

# 5G+智慧矿山应用中的 高可靠性保障

## High Reliability Guarantee in 5G+Intelligent Mine Application

刘 通,但德东,陈大明(中国电信股份有限公司安徽分公司,安徽 合肥 230031)

Liu Tong, Dan Dedong, Chen Daming(China Telecom Anhui Branch, Hefei 230031, China)

### 摘 要:

针对5G+智慧矿山应用在信号覆盖、网络速率、传输时延、网络运行等方面对5G网络提出的高可靠性需求,结合现网项目实践,验证了超级小区技术可有效应对同频干扰、频繁切换、重叠覆盖等问题,1D3U技术可以提供更高的上行速率,UPF下沉+部署MEC、合理规划BBU所属AAU覆盖区域等可有效降低数据传输时延,双层组网技术可以在提供更优质5G网络服务的同时提供高等级的网络运行保障,对于5G+智慧矿山应用的复制推广具有重要意义。

### 关键词:

智慧矿山;高可靠性;超级小区;1D3U;低时延;双层组网

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.02.015

文章编号:1007-3043(2025)02-0083-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

In view of the high reliability requirements for 5G network in terms of signal coverage, network speed, transmission delay, network operation, etc. in 5G+smart mine application, combined with the practical verification of existing network projects, it is verified that super cell technology can effectively cope with the reliability challenges of 5G network coverage, such as co-frequency interference, frequent handover, overlapping coverage, etc., 1D3U technology can provide higher uplink rate, MEC and UPF sinking, reasonable planning of AAU coverage area of BBU, etc. can effectively reduce data transmission delay, double-layer networking technology can provide high-quality 5G network services while providing high-level network operation guarantee, which is of great significance for the replication and promotion of 5G+smart mine applications.

### Keywords:

Smart mine; High reliability; Super cell; 1D3U; Low latency; Double-layer networking

引用格式:刘通,但德东,陈大明. 5G+智慧矿山应用中的高可靠性保障[J]. 邮电设计技术, 2025(2): 83-87.

## 0 引言

2021年7月,工业和信息化部等10部门联合出台《5G应用“扬帆”行动计划(2021—2023年)》,大力推动5G全面发展,深入推进5G赋能千行百业,打造一批“5G+”新业务、新模式、新业态,为数字经济注入新动能。矿山行业在远程操控、视频监控、矿车无人驾驶等5G+智慧矿山场景进行了大量有益探索<sup>[1-3]</sup>,5G网络服务的高可靠性是确保5G+智慧矿山应用稳定运营的重要基础,本文结合实践案例对5G+智慧矿山应用中

的高可靠性保障进行了深入分析和研究。

## 1 5G+智慧矿山应用的高可靠性需求

在智慧矿山应用中,5G网络承载了传感器监测、视频监控、远程控制及自动驾驶等高等级智能化应用<sup>[4-5]</sup>,本文以最具代表性的5G无人驾驶矿卡应用为例,分析其对5G网络的高可靠性需求及带来的挑战。

### 1.1 5G信号覆盖可靠性

无人驾驶矿卡需要5G网络的全程支持,要求在作业区域5G信号连续覆盖,信号强度和应稳定保持在较好水平,可提供稳定可靠的5G网络服务。

无人驾驶矿卡作业区域一般较开阔,但无论是从

收稿日期:2024-12-30

高处往下开采的山体型,还是从地面往下挖掘的地面型,不同作业面都存在高度差,且通常采用多个作业面同时梯次开采的模式,因此无人驾驶矿卡作业区域往往散布在不同高度作业面且地形随着开采进度不断变化,其对5G网络信号覆盖可靠性带来的挑战主要包括以下几点。

a) 5G信号的连续覆盖挑战。因山体遮挡,信号覆盖阴影效应明显,在阴影区信号覆盖较弱<sup>[6]</sup>,而开采面恰好处于阴影区,是无人驾驶矿卡重要作业区,必须提供良好的5G信号覆盖。

b) 5G信号的同频干扰挑战。除不同高度开采面带来的遮挡阴影外,矿区总体上较为空旷,不同基站信号很难避免重叠覆盖,重叠覆盖区域往往伴随着小区间的同频干扰,对信噪比影响较大<sup>[7]</sup>。

c) 5G信号的不确定性挑战。因矿山处于持续的开采过程中,开采面对信号的遮挡也在持续变化,经过一段时间累积,矿山的地形可能发生明显变化,这意味着前期的射频信号优化可能无法适应新地形要求,需要重新调整小区天线主覆盖区域以及切换关系等无线参数<sup>[8]</sup>。

