

基于5G NR的工业物联网

Industrial IoT Networks Powered by 5G New Radio

Amitava Ghosh, Rapeepat Ratasuk and Anil M. Rao

Nokia Bell Labs, 美国伊利诺伊州内珀维尔

由工业物联网 (IIoT) 引发的第四次工业革命 (工业4.0) 将通过新型数字服务提供商市场实现可观的收入增长。IIoT革命的主要技术推动力将包括: 1) 无需线缆并支持时间同步操作的5G无线融合自动化协议, 2) 用于实现安全且可扩展本地计算的私有边缘云, 3) 应用于IIoT网络的深度切片, 可实现用一个基础架构支持多方, 4) 支持机器学习 (ML) 的自动化操作, 用以监控、预测并优化IIoT网络。此外, IIoT网络在连接性和设备数量方面均可扩展, 并借助LTE和5G NR的关键特性如URLLC、mMTC、5G定位、TSC及一定程度的eMBB, 为所有工业应用提供最佳性能。

本文中, 我们将首先阐述IIoT的概要、用例和要求。其次我们将探讨URLLC (超可靠低时延通信) 在NR (新空口) 中的应用基础, 这点在3GPP Rel-15中有涉及, 主要目的是为了支持IIoT。然后我们会介绍Rel-16中IIoT的几个相关功能, 例如URLLC增强、NR定位和TSC (时间敏感通信), 还有计划将在Rel-17中推出的NR变体版本NR-Light。NR-Light旨在解决NR eMBB (增强型移动宽带)、URLLC或mMTC (海量机器通信) 无法满足的用例。最后, 我们将借助5G NR的关键功能URLLC和TSC来展示一家仿真室内工厂的系统性能。

由5G网络支持的IIoT将为OEM厂商和网络运营商创造新价值, 并实现可观的收入增长。IIoT能基于共享的弹性虚拟可扩展基础架构, 通过工业自动化提高效率。它将由5G NR的关键

功能驱动, 如URLLC、5G定位、TSC以及一定程度的eMBB。IIoT也会采用针对LTE的MTC技术, 也即增强型MTC (eMTC) 和窄带物联网 (NB-IoT)。3GPP Rel-15标准中阐述了URLLC的基础。随着关于前文这些功能的后续3GPP标准 (Rel-16和Rel-17) 的颁布, IIoT网络将得到进一步完善。^{1,2}

IIoT用例及要求

图1展示了具备相应5G技术特性的工业4.0用例。工业4.0两个主要的垂直行业是制造业和运输/物流业。对于未来的工厂而言, 在提高生产率的同时也要注意提高安全性和成本效益; 必须实现流程自动化, 同时最大化生产运行时间以减少业务中断, 从而取得更高的效率、竞争力和投资价值。与此同时, 还需要降低碳排放并节约能源。为了实现上述目标, 会引入产品的大规模个性化、为生产灵活性而实施的基于AI技术的自动检测、监测及分析、以及使供应链可快速重配置的数字价值链平台。未来运输/物流行业的目标是利用现有基础架构来提高吞吐量、消除寄递损耗和运输时延, 并确保IT基础架构和控制系统具有弹性。为此, 运输/物流行业将会大量应用AI控制的自动引导车 (AGV) 来实现最大吞吐量、弹性和安全控制系统, 还有大型仪表, 从而将碳足迹降至最低。

