构 (OPC UA) 等上层工业协议。

7.2 服务质量及对时间敏感网络的支持

7.2.1 服务质量

在众多工业应用场景中, 需要为优先级业务提供有保障的服务质量。基于时间敏感网络与以太网的工业网络会采用多种技术实现这一目标。与之类似, 5G系统也配备了服务质量 (QoS) 框架, 用于建立QoS流。

粒度极致精细的QoS流, 可在5G系统内对服务质量等级进行精准划分。无论是IP报文还是以太网数据报文, 均可建立对应的QoS流, 保障同一数据流内所有数据包在5G系统中遵循统一转发规则 (如调度、接入控制)。各类QoS流可配置不同的优先级、数据包时延上限以及允许的丢包率。

7.2.2 对时间敏感网络的支持

时间敏感网络 (TSN) 是一系列IEEE开放标准, 为基于IEEE802.1Q局域网构建高可靠、确定性低时延网络制定了相关机制。3GPP在R16版本中首次实现与有线TSN的对接适配, 并计划在R17版本中持续完善相关能力。也就是说, 5G已在标准以太网的基础上集成了TSN实时传输能力。5G系统被抽象为具备TSN功能的以太网网桥, 可实现5G与TSN融合, 满足各类工业自动化应用需求。5G-ACIA发布的5G与TSN融合白皮书也对此进行了验证 (见文献 [17])。

如图6所示, 5G系统在以太网中表现为一组具备时间敏感网络 (TSN) 能力的逻辑以太网网桥, 分别在终端 (UE) 侧和网络侧的用户面功能 (UPF) 提供以太网端口。借助这些端口, 终端侧与网络侧之间可实现以太网及TSN通信。

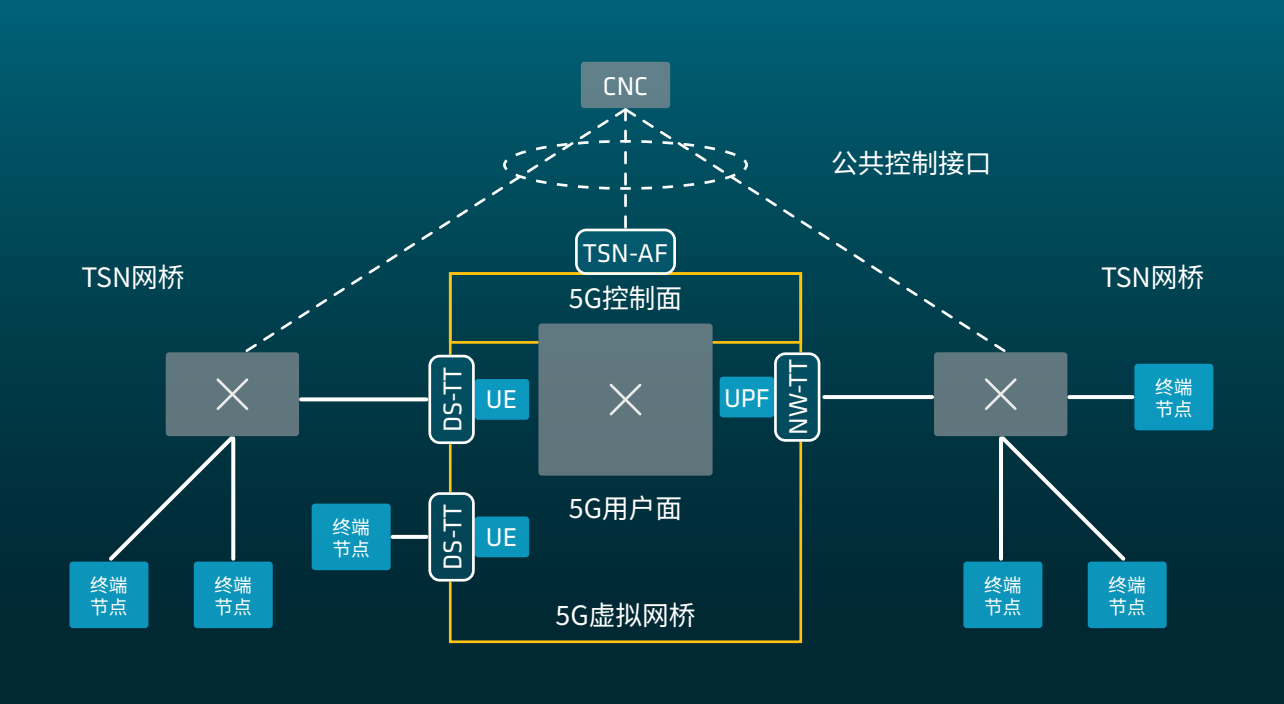
不同终端之间的TSN通信能力, 将在R17版本中新增支持。5G设TSN应用功能 (TS NAF) 这一控制面单元, 可与IEEE 802.1Qcc标准定义的核心TSN控制面组件: SN集中式网络配置单元 (CNC) 进行交互。

