

基于毫米波的工业 5G 创新应用 白皮书

(2024 年)

未来移动通信论坛毫米波工作组

二〇二四年八月

版权声明

本白皮书中所有材料和内容的知识产权属于未来移动通信论坛毫米波工作组及所有参编单位，并受法律保护。任何单位和个人未经未来移动通信论坛毫米波工作组授权，不得使用或转载白皮书中的任何部分。授权后转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书中文字或者观点的，应注明“来源：未来移动通信论坛毫米波工作组”。违反上述声明者，本工作组将追究其相关法律责任。

未来移动通信论坛毫米波工作组

编写单位

东南大学毫米波全国重点实验室、紫金山实验室、之江实验室、商飞智能技术有限公司、深圳市工赋数字化促进中心、上海新兴信息通信技术应用研究院、上海人工智能研究院有限公司、上海市无线专网有限公司、智慧尘埃（上海）通信科技有限公司、中科云谷科技有限公司、中国黄金集团内蒙古矿业股份有限公司、青岛港国际股份有限公司、中国海诚工程科技股份有限公司、金风科技股份有限公司、徐工汉云技术股份有限公司、本溪钢铁（集团）信息自动化有限责任公司、嘉宾科技（北京）有限公司

前言

5G 与工业互联网的深度融合应用已成为驱动经济社会数字化转型的重要力量，为推进新型工业化、建设现代化产业体系提供了坚强支撑。工业是 5G 应用的主阵地，毫米波频段作为 5G 的重要组成部分，具有广阔行业应用前景。

毫米波频谱参考 3GPP 协议在 24.25GHz 到 52.6GHz 之间，与传统 5G 中低频段（Sub-6GHz）相比，5G 毫米波拥有更为丰富的频谱资源，能够实现超大带宽、超低时延传输，满足工业场景对于高速率、大容量、低时延、高可靠的业务需求。同时，在提供通信功能之外，毫米波技术还能够提供高精度定位感知能力，满足智能制造与低空经济领域更多复杂的业务场景需求，有效释放通信技术潜能，推动实体经济高质量发展。

近年来，全球范围内对毫米波频谱资源的关注度不断增加，各国纷纷依据国际电信联盟（ITU）的规则，积极开展毫米波频谱的规划和实践探索，以适应日益增长的无线通信业务需求。目前，美、德、日等发达国家已率先开展了部分毫米波频谱划分与商用部署。同时，毫米波技术的成熟与使用成本的下降，使其能够应用到更多行业场景中，预计全球毫米波产业也将在未来几年内进入快速扩展阶段。

5G 毫米波在工业领域的技术应用在未来无线技术发展和网络基础设施建设中具有重要意义，也对关乎国家安全的

网络空间、航空航天等关键领域具有深远影响，积极布局和商业应用毫米波技术有助于提升我国在全球 5G 竞赛中的竞争优势。在行业应用层面，5G 毫米波专频专网在智慧工厂、智慧港口、智慧能源等领域，能够支撑大带宽连接和毫秒级时延的通信服务；在低空经济领域，能够提供高精度无人机探测和感知服务。同时，人工智能技术为毫米波在工业领域创新应用提供了智能化引擎，使网络资源按需配置更加精准，有效满足各行业对于专网架构的特定需求。

《基于毫米波的工业 5G 创新应用白皮书》详细介绍了毫米波在工业领域创新应用的国际现状、政策背景、技术特点和典型应用场景。希望白皮书的发布，能为相关产业政策制定提供理论支撑，为毫米波技术发展和行业创新应用提供有益参考。

本白皮书由东南大学毫米波全国重点实验室、智慧尘埃（上海）通信科技有限公司联合编写，并在编写过程中得到了行业内专家领导们的悉心指导。各参编单位均在推动 5G 毫米波行业的示范应用与技术发展中作出了卓越贡献，也为白皮书的写作提供了理论支撑与重要参考，在此表达感谢。