5G NR在eMBB、URLLC和mMTC这三个最主要的应用领域为工业4.0创造了新的价值。表1列举了一家典型工厂厂房在可靠性、时延、数

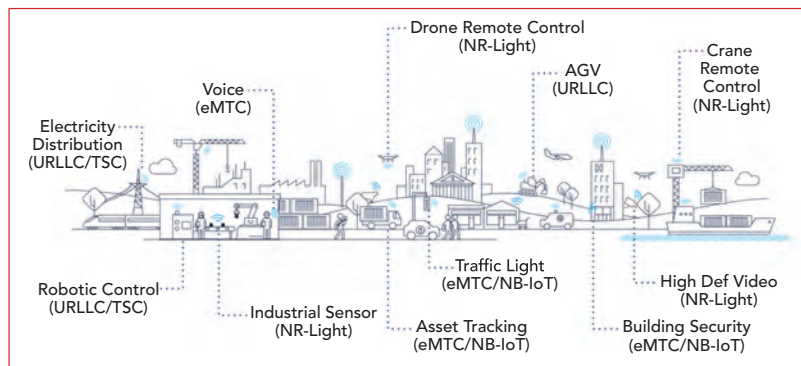


图1: 工业4.0用例及相关5G NR功能。

超低相位噪声和超高功率输出信号源

—R&S®SMA100B

R&S® SMA100B是市面上领先的模拟信号发生器，它产生的信号具有极低的相位噪声和超高的输出功率，同时还具备良好的谐波抑制性能。工程师无需再在输出功率和无杂散动态范围两个指标之间做出取舍。借助R&S®SMA100B，用户可轻松测量被测件的真实性能。

- ▶ 超宽频率范围：8 kHz-3 / 6 / 12.75 / 20 / 31.8 / 40 / 50 / 67GHz
(其中 67 GHz版本可达 72 GHz)
- ▶ 极低的相位噪声：
-152 dBc/Hz 偏离 10 kHz @1 GHz
-132 dBc/Hz 偏离 10 kHz @10 GHz
- ▶ 超高功率输出：
+35 dBm (typ.) @ 6 GHz频率 (6 GHz仪表)
+30 dBm (typ.) @18 GHz频率 (20 GHz仪表)
+25 dBm (typ.) @ 35 GHz (40 GHz仪表)
+19 dBm (typ.) @ 65 GHz (67 GHz仪表)
- ▶ 极低谐波：
< -63 dBc @高功率输出
- ▶ 宽带噪声：
< -162 dBc (typ.) 偏离 30 MHz @10 GHz
- ▶ 提供可作为时钟源的第二路输出
- ▶ 具有 2 HU和 3 HU两种高度规格

罗德与施瓦茨（中国）科技有限公司

www.rohde-schwarz.com.cn

免费客户支持热线

800-810-8228 400-650-5896



更多资讯与互动
请扫码关注官方服务号



ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



据速率和连接密度方面的要求。同时，它还写明了满足用例要求所需的不同5G技术。

诺基亚在其于芬兰奥卢举办的5G“未来工厂”中为我们拉开了工业4.0的序幕。³这一预生产设施采用了诺基亚的专用无线网络和边缘云来实现工厂内外所有资产的安全连接。

URLLC基础

3GPP为URLLC用例制定了两个关键要求⁴：1、目标用户的平均时延为下行0.5ms、上行0.5ms，2、32字节数据包可靠性达99.999%，用户时延为1ms。URLLC同时要求极高的可靠性和极低的时延，非常难满足。不过，如表1所示，许多IIoT用例不需要兼具高可靠和低时延。为此，3GPP Rel-15已经分别指定了两个物理层（PHY）特征组来支持URLLC。

第一组PHY特征用于降低时延，包括：

弹性时隙结构：

- 支持多种副载波间距——NR支持15、30、60、120和240kHz的副载波间距。这就意味着传输时隙长

度分别为1、0.5、0.25、0.125以及0.0625ms。时隙长度短有助于减少时延，因为数据传输过程完成得更快。而其弊端则在于每个时隙能够传输的数据量较少。不过这点不是特别重要，因为URLLC的数据包通常比eMBB等的小。

