



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

垂直行业 5G+工业互联网 频谱需求白皮书

(电子信息、汽车制造领域)

(2021 年)

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟 (AII)

2022 年 4 月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟
联系电话：010-62305887
邮箱：aia@caict.ac.cn

编写说明

随着全球新一轮科技革命和产业变革深入推进，5G 与工业互联网的融合将加速中国新型工业化进程，为中国经济发展注入新动能。2020 年政府工作报告中，第一次写入“加强新型基础设施建设”，表示“新基建”正式上升为国家战略。而在新基建建设中，工业互联网作为其重点组成部分，也将迎来前所未有的机遇，通过技术层面和商业模式层面的积极创新，不断推动制造业数字化转型。

通信网络是工厂数字化转型的基础，也是实现工业互联网的必要基础。本报告针对电子信息、汽车制造领域的生产需求，结合新型制造与 5G 技术的融合，研究和分析该行业对频谱的具体需求，进而为监管机构未来的工业互联网频谱分配政策提供参考。

牵头编写单位：上海诺基亚贝尔股份有限公司、高通无线通信技术（中国）有限公司、中兴通讯股份有限公司

参与编写单位：，吉利汽车研究院（宁波）有限公司、深圳艾灵网络有限公司、爱立信（中国）通信有限公司、中国信息通信研究院

编写组成员（排名不分先后）：

上海诺基亚贝尔股份有限公司：王丽娜、刘荐桦

高通无线通信技术（中国）有限公司：高路、王婷

中兴通讯股份有限公司：孙莹

吉利汽车研究院（宁波）有限公司：姚军

深圳艾灵网络有限公司：荣乐天、付锡华

爱立信（中国）通信有限公司：王卫

中国信息通信研究院：李晓帆、付有奇、刘琪



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

目 录

一、引言.....	1
二、5G+工业互联网典型应用.....	2
(一) 移动机器人 (AGV)	3
(二) 运动控制.....	4
(三) 大规模连接.....	4
(四) 机器视觉 (质检)	5
三、工业互联网频谱需求测算方法.....	6
(一) 基于应用的工业互联网频率测算方法.....	6
(二) 相关测算参数设定.....	7
四、汽车制造场景下的工业互联网频谱需求计算.....	9
(一) 汽车制造场景的无线参数假设.....	10
(二) 汽车制造场景下的业务数据模型.....	11
(三) 汽车制造场景频谱需求计算结果.....	13
五、电子信息制造场景下的工业互联网频谱需求计算.....	14
(一) 电子信息制造场景的无线参数假设.....	14
(二) 电子信息制造场景下的业务数据模型.....	15
(三) 电子信息制造场景频谱需求计算结果.....	19
六、总结和建议.....	20
附件：频谱需求预测方法分析.....	21
参考文献.....	27

一、引言

近年来，随着互联网、物联网、云计算、大数据、人工智能等为代表的新一代信息技术与传统产业的加速融合，全球新一轮科技革命和产业变革正蓬勃兴起。在此背景下，作为智能制造关键基础的工业互联网随之孕育而生。工业互联网是互联网和新一代 ICT 技术与工业系统（OT）全方位融合所形成的产业和应用生态，是工业智能化发展的关键综合信息基础设施。

以 5G 为代表的无线网络作为工业互联网的通信网络具有明显优势。一是可以大幅降低网络建设和维护成本。无线网络能够快速部署，无须在现场、车间、厂房等区域铺设线缆及相关保护装置。以工业测控系统为例，传统有线系统的布线成本为 30-100 美元/米，在一些恶劣环境下可达到 2000 美元/米¹。此外，工业测控系统还需要不断检测系统状态，发现故障后需立即更换线缆。使用无线技术将使测控系统的安装与维护成本降低 90%。二是可以显著提高生产效率。使用无线技术后，现场设备摆脱了线缆的束缚，增加了现场仪表、被控设备的移动性，网络结构的灵活性以及工程应用的多样性，用户可以根据工业生产需求，快速、灵活、方便、低成本的重构系统。三是可以实现对老旧设备的监测。通过加装无线传感器等监测节点，实现对工业全流程的“泛在感知”。

5G 网络是工业互联网的基础网络之一，频谱是发展工业互联网关键、稀缺的战略性资源。关于 5G 技术的特点及其在工业不同制造领域的应用创新，工业互联网联盟相关工作组已经做了大量研究，并完成大量白皮书供业界参考，因此在本白皮书中，将不再就这方

¹ 自动化博览 2009.1《工业无线网络 WIA 标准体系与关键技术》

面进行重复阐述，而是重点围绕电子信息、汽车制造行业的典型场景，针对 5G+工业互联网重点应用的频谱需求进行分析和计算，为相关部门工业互联网频率管理以及运营商频率使用提供重要参考。

二、5G+工业互联网典型应用

在 2019 年“绽放杯”工业案例中[1]，从工业应用角度统计分析，前十大应用主要包括 AR/VR 应用占比 14%，工业视觉类应用占比 14%，无人巡检类应用占比 11%，工业数据采集类占比 10%，工业 AGV 应用占比 9%，环境监控类应用占比 6%，高清视频监控类应用占比 6%，远程监控运维管理类应用占比 6%，远程控制类应用占比 5%，移动办公类应用占比 4%。前十大应用占比总计 85%，其他如物联网类应用、无人驾驶类应用、工业控制类应用、位置定位类应用、数字孪生等占比总计 15%。