时间所限，白皮书难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

目 录

一、基于毫米波的工业 5G 应用背景	- 1 -
(一) 5G 毫米波应用的重要意义	- 1 -
(二) 5G 毫米波应用的全球现状	- 3 -
(三) 5G 毫米波应用的市场前景	- 6 -
(四) 5G 毫米波应用的政策背景	- 9 -
二、5G 毫米波的工业领域创新应用方向	- 11 -
(一) 行业专频专网	- 11 -
(二) 通感算一体化	- 12 -
(三) 人工智能驱动	- 13 -
(四) 组网架构创新	- 14 -
三、5G 毫米波专频专网简介	- 17 -
(一) 5G 毫米波技术优势	- 17 -
(二) 5G 专网模式对比	- 21 -
(三) 5G 专频专网安全性	- 24 -
四、基于毫米波的垂直行业应用	- 26 -
(一) 制造行业	- 27 -
(二) 港口行业	- 31 -
(三) 风电行业	- 35 -
(四) 电力行业	- 38 -
(五) 矿山行业	- 42 -

五、建议与展望	- 46 -
(一) 加快构建毫米波行业应用规范	- 46 -
(二) 深化并拓展毫米波的行业应用	- 46 -
(三) 推动毫米波技术适度预研攻关	- 47 -
(四) 促进毫米波产业链发展与协同	- 47 -
(五) 加强毫米波技术领域人才培养	- 47 -
参考文献	- 48 -

一、基于毫米波的工业 5G 应用背景

(一) 5G 毫米波应用的重要意义

5G 与工业互联网的深度融合应用已成为驱动经济社会数字化转型的重要力量，为工业生产的智能化、网络化、数字化提供了坚实的技术支撑，作为 5G 的重要组成部分，5G 毫米波以其超大带宽、极低时延等优势，将成为推进工业经济和数字经济深度融合的关键技术之一。毫米波频谱的合理规划与毫米波技术的产业化应用对于推动核心技术自主创新和产业链自主可控，保持我国毫米波技术的国际竞争力具有重要意义。加快我国 5G 毫米波网络建设与应用推广，将对智能制造、低空经济、卫星互联网等未来产业创新产生积极作用，并有望成为产业数字化转型的有力支撑，赋能新质生产力发展。

频谱资源是移动通信产业发展的核心资源。5G 毫米波频谱参考 3GPP 协议在 24.25GHz 到 52.6GHz 之间，是 5G-A 时代的关键频谱。相较于传统的 5G 中低频段（Sub-6GHz），毫米波拥有更为丰富的频谱资源，能够实现超大带宽、超低时延传输，更好满足高速率、大容量、低时延、高可靠的典型工业场景业务需求。为实现“广覆盖、高速率、大容量和低时延”的 5G 愿景，运营商普遍采取“Sub-6GHz+毫米波”的长期 5G 部署策略，充分利用中低频和高频段的特性，即通过中低频段实现网络覆盖和容量的平衡，高频段（毫米波）提供数千兆比特速率和超大容量，发挥毫米波技术优势，提升现有 5G 网络在超高带宽、极低时延、

高精度感知等工业场景的服务能力。面对传统频谱资源愈发紧张的问题，开发利用毫米波频谱能够有效拓展可用频谱资源，优化频谱利用效率，满足 5G-A 时代对大带宽频谱资源的行业需求。

在应用场景上，随着 5G 商用的不断深入，毫米波技术已成为 5G 生态系统中的关键技术之一，保持在毫米波领域的技术领先地位对于提升我国通信设备制造商在全球市场的竞争力至关重要。中国已发展成为全球最大的互联网市场，对移动数据流量的需求持续增长，特别是在城市中心、大型活动场所等场景，毫米波频谱的大带宽特性可以有效满足超高速率、超大容量的数据传输需求。同时，毫米波技术对推动智能制造、工业自动化等工业领域创新应用具有积极作用，也在低空经济、卫星互联网等新兴产业领域拥有广阔前景，是实现产业数字化转型、助力数字经济发展的关键技术支撑。

在国际合作上，我国积极参与毫米波技术国际标准化工作，推动国内标准与国际标准接轨，可进一步提升我国在国际舞台上的话语权。当前，各国纷纷依据国际电信联盟（ITU）的规则，积极开展毫米波频谱的规划和实践探索，国际合作有助于完善我国毫米波产业链，加强与国际先进企业和研究机构的交流合作，借鉴国际先进的行业应用经验，可以加速我国相关技术的成熟度和产业化进程，提升我国毫米波领域的整体竞争力。

毫米波行业创新应用是顺应 5G 及未来无线通信技术演进的

重要选择，也是实现国家信息通信发展战略、促进实体经济高质量发展的关键举措之一。毫米波行业创新应用与全球通信行业发展趋势紧密相连，通过借鉴国际先进经验，加强自主研发和产业生态建设，我国有望在毫米波技术领域实现突破和领先，进而助力我国“5G+工业互联网”体系化发展，巩固在全球范围内的领先地位，为推进新型工业化、建设现代化产业体系提供坚强支撑。