可通过TSN应用功能 (TSN AF) 完成5G网桥属性与5G时间敏感网络 (TSN) 功能的配置。系统依据IEEE 802.1Q标准定义的优先级编码点, 将以太网/TSN业务流映射为5G专属服务质量 (QoS) 流, 并可针对不同QoS流配置差异化处理策略。例如, 针对时延敏感业务, 可依托5G超可靠低时延通信 (URLLC) 能力, 配置具备超低时延、超高可靠性传输特性的QoS流。

5G支持两项核心TSN功能: 一是IEEE 802.1Qci定义的逐流过滤与流量监管, 用于防范异常数据流; 二是IEEE802.1Qbv定义的时间调度, 为关键业务流提供差异化转发保障。上述功能要求核心网与终端均具备 3GPP 时间敏感通信 (TSC) 能力, 因此如图6所示, 系统还需部署网络侧TSN转换器 (NW-TT) 与终端侧TSN转换器 (DS-TT), 以实现TSN数据流在5G网络中的解析处理。

TSN应用功能还可按照IEEE 802.1AB链路层发现协议 (LLDP) 的要求输出拓扑信息, 通过标准接口即可查询接入5G系统的终端与网桥设备信息。此外5G系统也支持冗余传输配置。

图6: 5G与TSN融合



7.3 对时间同步的支持

时间同步是时间敏感网络 (TSN) 的基础能力, 各类TSN应用需依靠该功能才能启用时间感知调度等其他TSN特性。R16版本遵循IEEE 802.1AS标准定义的通用精确时间协议 (gPTP), 可借助以太网经由5G系统实现主时钟与其余所有节点间的时间同步, 使5G系统具备IEEE 802.1AS所规定的时间感知能力。

5G系统会转发通用精确时间协议 (gPTP) 的时序信息, 并依托自身内部机制, 利用统一的5G时钟完成终端、基站与用户面功能 (UPF) 网关的同步, 以此计算数据驻留时间 (见文献[18])。

在R16版本中, gPTP主时钟必须部署在5G系统的网络侧。R17版本则支持将主时钟接入终端, 进而为其他终端或网络侧节点提供同步服务, 同时将系统最大时间误差控制在900纳秒以内。此外, R17还拓展了时间同步能力, 支持基于UDP/IP传输的精确时间协议 (PTP)。

