

5G 开放式小基站的室内专用网络方案研究

方绍湖, 罗漫江, 康冬

(京信通信系统(中国)有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: 垂直行业应用的多样化需求, 催生更加丰富的建网模式。5G 开放平台小基站具有开放、灵活、高性价比等优势, 将助力 5G 基础网络建设的高效发展。从 5G 时代室内覆盖的挑战与趋势进行分析, 提出应对该现状的基于开放平台小基站的 5G 数字室分解决方案, 并探讨了其在典型行业应用的技术赋能。

关键词: 5G; 小基站; 数字室分; 行业应用

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200486

中文引用格式: 方绍湖, 罗漫江, 康冬. 5G 开放式小基站的室内专用网络方案研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 38-43, 52.

英文引用格式: Fang Shaohu, Luo Manjiang, Kang Dong. Research on indoor private network scheme of 5G open small cell[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 38-43, 52.

Research on indoor private network scheme of 5G open small cell

Fang Shaohu, Luo Manjiang, Kang Dong

(Comba Telecom Systems(China) Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The diversified demand of vertical industry application brings about more abundant network construction mode. Small cell on 5G open platform have advantages such as openness, flexibility and cost performance, which will contribute to the efficient development of 5G infrastructure network construction. Based on the analysis of the challenges and trends of indoor coverage in 5G era, a solution of 5G digital indoor coverage based on open platform small base station is proposed to deal with the current situation, and its application in typical industries is discussed.

Key words: 5G; small cell; digital indoor distribution; industry application

0 引言

4G 催生了移动互联网的繁荣, 5G 将改变各行各业的生产方式, 而 80% 以上的 5G 业务将发生在室内, 5G 室内网络的覆盖质量与应用普及将直接影响到 5G 商业模式的成功。根据后 4G 时代的网络现状及 5G 网络的需求, 5G 网络面临五大挑战。

(1) 网络容量面临巨大挑战。自从 2017 年三大运营商 unlimited 套餐的相继推出, 加速了移动通信网络流量使用的爆发。近几年, 用户每个月使用的流量逐年翻倍在增长, 2018 年 DOU 是 4.5 GB 左右, 2019 年底, 这个数据达到了 9 GB。随着大家习惯线上的各种应用, 以及更多的高清娱乐视频应用的诞生, 流量的需求会持续增长。

(2) 室内网络的覆盖效率需要提升。用户流量需求在持续爆发, 但是 80% 流量是发生在室内的, 而这些用户虽然在室内, 却有 70% 是使用的室外宏站来承载的。因此, 下一步需要提升网络容量就急需在室内网络覆盖上面下功夫^[1]。

(3) 传统室分难以满足 5G 的需求。5G 室内覆盖 4T4R、更高的频段、可视化运维等需求, 这是传统室分无法解

决的, 或许现在 SuB 6G 也有利旧传统室分的方案, 但是这是短期内的快速解决 5G 覆盖的方法之一。长期来看, 5G 要解决的是容量, 传统室分是支撑不了的。

(4) 高性价比建网的诉求。5G 的能力至少是 4G 的十倍以上, 对应基站设备的处理能力也肯定要增加十倍以上, 这就带来了大家耳熟能详的高成本高功耗。实际上, 建设一张 5G 全覆盖网络, 投资很大, 但从过去几年的发展情况来看, 流量的红利并不会带动运营商收入的显著增长, 反而 ARPU 值在缓降。这就意味着运营商从投资回报角度来说, 也急需更高性价比的建网方式。

(5) 5G+行业应用碎片化、复杂化的网络需求, 如智慧矿山、智慧能源、智慧医疗、智慧交通等。这些垂直应用都有其自身的需求点, 需求无法归一, 很难用统一的网络部署方式满足这些所有差异化的客户需求, 需要更加灵活、丰富的网络解决方案。

小基站具有高容量、易部署、灵活、敏捷、高性价比、开放平台等特性, 必然更加容易去适配这种多样化的需求, 所以 5G 小基站将在 5G+工业互联网的室内基础网络中得到广泛应用。“宏基站+小基站”多元化的建网方式