- 子时隙数据传输——NR允许数据传输占据不到一个时隙（即下行链路2、4、7个符号，上行链路不限）。这样便可以在更短时间内完成传输过程。例如，利用60kHz的子载波间隔和2个符号，每个字节包耗时0.036ms即可发送完毕。
- TDD的自容式时隙结构——NR允许TDD中有一个时隙包含用于数据和混合自动重传请求（HARQ）确认反馈的符号。这减少了TDD中上行链路和下行链路时隙的等待时间。

弹性调度请求：

- 抢占——基站可以抢占正在进行的下行数据传输，将URLLC数据包插入正在传输的数据包中。这是通过用URLLC流量打断正在进行的数据传输来实现的。随后，会向被抢占的

UE（用户端设备）通知这一情况，以便其有效管理丢失的数据。

- 配置的授权或无授权上行传输——UE配有用于上行传输的周期性资源。因此UE在遇到有数据待传时，不需要向gNB（即5G NR基站）发送调度请求等待调度授权。

快速反馈：

- UE处理时间更短——NR时隙结构使得UE管道化以缩短处理时间。
- HARQ反馈格式短——UE能够用一至两个符号发送HARQ反馈。
- 调度请求周期短——UE可以配置一个调度请求时隙，每两个符号请求一次上行数据传输。

第二组PHY特性用于提高可靠性，包括：

数据增强：

- 从不同传输点对同一数据包进行传输来提高可靠性。我们通过在PDCP层复制数据包来实现这一操作。如此便可从两个不同的gNB向UE发送相同的数据包来增加可靠性。
- 数据通道的多时隙重复——数据包可通过2、4、8重复传输来提高可靠性。
- URLLC特定的调制和编码值，旨在支持极高的可靠性。

控制增强：

- 支持相关控制信道较低的编码率以及较小的控制包。
 - 目标可靠性为99.999%的增强型信道状态信息上报。
- 除了增强物理层外，URLLC还需要

表 1
典型工厂内不同用例的要求

Use Case	Reliability	Latency	Data Rate	Connection Density
Motion Control	99.9999%	1 ms	1 to 10 Mbps	100,000/km ²
Electricity Distribution	99.9999%	5 ms	10 Mbps	1000/km ²
Mobile Robots/ AGV/Drone	99.9999%	1 to 50 ms	1 to 10 Mbps	
Augmented Reality	99.9999%	1 to 5 ms	5 to 25 Mbps	
Video Assisted Application	99.99%	10 ms	10 to 15 Mbps	
Industrial Sensor	99.99%	10 to 30 ms	1 Mbps	10,000/km ²
Process Automation-Monitoring	99.9%	50 ms	1 Mbps	10,000/km ²
Hi-Definition Video	99.9%	100 ms	1 to 100 Mbps	
Video	99.9%	100 ms	1 to 10 Mbps	1000/km ²
Voice	99.9%	100 ms	20 kbps	10,000/km ²
Field Sensor/ Instrumentation	99.9%	10 sec	10 kbps	1,000,000/km ²
Public Safety/ Security	99.9%	10 sec	0.1 to 20 kbps	1,000,000/km ²
Asset Tracking	99.9%	10 sec	0.1 to 20 kbps	1,000,000/km ²

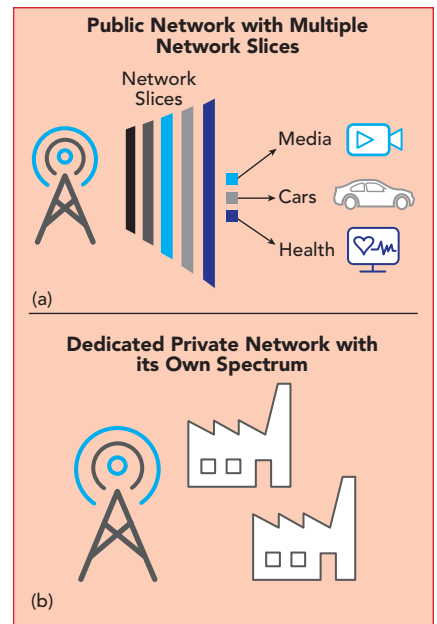


图2：工业网络的两个选项。

1,500,000 多种现货产品 | 原厂授权分销商 | 800 多万种在线产品

时不我待, 创新无限

从我们的仓库...