（二）5G 毫米波应用的全球现状

截至 2023 年底，全球已有超过 141 个国家和地区的监管机构宣布或计划进行 5G 频谱分配，其中 32 个国家和地区完成毫米波频谱的分配，通过全球多个国家和地区的毫米波技术试验和商用部署，其产业链也在逐渐成熟。^[1]据 GSMA 移动智库数据，截至去年一季度末，全球范围内已有超过 119 次 5G 毫米波试验开展，22 家运营商在毫米波频段推出 5G 服务。¹

随着国际标准化组织 3GPP 正式确定 5G-Advanced（5G-A）为 5G 下一阶段演进的官方名称，标志着全球 5G 发展进入新阶段。毫米波频段正逐渐成为 5G-A 网络建设的重要组成部分，尤其在提高网络峰值速率和增加容量方面将发挥重要作用。目前，我国已完成多个毫米波频段的规划和试验，包括但不限于 24.75-27.5GHz 和 37-42.5GHz 频段，并已在部分城市开展了实地测试。国内外各大通信运营商也在积极布局毫米波建设，在毫米

¹ 数据来源：GSMA 移动智库 Pau Castells，2023 年 MWC 上海世界移动通信大会

波新技术研究、新设备研发、新标准制定、新生态构建等方面加速推进毫米波产业链发展。

国内在毫米波通信领域的商业实践虽起步较晚，但在政策推动、技术研发和应用落地等方面正快速跟进。目前国内毫米波通信尚未大规模商用推广，相较 Sub-6GHz 频段，毫米波基站所需部署密度更大，且对环境条件要求更高，针对性的技术解决方案虽已获得验证，但仍需要大规模应用和推广。同时，国内毫米波产业的生态尚待培育，智能终端设备的研发和普及速度相比美国等先行国家也尚存在一定差距。²

在国际范围内，美、德、日、韩等发达国家启动毫米波行业应用时间较早，商用化进程相对较快，因而在该领域的技术成熟度和市场接受度相对较高，终端设备生态也比较丰富，在 5G 毫米波通信的基础研发、专利积累以及国际标准制定等方面具有一定的先发优势。

美国运营商如 Verizon、AT&T 等早在 2018 年就开始了 5G 毫米波的商用部署，在很多城市建立了相当规模的毫米波网络，提供高达数千兆比特每秒的下载速度，并在如 2021 年“超级碗”等大型活动中起到关键支撑，满足了赛事多路高清直播需求与众多现场观众的网络使用。2021 年 7 月高通公司利用骁龙 X65 5G 调制解调器射频系统完成了全球首个支持 200 MHz 载波带宽的 5G 毫米波数据连接。2023 年 2 月高通公司推出骁龙 X75 5G 调

² 资料来源：TechInsights, Global 5G mmWave Smartphone Shipments Forecast by Vendor to 2024

制解调器射频系统，是全球首款支持 5G-A 的系统，为智能手机连接树立了新标杆。骁龙 X75 还旨在面向全部关键垂直领域，包括汽车、计算机和工业物联网等，推动 5G 下一阶段演进。

德国运营商德国电信与爱立信在 2019 年初开始了毫米波进行无线回传的测试与试验，并在毫米波链路上实现了 40Gbps 的数据传输速率。2020 年初弗劳恩霍夫生产技术研究所以(Fraunhofer IPT)、爱立信、罗德与施瓦茨 (Rohde & Schwarz, 简称 R&S)、巴斯勒 (Basler) 和高通公司联手在德国亚琛的欧洲 5G 工业园区建立了一个测试平台，重点关注 5G 毫米波在工业环境中的传播和网络质量。2023 年德国电信、爱立信和高通公司合作，在波恩的园区内展示了 5G 毫米波技术在 QoS 管理连接中的应用。他们使用毫米波和中频频段的双连接，通过优先级调度机制，确保每个网络切片或设备的资源分配。

日本允许垂直行业申请 28.2GHz-28.3GHz 毫米波频段，日本运营商 NTT DOCOMO 于 2020 年 9 月便开始使用毫米波频段提供 5G 服务。截至 2022 年 7 月，日本四大移动运营商成功部署了超过 20,000 个 5G 毫米波基站，实现了多地区包括东京原宿和新宿的高速宽带体验，并预计将进一步扩展网络覆盖。同时，日本市场上已有多款支持毫米波技术的智能手机，如三星、索尼和夏普等品牌，为消费者提供更多选择。