5G可实现多场景下的跨域时间同步, 其中就包括网络共享场景: 例如两套独立的非公用5G网络共用同一套5G无线接入网 (见文献[18])。

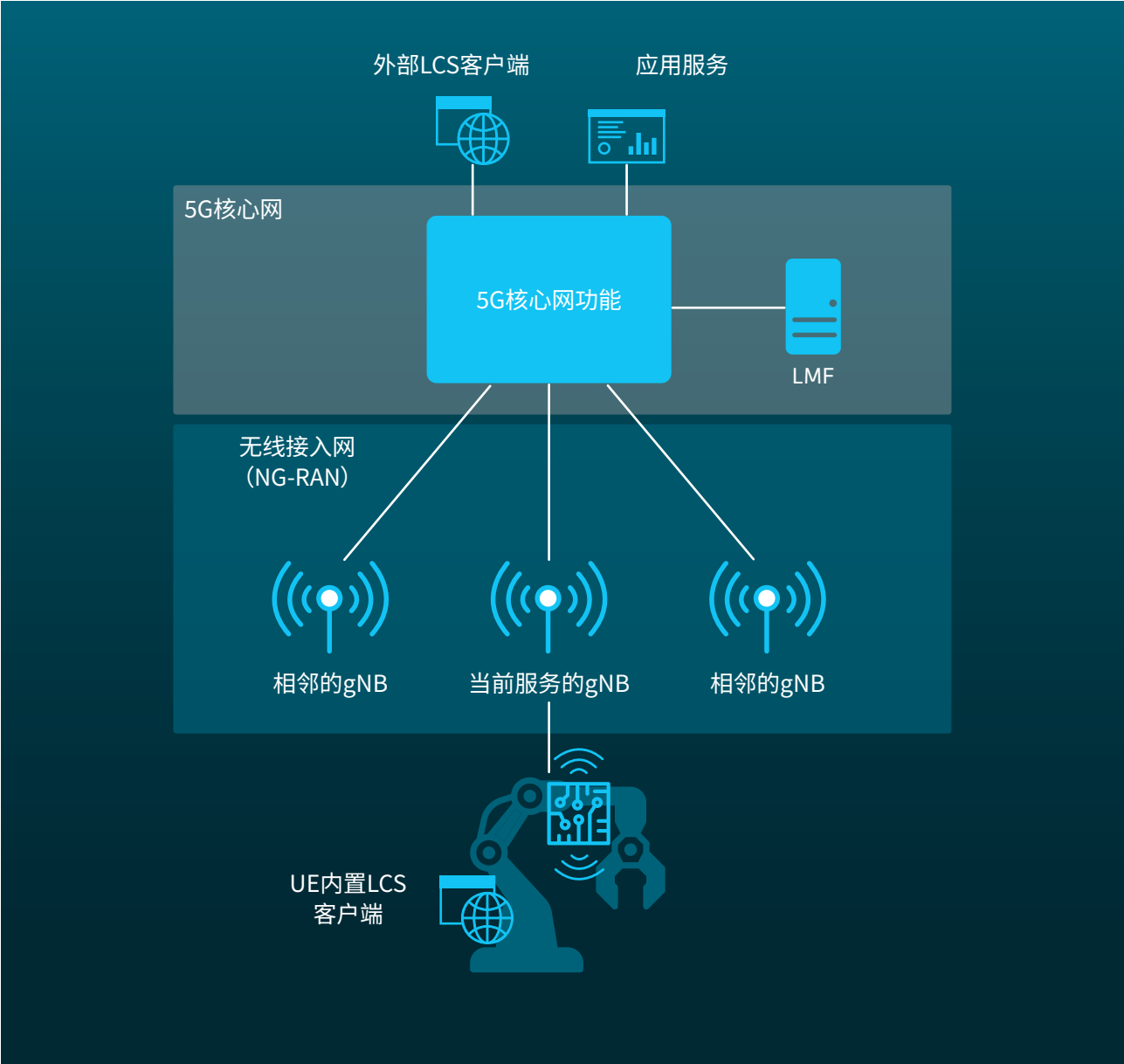
在此类场景中, 主时钟发往各设备的同步报文, 需要像网络中其他私有数据一样, 依托5G系统进行安全防护。精确时间协议 (PTP) 报文会经过加密处理, 仅授权设备可解析读取。

8 定位

三维定位是诸多工业领域的重要能力,也是人员与资产追踪、安全保障、生产装配车间工具定位、供应链优化以及自动导引车管控等各类应用的基础。定位所需精度(详见文献[19])、作业环境与无线信号条件也存在较大差异。