- 订单满 ¥300 特快免运费*
- 价格包含关税和增值税
- 订单确定当天美国统一发货



到您的门口...

400 920 1199
DIGIKEY.CN



得捷电子®

*由顺丰快递送货, 所有订单免运费。所有数据由 Digi-Key 提供。Digi-Key 是所有合作供应商授权的正品分销商。新产品每日添加。
Digi-Key 和 Digi-Key Electronics 是在美国和其他国家的注册商标。© 2020 得捷电子 (上海) 有限公司。本公司保留全部版权。
上海客服中心: 上海中山西路1055号SOHO中山广场A座504室 邮编 200051

ECIA MEMBER
Supporting The Authorized Channel



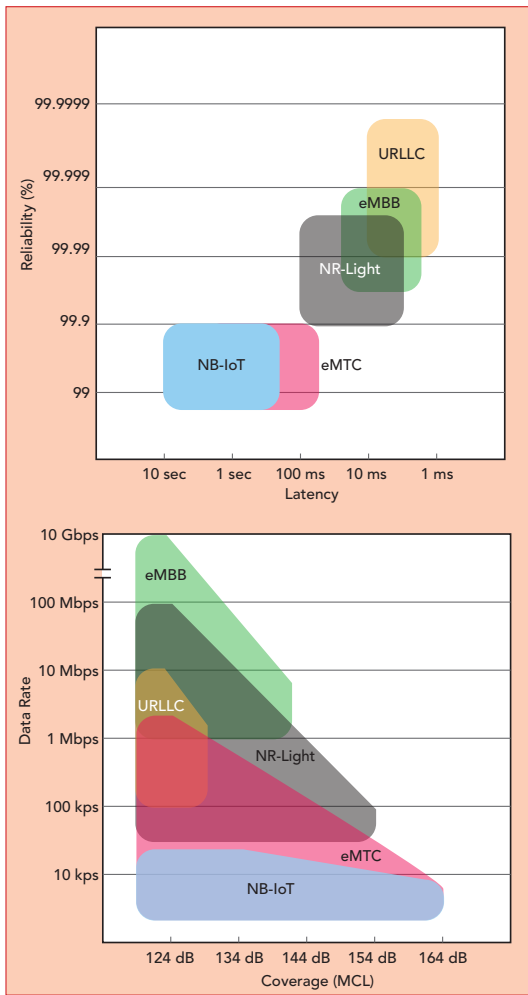


图3: NR-Light与其他NR功能的对比。

优化系统架构设计。两个重要特性是:

- 边缘云和MEC (多路访问边缘计算) ——边缘云代替集中式结构, 将计算资源布置在网络边缘。这样可以实现较低的端到端时延以及超短响应时间。此外, MEC对许多IIoT垂直行业而言至关重要, 因为它允许实时数据分析, 且减少了必须上行发送的数据量。
- 网络切片可以为多个应用分配一组专用的端到端资源。对于工业网络, 一种选择是带切片的公共网络, 其中每个切片的QoS和安全级别都有保障。另一种选择是专用的私有网络, 具备自己的“局部频谱”和自定义安全及QoS级别。这两种选项具体如图2所示。

REL-16及REL-17中的IIoT特性

Rel-16中有两个工作项对IIoT的进一步增强进行了规范。第一个工作项涉及URLLC的物理层增强, 包括以下几项:⁵

- 控制信道增强——用大小可调的控制格式来提高可靠性, 增强控制信道监控水平来减少调度延迟, 一个时隙内传输一个以上的ACK, 且支持两个同步HARQ码本。
- 数据信道增强——小型时隙级跳变。
- 调度增强——支持无序调度及HARQ反馈、多种主动无授权配置。
- 用户间的上行传输优先级和复用——采用干扰抵消来支持上行链路抢占及增强功率控制。