韩国科学技术信息通信部为推动企业数字化转型及韩国各行业 5G 应用，于 2021 年 10 月分配 4.72GHz-4.82GHz 和 28.9G

Hz-29.5GHz 频段用于 5G 专网。截至 2024 年 1 月，韩国有 31 家运营商和企业获得 5G 专用频率许可，其中三星电子作为电子信息制造业巨头计划在水原市工厂部署 5G 专网，实现工厂的降本增效，加强安全生产。

（三）5G 毫米波应用的市场前景

毫米波技术因其能够实现大容量、高安全性通信和定制化的独特优势，在行业专网领域具有广阔的市场前景，逐步成为了智慧工厂、智慧港口、智慧能源等方向无线通感算一体化的重要选择，同时也能够在低空经济、卫星通信等领域发挥重要作用。根据《2023 年通信业统计公报》解读，截至 2023 年底，行业共发展 5G 虚拟专网数量 3.16 万个，是上年末数量的 2.2 倍。应用案例数超 9.4 万个，已融入 97 个国民经济大类中的 71 个，覆盖超七成大类行业，这些数字充分反映了行业专网快速增长的趋势。^[2]

在智慧工厂领域，毫米波行业创新应用的加快推广，将推进行业应用从外围辅助向核心生产控制环节拓展。国外在毫米波行业应用上积累了多年的经验，不乏应用在智慧工厂等关键领域的行业案例。

例如，爱立信与奥迪携手利用第五代移动通信技术（5G）为未来工厂的发展开辟了新的可能性。自 2018 年 8 月双方宣布合作以来，双方力争将 5G 技术融入汽车制造业，并在与奥迪及西克公司的合作基础上进一步发展，利用 5G 毫米波段的 URLLC（超可靠低延迟通信）技术，为西克公司的自动引导车（AGV）

的安全运行提供了网络支持，从而将工厂自动化推向了一个新的高度。该技术为自动化通信的行业标准，如 PROFINET RT 和 PROFIsafe 的运行提供了严格的低时延保障，确保操作安全，并避免了安全停止的发生。这一进展在工业自动化领域极为关键，因为它首次实现了安全的人机交互，而不再依赖传统的有线网络连接，为工业4.0的实现提供了突破性变革。

爱立信和奥迪于2020年1月在瑞典基斯塔的工厂中，成功进行了5G毫米波 URLLC 功能和工业自动化应用的结合测试。两家公司联合打造了一个机器人工作站，与奥迪工厂中现有的机器人工作站类似，该工作站能够通过5G毫米波网络进行通信，并由机器人进行方向盘的生产，包括安全气囊的安装，而激光防护幕则确保了操作区域的安全。得益于5G URLLC 的低延迟和高可靠性，当生产工人接近工作区域时，机器人能够立即暂停操作，确保了操作人员的安全，这种快速响应在传统的 Wi-Fi 或早期移动网络中是难以达到的，也充分展示了通过毫米波技术创新解决传统工业通信限制的高效应用。

此外，5G毫米波 URLLC 技术的应用使得工业机器人不再受限于有线连接，在工厂内可自由移动，极大地提升了生产线的灵活性和效率。生产布局可以轻松调整，设备也可以根据需要进行移动，从而优化生产流程并提高产出效率。^[3]

在低空经济领域，特别是无人机和城市空中交通（UAM）领域，毫米波通感算一体化技术扮演着至关重要的角色。毫米波

通感算一体化技术凭借其高精度测距、精准定位和强大的抗干扰能力，可用于无人机避障、导航以及空中交通管理。同时，毫米波技术支持无人机之间、无人机与地面站之间的高速数据传输，保障飞行控制指令的实时传递和高清影像数据的实时回传，助力低空经济生态的快速发展。根据前瞻产业研究院的《中国低空经济行业市场前瞻与投资战略规划分析报告》，2022 年中国低空经济行业市场规模为 2.5 万亿元，到 2035 年，中央对国家低空经济的产业规模预期达 6 万亿元。^[4]