R16版本明确了5G新空口(NR)定位的基本原理。德维迪等人在文献[20]中综述了其相较于4G(LTE)的主要技术改进。图7展示了5G定位服务(LCS)整体架构,该架构主要分为核心网(CN)与5G无线接入网(NG-RAN)两大功能模块。

图7：简化的5G LCS架构



定位服务客户端或应用功能可携带一组定位服务质量参数,发起定位请求。定位服务客户端可部署在5G核心网或终端设备中。定位管理功能(LMF)是核心网关键网元,它与服务基站、邻区基站及终端交互,接收并处理上下行定位测量数据,进而解算出终端位置。

在下一代无线接入网侧,部分定位技术需要多小区联合测量,例如下行到达时间差(DL-TDOA);而下行发射角(DL-AoD)等技术,仅依靠单一服务小区即可完成终端定位。定位管理功能还可向终端下发辅助定位数据(详见文献[21])。

定位服务客户端或应用功能可携带一组定位服务质量参数,发起定位请求。定位服务客户端可部署在5G核心网或终端设备中。定位管理功能(LMF)是核心网关键网元,它与服务基站、邻区基站及终端交互,接收并处理上下行定位测量数据,进而解算出终端位置。

在下一代无线接入网侧,部分定位技术需要多小区联合测量,例如下行到达时间差(DL-TDOA);而下行发射角(DL-AoD)等技术,仅依靠单一服务小区即可完成终端定位。定位管理功能还可向终端下发辅助定位数据(详见文献[21])。

性能仿真结果(见文献[20])表明,现行5G标准在室外场景定位精度可达数米,室内场景可达几分米,但尚未达到工业应用所需的可靠性水平。

R16定位技术研究阶段的仿真数据(见文献[22])显示:在基站完全同步等理想条件下,商用室内场景中80%终端的水平定位误差可控制在3米以内,能够达成R16预设指标,足以满足多数应用场景需求。

需要注意的是,5G定位技术基本要求终端与至少一个基站之间存在视距传输。工业现场往往遍布设备、金属构件、货架等遮挡物,因此若要稳定实现分米级高精度定位,就需要密集部署5G基站,保障充足的视距链路。

在遮挡严重的环境中,无需加密基站,搭载集成传感器的设备也可提升定位精度。例如,惯性测量单元(IMU)可采集加速度计、陀螺仪(部分还包含磁力计)的数据,以此追踪设备的运动轨迹。

多数生产场景位于室内,全球导航卫星系统(GNSS)在此类环境中信号强度极低,覆盖效果差甚至完全无信号,应用受限。

在可正常使用卫星定位的室外场景中,5G能够播发定位辅助数据,支持全球导航卫星系统实时动态定位(GNSS-RTK),定位精度可达厘米级(见文献[23])。即便不启用GNSS-RTK,现行R16标准在广覆盖室外宏网络中,也可实现十米级定位精度。

5G标准还兼容各类非3GPP定位技术,包括地面信标系统(TBS)、气压计与惯性测量单元等传感器,以及无线局域网、蓝牙定位(见文献[24])。系统可结合室内局域高精度定位与室外宏站普通精度定位,适用于工业园区楼宇间移动、物流追踪等场景。将非3GPP定位技术与3GPP无线定位方案融合组成混合定位模式,还能进一步提升定位精度

R17版本的定位技术标准化工作当时仍在推进,计划于2022年正式定稿(译注:中文版发布时已完成)。其制定目标重点面向工业物联网(IIoT)应用场景。本次标准优化的核心目标是:实现90%终端的室内定位误差小于20厘米(见文献[25])。

另一项正在研讨的优化方向,是将端到端定位时延降至100毫秒以内,缩短首次定位时间(TTFF),即设备采集数据并完成位置解算的总耗时。

3GPP《新空口定位增强技术研究》(文献[25])列出了R17的多项优化内容:降低终端与5G基站的收发时序延迟,同时提升上行到达角(UL AoA)、下行发射角(DL AoD)的测量与上报精度。