第二个工作项主要解决时效性网络用例的支持问题, 例如工厂自动化和电力分配。这些用例的要求比URLLC更严格 (例如可靠性达99.99999%), 并且对于数据包传递的时间同步要求严苛 (如时延有限且差异极低的确定性服务)。该工作项包括以下几部分内容:⁶

- TSC——指定准确的参考交付时间, 对TSC消息提供支持, 关于QoS特性 (如数据包丢失及可靠性、时延范围和低至纳秒级的同步) 的硬性保证。
- 支持可靠性更高、效率更佳的PDCP复制。
- 解决来自同一用户多个传输间的资源冲突。

除了上述工作项之外, 定位也是IIoT部署的重要方面。3GPP在Rel-16中试着为NR明确了定位支持⁷, 包括:

- 定义接口、信令和过程。
- 扩展LTE定位协议 (LPP) 和NR定位协议a (NRPPa) 以支持NR定位。
- 指定参考信号以支持各种定位技术。
- 定义UE和gNB适用于定位的测量结果和要求。
- 研究基于RAN的定位管理可行性。商用用例的定位要求是:⁸
- 室内部署场景——80%的UE水平定位误差小于3米, 垂直定位误差小于3米。
- 室外部署场景——80%的UE水平定位误差小于10米, 垂直定位误差小于3米。
- 端到端时延小于1秒。

此外, 我们还需要应对无法用NR eMBB、URLLC、eMTC和NB-IoT满足的用例。因此, 3GPP Rel-17/18期间会引入NR的一个版本, 称为NR-Light。借助这一新功能, 运营商能将其频谱迁移

到NR, 从而可以在同一载波上同时支持URLLC和NR-Light, 并且在频段内或保护频段部署eMTC/NB-IoT。NR-Light与其他IIoT相关技术在数据速率、时延和可靠性方面的比较如图3所示。

典型室内厂房的系统性能

本节中, 我们采用射线追踪技术, 对一座典型的室内工厂进行了仿真。需要注意的是, 工业环境中的各种实时和射线追踪测量是由多方完成的, 结果用来构筑3GPP标准主体中的IIoT信道模型。⁹⁻¹⁰

我们选择使用室内工厂场景来研究性能, 该场景在28GHz载波频率下具有400MHz带宽毫米波载波。毫米波频谱中可用的高载波带宽的容量可观, 而室内工厂设置本身就保障了对外部环境的良好隔离, 确保了能够同时使用授权及未授权高带宽毫米波频谱。

本研究创建了一个尺寸为120 m × 50 m × 10 m的虚拟工厂, 其天花板上安装了12个朝下的单扇区gNB。这与3GPP TR 38.901中“0.5-100GHz频段上的信道模型研究”里的室内办公室场景非常类似, 除了天花板高度为配合工厂场景由3米增加到了10米¹¹。对于传播模型, 我们利用了Altair的WinProp工具进行3D射线追踪。工厂中随机放置了矩形金属物体来代表生产线、重型机械、工具容器等。我们选择混凝土作为墙面和屋顶材料, 同时给天花板增加了金属支撑梁。具体如图4所示。

我们之所以选择研究TSC用例是因为它比单独的URLLC要求更严格。除了和单独URLLC一样的高可靠性及低时延 (即可靠性99.999%、时延小于1ms), TSC还强制要求发射机和接收机间的延迟为确定而非可变的。因此, 接收机端增加了抖动缓冲器来抵消5G NR空中接口上的延迟变化, 包括动态调度中会出现的HARQ或可变调度延迟等。

毫米波频段中使用的120kHz子载波间隔提供了0.125ms的短时隙。但是, 由于存在1ms的时延约束, 这意味着只有1/0.125=8个时隙可用于调度, 并且由于