也将成为 5G 建网必然方案。

本文基于以上 5G 网络挑战与小基站的优势,提出开放式小基站在室内的组网可行方式,并探讨了其在典型行业应用的技术赋能。

1 5G 开放式小基站室内网络方案

5G 开放式小基站最重要的特性就是平台的开放,同时满足个人的通信和垂直行业的通信需求。

开放平台包含两个层面的意思:(1)基站功能实现基于通用处理器平台,即基站硬件的白盒化,支持云化部署、虚拟化部署,支持与轻量化 MEC 的集成,支持基站基础能力的开放,实现 IT 与 CT 的深度融合^[2];(2)接口的开放,5G 将会以泛在化组网形态存在,实现万物智联,而不是狭隘的理解 5G 时代,所有连接就是指 5G NR,在生态产业链下,会存在多样化的组网形态,5G NR、光纤网络、WiFi、BLE、UWB 等都将同时共存,在各自的优势领域发挥其极致优势,从而构建一张效益比最优化的 5G 泛在化网络。5G NR 将会与其他形式网络融合组网,那么 5G 开放式小基站就需要支持与目前已有的泛在化物联网网络进行融合,如与智慧室分的融合、与厘米级超高精度定位网络的融合。通过这种融合,将大带宽、物联定位的数据开放到本地,给垂直行业直接使用,真正做到确定性低时延,以及融合、安全与经济性。

1.1 基本架构

开放平台小基站设备形态如图 1 所示,由 5G 接入单

元、5G 扩展单元和 5G 远端覆盖单元三部分组成^[3]。

(1)接入单元:基于通用处理器平台实现 5G 无线物理层及协议栈处理,操作维护、综合管理,直接连接核心网等功能。

(2)扩展单元:实现远端单元数据通信,下行分发、上行汇聚和给远端单元供电。

(3)远端单元:微功率射频收发功能,实现室内 5G 信号的分布式覆盖^[4]。

接入单元与扩展单元之间通过光纤连接,扩展单元与远端单元之间通过复合光缆连接。在实际应用中,可以根据应用场景的大小,灵活地配置扩展单元和远端单元的数量,这一套系统的最大能力,可以外接 64 个远端单元,可以覆盖 3~4 万平方米的室内场景。

5G 开放式小基站提供差异化的产品规格满足多样性的室内覆盖需求,使得室内 5G 网络建设更加灵活、便捷。由于支持云化、虚拟化部署,开放式小基站的容量可以实现很好的柔性容量,可以实现 2T2R、4T4R、5G 单模或者 4G+5G 双模等产品类型。

1.2 开放与融合架构

图 2 所示为开放式小基站开放与融合架构,开放式小基站基带采用通用处理器平台,天然支持软硬件解耦,支持基站基带与 MEC 一体化设计、基于容器虚拟化设计,实现 MEC 现场级方案部署,用于增强移动宽带,高