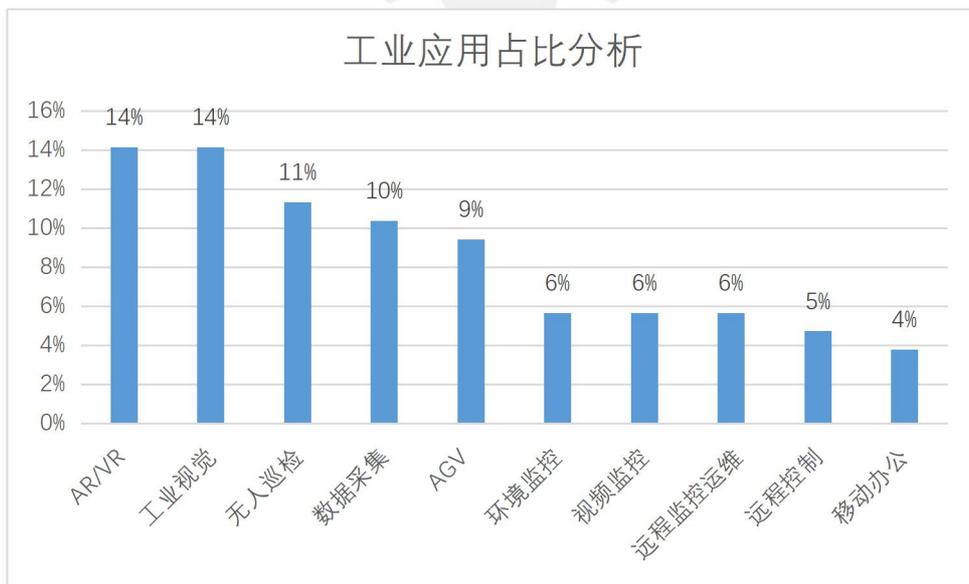


图 1：2019 年“绽放杯”工业应用占比分析

在 2020 年“绽放杯”工业案例中[2]，与 2019 年相比，产业数字化项目比例获得 17% 的增长，5G 技术加速与垂直行业深度融合。5G 行业应用方面，工业互联网项目占比连续三年增长，占据全部项目的 28%，成为最具热度的 5G 融合应用领域。随着 5G 融合应用的不断发展和演进，应用重点行业和领域逐步聚焦，尤其是在工厂、矿山、港口等领域，逐步获得业界认可，并初步形成了有望规模商用的应用场景。

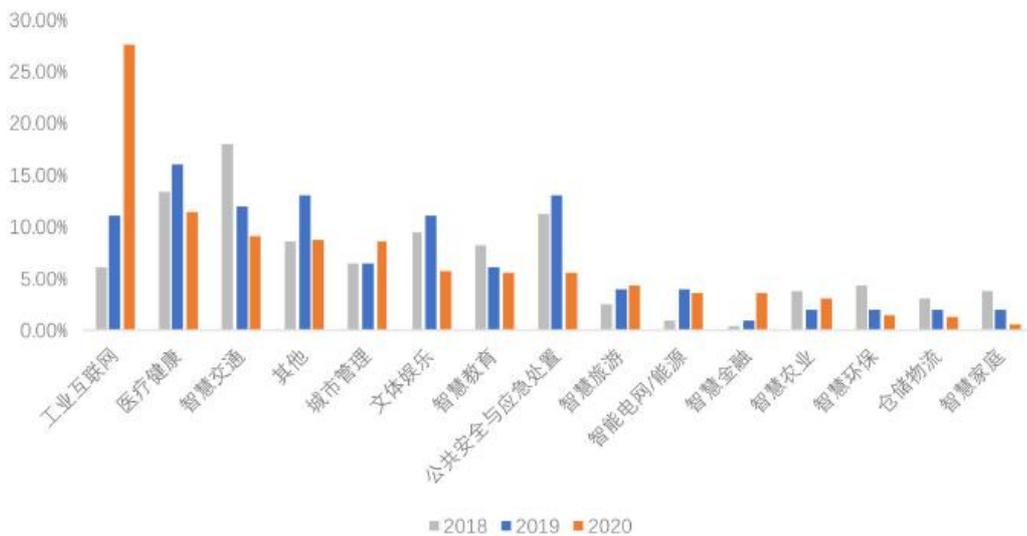


图 2：2018-2020 “绽放杯”大赛参赛项目各类行业应用占比

工业领域部分 5G 典型应用案例如下：

（一）移动机器人（AGV）

AGV（自动导航车辆 Automatic Guided Vehicle）需要与控制系
统、其它 AGV 以及周边设备保持安全可靠的无线通信，对通信时延、可靠性、确定性和时钟同步提出严格要求。同时 AGV 的移动性，要求无线网络在室内或者室外具备连续覆盖，并支持无缝切换。一

种迅速崛起的导航方式是基于视觉实现 AGV 导航，视觉导航对无线通讯要求高，如果采用 4K 或 8K 摄像头，且视频上传边缘节点做实时分析，那么无线网络需要支持几十甚至上百 Mbps 的吞吐量。

(二) 运动控制

工业机器人是自动化产线上不可或缺的一部分。传统机器人通常搭配固定的 PLC 硬件，执行特定功能，而随着制造业向智能制造、柔性制造发展，未来机器人也将向云化发展。通过将控制、编程功能移向云端（包含边缘云），使得机器人可以利用云端的计算能力完成复杂的判断、行动以及协作，比如图像识别，两台机器人一些协作搬运更大的货物等等。这种情况下，通过无线网络，实现远端机器人和云端的控制器之间的通信，就变得更灵活。根据应用场景的不同，远端机器人既可能工作在室外，也可能在室内，甚至有可能是地下，回传的信息可以是设备状态、图像甚至视频等信息，而云端控制器则需要发送运动控制指令给远程机器人，因此一个灵活、能支持丰富传输特性的网络将变得非常重要。就运动控制指令而言，一个低时延、高可靠的传输通道尤为重要。

(三) 大规模连接

5G 的 mMTC 场景可以支持平方千米内拥有百万用户。现代化工厂依赖传感器接入技术，将设备、环境和流程集成在一起，实现工业生产的智能化监控。海量传感器接入技术为老旧设备和车间环境升级到工业 4.0 提供了解决方案。大量传感器被部署到生产环境和生产设备中，推动制造领域向自动化、智能化方向发展。分辨率高达 8K 的工业摄像机、声音检测传感器和温度传感器被安装在生产线

上，以监控生产线生产情况，执行生产质量检查。传感器还安装在关键位置，用于预防意外事故（如：火灾），或者安装在相关工具上，如：灭火器，以确保其工作状态正常。5G 海量接入和低功耗终端的特性，促进长周期、小数据包的传感器更容易部署在电池更换周期长的生产环境中，满足信息制造场景的需求。

（四）机器视觉（质检）

机器视觉，就是用机器代替人眼来做测量和判断。随着 4K、8K 等超高清视频技术的发展，机器视觉结合 5G 与工业互联网，可以发展出大量的创新型应用。不仅可以实现精细原材料识别、精密定位测量等环节，还可应用于工业可视化、机器人巡检、人机协作交互等场景，利用机器视觉、人工智能算法，提高工业自动化、智能化水平。

利用 VR/AR 技术提高工作效率将是智能制造的一大趋势。虚拟现实 VR（Virtual Reality），则通过计算机仿真技术生成虚拟的全沉浸式、可交互的三维场景，使用户与现实世界隔离。而增强现实 AR（Augmented Reality），通过在现实世界环境和物体中，叠加虚拟信息，实现对现实世界信息的增强，使用户获得超感知体验。

在工业制造中，VR 适用于 3D 产品设计、员工培训等场景。采用 VR 技术，基于 3D 仿真进行产品设计和交互，提供设计产品的测试能力，既降低了验证成本，同时提高了设计效率。VR 技术用于员工培训，特别是工艺复杂、操作性强的制造领域，通过模拟真实工作场景，解决传统培训操作性不足的缺陷。