在卫星通信领域，毫米波频段也为地球同步轨道（GEO）、低地球轨道（LEO）和中地球轨道（MEO）卫星通信系统提供了新的发展空间。Ku 波段（12-18GHz）与 Ka 波段（27-40GHz）等高频段是卫星通信的传统频段，如今卫星通信产业进入高速发展阶段，卫星互联网星座发展迅猛，造成频谱资源使用紧张，毫米波技术不仅能够解决传统卫星通信频谱资源紧张问题，还能通过在卫星和地面站之间建立高容量的毫米波链路，极大地提高卫星互联网的带宽和连接质量，支持 5G 非地面网络（NTN）的构建，促进偏远地区网络覆盖、应急通信和商业航天市场的发展。近年来，“卫星互联网”已纳入新基建范畴，依据测算，预计 2024—2029 年市场规模年均复合增速约为 15%，2029 年我国卫星通信行业市场规模有望突破 2000 亿元。

毫米波技术在行业专网、低空经济和卫星通信这三个领域展现出广阔的应用潜力和市场前景。随着技术成熟和成本降低，毫

毫米波技术有望在未来通信市场中占据更加重要的地位，推动国内相关产业链的快速发展。

（四）5G 毫米波应用的政策背景

毫米波作为 5G 通信的关键技术，我国政府高度重视毫米波领域的技术发展与创新应用。工业和信息化部发布的多项通知和行动计划涉及毫米波测试与频率使用规划，并围绕加速 5G 毫米波技术的试验、应用和产业化，为毫米波技术发展及产业布局提供了指引。

工业和信息化部于 2017 年 7 月首次批复 24.75-27.5GHz 和 37-42.5GHz 频段用于我国 5G 技术研发毫米波实验频段，中国 IMT-2020（5G）推进组也于 2019 年起着手毫米波试验任务。中国 IMT-2020（5G）推进组规划按三个阶段实施 5G 毫米波的试验任务，即 2019 年重点验证 5G 毫米波系统特性及关键技术，2020 年重点验证 5G 毫米波的终端及基站的性能、功能以及互操作性，并于 2021 年开展典型场景应用验证。2020 年 3 月，工业和信息化部在《关于推动 5G 加快发展的通知》中指出，将结合国家频率规划进度安排，组织开展毫米波设备和性能测试，为 5G 毫米波技术商用做好储备，适时发布部分 5G 毫米波频段频率使用规划。2021 年 7 月，工业和信息化部公布的《5G 应用“扬帆”行动计划（2021—2023 年）》中指出，适时发布 5G 毫米波频率规划，探索 5G 毫米波频率使用许可实行招标制度，开展 5G 工业专用频率需求以及其他无线电系统兼容性研究，研究制定适

合我国的 5G 工业专用频率使用许可模式和管理规则。2021 年 11 月工业和信息化部发布的《“十四五”信息通信行业发展规划》指出，将加快 5G 独立组网（SA）规模化部署，逐步构建多频段协同发展的 5G 网络体系，适时开展 5G 毫米波网络建设。2023 年 1 月，工业和信息化部发布《关于微波通信系统频率使用规划调整及无线电管理有关事项的通知》，对微波通信系统频率使用规划进行优化调整，通过新增毫米波频段（E 波段，71-76GHz/81-86GHz）大带宽微波通信系统频率使用规划等方式，进一步满足 5G 基站等高容量信息传输（微波回传）场景需求，并为我国 5G、工业互联网以及未来 6G 发展预留了频谱资源。

二、5G 毫米波的工业领域创新应用方向

（一）行业专频专网

随着行业智能化程度不断提升，出现了许多工业领域的行业创新应用，对网络也提出了新的要求。例如工厂的多机器人作业协同、港口的无人集卡车群调度、风电的风机远程运维、电网的变电站无人巡检、露天矿山的矿卡无人驾驶等新应用场景，都需要结合行业的场景需求差异与特点提供解决方案。

在业务需求上，港口大规模集卡无人驾驶和调度需要在作业区实现密集高清视频上传，要求极高上行带宽，而智能工厂的多机器人控制协同作业则要求高可靠低时延的网络能力。这就需要一种全集成、按需加载、能够实现整体交付的一站式专频专网解决方案，以实现更好的行业自主性，更高的资源分配灵活性，更强的网络传输确定性以及更高的网络安全性：

更好的行业自主性是指企业可基于 5G 毫米波专频专网构建独立、专用的通感算一体化网络。各行业基于业务需求的不同，在同区域内对网络需求动态变化，专频专网可提供对网络资源的可配置可编程能力，允许企业根据自身需求灵活配置和优化网络参数，从而避免与公网共享资源可能导致的服务质量和安全问题。