5G定位框架还可融入新型应用场景,进一步提升能效,并确定设备在网络中的相对位置。后续5G技术升级还将支持低功耗、高精度的绝对定位与相对定位业务,例如对续航要求较高的工具追踪场景,这类应用也是工业物联网的重要需求。

9 网络安全（资安）

当通信不再依赖有线连接时，通信安全便不能仅依靠物理防护手段。5G内置多项安全机制，可对无线接口及整个5G系统的通信链路进行全面防护。

5G可通过无线接口，实现工业5G设备的调制解调器与网络之间的双向认证。该机制既能阻止非法设备接入网络，也可避免合法设备接入虚假或错误网络。双向认证是启用5G密钥体系的前提。借助密钥体系，设备与网络间的所有通信数据均可加密，保障无线链路的完整性与保密性。即便通信数据被截获，加密机制也能隐藏传输内容，防止数据被篡改，并屏蔽通信双方身份信息。可根据安全需求，在运营技术（OT）应用层进一步叠加防护，例如采用互联网协议安全（IPSec）、传输层安全（TLS）、数据报传输层安全（DTLS）等协议。

执行双向认证及相关安全功能主要有两种实现方式：

- 对于公网融合专用网络（PNI-NPN）场景，或是设备直接接入公网时，必须采用基于通用用户识别模块（USIM）的双向认证。USIM中存储着5G用户身份及对应的长期加密密钥。USIM默认搭载在可移动通用集成电路卡（UICC）（即常说的SIM卡）中，也可采用嵌入式UICC，并加载虚拟卡配置文件（eSIM）。使用UICC的优势在于，长期密钥始终无法脱离卡片，可有效防范USIM卡被复制伪造。
- 对于独立专用网络（SNPN），则不强制要求使用USIM。这使得工业设备可灵活部署5G认证功能，并针对工业场景做集成优化。这类非USIM方案同样可依托硬件安全能力：工业设备可采用安全单元防护工业协议层，该单元也可作为可信存储与运行环境，承载5G认证相关功能。

除双向认证与无线链路防护外，5G还具备流量管控能力，可用于保障工业网络安全。需要强调的是，该能力与上述5G双向认证相互独立，无论采用通用用户识别模块/通用集成电路卡（USIM/UICC）还是其他认证方式，均可正常使用。当工业网络协议层无法提供安全防护时，这项功能就尤为重要。传统工业网络依靠物理隔离实现安全防护，而网络一旦新增无线接入能力，物理隔离就存在被突破的风险。对此，5G系统增设了相关管控功能：即便设备持有合法USIM卡，也可限制其访问工业网络。

整体而言，可通过5G网络切片和/或封闭接入组（CAG）实现访问管控，仅允许工业网络内的合法成员接入。5G核心网的用户面功能（UPF）还能限制设备访问工业网络的特定网段（即数据网络DN），并可针对单条业务流执行管控策略。例如依据应用类型、源地址、目的地址或虚拟局域网标识（VLAN ID）对流量进行过滤。借助以上能力，工业网络运营商可对网内数据流实现精细化管理，既能保障服务质量，又能通过流量隔离筑牢网络安全。

3GPP仍在持续优化5G安全能力，以满足运营技术（OT）场景的业务需求，相关技术思路借鉴了网络切片专属鉴权与授权（NSSAA）以及数据网络专属（二次）鉴权两项技术，二者分别在3GPP R16和R15版本中正式引入。

10 标准化、一致性与测试

5G通信系统要稳定运行,所有组件必须实现无缝、可靠的协同交互。此前几代蜂窝通信系统数十年间均已做到这一点,5G也延续了这一技术优势。5G标准不仅明确了各系统组件的功能规范,还规定了设备需遵循的标准要求及一致性测试规范。5G认证体系覆盖范围广泛,会对绝大多数标准化功能及性能开展测试,以此保障不同厂商的5G设备可接入任意5G网络。不过目前,并非所有工业物联网相关功能都已纳入认证范围。