在机器视觉中，由于具体应用采用不同的编码率、像素深度、帧率以及压缩比，对应的速率都不相同，表 1 中给出的是本文计算采用的速率。

表 1: 不同格式的视频数据速率计算

	分辨率	数据量	编码率	像素深度	帧率	压缩比 (H.265)	速率 (Mbps)
1080P	1920*1080	2073600	3	8	30	200	8
4K视频	4096*2160	8851456	3	8	30	200	32
8K视频	8192*4320	35397632	3	8	30	200	127
4K AR/VR视频(3D)	4096*2160*2	17702912	3	8	30	200	64
8K AR/VR视频(3D)	8192*4320*2	70795264	3	8	30	200	255

三、工业互联网频谱需求测算方法

在对比分析了 IMT 常用的频率需求测算方法基础上，针对工业互联网应用特点，我们认为基于应用的测算方法更适用于工业互联网频率需求测算。相关频率需求测算方法见附件。

(一) 基于应用的工业互联网频率测算方法

该方法采用 ITU-R M.1651 建议书 [3] 的方法，关于应用的输入参数可以反映各个国家的不同情况。

为了在该方法中计算频率总需求量 R (Hz)，使用以下等式：

$$R_{ts} = (C \times A \times U) / I / S \quad (1)$$

$$R_t = \sum R_{ts} \quad (2)$$

$$R = \max(R_t) \quad (3)$$

在上面的等式中， R_{ts} 表示给定的电信密度和服务类型中的一组频率需求，可以由连接密度(用户数/km²) C 、应用数据速率(bits/s) A 、使用模式(%) U 、以及无线技术相关的参数(每平方公里的小区个数 I 小区面积和小区平均频谱效率 S) 计算而得到。其

中，连接密度 C 的定义在 ITU-R 建议书 M. 2083 [4] 中给出，可以由公式 1 连接密度 $C = (\text{给定区域内的用户数}) \times (\text{激活因子})$ 计算得到。使用模式 U 定义了给定电信密度下使用一定类型的业务的用户比例，该参数值可能因区域或者国家的不同而有所区别，单位为%。激活因子和使用模式可能被不同频率影响，以反应不同的运营环境。

R_t 表示给定电信密度的一组频率需求 (Hz)。频率总需求量 R 。频率需求应该取不同电信密度条件下最大的频率需求值。

当用于工业互联网工厂内网络频率分析时，可以对不同场景下的工厂内网络频率需求采用不同的参数分别进行评估，总的频率需求应该在各种不同场景中取其中的最大值。值得注意的是，工厂中的无线电传播环境可能与 5G 系统的其他应用领域的情况有很大区别 [5]。它的典型特征是非常丰富的多径，由发射机和接收机周围的大量常见金属物体引起，以及由电机，电弧焊等引起的潜在高干扰。因此，应评估工厂无线传播环境下无线技术的小区覆盖范围和小区频谱效率。

(二) 相关测算参数设定

针对工厂内网络不同部署场景下，可能具有不同的应用以及部署情况。应尽量针对不同部署场景和业务收集相关参数，如下为某一个场景的参数集，如表 2 所示。

表 2: 基于应用的工业互联网频率需求分析的基本应用参数

参数	说明
工厂面积 $FactoryArea$ (平方米)	
小区总数 $TotalCellNumber$	可由工厂面积与站间距计算得到
用户总数 N	

业务 1 激活因子 $ActivityFactor_1$ (%)	业务 1 用户有空口业务发送的激活时间比例
业务使用模式 $UsagePattern_1$ (%)	业务 1 的用户数占总用户数的比例
业务 1 平均数据速率 $DataRate_1$ (kbps)	
业务 2 激活因子 $ActivityFactor_2$ (%)	业务 2 用户有空口业务发送的激活时间比例
业务 2 使用模式 $UsagePattern_2$ (%)	使用业务 2 的用户占全部用户总数的比例
业务 2 平均数据速率 $DataRate_2$ (kbps)	
...	
业务 n 激活因子 $ActivityFactor_n$ (%)	业务 n 用户有空口业务发送的激活时间比例
业务 n 使用模式 $UsagePattern_n$ (%)	使用业务 n 的用户占全部用户总数的比例
业务 n 平均数据速率 $DataRate_n$ (kbps)	

针对应用的无线技术，应通过链路预算或者系统级仿真结合候选频率范围研究以下参数和假设，如表 3 所示。

表 3: 基于应用的工业互联网频率需求分析的基本无线参数

参数	说明
站间距 (米)	根据链路预算或者系统级仿真估计站间距
每个站址的小区数量 total cell number	如果采用更好方向性的天线、毫米波段频率达到高效的空分复用，采用更高效的小区分裂技术，可以使得每个站址支持更多小区数量。
频率效率 S (b/s/Hz/cell)	根据无线技术规范 and 系统级仿真等，确定每小区平均频谱效率
负载因子 (loadingfactor _n) %	负载因子应反映不同可靠性要求的应用对网络负载的要求，可靠性要求越高网络负载因子越低。

总的频率需求可以用如下公式计算得到:

$$TotalSpectrum = \frac{\sum_n \left(N \times UsagePattern_n \times ActivityFactor_n \times DataRate_n \times \frac{1}{loadingfactor_n} \right)}{(total\ cell\ number) \times S} \quad (4)$$

其中，小区平均频谱效率 S ，原则上可以根据无线技术规范和系统级仿真等，确定每小区平均频谱效率，但谱效与小区无线参数配置强相关，故此在工业互联网频谱需求预测场景中，我们采用 ITU-R M. 2410 中对室内热点场景的平均频谱效率的最小要求值作为频谱预测的平均谱效。ITU-R M. 2410 对 IMT-2020 技术的需求中，不同场景的上下行平均频谱效率最小需求如下：

表 4 平均频谱效率最小需求

应用环境	下行 (bit/s/Hz/TRxP)	上行 (bit/s/Hz/TRxP)
室内热点 - eMBB	9	6.75
密集城区 - eMBB	7.8	5.4
郊区 - eMBB	3.3	1.6

针对测算涉及的参数，一方面，需要结合工厂内网络采用的空口无线技术和候选频率范围进行分析，比如采用基于 5G 的技术，则应采取 5G 空口设计在工厂网络环境下对应的小区覆盖和频谱效率，最终得到不同场景下的频率需求。另一方面，还需要考虑到高速率高可靠性业务对网络负载的要求。为了保证一定的时延和抖动性能，需要考虑空中接口的负载冗余以满足高可靠性业务的要求。因此，建议针对工业互联网频谱需求研究，在无线参数中针对不同应用考虑不同的负载因子。