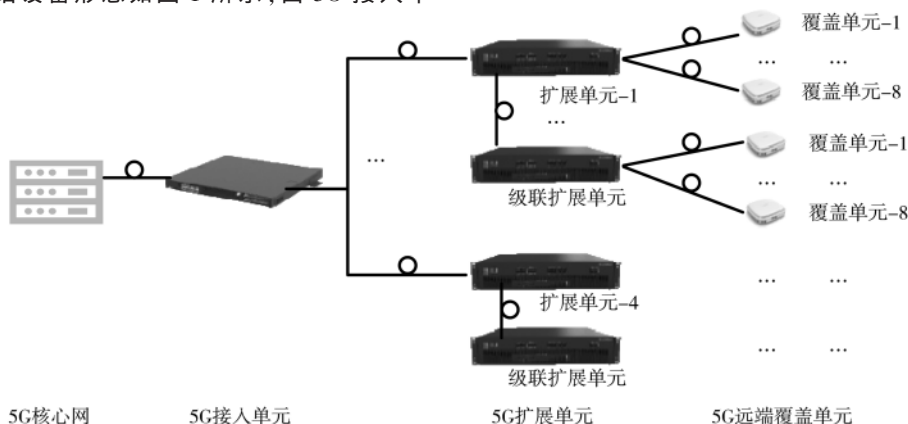


图 1 5G 开放式小基站数字室分结构

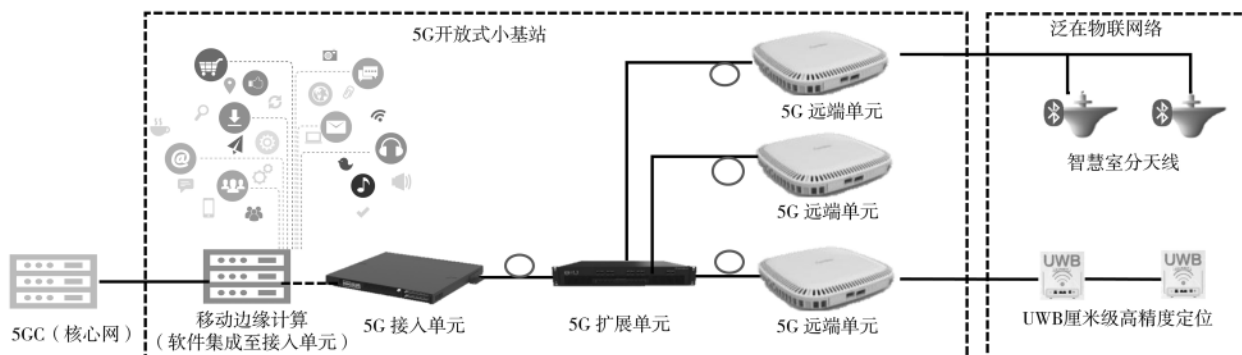


图 2 5G 开放式小基站开放与融合架构

5G 室内覆盖技术 5G Indoor Coverage Technology

特约主编 朱雪田

并发大流量数据请求,区域限制访问并主要集中在现场级的应用场景,解决时延过长、汇聚流量过大等问题,为实时性和带宽密集型业务提供更好的支持^[5]。

开放式小基站另外一个重要特性就是远端单元具备基于 Ethernet 物理接口与蓝牙、UWB 等泛在化物联网的扩展连接,支持将外接物联网设备的信息透传至 MEC,由 MEC 实现 5G NR 传输数据与扩展物联数据的深度融合与运算,对外提供 API 应用接口。从而实现 5G NR 与垂直行业已有信息化体系的融合。

2 面向垂直行业的 5G 室内专网

2.1 5G 室内专网特点

对于室内行业应用要更加丰富的 5G 支撑网络,因为垂直行业应用都有其自身的需求点,即需求肯定是碎片化、复杂化的,很难用统一的网络部署方式满足这些所有差异化的客户需求。例如,智慧矿山的关键需求是:井下远程高清视频、危险作业面的稳定可靠的无人挖矿、矿井设备运行状态监控、井下人员资产信息的实时定位、自动化巡检等;而智慧工厂的关键需求是数据不出厂的安全需求、确定性大带宽低时延需求、泛在网络融合的需求。即各种应用关心的点是不一样的,这些应用对设备的功耗、体积、认证需求也都不一样,如矿井下面的设备,只做入网认证不够,还要做防爆认证、煤安认证等。但对于行业关心的是,如何真正高效、全面地满足其应用场景的所有需求。

归纳 5G 室内行业应用网络需求特点有:(1)确定性,敏感性应用场景对大带宽、低时延指标的确定性要求高;(2)安全性,高于运营商原来的网络安全要求,且是全网络的端到端安全要求,甚至要求数据不出厂;(3)融合性,IT 网络与 CT 网络的融合,云网融合,更加灵活、敏捷、开放的网络,以及融合的服务;(4)经济性,网络建设要求速度快、成本低,以及更低的网络维护和服务成本,能够带来生产成本的降低。

2.2 5G 室内组网方式

面对垂直行业需求的多样性,除了设备形态的丰富性诉求,还必然伴随组网方式的不同诉求,以下探讨 5

种可行的室内组网方式。

2.2.1 切片网络:公网与专网端到端共享

从 5GC、MEC 到 5G 基站,包括控制面和用户面,5G 专网与公网端到端共享,实际就是端到端网络切片。基于 5G 公网,为 5G 专网端到端切出一个“切片子网络”^[6],即为特定应用构建虚拟专网,如图 3 所示。

网络切片构建专网中的用户信息和数据流量的安全性取决于网络切片能力,低时延保障取决于运营商的边缘云(UPF 和 MEC)的部署位置。

2.2.2 UPF 下沉:专网与公网之间 RAN 和控制面共享

5G 基站(gNB)、控制面与 5G 公网共享。所谓控制面共享,就是专网和公网的控制面功能(身份验证、移动性管理等)均由公网中的 5GC 执行,如图 4 所示。

该方案中 MEC 与 UPF 下沉至用户现场,业务低时延低保障,无需承担网络建设运维费用。但同时,设备的用户信息也存储在运营商的 5G 公网中,在安全性要求极高的场景,数据安全性和隐私保护方面难以满足要求。

2.2.3 本地分流(LIPA)

本地 IP 接入,本地分流,它负责在无线接入网及核心网之间提供数据本地转发通路,实现数据流量的本地卸载。gNB 本身具备对 N3 GTP 数据流的解析处理能力,例如,gNB 对来自基站的 GTP 分组数据包的目标 IP 地址进行解析,如果 IP 数据包是本地流量,则将其路由到内部专网,如图 5 所示。

该方案通过 gNB 本身将公网流量与专网流量分开,从而保障专网数据的安全。由于 UPF 增加部署成本,LIPA 本地分流方案也是减少企业部署成本的一种折衷方案,同时还减少了 N4 接口 IoT 带来的诸多麻烦。