更高的资源使用灵活性是指企业可以根据业务负载变化，基于 5G 毫米波专频专网进行灵活的资源分配，确保关键业务在需要时能得到充足且稳定的带宽保障。5G 毫米波专频专网可以设定严格的服务质量等级（Quality of Service，简称 QoS），确保

重要应用如远程控制、实时监控等获得确定性网络资源，降低网络拥塞对关键业务的影响。

更强的网络传输确定性是指毫米波通信采用窄波束技术，在复杂多变的工业环境中也能保持高传输质量，提高了通信的可靠性和稳定性。5G 毫米波专频专网可根据行业特点设立多重备份和容错机制，提供高于 5G 公网的传输可靠性。

更高的网络安全性是指 5G 毫米波可在指定区域内构建高度定向、抗干扰性强的无线网络，实现数据的高速、低时延传输。在工业环境中，5G 毫米波专频专网可以限定通信范围，避免非法侵入和监听的风险，提高数据传输的保密性和完整性。

（二）通感算一体化

5G 毫米波组网架构创新聚焦于通过集成通信（Communication）、感知（Sensing）和计算（Computing）功能于一体的通感算一体化网络架构，这种架构能够实现一网多用的统一网络，满足工业在安全生产、资产追踪、设备运维等典型工业场景的需求。

感知功能集成是指 5G 毫米波专频专网可以用于雷达和成像等感知应用，通过精细的波束赋形技术，实现精确的空间定位、物体识别和运动检测等功能，为智慧仓储、无人机导航等场景提供强大的感知能力。

资源共用与协同是指通感算一体化网络通过灵活的频谱资源管理和智能调度，可以实现通信、感知和计算功能在同一网络

中共享频谱资源，依据业务需求动态分配，达到资源的最大化利用，实现一网多用的效果，为用户降低建网成本，避免重复建设。

统一网络计算架构是指软件定义无线电（Software Defined Radio，简称 SDR）在 GPU 计算架构下，能够在 5G 毫米波通感算一体领域得到更好的应用，使得 5G 毫米波无线组网能够构建一个人工智能（Artificial Intelligence，简称 AI）内生的可编程、可扩展、高度灵活的统一网络架构，各类应用无需再单独建设和维护独立的通信和感知网络，从而降低了运维成本，提高了网络的整体智能水平与应用能力。

（三）人工智能驱动

随着人工智能从 AlphaGo 到 ChatGPT 应用的飞跃，人工智能也将为 5G 毫米波专频专网的智能化提升提供更多可能性，使其更好服务工业场景实时动态变化的网络需求。同时，随着边缘计算能力的增强，网络资源能够得到更高效地配置，业务服务质量显著提升，以 AI 为中心的智能化网络服务受到广泛关注，具体体现为以下两个主要方向。

一是将生成式大语言模型（Large Language Models，简称 LLMs）集成到边缘网络中，有望促进通信和计算（Communication and Computing，简称 C&C）资源的高效利用。NetGPT（Network Generative Pre-trained Transformer）能够根据计算能力在边缘和云端有效协同、编排适当的 LLMs。边缘 LLMs 可以高效利用基于位置的信息进行个性化提示，从而有益于与云端 LLMs 的互动，

实现网络的决策优化、资源调度、自适应配置和智能预测等功能。

二是利用深度神经网络（Deep Neural Networks，简称 DNN）和强化学习模型，能够实时分析网络中的各种参数，包括用户分布、设备状态、信道条件等，实现智能调度毫米波频谱资源。人工智能驱动的无线资源管理算法可以动态调整波束赋形、载波聚合、功率分配等参数，实现按需分配和自适应优化，极大提高频谱利用效率和网络服务质量。通过学习环境和用户行为，5G 毫米波专频专网能够针对不同的应用场景（如工业园区、港口码头等）进行毫米波频率的灵活配置，克服毫米波信号传播损耗大、穿透性差的弱点，确保在多种环境下都能提供合适的无线覆盖和通信容量。

（四）组网架构创新

5G 毫米波专频专网的架构创新旨在通过简化网络架构、优化调度策略、智能运维和多系统融合等方法，满足低时延、高可靠的工厂场景应用需求，同时降低运维复杂度，提升整体系统的智能化水平和业务融合能力，帮助工业企业降低专频专网的应用门槛并快速实现设备的部署及应用。