四、汽车制造场景下的工业互联网频谱需求计算

在不同工业领域中，汽车制造属于自动化实现程度较高的行业。随着竞争加剧，整车制造商们急需实现产品个性化，提高整车质量，提升生产效率，因此对生产过程中的柔性制造、质量检测和流程监控提出了更高的要求。

工业互联网技术的发展，培育了新模式新业态。通过构建连接企业信息系统、智能机器、物料、人等的工业互联网平台，贯穿汽车智能制造全产业链、全生命周期，实现工业互联网数据的全面感知、动态传输、实时分析，为智能制造、个性化定制生产模式创新提供良好支撑和契机。很多国内外汽车制造企业，已经开始在工厂中试点和部署 5G 网络，利用 5G 低时延，高可靠，大带宽的特性，更好的支撑工业场景下多传感器、移动云机器人、视频监控、AR/VR 远程指导和辅助操、AI 机器视觉质量检测、远程控制、物流运输等先进应用对高效连接、低时延、高可靠和大容量数据传输特性的需求。

（一）汽车制造场景的无线参数假设

做为精益生产的典型场景，汽车制造的整个业务流程，都是基于严密而精确的设计，发送什么类型的数据，什么时候发送，都具有很强的计划性和确定性。因此，在计算汽车制造场景的频谱需求时，可以采用第 3 章中基于应用的方式，公式（4）也可以表述如下：

$$F_{es} = \text{Total traffic data rate} / \text{Nb of sectors} / \text{load factor} / \text{Spectral Efficiency} \quad (5)$$

$$F_{es} \text{ Total} = (F_{es} \text{ uplink} + F_{es} \text{ downlink}) \quad (6)$$

其中： F_{es} 表示需要的频谱数量

Total traffic data rate（数据速率总量）：假设一天 24 小时的生产时间周期，因此将根据工厂的业务设计，统计 24 小时内的业务数据总量，再计算出该工厂内平均每秒所需的总吞吐率。

Load factor（网络负载因子）：考虑到工业场景中有大量 URLLC 类型的数据，它们数据包不大，但对可靠性和时延都有很高的需求，因此该式中的 Load Factor 取值为 50%。

Spectral Efficiency（频谱效率）：频谱效率采用 ITU-R 对 5G 室内热点场景的最小需求值，上行为 6.75bit/s/Hz，下行为 9 bit/s/Hz。

工厂环境和业务模型假设：工厂面积为 10000m²，里面有 100 个操作工位，每个工位平均面积 100 m²。

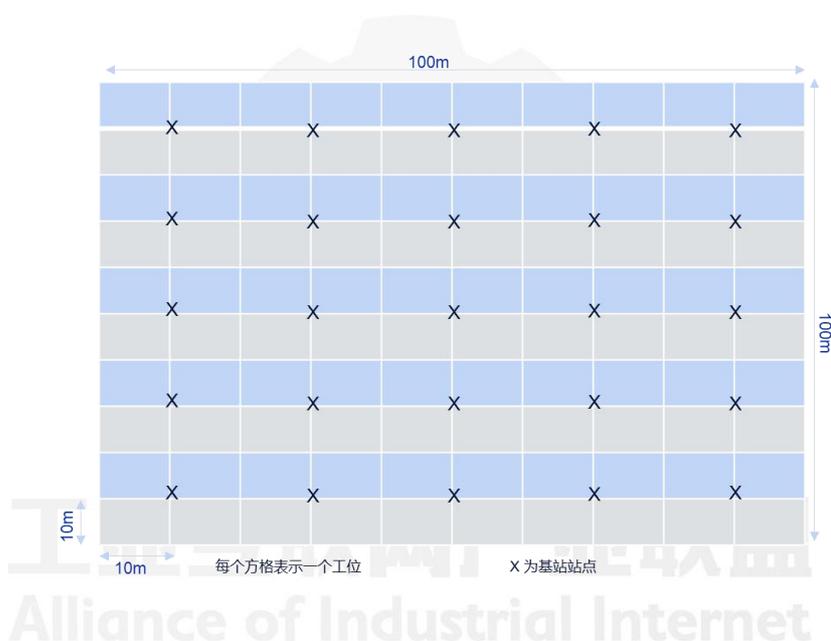


图 3: 工厂环境拓扑假设示意图

其中基站的部署采用矩阵模型，根据 3GPP 的参数，站间距设为 20m，对应也就是 25 个基站，假设每基站采用 3 扇区天线，则工厂内一共有 75 个小区。

（二）汽车制造场景下的业务数据模型

2018 年 11 月，在通信、汽车制造行业会员的努力下，工业互联网联盟发布了《无线应用场景白皮书—汽车制造领域（2018 年）》

[6]，对整车制造场景下的无线应用场景做了非常详细的介绍。因此，本次频谱需求的计算，主要采用了该白皮书中的业务模型，并通过和具体整车汽车制造厂家讨论调研，对各应用场景下的消息数据包大小，发送频率，终端密度等数据进行了初步估计，从而计算出整车制造场景下的无线通信数据总量范围。

汽车制造从流程上分为冲压，焊接，涂装和总装四道工序。其中，总装车间，由于同时兼具视频检测和基于 VR/AR 的装配辅助应用场景，无线业务数据量是最高的（表 5 和表 6 给出了三类工序下的业务模型），因此最终的汽车制造场景下的频谱需求取值总装场景下的频谱计算结果。

在所有的业务中，视频类业务比如红外相机、机器视觉以及 VR/AR 眼镜是最消耗带宽的应用。《无线应用场景白皮书—汽车制造领域（2018 年）》中指出，在汽车制造车辆质检中，会用到红外相机、机器视觉。根据我们和整车制造企业的交流，目前行业正在试验将机器视觉应用于汽车生产的不同环节中，比如出厂前的划痕检测，因为划痕较为细小，因此会更多采用基于 8K 的视频解决方案。同时，4K/8K VR/AR 眼镜也被认为在远程维护指导、装配指导等方面具有很大的应用潜力。