2.2.4 运营商帮助企业建设独立专网,与公网完全隔离

使用运营商的 5G 频段,为企业部署专网,并代为运维。该方式与公网完全隔离,企业数据绝对安全;超低网络时延低,能够实现低时延应用;无需建设到大楼的光纤,部署灵活、速度快;无需承担网络建设运维费用,如图 6 所示。

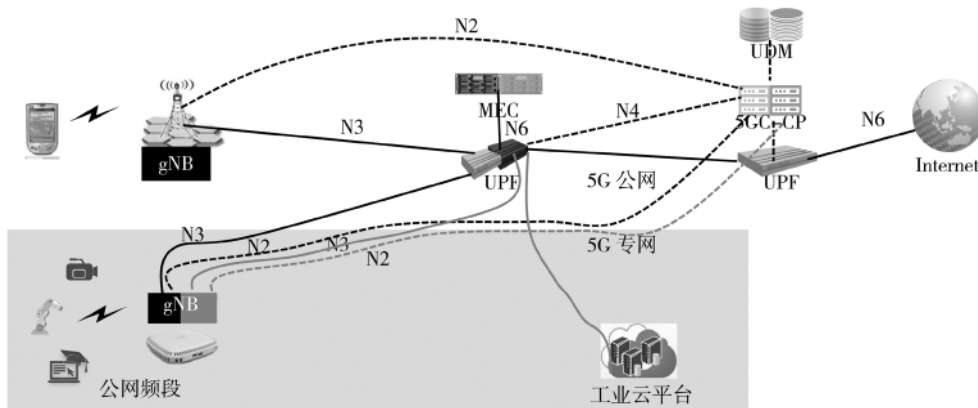


图 3 切片网络—公网与专网端到端共享

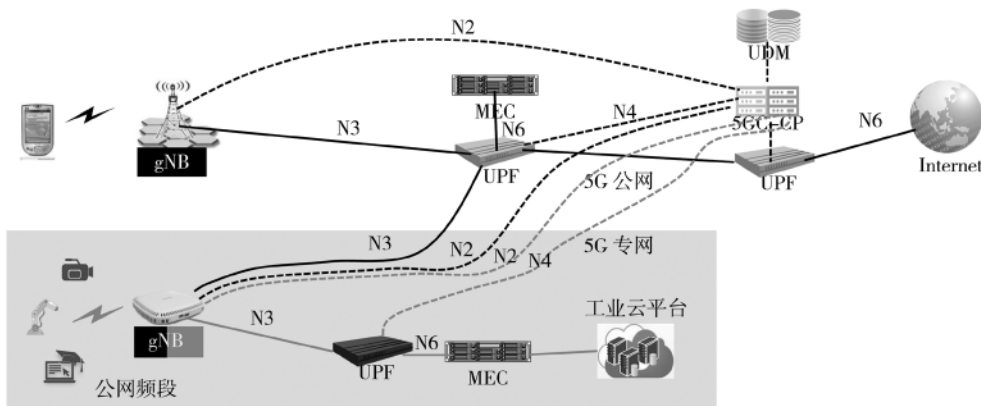


图4 专网与公网之间 RAN 和控制面共享

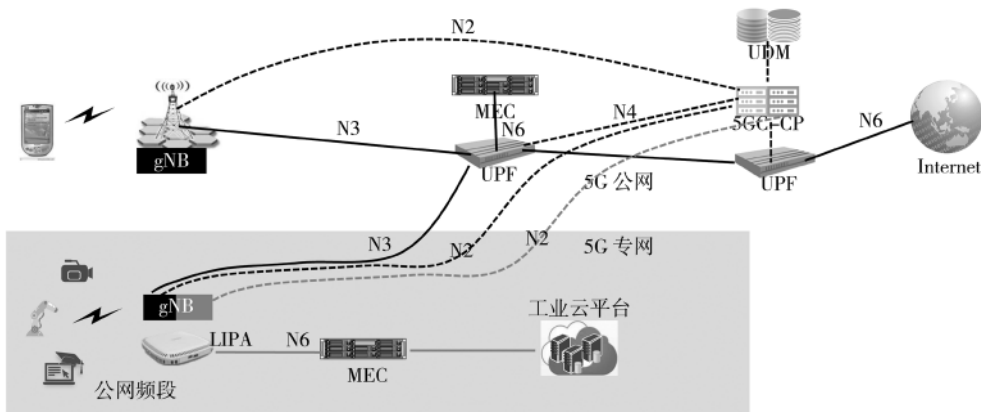


图5 本地分流(LIPA)