一是通过引入诸如简化架构、协议栈优化等网络优化技术和干扰抑制技术、抗多径衰落技术等信道优化技术，满足系统低时延、高可靠的要求。5G 毫米波专频专网采用扁平化网络架构，减少网络层级，缩短数据传输路径，有效降低端到端时延。通过引入边缘计算技术，将部分计算和存储资源下沉至网络边缘节点，

使得数据处理更接近用户端，进一步减少时延。此外，优化的网络协议栈，精简了不必要的处理环节，提升了数据包的转发效率，也是降低时延的重要手段。在 5G 毫米波专频专网设计中，采用先进的干扰抑制技术和抗多径衰落技术，增强毫米波信号的传输稳定性和可靠性。

二是通过优化的调度策略实现从“尽力而为”到确定性 QoS 保证，因而可以确保适应瞬息万变的网络环境。传统的尽力而为（Best Effort）调度策略难以满足专网中关键业务对 QoS 的严格要求。5G 毫米波专频专网引入了确定性 QoS 保障机制，通过精细化的资源管理和动态优先级调度，确保关键业务数据的传输得到优先处理和足够带宽保障。为关键业务预先分配专用的网络资源（如带宽、计算资源等），确保在多种网络负载条件下都能得到稳定的资源供给。基于业务类型和实时需求设定不同业务的优先级，高优先级业务在资源争抢时优先得到服务。实时监测网络状态和业务需求，动态调整资源分配和调度策略，以适应瞬息万变的网络环境。

三是通过智能运维和免配置一柜式交付降低 5G 毫米波专频专网的使用门槛，提升运维效率，实现即插即用和自动化运维。许多企业没有配备专门的无线运维团队，缺乏运维无线网络的技能，这就需要专频专网服务商在使用侧提供智能运维功能，降低企业使用门槛和运维成本。采用 AI 技术实现网络的智能化运维，包括故障预测、自动诊断、远程修复等功能，减轻人工运维负担，

提高运维效率。通过网络参数预配置，实现即插即用，无需人工进行复杂的网络配置。通过网络自动发现和自组织功能，新设备能快速融入现有网络，简化扩容和升级过程。通过一体化、模块化的硬件架构，如一体化基站、边缘计算节点等，实现所有必要设备在一个机柜内集成，从而大大简化现场安装部署过程，降低空间占用和布线复杂度。

四是通过融合通信技术、通用化接口设计和一体化管理平台帮助实现多系统无缝对接与融合，确保跨系统的数据共享和协同工作。在组网架构上，通过结合毫米波蜂窝移动通信与无线局域网的融合通信技术（HyFi-m）复用宽带射频模组与天线，利用模式与协议分析技术，实时确定通信制式，通过软件或硬件开关，进行中频射频滤波和基带的自适应选择，实现 5G 毫米波的融合通信。设计通用的接口标准和协议栈，确保不同厂家、不同类型的设备（如摄像头、传感器等）能够便捷地接入专网，实现设备间的互联互通。通过一体化的网络与业务管理平台，对多系统设备进行统一监控、配置和管理，实现资源的集中调度和业务的灵活编排。通过 API 或消息总线实现不同系统间的数据共享和业务联动，如基于视频分析的智能告警能够触发毫米波网络的定向数据采集，或基于声光电系统的状态变化能够触发网络资源的动态调整，从而实现跨系统的协同工作。

三、5G 毫米波专频专网简介

(一) 5G 毫米波技术优势

与 5G 中低频段相比，5G 毫米波频段具备超大带宽、极低时延、易与波束赋形技术结合、高度集成、能够实现高精度定位与感知等技术优势，这些优势使得毫米波技术能够较好应用于越来越多的工业智能化场景需求，为各行业转型升级提供有力支撑。

优势 1：毫米波带宽大、频谱资源丰富。与 5G 的 Sub-6GHz 频段（FR1）相比，毫米波频段拥有更为丰富的频谱资源，这一点在下图 3-1 中得以清晰展现。毫米波的优势使得 5G 网络具备提供千兆连接的能力，也是进一步实现“5G+工业互联网”在工业领域应用的重要途径。由于拥有充裕的频谱资源，毫米波网络能够轻松实现 Gbps 级别的峰值吞吐率，为实现更高速、更稳定的通信提供了坚实保障。



图 3-1 5G 频段分布示意图

在密集摄像头的高清视频回传和工业相机质检场景的图片回传等大容量场景中，对大带宽的无线传输能力有着极高的需求。在这种情况下，毫米波成为最佳选择。毫米波技术特性使其能够在高容量、高速度的数据传输场景下表现出色，为满足现代无线通信的需求提供了有力支持。