在本场景下的频谱计算中，机器视觉以及 AR/VR 的速率值，直接引用第一章表 1 数据，并根据工厂对新型智能应用的程度，给出了高、中、低三种智能终端数量配置。

表 5 汽车制造三类工艺下的上行业务速率计算

流程	应用场景	具体消息	终端数量 (个)			平均消息速率 (Kbps)	业务总速率		
			高	中	低		高	中	低
焊接	机器人间协调控制	控制器间互锁消息发送	600	400	200	500	300000	200000	100000.0
		PLC任务	600	400	200	0.2	100.0	66.7	33.3
		控制器状态上报	600	400	200	1000.0	600000.0	400000.0	200000.0
	远程维护机器人	数据采集	1000	600	200	2.0	2000.0	1200.0	400.0
	焊接过程中的视频监控	焊接过程中的视频监控回传	300	200	40	124000.0	3720000.0	2480000.0	4960000.0
		高清视频监控回传	100	50	25	7500.0	750000.0	375000.0	187500.0
	焊接群控站回传	实时焊接数据上传	400	200	100	1.7	666.7	333.3	166.7
		紧急报警信息上传	400	200	100	1.7	666.7	333.3	166.7
	焊接远程调试可视化	AGV和线体PLC的数据交互	250	125	50	0.3	83.3	41.7	16.7
		各信息系统录入	1000	500	100	166.7	166666.7	83333.3	16666.7
涂装	基于RFID的设备可追踪	RFID读写器消槽写入清除	300	150	50	0.2	50	25	8.3
		RFID信息读取并回传到MES	300	150	50	0.2	50	25	8.3
		主控PLC上传信息到服务器 (接受和回传)	300	150	50	0.2	50	25	8.3
	工艺信息交互无线化	安全类的智能仪表与服务器间的数据交互	500	250	50	500.0	250000	125000	25000.0
		监测类的智能仪表与服务器间的数据交互	500	250	50	500.0	250000	125000	25000.0
	汽车生产工厂能耗监控应用	智能无线网关和运营高网络之间 (接收和回传)	150	100	50	100.0	15000	10000	5000.0
		报警上报 (拧紧超时、过欠扭等)	1000	500	100	0.1	100	50	10
	总装	总装车间拧紧器无线化	车辆装配过程中的无线扫码	200	300	100	0.5	100	150
扫码器将扫码信息上传			50	40	25	250000	1250000	1000000	625000
车辆质检中无线机器视觉应用		车辆质检中红外相机数据上传	600	450	300	127000	7620000	5715000	3810000
		车辆质检中可见光相机数据上传	0	0	50	32000	0	0	1600000
生产装配中的无线AR应用		推送装配视频	800	200	50	64000	4423680000	1105920000	276480000
		装配实时视频上传	200	0	0	64000	12800000	0	0

表 6 汽车制造三类工艺下的 DL 业务速率计算

流程	应用场景	具体消息	终端数量 (个)			业务速率 (Kbps)	业务量 (高) Mb	业务量 (中) Mb	业务量 (低) Mb
焊接	机器人间协调控制	控制器间互锁消息发送	600	400	200	500.0	300000.0	200000.0	100000.0
		PLC任务	600	400	200	0.2	100.0	66.7	33.3
		控制器状态上报	600	400	200	500.0	300000.0	200000.0	100000.0
	远程维护机器人	数据上传下载	1400	600	200	0.2	324.1	138.9	46.3
		数据采集命令	1000	600	200	4.0	4000.0	2400.0	800.0
	焊接群控站回传	焊接参数下载	400	200	100	1.7	666.7	333.3	166.7
		焊接参数的修改	400	200	100	1.7	666.7	333.3	166.7
	焊装车间工序间的物料传输	AGV和线体PLC的数据交互	250	125	50	0.3	83.3	41.7	16.7
		AGV小车控制数据	250	125	50	0.0	2.9	1.4	0.6
	焊接远程调试可视化	可视化系统展示	0.5	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2
主控PLC上传信息到服务器 (接受和回传)		300	150	50	0.2	50.0	25.0	8.3	
涂装	工艺信息交互无线化	服务器下发任务到PLC	300	150	50	0.2	50.0	25.0	8.3
		安全类的智能仪表与服务器间的数据交互	500	250	50	500.0	250000.0	125000.0	25000.0
	智能仪表及质检仪器无线化	监测类的智能仪表与服务器间的数据交互	500	250	50	500.0	250000.0	125000.0	25000.0
总装	总装车间拧紧器无线化	拧紧命令下发	2000	1000	200	0.1	200.0	100.0	20.0
	AGV的控制	AGV小车的控制信息	100	75	50	100.0	10000.0	7500.0	5000.0
	生产装配中的无线AR应用	推送装配视频	800	200	50	64000	4423680000	1105920000	276480000

(三) 汽车制造场景频谱需求计算结果

由于频谱的热点效应，频谱需求的测算需要基于累加业务量需求最高的场景进行计算，因此在汽车制造的 4 类车间中，选择总装车间作为汽车制造场景频谱需求计算结果。

可以得出汽车制造场景频谱需求计算结果如下表所示：

表 7: 汽车制造场景频谱需求计算结果

频谱需求 (MHz)	三扇区部署		
	高	中	低
下行	152	38	10
上行	452	291	181
总计	604	329	191

五、电子信息制造场景下的工业互联网频谱需求计算

在电子信息制造业，工业通信是整个企业的神经系统，自动化、智能化的生产更离不开高效、可靠的通信网络。随着工业 4.0 的到来，柔性化、智能化生产的需求日益强烈，同时 5G 通信技术在可靠性和时延上的突破，为无线应用到制造领域提供了可能。在未来工厂中，由无线通信提供的灵活、移动、通用的连接，必将对制造业生命周期中的生产、运输和服务带来革命性的发展[7]。

针对 5G 应用到电子制造场景的不同发展时期的业务部署需求，通过研究两种电子信息制造工厂面积内的典型业务量情况，即电子信息制造场景业务数据模型 1 和电子信息制造场景业务数据模型 2，结合 5G 无线系统性能参数和无线基站部署的假设，对频谱需求总量进行评估。

（一）电子信息制造场景的无线参数假设

根据第三章的研究方法中无线参数集，通过 5G 系统级仿真研究提出以下参数和假设，如表 8 所示。

表 8：基于应用的工厂内网络频谱需求分析的基本无线参数

参数	数值	说明
站间距（米）	20	根据链路预算或者系统级仿真估计站间距

每个站址的小区数量	1 或者 3	如果考虑小站常用全向天线配置，则每站址小区数量为 1。如果采用更好方向性的天线、毫米波段频率达到高效的空分复用，采用更高效的小区分裂技术，可以使得每个站址支持更多小区数量，比如 3。
下行频谱效率 (b/s/Hz/cell)	9	ITU-R M. 2410 indoor hotspot
上行频谱效率 (b/s/Hz/cell)	6.75	ITU-R M. 2410 indoor hotspot
负载因子	50%	负载因子应反映不同可靠性要求的应用对网络负载的要求，可靠性要求越高网络负载因子越低。

(二) 电子信息制造场景下的业务数据模型

1. 电子信息制造场景业务数据模型 1

假定工厂厂房面积为 8000 平方米，为长 200 米宽 40 米的矩形，在工厂内一共部署 18 个站址，如果每个站址上部署 1 个三扇区小区 (cell)，则在此厂房内共有 54 个小区 (cell)。厂房站址和基站位置的拓扑所图 4 示。