3GPP无线接入网工作组(RAN WG1、RAN WG2、RAN WG3、RAN WG4)负责制定基站与终端的无线功能标准及合规要求(见文献[26]、[27])。RAN WG4负责制定基站一致性测试规范,涵盖无线收发机特性与射频性能指标(见文献[28]、[29])。

终端一致性测试规范则由RAN WG5制定,内容包括无线收发机特性、射频性能、无线资源管理,以及无线接入网、核心网、IP多媒体子系统业务层全协议栈功能(见文献[30])。

全球认证论坛(GCF)、北美个人电信设备认证委员会(PTCRB)等机构,均依据终端一致性规范开展认证工作(见文献[31]、[32])。终端侧的一致性要求,覆盖了5G中已标准化的各类终端无线接入能力(见文献[33])。

上述一系列举措,旨在确保通过认证的5G设备能够符合测试规范、具备标称的终端能力。设备厂商需委托授权实验室完成检测,方可申请认证。

11 结论

5G具备多项核心能力,可依托一套无线通信系统,承载各类高端工业应用场景,包括等时实时运动控制、关键流程传感监测系统以及增强现实/虚拟现实应用。这些能力既满足严苛的通信指标要求,也具备良好的集成适配性,可与现有及新一代以太网技术无缝融合、共存。5G工业自动化联盟 (5G-ACIA) 长期致力于优化5G标准规范,以适配工业物联网领域的高要求应用。本白皮书基于该联盟的大量研究分析,介绍了5G在工业物联网中的各项能力,并探讨了在工业场景中部署5G通信的多种方案,其中也包含频谱接入与使用方式。

如果想要了解更多关于5G在工业物联网背景下的各项能力的详细信息,感兴趣的读者可参阅5G-ACIA发布的其他相关白皮书,比如:

- Key 5G Use Cases and Requirements
- 5G for Automation in Industry

- 5G for Connected Industries and Automation (Second Edition)
- 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios
- Performance Testing of 5G Systems for Industrial Automation
- Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications
- Integration of Industrial Ethernet Networks with 5G Networks
- Security Aspects of 5G for Industrial Networks
- Exposure of 5G Capabilities for Connected Industries
- and Automation Applications

5G工业自动化联盟 (5G-ACIA) 致力于助力工业网络领域各界理解并落地应用5G技术。相关最新资料可在联盟文档专区 (Publications - 5G-ACIA) 查阅获取。

12 主要术语及定义

3GPP

第三代合作伙伴计划 (3GPP) 是由全球多家标准组织组成的联盟,旨在共同制定移动通信领域全球通用的协议规范。顾名思义,该组织最初成立的目的是制定第三代移动通信系统 (3G) 的技术标准,并在此后持续开展后续代际移动通信技术的标准化工作,本文所介绍的第五代移动通信 (5G) 也包含在内。

5G-ACIA

5G-ACIA (5G工业和自动化联盟) 是主导和推动工业5G发展的全球领先组织。

13 缩略语

3GPP 3rd Generation Partnership Project	PNI-NPN Public network integrated nonpublic network
5G-ACIA 5G Alliance for Connected Industries and Automation	QoS Quality of service
AR/VR Augmented reality/virtual reality	RAN Radio access network
CN Core network	SNPN Standalone NPN
DS-TT Device-side TSN translator	SIM Subscriber identity module
gNb 5G base station	TSC Time-sensitive communications
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers	TSN Time-sensitive networking
LAN Local area network	UE User equipment
LCS Location services	UICC Universal integrated circuit card (a physically secure device for storing USIM applications)
LMF Location management function	UPF User plane function
NG-RAN 5G radio access network	URLLC Ultra-reliable low latency communications
NMS Network management system	USIM Universal subscriber identity module
NPN Nonpublic network (private network)	
NR New Radio (5G radio)	
NW-TT Network-side TSN translator	