优势 2：可实现确定性低时延，满足工业控制短时延场景需求。5G 网络的空口时隙长度越短，意味着在物理层上的时延就越小，毫米波网络的空口时隙长度最小可达 0.125ms，仅为目前主流低频 5G 网络的 1/4，具备独特优势。如果采用短时隙（mini slot）调度，空口时延甚至会更小，这使得毫米波系统能够实现极低时延，从而满足工业控制等对确定性低时延场景需求严苛的应用场景。因此，毫米波系统在空口时延方面比低频 5G 系统显著降低，为满足 5G 空口时延小于 1ms 的要求提供了有力保证。

优势 3：毫米波易与波束赋形技术结合。毫米波的高频特性和较短波长为其在设计和部署上带来空间布局的优势，特别是与波束赋形技术的结合更为便利。这种结合增强了信号的覆盖范围，同时减少了干扰现象。即便在单根天线的功率不高时，波束赋形技术也能确保传输高质量的信号，从而增强了整个通信系统的表现。毫米波较短的波长还允许在同样大小的空间内集成更多的天线阵元，这意味着无论是上传还是下载，信号都能够获得显著的波束赋形增益。因此，毫米波技术与波束赋形的结合不仅提升了通信系统的整体性能，还有效降低了对相邻频段的干扰，为关键工业场景提供高速稳定的无线连接。



图 3-2 波束赋形技术

优势 4：毫米波技术具有高度集成的特点。由于毫米波的波长相对于中低频段要更短，因此相关元器件的尺寸也相应地小得多。这使得毫米波设备更容易实现小型化和微型化。随着毫米波技术的商业化和规模化，相关元器件的成本将会大大降低。在专业设备、可穿戴设备、智能零部件等领域，5G 毫米波技术的高集成度意味着其在工业具有广阔的应用前景。高度集成的特性也使得毫米波基站具有重量轻、体积小、易安装的优势，这有助于打造一个高效、绿色、易于部署的毫米波网络，为工业不同的应用场景提供了更加灵活和可靠的解决方案。

优势 5：毫米波有利于实现高精度定位。毫米波技术在高精度定位方面具有显著优势，其波束窄、方向性好，因此具备极高的空间分辨力，这使得其特别适用于需要精准定位的工业物流、资产追踪等场景。同时，毫米波信号的传输周期短、时间精度高，因此可以实现厘米级的定位精度。相比全球卫星导航系统，毫米波定位在许多行业场景下具有更高的精度，而且速度更快。

在智能制造等领域，高精度定位至关重要。特别是在卫星导航信号难以覆盖或信号较弱的室内环境中，毫米波技术的高精度定位有着更突出的优势。例如，在物料的自动运输过程中，毫米波技术可以精确地定位物料的位置，实现自动化的物料搬运和配送；在智能制造生产线中，工业机器人在完成铆接、焊接、组装、剪裁等精密机械操作，以及产品的自动检测和封装等过程中，都需要高精度的定位。此外，在工业控制、物流运输、大型园区等

应用场景中，毫米波可以提供快速高精度的定位服务，为各种应用提供了强大的支持。

优势 6：感知精度更高，是通感算一体的首选，实现一网多用。毫米波技术在感知精度方面展现出了卓越的性能，能支持多种应用和服务，成为通感算一体的首选。感知精度受带宽、感知时间和阵子个数等因素影响，而毫米波具有大带宽、更短的 OFDM 符号和更小的波长，这使得其能够集成更多的阵子数。此外，专频专网技术可以灵活设置感知和通信的资源，进一步提高了感知精度。相比公网中低频技术，毫米波技术具有更高的感知精度，可以满足轨迹跟踪等高精度业务需求。这种优势使得毫米波技术在感知和通信一体化应用中具有巨大的潜力，并可以实现多种功能的高效利用。

表 3-1 Sub-6GHz 与毫米波的感知技术特性对比

指标	Sub-6GHz	毫米波	备注
探测距离	公里级+	公里级	以无人机为典型目标，相同 EIRP 和口径
距离精度	米级	厘米级	小于 1m 无人机，低频无法识别
距离分辨率	米级	厘米级	物体间距小于 1m，低频无法识别
速度精度	m/s	cm/s	速度监测精度
速度分辨率	m/s	cm/s	可通过速度区分不同物体

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/266152024033010211>