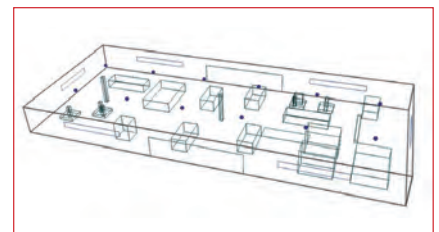


图4: 采用射线追踪进行系统仿真的虚拟工厂, 其天花板上分两排布放了12个单gNB, 横竖间隔均为20m。



四川益丰电子科技有限公司
Sichuan YiFeng Electronic Science & Technology Co., Ltd.

MM-Imager90-CKP 太赫兹被动式安检成像系统

ADVANTAGES

优势

- * 被动式，零辐射，安全
- * 高灵敏度
- * 检查物品范围广
- * 易于部署
- * 可多台协同工作
- * 非接触式安检，尊重隐私和人文



TECHNICAL SPECIFICATIONS 技术指标

工作距离：1-2m
视场：2m*1m
帧率：典型值10帧/秒
分辨率 (@1.25m)：13 mm
供电：220V/50Hz, 110V/60Hz或电池
高：170cm, 长：75cm, 宽：78cm

CONTACT US 联系方式

更多信息，请访问：<http://www.yifengelectronics.com/>
公司：四川益丰电子科技有限公司
邮箱：sales@chinafirstholdings.com
电话：86-28-61962718
传真：86-28-61962738

APPLICATIONS 应用场景



机场



轨道交通



海关/边防



要害部门



会议/赛事



工矿企业

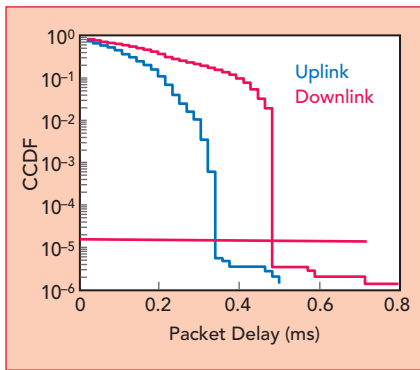


图5: 上行和下行链路数据包延时的CCDF。

毫米波频谱为时分双工 (TDD), 还需要拆分给上行链路和下行链路。TSC用例的流量对称, 所以每个链路方向上有四个时隙可用, 同时也意味着整个gNB覆盖区域只有四个模拟波束可用。对于毫米波频谱而言, 这一波束成形增益通常是不够的, 所以即使有120kHz子载波间隔, 配置迷你时隙也是有好处的。通过选取持续时间仅为17.84 μ s的含2个符号的迷你时隙, 我们在1ms间隔内便可拥有56个迷你时隙。这样一来, 考虑到TSC流量的对称性, 如果在上行/下行链路平分, 每个方向上可有28个迷你时隙。因此系统中可配置多达28个模拟波束, 并且可以在不到1ms的时间内完成对28个波束的上行和下行扫描。

表2列举了完整的系统仿真假设。图5为数据包延迟的CCDF (互补累积分布函数)。本例中未收到数据包故障的报告。可以看到, 上行和下行链路都可实现99.999%可靠性, 时延不到1ms。图6中我们只关注下行链路以及增加工厂内活跃用户总数。我们研究了总数分别为120、300、600个活跃用户的情况, 即每个gNB平均10、25、50个。由于毫米波频谱带宽较宽, 我们得以在这些高流量