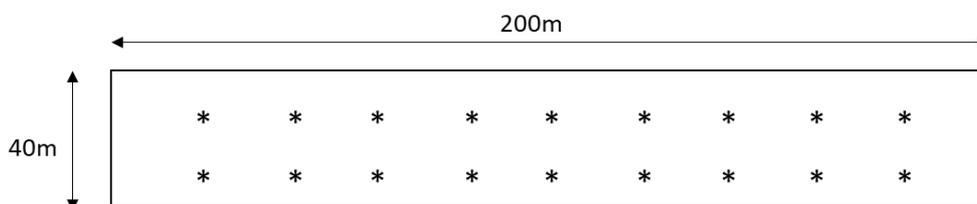


图 4: 电子信息制造工厂和基站部署拓扑示意图

参考《电子信息制造业 5G 应用需求白皮书》[7]，针对不同数据速率应用的情况，分别总结了近期部署的业务参数如表 9，以及中远期部署的业务参数假设如表 10。假设近期部署的场景中，涉及到视频的业务以 4K 分辨率为主；而中远期部署的场景中，涉及到视频的业务以 8K 分辨率为主。

表 9：模型 1 近期部署的基本业务参数

应用	下行				上行			
	数据速率 每终端 (kbps)	终端 总数	平均激活 因子	集总数据 速率 (kbps)	数据速率 每终端 (kbps)	终端总 数	平均激活 因子	集总数 据速率 (kbps)
设备内工业控制	50	100	1	5000	50	100	1	5000
线体内工业控制	250	100	1	25000	250	100	1	25000
整间车间生产控制	250	10000	1	2500000	250	1000	1	250000
AGV 控制	100	20	1	2000	100	20	1	2000
AGV 视频 (4K)	0	0	0	0	32000	20	1	640000
缺陷检测 (4K)	0	0	0	0	64000	150	1	9600000
震动传感器	0	0	0	0	480	150	1	72000
海量传感器	1	10000	1	10000	1	10000	1	10000
音频电话	100	20	1	2000	100	20	1	2000
视频电话	1536	10	1	15360	1536	10	1	15360
AR (4K)	64000	32	1	2048000	64000	32	1	2048000
智能诊断 维护	500	10	0.001	5	500	10	0.001	5

表 10：模型 1 中远期部署的基本业务参数

应用	下行				上行			
	数据速率每终端 (kbps)	终端总数	平均激活因子	集总数据速率 (kbps)	数据速率每终端 (kbps)	终端总数	平均激活因子	集总数据速率 (kbps)
设备内工业控制	50	100	1	5000	50	100	1	5000
线体内工业控制	250	100	1	25000	250	100	1	25000
整间车间生产控制	250	10000	1	2500000	250	10000	1	2500000
AGV 控制	100	20	1	2000	100	20	1	2000
AGV 视频 (8K)	0	0	1	0	127000	20	1	2540000
缺陷检测 (8K)	0	0	1	0	254000	150	1	38100000
震动传感器	0	0	1	0	480	150	1	72000
海量传感器	1	10000	1	10000	1	10000	1	10000
音频电话	100	20	1	2000	100	20	1	2000
视频电话	1536	10	1	15360	1536	10	1	15360
AR (8K)	255000	32	1	8160000	255000	32	1	8160000
智能诊断维护	500	10	0.001	5	500	10	0.001	5

2. 电子信息制造场景业务数据模型 2

本节参考《电子信息制造业 5G 应用需求白皮书》[7] 中的基于海量终端接入的工厂监控应用案例给出的技术要求和技术指标作出以下假设：工厂厂房面积为 1000000 平米，假设站间距 20 米，每站址 1 小区，共有 2500 个站址。如果每个站址上部署 1 个全向小区 (ce11)，则在此厂房内共有 2500 个小区 (ce11)。如果每个站址上部署 1 个三扇区小区 (ce11)，则在此厂房内共有 7500 个小区 (ce11)。假定用户总数为 1000000，近期预估采用每平方千米 1 百万用户，远期预估采用每平方千米 2 百万用户。

表 11：模型 2 近期部署的基本业务参数

近期									
	下行				上行				
应用	数据速率每终端 (kbps)	终端总数	平均激活因子	集总数据速率 (kbps)	用户比例	数据速率每终端 (kbps)	终端总数	平均激活因子	集总数据速率 (kbps)
设备内工业控制	50	50000	1	2500000	5%	50	50000	1	2500000
线体内工业控制	250	50000	1	12500000	5%	250	50000	1	12500000
整间车间生产控制	250	100000	1	25000000	10%	250	100000	1	25000000
AGV 控制	100	4000	1	400000	0.40%	100	4000	1	400000
AGV 视频 (4K)	32000	3000	0	0	0.30%	32000	3000	1	96000000
AGV 视频 (8K)	127000	1000	0	0	0.10%	127000	1000	1	127000000
缺陷检测 (4K)	64000	3000	0	0	0.30%	64000	3000	1	192000000
缺陷检测 (8K)	254000	1000	0	0	0.10%	254000	1000	1	254000000
震动传感器	480	4000	0	0	0.40%	480	4000	1	1920000
海量传感器	1	750000	1	750000	75%	1	750000	1	750000
音频电话	100	10000	1	1000000	1%	100	10000	1	1000000
视频电话	1536	10000	1	15360000	1%	1536	10000	1	15360000
AR (4K 3D)	64000	3000	1	192000000	0.30%	64000	3000	1	192000000
AR (8K 3D)	255000	1000	1	255000000	0.10%	255000	1000	1	255000000
智能诊断维护	500	10000	0.001	5000	1%	500	10000	0.001	5000

表 12: 模型 2 中远期部署的基本业务参数

中远期								
	下行				上行			
应用	数据速率每终端 (kbps)	终端总数	平均激活因子	集总数据速率 (kbps)	数据速率每终端 (kbps)	终端总数	平均激活因子	集总数据速率 (kbps)
设备内工业控制	50	100000	1	5000000	50	100000	1	5000000
线体内工业控制	250	100000	1	25000000	250	100000	1	25000000
整间车间生产控制	250	200000	1	50000000	250	200000	1	50000000

AGV 控制	100	8000	1	800000	100	8000	1	800000
AGV 视频 (4K)	32000	5000	0	0	32000	5000	1	160000000
AGV 视频 (8K)	127000	3000	0	0	127000	3000	1	381000000
缺陷检测 (4K)	64000	5000	0	0	64000	5000	1	320000000
缺陷检测 (8K)	254000	3000	0	0	254000	3000	1	762000000
震动传感器	480	8000	0	0	480	8000	1	3840000
海量传感器	1	1500000	1	1500000	1	1500000	1	1500000
音频电话	100	20000	1	2000000	100	20000	1	2000000
视频电话	1536	20000	1	30720000	1536	20000	1	30720000
AR (4K 3D)	64000	5000	1	320000000	64000	5000	1	320000000
AR (8K 3D)	255000	3000	1	765000000	255000	3000	1	765000000
智能诊断维护	500	20000	0.001	10000	500	20000	0.001	10000