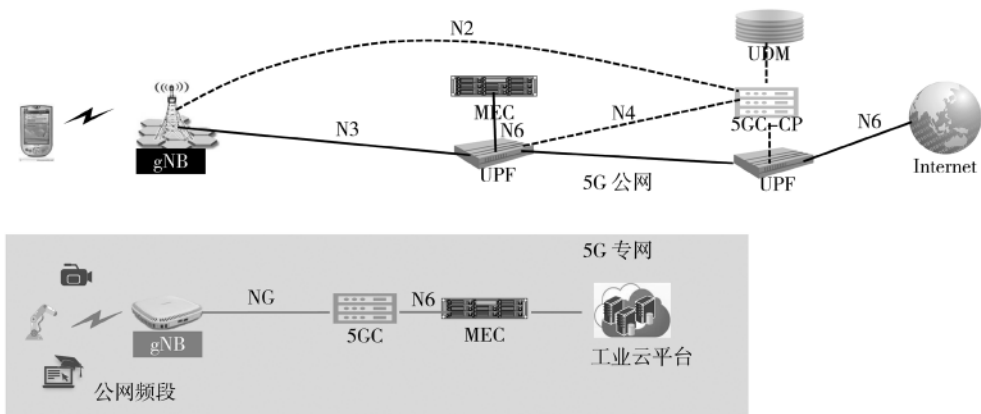


图6 运营商帮助企业建设独立专网,与公网完全隔离

2.2.5 企业基于专网频段独立自建,与公网完全隔离

垂直行业基于 5G 专网频段,自建一张包括 5GC、UPF、MEC 和 gNB 的 5G 移动专网,并与 5G 公网完全隔离。所谓 5G 专网频段,指决策者为垂直行业专门分配的 5G 频段,垂直行业基于 5G 专网频段自建物理专网,如图 7 所示。

该方式与公网完全隔离、企业数据绝对安全;超低网络时延低、能够实现低时延应用;无需建设到大楼的光纤,部署灵活、速度快;网络自主可控(E2E 专属);企业需要承担物理专网部署(建设与运维)和运维成本。

3 5G 室内专用网络应用研究

基于开放式小基站+工业互联网应用为典型垂直行业应用场景。如图 8 所示,在通信设备工厂中部署 5G 开放式小基站,工厂的制造装备通过 5G CPE 连接 5G 网络,将工厂内部数据直接在 5G 基站端进行基于目的地址的 IP 本地分流,以探索 5G 在智能工厂的各种应用,打造成应用的示范标杆,并形成可复制的商业模式。本应用研究重点聚焦对 5G 网络有明确需求的应用,将 5G 网络无缝切换、低时延、大带宽的技术优势和 MEC 平台相结合,提供 5G 云化移动机器人、云化视觉检测、云化