14 参考文献

- [1] 5G-ACIA, “5G-ACIA whitepaper: 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios,” 2020. [Online]. Available at: https://5g-acia.org/wp-content/uploads/2021/04/WP_5G_NPN_2019_01.pdf.
- [2] 3GPP, “TS38.300 - NR and NG-RAN Overall description; Stage-2,” 2020. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.300/38300-g30.zip.
- [3] T.-K. Le, U. Salim and F. Kaltenberger, “An overview of physical layer design for Ultra-Reliable Low-Latency Communications in 3GPP Release 15 and Release 16,” February 2020. [Online]. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2002.03713.pdf>.
- [4] 3GPP, “RP-210490 - Report on Evaluations for 5G-ACIA,” March 2021. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_91e/Docs/RP-210490.zip.
- [5] Ericsson, “5G URLLC - Achieving industrial automation,” 2021. [Online]. Available at: <https://www.ericsson.com/en/cases/2020/accelerate-factory-automation-with-5g-urllc>.
- [6] 3GPP, “R1-1901470 Reply LS on TSN requirements evaluation,” January 2019. [Online]. Available at: ftp://ftp.3gpp.org/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_AH/NR_AH_1901/Docs/R1-1901470.zip.
- [7] K. I. Pedersen, G. Pocovi and J. Steiner, “Preemptive Scheduling of Latency Critical Traffic and Its Impact on Mobile Broadband Performance,” in IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto, 2018.
- [8] I. Leonardo Da Silva, C. Eklöf, J. Muller and R. Zhohov, “This is the key to mobility robustness in 5G networks,” Ericsson, May 2020. [Online]. Available at: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/5/the-key-to-mobility-robustness-5g-networks>.
- [9] O. Ohlsson, P. Wallentin and C.-G. Persson, “Reducing mobility interruption time in 5G networks,” Ericsson, April 2020. [Online]. Available at: <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/4/reducing-mobility-interruption-time-5g-networks>.
- [10] 3GPP, “TR37.910 - Study on self evaluation towards IMT-2020 submission,” 2019. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/37_series/37.910/37910-g10.zip.
- [11] I. Viering, H. Martikainen, A. Lobinger and B. Wegmann, “Zero-Zero Mobility: Intra-Frequency Handovers with Zero Interruption and Zero Failures,” IEEE Network Magazine, no. April, 2018.
- [12] 3GPP, “TR38.825 - Study on NR industrial Internet of Things (IIoT),” 2019. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.825/38825-g00.zip.
- [13] 5G-ACIA, “Exposure of 5G Capabilities for Connected Industries and Automation Applications,” February 2021. [Online]. Available: https://5g-acia.org/5g-acia_exposure_of_5g-capabilities_for_connected_industries_and_automation_applications_single-pages/. [Accessed on 23 June 2021].
- [14] IEC, “61784-1:2019 Industrial communication networks - Profiles Part 1: Fieldbus profiles,” April 2019. [Online]. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/59887>.
- [15] IEC, “61784-2:2019 Industrial communication networks - Profiles - Part 2: Additional fieldbus profiles for real-time networks based on ISO/IEC/IEEE 8802-3,” April 2019. [Online].
- [16] Patel et al., “5G-SMART deliverable D5.1, “First Report on 5G network architecture options and its assessments”,” November 2020. [Online]. Available at: <https://5gsmart.eu/wp-content/>