(三) 电子信息制造场景频谱需求计算结果

结合表 4 无线参数，以及表 9、表 10、表 11 和表 12 的业务参数，采用本报告第二章中频谱需求预测方案，可以计算得出电子信息制造场景下的频谱需求计算结果分别如表 13 和表 14 所示。

表 13: 电子信息制造场景数据模型 1 的频谱需求计算结果

	三扇区小区部署	
	近期	中远期
上行频谱需求	69MHz	282MHz
下行频谱需求	19MHz	44MHz
合计频谱需求	88MHz	326MHz
上下行时隙配比	3.7: 1	6.4: 1

表 14: 电子信息制造场景数据模型 2 的频谱需求计算结果

	三扇区小区部署	
	近期	中远期
上行频谱需求	46MHz	111
下行频谱需求	19MHz	36
合计频谱需求	61MHz	147
上下行时隙配比	3: 1	3: 1

六、总结和建议

根据“绽放杯”的应用情况以及之前章节对具体行业的实际应用需求分析，可以看出未来工业企业的数字化转型和升级，离不开频谱资源的供给。

根据第四、五章的模型、参数和计算，电子信息制造行业估算需要 61-326MHz 频谱，汽车制造行业估算需要 191-604MHz 的频谱。初步分析如下：

- 随着 5G 和工业互联网应用的不断结合，工业对频谱提出了更多的需求；
- 高清图像、视频在质检以及和其它云机器人、AGV 导航等工业场景中的应用，成为频谱需求的主要驱动力；
- 工业应用中，上行业务需求远大于下行需求；
- 根据室内、室外应用的需求，工业互联网业务可通过中频段或中频段加毫米波频段满足其覆盖和容量需求。

综合以上分析，可以看出电子信息和汽车制造领域 5G+工业互联网的频谱需求较大，需要规划新的频率来满足行业迫切需求。其他垂直行业的频谱资源需求仍需要进一步研究。

附件：频谱需求预测方法分析

ITU-R WP5D 从 IMT-2000 一直到 IMT-2020 系统，结合无线系统技术演进和不断增强增加的场景，持续针对系统频率的需求进行预测评估。

ITU-R M. 1768[8] 针对 IMT 系统提出了一种基于排队论理论的预测计算方法，在 2006 年 ITU-R M. 2078[9] 采用 M. 1768 的方法针对 IMT2000 系统以及 IMT-advanced 系统进行了频率需求的评估；在 2013 年针对 WRC15 议题 1.1，ITU-R M. 2290[10] 报告采用 M. 1768 的方法根据当时 IMT 技术发展、全球移动市场的业务增长和部署情况，对 IMT2000 以及 IMT-advanced 频率需求相关参数和结果预测进行了更新。

针对 WRC19 AI1.13 议题，WP5D 针对 IMT-2020 系统的毫米波频段频率需求进行预测和计算[8]，主要采用两种方法：其中一种方法采用 ITU-R M. 1651 建议书[3] 基于应用的方法，M. 1651 是在 WRC-03 研究周期中制定和使用的，也曾在 WRC-15 议题 1.1 下用于计算 RLAN 频率需求；另外一种方法，是基于系统性能关键指标（比如峰值速率，用户体验速率，小区边缘数据速率要求，频谱效率等）的方法，进行频率需求分析。

附件针对 M. 1768 和 WP5D IMT-2020 的频率需求方法以及所需要的参数集进行介绍，并进行对比分析。

一、ITU-R M.1768 频率需求预测方法

M.1768 针对分组业务和电路域业务的频率需求分别进行预测并叠加[8]。这里主要考虑针对分组业务的频率需求预测方法，采用排队论理论针对分组业务的容量和频率需求进行预测。

排队论模型采用 M/G/1 先进先出排队系统，既假设系统中只有一个服务窗，顾客到达系统的时间间隔服从参数为 λ 的泊松分布，而服务窗的服务时间是一般分布 G。排队系统中，当系统为一个顾客服务时，当前服务不能被中断，新来的客户只能进入队列排队等待。对于每个分组业务都可以设定优先级，不同分组业务也可以具有相同优先级。服务时间由分组包长和无线接入技术调制编码速率决定。

此种方法需要比较多的业务模型相关的参数，比如分组数据包大小的平均值和二阶矩、会话到达率和会话平均时长等，需要提前针对不同业务场景的具体业务流量建模深入研究，才能达到比较好的预测效果。此方法在 5G 毫米波频率需求预测过程中，没有被采用。

二、ITU-R IMT-2020 毫米波频率需求预测方法和参数集

IMT-2020 毫米波频率需求预测中采用的计算方法，主要有两种类型：基于应用的方法和基于性能的方法。

（一）基于应用的方法

该方法采用 ITU-R M.1651 建议书[3]的方法，关于应用的输入参数可以反映各个国家的不同情况。

为了在该方法中计算频率总需求量 R (Hz)，使用以下等式：

$$R_{ts} = (C \times A \times U) / I / S$$

$$R_t = \sum R_{ts}$$

$$R = \max(R_t)$$

在上面的等式中， R_{ts} 表示给定的电信密度和服务类型中的一组频率需求，可以由连接密度（用户数/km²） C 、应用数据速率（bits/s） A 、使用模式（%） U 、以及无线技术相关的参数（每平方公里的小区个数 I 小区面积和小区平均频谱效率 S ）计算而得到。其中，连接密度 C 的定义在 ITU-R 建议书 M.2083[4] 中给出，可以由公式 连接密度 $C = (\text{给定区域内的用户数}) \times (\text{激活因子})$ 计算得到。使用模式 U 定义了给定电信密度下使用一定类型的业务的用户比例，该参数值可能因区域或者国家的不同而有所区别，单位为%。激活因子和使用模式可能被不同频率影响，以反应不同的运营环境。

R_t 表示给定电信密度的一组频率需求（Hz）。频率总需求量 R 。频率需求应该取不同电信密度条件下最大的频率需求值。

（二）基于性能的方法

基于性能的方法的概念是指无线系统的关键性能参数，比如支持的峰值数据速率、频谱效率、用户体验的数据速率、预期的设备密度等因素，会影响频率需求。此外，使用场景，包括其相关的预期覆盖区域、部署环境和目标应用，会直接或间接地影响频率需求的技术要求和条件。