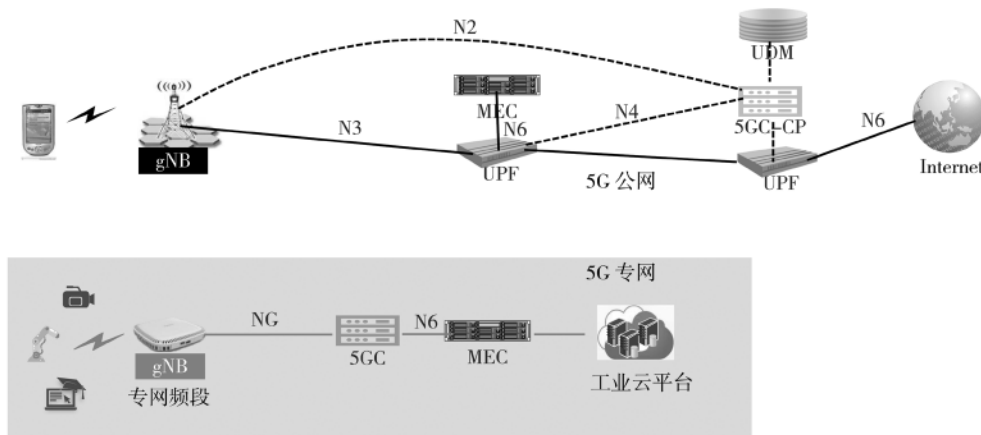


图7 企业基于专网频段独立自建，与公网完全隔离

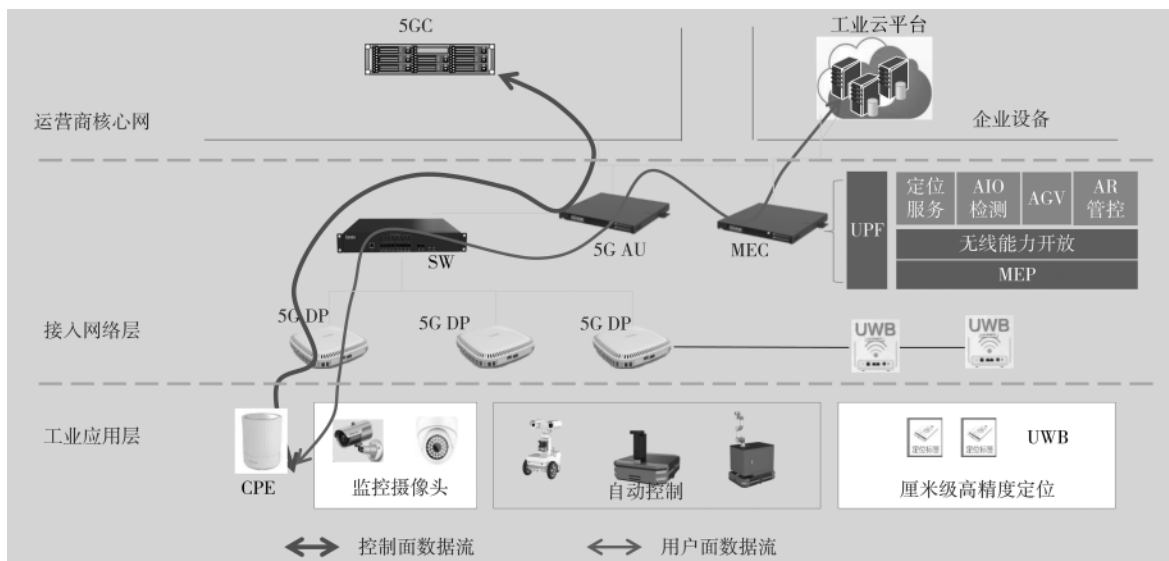


图8 5G 开放式小基站赋能智能工厂网络架构图

人脸识别、AR 远程工位指导等应用，以提高生产效率和质量，降低制造成本。本应用场景 5G 基础网络需求如下：

(1)工业的上行应用多于下行应用，因此要保证双向都需提供大带宽；

(2)企业对数据安全看得很重，设备可以管控，数据不出企业是最基本的需求；

(3)5G 网络作为生产工具的一部分，对可靠性提出更高的要求，5G 相关产品在可靠性设计方面需要得到保障。

3.1 5G 云化 AOI 检测

AOI 检测设备是检查电子设备 PCB 贴片质量的，通过拍摄设备焊接完元器件的 PCB 高清图像，进行图像分析，判断电子元器件的焊接是否完好，排除焊接短路、虚焊等不合格品。由于电子设备 PCB 板上器件小、数量多，因此人眼无法完成。传统的一体化 AOI 设备非常昂贵（一般 30 万元左右一台）。通过 5G 改造后，AOI 检测设备的前端就主要由高清摄像头和 5G 模块组成，将算

力资源集中放到边缘云侧，前端拍下的高清图像通过 5G 网络传到边缘云进行缺陷算法运算，然后反馈运算结果至前端，大幅降低 AOI 设备的部署成本。同时边缘云的算力由于资源集中调度，相比于一体化 AOI，每块 PCB 的检测效率还将提升至少 30%。

后续发展将会采用更多的云化 AOI 检测设备，并将会由二维检测向三维检测发展，即现在检测 PCB 焊接质量，后续将升级至自动检测整机的装配质量，进一步提升生产效率。

3.2 5G 云化人脸识别

在工厂的大门入口、各个车间的入口、物品运送通道，都是需要严格控制出入权限的，采用人脸识别免去人员打卡进出的繁琐，排除代打卡的安全隐患。云化的人脸识别系统就是通过实时采集人员进出的身份信息，将该身份信息上传至云端，云端进行实时的身份信息比对，进而控制进出通道。云化人脸识别前端装置是摄像头和呈现屏幕，摄像头采集的图像是通过 5G 网络回传

至边缘云进行计算,然后反馈计算结果,这与传统的人脸识别一体机相比,终端成本将降低至少 45%,同时提高权限的管理效率和提高识别算法的识别效率。

在技术演进方面,云化人脸识别系统由于运算识别都集中在云端,采集图像的前端只是完成了高清图像或者视频的采集以及结果呈现。在安全性要求更高的场合,可以通过升级后端的识别算法,由人脸识别演进至人脸识别+步态识别,可以通过云端识别算法的持续训练,不断实现更加安全、可靠的系统演进。