- ploads/5G-SMART-D5.1.pdf. [Accessed Sept 2021].
- [17] 5G-ACIA, “Integration of 5G with Time-Sensitive Networking for Industrial Communications,” 2021. [Online]. Available: https://5g-acia.org/5g-acia_integration_of_5g_with_time-sensitive_networking_for_industrial_communicatins_single-pages/. [Accessed 23 June 2021].
- [18] Godor et al., “A Look Inside 5G Standards to Support Time Synchronization for Smart Manufacturing,” IEEE Communications Standards Magazine, vol. 04, no. 03, 2020.
- [19] 3GPP, “TS22.261 - Service requirements for the 5G system,” 2021. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.261/22261-i30.zip. [Accessed 30 June 2021].
- [20] Dwivedi et al., “Positioning in 5G networks,” 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2102.03361.pdf>. [Accessed 23 June 2021].
- [21] 3GPP, “TS23.271 - Functional stage 2 description of Location Services (LCS),” 2021. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.271/23271-g00.zip.
- [22] 3GPP, “TR38.855 - Study on NR positioning support,” 2019. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.855/38855-g00.zip. [Accessed 2 July 2021].
- [23] Ericsson, “LTE Positioning and RTK: Precision down to the centimeter,” [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/blog/2018/11/lte-positioning-and-rtk-precision-down-to-the-centimeter>.
- [24] 3GPP, “TS38.305 - Functional stage 2 description of Location Services (LCS),” [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.305/38305-g50.zip. [Accessed 9 Sept 2021].
- [25] 3GPP, “TR38.857 - Study on NR Positioning Enhancements,” 2021. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.857/38857-h00.zip. [Accessed 23 June 2021].
- [26] 3GPP, “List of RAN1 Technical Specifications and Technical Reports,” [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/DynaReport/TSG-WG--r1.htm>.
- [27] 3GPP, “List of RAN4 Technical Specifications and Technical Reports,” [Online]. Available at: <https://www.3gpp.org/DynaReport/TSG-WG--R4.htm>.
- [28] 3GPP, “TS38.141-1 - NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing,” 2020. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.141-1/.
- [29] 3GPP, “TS38.141-2 - NR; Base Station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing,” 2020. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.141-2/.
- [30] 3GPP, “RAN5 - Mobile terminal conformance testing,” [Online]. Available at: <https://www.3gpp.org/Specifications-groups/ran-plenary/49-ran5-mobile-terminal-conformance>.
- [31] “Global Certification Forum,” [Online]. Available at: <https://www.globalcertificationforum.org/>.
- [32] “PTCRB,” [Online]. Available: <https://www.ptcrb.com/>.
- [33] 3GPP, “TS 38.306 NR; User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 16),” 2021. [Online]. Available at: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.306/38306-g60.zip
- [34] NTT Docomo, “Field Experiments on 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC),”

July 2018. [Online]. Available at: https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/rd/technical_journal/bn/vol20_1/vol20_1_003en.pdf.

[35] Nokia, “5G and Wi-Fi6 radio: options for operational technology,” 2020. [Online]. Available at: <https://onestore.nokia.com/asset/207850>.

[36] Nokia, “5G New Radio Unlicensed,” 2021. [Online]. Available at: https://onestore.nokia.com/asset/210366?_ga=2.63841071.1842850492.1620807913-36346702.1583570076.

5G-ACIA White Paper

5G for Industrial Internet of Things (IIoT):
Capabilities, Features, and Potential

Contact

5G-ACIA
Amelia-Mary-Earhart-Str. 12
60549 Frankfurt am Main
Germany
Phone: +49 69 6302-209
Email: info@5g-acia.org
www.5g-acia.org

Published by

ZVEI – German Electro and Digital Industry Association,
5G-ACIA – 5G Alliance for Connected Industries and
Automation, a Working Party of ZVEI
www.zvei.org

Originally published in November 2021

Translated into Chinese in August 2026

© ZVEI e. V.

This work, including all of its parts, is protected by copyright. Any use outside the strict limits of copyright law without the consent of the publisher is prohibited. This applies in particular to reproduction, translation, microfilming, storage, and processing in electronic systems. Although ZVEI has taken the greatest possible care in preparing this document, it accepts no liability for the content.

Design: COBRAND Berlin

5G-ACIA.org