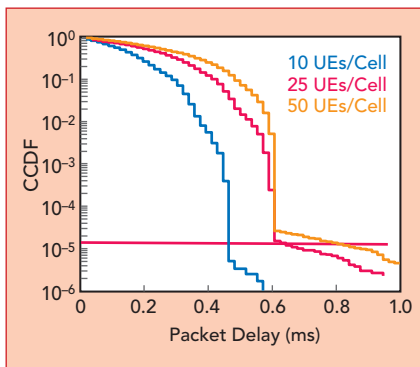


图6: 下行链路数据包延时的CCDF, UE密度为每个gNB分别有10、25、50名用户, 对应工厂内共有120、300和600个活跃用户。

表2 仿真参数

Simulation Parameter	Value
Carrier Configuration	28 GHz carrier frequency 400 MHz bandwidth 120 kHz subcarrier spacing 2 symbol mini-slots TDD spectrum
TDD Slot Format	#45: 6 DL, 2F, 6 UL. Flexible assigned to UL
Scenario	Indoor factory: 120 m \times 50 m \times 10 m as in Figure 3 12 single-sector gNBs mounted on ceiling in two rows, 20 ms horizontal and vertical spacing between gNBs
Channel Model	3D ray traced with WinProp [®]
gNB Configuration	30 dBm Tx power (4, 4, 2) antenna panel Column spacing 0.5 λ row spacing 0.7 λ 8 dBi element gain 65 degrees azimuth and elevation beamwidth per element Front-to-back ratio 30 dB Single sector, down tilt = 90 degrees Noise figure = 7 dB Analog beam configuration: 4 horizontal and 4 vertical DFT beams, for a total of 16 beams
UE Configuration	23 dBm Tx Power (4, 4, 2) antenna panel, optimally oriented towards serving gNB Noise figure = 10 dB
Scheduler Configuration	FIFO scheduling policy, segmentation-aware SPS in DL and CG in UL Max modulation: 16-QAM Link adaptation: off HARQ: off Target FER < 10 ⁻⁶
Uplink Power Control	Po_nominal = -85 dBm, FPC α = 0.8
Traffic Model	Strictly periodic traffic 32 bytes every 1 ms
Simulation Time	10 Monte-Carlo drops with each drop long enough for 10,000 packets to be transmitted per user in each link direction

的情况下依旧满足目标为99.999%的可靠性, 且时延不超过1ms。

总结

由5G网络支持的工业4.0将借助新的数字服务提供商市场实现显著的收入增长。5G NR及它的变体为我们提供了诸多功能, 如URLLC及其增强版本、TSC及其增强版本、网络切片和定位等。这些功能对于公共和私有网络中的IIoT部署至关重要。对于典型工厂环境的仿真研究表明, 借助5G NR URLLC和TSC功能可满足严格的时延及可靠性要求。■

致谢

感谢Eugene Visotsky、Peter Merz和Andreas Maeder提供的巨大帮助。

参考文献

1. A. Ghosh et. al., "5G Evolution: A View on 5G

Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15," IEEE Access, September 2019.

2. 3GPP, "RP-190831; Key Directions for Release 17," RAN#84, June 2019.
3. D. Greenfield, "Nokia Employs 5G in its Own Factory," AutomationWorld, August 12, 2019, www.automationworld.com/article/industry-type/discrete-manufacturing/nokia-employs-5g-its-own-factory.
4. 3GPP TR 38.912, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies," V14.3.0, June 2017.
5. 3GPP, "RP-191584; Revised WID: Physical Layer Enhancements for NR Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC)," RAN#84, June 2019.
6. 3GPP, "RP-191561; Revised WID: Support of NR Industrial Internet of Things (IIoT)," RAN#84, June 2019.
7. 3GPP, "RP-191156; Revised WID: NR Positioning Support," RAN#84, June 2019.
8. 3GPP, "RP-18.855," "Study on NR Positioning Support," V16.0.0, March 2019.
9. 3GPP, "R1-1909706; List of Measurements Used to Derive IIoT Channel Model," RAN1#98, August 2019.
10. 3GPP, "R1-1909807; Addition of Industrial IoT Model to 38.901," RAN1#98, August 2019.
11. 3GPP TR 38.901, "Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz," V14.3.0, December 2017.