3.3 5G 云化机器人

通过移动机器人将柔性生产线生产完的设备根据需要送到相应的测试站,消除测试技工频繁来回推车的时间和人力成本。原先 AGV 车是采用 WiFi 信号,但是由于 WiFi 存在切换丢包、用户容量少、网络稳定性不好的问题,使得系统应用经常出现停车问题。现在 AGV 车装上 5G CPE,通过 5G 网络连接后台调度系统,解决了移动状态的可靠连接、多用户并发的实时稳定性问题。

同时,云化 vSLAM 技术逐步成熟,通过 5G 网络,基于高清摄像头+云化 vSLAM 技术的 AGV 车将逐步取代高昂成本的激光导航 AGV 车,实现降低成本至少 50%。

3.4 5G AR 远程指导

AR 远程工位指导利用 5G 网络的移动性和大带宽优势,采用 AR 眼镜提供所见即所得的现场视频,即采

用数字孪生技术进行现场的情景再现,跨区域远程指导制造现场过程中出现的问题,保障生产制造过程中的问题快速高效地得到解决,节省去现场解决问题的人力资源及相关差旅费用。

这种采用数字孪生技术的 AR 远程指导将来可以推广到非常广泛的工业场景中,实现专家时刻在现场,高效、快速地解决生产中的问题,也可解决高危环境的现场作业问题。

3.5 室内高精度定位

通过 5G 开放式小基站远端单元的 Ethernet 物理接口连接工厂已有物联网,如融合蓝牙网络、UWB 网络,可以实现高性价比的物联管理,精度从基于蓝牙的米级到基于 UWB 的厘米级定位能力,可以对工厂内人员、资产进行定位和智能盘点。通过 UWB 与叉车、通勤车的结合,可以实现工厂内的无人驾驶。

4 结论

5G 是数字经济时代的基础设施,位于我国新基建之首,其重要性不言而喻。行业应用的多样性也需要更加丰富的 5G 解决方案,基于开放平台小基站的 5G 数字室分是一种非常开放、灵活、高效的解决方案,在技术创新、场景化应用、网络建设及网络维护方面,均有其独特的优势,充分考虑产业与应用的实际结合,在提供最

(下转第 52 页)

(上接第 37 页)

5 结论

5G 正处于深入发展和产业化培育的关键时期,全球各国在国家数字化战略中均把 5G 作为优先发展领域,强化产业布局,塑造竞争新优势。国家也紧抓这一历史性新机遇,加大统筹推进力度,加快 5G 产业化进程,超前部署网络基础设施,营造产业生态环境,深化各领域融合应用,全面开创 5G 发展新局面。

5G 共建共享可以节省大量设备投资,有效提高网络设备利用效率,同时最大程度保障网络用户体验。因此,5G 阶段共建共享的必要性和战略意义凸显。室外共建共享已在全国范围内部署和试运营,并取得较好成绩。随着 5G 建设深入开展,5G 室内覆盖共建共享将迫在眉睫。

中国运营商开启了全球规模最大的 5G 共建共享网络的建设,由于属于创新型网络,没有可以借鉴的成功经验,只有在不断的发展中完善技术标准、革新技术产品。本文对 5G 室内共建共享意义、分类、技术方案、演进路线、室内外协同和干扰避免以及语音解决方案等方面进行系统化地分析和探讨,5G 室内共建共享方案是可行的,后续将着重实现应用落地。

参考文献

- [1] YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Scientia Sinica, 2014, 44(5): 551.
- [2] LIU G, JIANG D. 5G: Vision and requirements for mobile communication system towards year 2020[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 33(7): 1-8.
- [3] 张志荣, 李志军, 陈建刚, 等. 5G 网络共建共享技术研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(4): 1-5.
- [4] 李晶, 李志军, 周阅天, 等. 5G 共建共享语音业务解决方案研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(4): 6-9.
- [5] cnTechPost. China unicom and China telecom launch China's first shared 5G SA base station[OL]. (2019-12-15) [2020-06-01]. <https://cntechpost.com/2019/12/15/china-unicom-and-china-telecom-launch-chinas-first-shared-5g-sa-base-station/>.