可以根据关键技术性能要求（例如，峰值数据速率、用户体验数据速率和区域流量容量）对频率需求进行简单粗略的估计，或者可以在链路预算和系统级仿真的基础上取得关键参数，进行详细计算。

WP5D 针对基于性能的方法中，又分成两种类型。

类型 1

在类型 1 的方法中，使用非常简单的公式来估计系统频率需求，如下：

$$B = (D \times N) / S$$

其中，

B: 频率需求，单位是 Hz

D: 平均用户数据速率，单位是 b/s

N: 同时服务的用户数

S: 频谱效率，单位是 b/s/Hz

表 15 是 WP5D 给出的基于类型 1 方法计算的频率需求示例。

表 15: WP5D 联络函中基于性能方法中类型 1 方法的频率需求示例

示例	频率需求
# 1 - 基于 ITU-R M.2083 建议书 [4]中的小区边缘用户吞吐量和频谱效率目标，N 个用户/设备同时服务于小区边缘。	用户体验数据速率 1 Gbit/s: 3.33 GHz (N=1), 6.67 GHz (N=2), 13.33 GHz (N=4), 例如室内 用户体验数据速率 100 Mbits/s: 0.67 GHz (N=1), 1.32 GHz (N=2), 2.64 GHz (N=4), 例如广域覆盖

类型 2

根据 IMT-2020 的不同技术性能要求估算频率需求，包括用户体验数据速率，峰值数据速率和区域业务容量。频率需求应基于每个技术性能要求遍历进行估算，并结合所有 IMT-2020 部署方案。这些情景可分为室内热点、密集城区的微小区和宏小区、以及城市的宏小区层。考虑到频率需求应满足网络的所有关键能力，从不同技术性能要求获得的最大频率需求结果被视为 IMT-2020 的最终频率需求。

在 ITU-R WP5D 的基于性能方法的类型 2 分析中，进行了以下假设：

-用于无缝广域覆盖的密集城区和城区场景中的宏小区由 6 GHz 以下的频率范围提供。

-24.25-86 GHz 之间的频率范围提供满足极高传输速率要求的密集城区和室内热点场景。在 24.25-86 GHz 的频率中，由于更好的传播特性，24.25- 43.5 GHz 的频率适合于微小区场景。

基于以上所述，表 16 提供了在类型 2 分析中假设的 IMT-2020 的部署方案和频率范围之间的关系。

表 16: IMT-2020 在类型 2 中假设的部署场景和频率范围

部署场景	室内热点	密集城区		城区 marco
		Micro	Macro	
频率范围	24.25-86 GHz	24.25-43.5 GHz	<6 GHz	<6 GHz

WP5D 向 TG5/1 发送的联络函 [12] 的附件 A 中的 A.2.2 节提供了类型 2 的一个示例的细节，基于关键能力、部署方案以及部署方案和建议频率范围，如上所述。估计的频率需求总结在表 17 中。

表 17: 24.25-86 GHz 范围内 IMT-2020 在不同频率范围里的频率需求估计

部署场景	微小区	室内热点
24.25-86 GHz 总频率需求	14.8-19.7 GHz*	
24.25-43.5 GHz 频率需求	5.8-7.7 GHz	9-12 GHz
45.5-86 GHz 频率需求	-**	

*考虑到多个网络运营商之间的共存（例如，在多个网络运营商场景的情况下可能需要保护频带），预期总频率需求将增加。

**表 7 中有关频率范围和部署方案的划分仅仅是关于如何在 24.25-86 GHz 和不同部署方案内针对不同频谱子范围分配频率需求的指示性示例。不应理解或使用该表来排除 45.5-86 GHz 范围内任何可能的 IMT-2020 部署选项。

三、对比和分析

M. 1768 中的方法可以结合 QoS 要求比如业务优先级和时延等，基于排队论理论，在考虑理想调度的前提下，对于频率需求进行较为精细的预测，但是 M. 1768 需要比较多的业务模型相关的参数此方法在 5G 毫米波频率需求预测过程中，已经被采用了。

IMT-2020 毫米波频率需求预测采用的两种预测方法（基于应用的方法和基于性能的方法），参数复杂度要求相比 M. 1768 较低，在场景和业务难以准确预测时，该方法可以根据较为概括的技术和业务参数集提供频率需求估计。其中基于应用的方法在各种分组系统的容量估计和频率需求估计中应用更为广泛，比如曾用在 5GHz RLAN 网络频率需求预测以及 5.9GHz C-V2X 频率需求研究 [13] [14]，需要的参数、假设和应用场景以及无线技术（及其候选频率范围）都紧密相关。基于性能的方法，对于无线系统更为依赖，是在各种场景应用的业务模型进行高度总结和抽象的基础上进行，与基于应用的方法并不矛盾，只是更侧重于无线系统性能参数。

在难以取得工厂内网络的精细业务建模时，可以采用基于应用的方法对频率需求进行初步分析。

参考文献

- [1]. 5G 工业应用发展白皮书——2019 年第二届“绽放杯”5G 智慧工业征集大赛洞察
- [2]. 第三届“绽放杯”5G 应用大赛优秀案例集锦，5G 应用产业方阵
- [3]. Recommendation [ITU-R M.1651](#), “A method for assessing the required spectrum for broadband nomadic wireless access systems including radio local area networks using the 5 GHz band”
- [4]. Recommendation [ITU-R M.2083](#), “IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,”
- [5]. 3GPP TR22.804 V16.1.0, “Study on Communication for Automation in Vertical Domains”, 2018/09
- [6]. AII, “无线应用场景白皮书-汽车制造领域”，2018 年 10 月
- [7]. AII-S-09-07, “可用于工业互联网工厂内网络频率需求研究的预测方法和所需要的参数集”，2018 年 12 月
- [8]. Recommendation ITU-R M.1768-1, “Methodology for calculation of spectrum requirements for the terrestrial component of International Mobile Telecommunications”, 2013/04

- [9]. Report ITU-R M.2078-0," Estimated spectrum bandwidth requirements for the future development of IMT- 2000 and IMT-Advanced", 2006
- [10]. Report ITU-R M.2290-0," Future spectrum requirements estimate for terrestrial IMT", 2013/12
- [11]. Report ITU-R M.2289-0," Future radio aspect parameters for use with the terrestrial IMT spectrum estimate methodology of Recommendation ITU R M.1768-1", 2013/12
- [12]. ITU-R WP5D R15-TG5.1-C-0036!!MSW-E, "LS statement to TG5/1, spectrum needs and characteristics for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz", Feb, 28th, 2017
- [13]. 5GAA S-180117," Study of spectrum needs for safety related intelligent transportation systems", 2018 July
- [14]. CCSA SR239-2018, "智能交通车车/车路主动安全应用的频率需求和相关干扰共存研究"