(收稿日期: 2020-06-01)

作者简介:

张志荣(1973-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 4G/5G 移动通信技术、网络 AI、网络节能、物联网技术等。

李晶(1994-), 女, 硕士, 主要研究方向: 4G/5G 移动通信无线网络创新与研发。

李志军(1976-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 5G 网络技术与规划、4G/5G 协同组网等。

综述与评论

Review and Comment

与部署方面取得的相对优势,形成服务全球并具普惠意义的低轨卫星互联网系统。

参考文献

- [1] 尚志.全球低轨空间互联网发展与展望[J].太空探索, 2019(6): 14-17.
- [2] 尹志忠,张龙,周贤伟.LEO/HEO/GEO 三层卫星网络层间 ISL 性能分析[J].计算机工程, 2010, 46(12): 9-13.
- [3] 高瓴园,王妮炜,陆洲.卫星互联网星座发展研究与方案构想[J].中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8): 875-881.
- [4] 刘悦.新兴卫星互联网星座对传统卫星制造发展的启示[J].国际太空, 2016(11): 51-58.
- [5] 刘洁,潘坚,曹世博.低轨互联网星座业务发展趋势分析[J].中国航天, 2015(7): 17-21.
- [6] 姜文华,王学磊,曾志毅.国内外卫星互联网发展现状、风险及对策分析[J].信息通信, 2016(11): 11-12.
- [7] 翟继强,李雄飞.OneWeb 卫星系统及国内低轨互联网卫星系统发展思考[J].空间电子技术, 2017(6): 1-7.
- [8] 姜燕丽.低轨卫星互联网发展问题研究[J].数字通信世界, 2018(8): 21-22.

(上接第 43 页)

佳行业解决方案的同时尽显最优性价比,与运营商及产业生态链达到价值共赢。

参考文献

- [1] 郭希蕊,张涛,李福昌,等.中国联通 5G 数字化室分演进方案探讨[J].邮电设计技术, 2019(8): 7-11.
- [2] 周一青,李国杰.未来移动通信系统中的通信与计算融合[J].电信科学, 2018, 34(3): 1-7.
- [3] 方绍湖,李馨,卜斌龙.基于开放平台小基站的 5G 数字室分解决方案[J].电信科学, 2019, 35(7): 69-77.
- [4] 方绍湖,杨波,向伟.一种微小区基站系统、相关设备及数据处理方法:中国:201410391064.9[P].2017-12-26.

(上接第 48 页)

- [21] OLDHAM T R, SUHAIL M, FRIENDLICH M R, et al. TID and SEE response of advanced 4G NAND flash memories[C]. Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2008.
- [22] 殷亚楠. Flash 存储器单粒子效应及与总剂量的协同效应研究[D]. 兰州:中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2018.
- [23] 曹洲,薛玉雄,高欣,等. NAND Flash 存储器单粒子效应试验研究[J].空间电子技术, 2019(3): 81-86.
- [24] BAGATIN M, GERARDIN S, PACCAGNELLA A, et al. SEE tests of the NAND flash radiation tolerant intelligent memory stack[C]. 2015 IEEE Radiation Effects Data

- [9] 付毅飞. 156 颗小卫星构建天基互联网[N]. 科技日报, 2017-8-31(3).
- [10] 左赛春. 全球低地球轨道互联网卫星星座竞争格局与面临的挑战[J]. 中国航天, 2018(2): 42-45.
- [11] 全球低轨卫星移动通信与空间互联网项目落户重庆[J]. 卫星与网络, 2018(12): 74-75.
- [12] 沈永言. 5G 时代卫星通信的发展态势[J]. 国际太空, 2020(1): 48-52.
- [13] “鸿雁”星座谱写我国低轨卫星互联网建设新篇章[J]. 中国航天, 2019(2): 6-9.

(收稿日期: 2020-04-28)

作者简介:

王子剑(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向:网络通信技术。

杜欣军(1974-),男,博士,研究员,主要研究方向:软件无线电技术、软件化雷达、开放体系架构。

尹家伟(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向:计算机设计。

- [5] 中国移动边缘计算开放实验室. 中国移动边缘计算技术白皮书[R]. 2019.

- [6] 3GPP TS 23.501 V15.3.0(2018-09). Technical specification group services and system aspects; system architecture for the 5G system[S]. 2018.

(收稿日期: 2020-06-11)

作者简介:

方绍湖(1982-),男,本科,工程师,主要研究方向:移动通信小基站相关技术和产品。

罗漫江(1979-),男,硕士,工程师,主要研究方向:移动通信系统相关技术和产品。

康冬(1976-),男,本科,工程师,主要研究方向:移动通信系统网络覆盖解决方案。

Workshop(REDW), 2015.

- [25] JORDAN A, FARRIS T, HAFFER C, et al. SEE test results on a commercially designed and manufactured NOR flash[C]. European Conference on Radiation & Its Effects on Components & Systems, IEEE, 2011.

(收稿日期: 2020-03-21)

作者简介:

黄姣英(1977-),女,博士,高级工程师,主要研究方向:电子元器件可靠性试验、分析与评价。

王乐群(1996-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:元器件测试与可靠性评价, E-mail: wanglq@buaa.edu.cn.

高成(1972-),男,博士,研究员,主要研究方向:电子元器件可靠性评价、大规模集成电路测试。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所