## 1.2 5G网络速率可靠性

为满足无人驾驶矿卡在作业过程中现场视频、传感器数据的实时回传需求,需要较高的上行速率,对基站小区总上行带宽、单车单卡上行速率均有较高要求,其对5G网络速率的可靠性带来如下挑战。

a) 5G网络高速率挑战。5G网络主流双工方式为时分双工(TDD),上下行以时分复用方式共享频率带宽<sup>[9-10]</sup>,通常所说的5G高速率更多的是针对下行速率而言。以中国电信3.5 GHz频段100 MHz带宽为例,上下行时隙配比为3:7,以2T4R终端为例,理论上其下行峰值速率可达1.58 Gbit/s,但上行峰值速率仅382 Mbit/s。由此可见,公网配置更适合个人用户(2C用户)高下行速率需求,但很难满足企业用户(2B用户)实时视频回传等业务的高上行速率需求。

b) 5G网络速率稳定性挑战。5G无线网采用经典蜂窝架构组网,无线信号强度随着与基站距离的增加逐步衰减,相应的网络速率也同步下降。同时,在基站小区边缘重叠覆盖区域内的同频干扰、小区间切换等进一步加剧了网络速率的劣化和波动。

## 1.3 5G传输时延可靠性

无人驾驶矿卡控制消息实时交互对上、下行时延均有较高要求,以40 km/h的速度为例进行测算,矿卡

每前进1 m仅耗时91 ms,为确保无人驾驶矿卡安全运行,尤其是特殊情况下人工远程接管时,控制指令的下发时延应小于100 ms,最好能达到10+ ms级,其对5G网络传输时延带来如下挑战。

a) 端到端10+ ms级时延挑战。5G公网数据传输路径为“业务平台↔互联网链路↔省级核心网↔承载网链路↔基站↔终端”,路径长、环节多,时延控制难度极大,需要尽可能缩短路径、减少中间环节。

b) 无线侧时延稳定性挑战。由于5G信号覆盖或负荷波动带来速率波动,会间接引起时延波动。同时,在进行基站小区间切换时,切换过程也会引入一定时延,倘若出现频繁切换、切换失败等异常事件则影响被进一步放大。

## 1.4 5G网络运行可靠性

无人驾驶矿卡对数据丢包容忍度较低,如果出现连续大量丢包或网络中断,可能导致无人驾驶矿卡停车,其对5G网络运行带来如下挑战。

a) 基站设备长期稳定运行的挑战。5G基站由基带处理单元(BBU)、有源天线处理单元(AAU)或射频拉远单元(RRU)组成,单个AAU/RRU故障可能导致该AAU/RRU覆盖区域出现覆盖空洞或弱覆盖,同时对小区间切换带来不利影响;若BBU故障,可能导致该BBU下挂的部分或全部AAU/RRU退服,影响范围更大。

b) 承载网和核心网长期稳定运行的挑战。基站通过承载网上联至核心网,通常来讲承载网会成环保护,同时中断导致基站退服的概率较小,但承载网设备或链路出现的丢包、抖动等隐性问题更值得关注。5G核心网具有冗余保护机制,关键网元一般通过池化(Pooling)方式保护,相对来说风险较小。

## 2 5G+智慧矿山应用可靠性保障技术

针对上述分析的5G+智慧矿山应用在信号覆盖、网络速率、传输时延、网络运行等方面对5G网络提出的可靠性挑战,本文开展了可靠性保障技术研究,并在现网项目中进行了实践应用,验证了相关技术的可行性和有效性。

### 2.1 超级小区技术

超级小区(Super Cell)是将2个或更多小区组合成一个逻辑小区,进行统一的资源调度<sup>[11]</sup>(见图1)。未进行组合前的小区称为普通小区;组合后,普通小区转换为超级小区的组成部分,被称作CP(Cell Por-

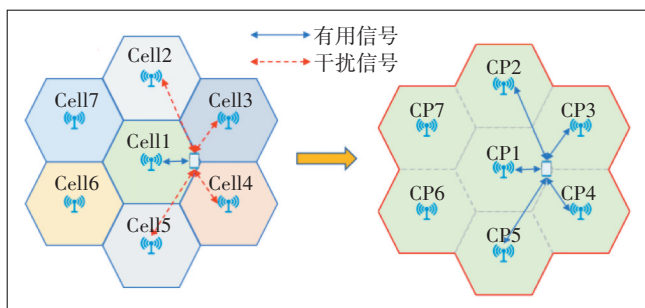


图1 超级小区技术原理

tion)。超级小区内的CP具有相同的小区号(Cell ID)和公共信道。

目前尚未实现多个AAU联合波束调度和赋形,当前超级小区仅支持RRU设备,限制了超级小区技术在公网的应用,但其较好地匹配了5G+智慧矿山场景的应用需求,其主要优势有:

a) 有效降低同频干扰,提高信噪比。超级小区内多个CP属同一个逻辑小区,故多个CP间不存在小区间干扰问题。超级小区内不同CP间的边缘用户,可采用多个CP上行联合接收/下行联合发射的方式,将CP间重叠覆盖变害为利,分集增益显著改善了边缘重叠区域信号质量。

b) 减少小区间切换,避免频繁切换尤其是切换失败带来的时延影响。超级小区不存在内部多个CP间切换,切换主要发生在超级小区与周边小区的切换,可有效减少切换次数及切换失败风险。

c) 有利于射频信号覆盖优化。当采用多个普通小区覆盖时,需要持续跟踪开采面的变化并及时调整小区主覆盖方向,尽量确保开采面处于小区主覆盖区域,避免开采面处于小区边缘重叠覆盖区域,带来同频干扰、频繁切换等影响。采用超级小区覆盖时,内部多个CP协同覆盖,重叠覆盖变害为利,在矿区覆盖优化完成后如无重大变化无需频繁调整。

d) 有利于提升频谱效率。超级小区包含了多个CP的覆盖范围,范围更大、更广,更有利于满足多用户MIMO(MU-MIMO)空间信道相关性条件,提升MU-MIMO配对成功概率,通过多终端复用相同时频资源,提升频谱效率<sup>[12]</sup>。

在具备上述优势的同时,超级小区技术因将多个逻辑小区合并为1个逻辑小区,相应的空口容量也变成1个逻辑小区容量,从而带来区域总容量的降低,在应用时需根据无人驾驶矿卡同时作业的数量、在矿区的分布情况、矿卡作业路线及调度机制等,合理规划

超级小区合并方案,避免大量矿卡同时聚集在一个超级小区覆盖范围内。

以某5G+智慧矿山实践应用为例,在原32T32R AAU设备组网基础上,再部署一套8T8R RRU设备组网,采用相同的工程参数和配置,8T8R RRU应用超级小区技术,将12个8T8R逻辑小区合并为1个超级小区。8T8R超级小区开通后,与原32T32R网络相比,无线覆盖质量和上行速率均明显提升(见表1和图2)。

表1 8T8R超级小区与32T32R普通小区测试指标对比

小区类型	RSRP 均值/ dBm	RSRP< -90 dBm 比例/%	SINR 均值/ dB	上行平均 速率/ (Mbit/s)	上行<30 Mbit/s 比例/%
8T8R 超级小区	-65	0.00	26.88	129.10	0.19
32T32R 普通小区	-78	7.31	17.39	119.96	0.84

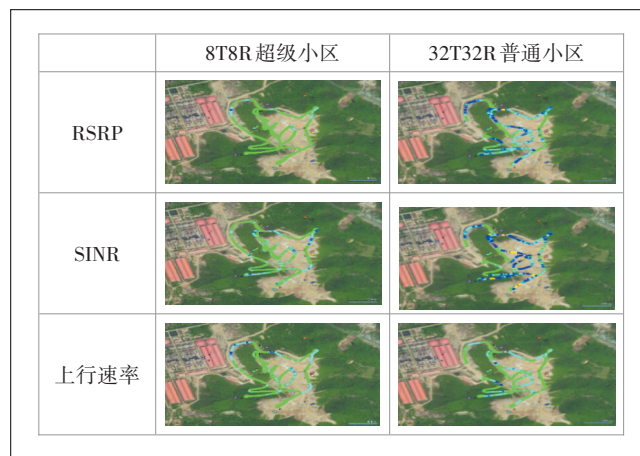


图2 8T8R超级小区与32T32R普通小区测试图层对比

## 2.2 1D3U技术

以某运营商5G网络3.5 GHz频段为例,当前上下行时隙配比为3:7,即5个下行时隙+2个特殊时隙+3个上行时隙(5D3U),特殊时隙符号配比为8:4:2,上行符号占比仅为32.86%。1D3U技术通过调整上下行时隙配比,将更多的时频资源用于上行业务调度,上行符号占比达62.86%,上行速率提升约50%,更好地满足5G+智慧矿山应用中视频回传等业务对上行速率的差异化需求(见图3)<sup>[13-15]</sup>。

由于其时隙结构与公网不同,在5D3U与1D3U交界区域,因基站发射功率远高于终端发射功率,在同一时刻基站下行发射D时隙将对另一侧终端上行发射U时隙产生干扰,因此1D3U技术应用时需要注意规避交界区域上下行干扰问题,在同频部署时应选择封闭的室内场景,或采用为1D3U基站配置专用频点的异



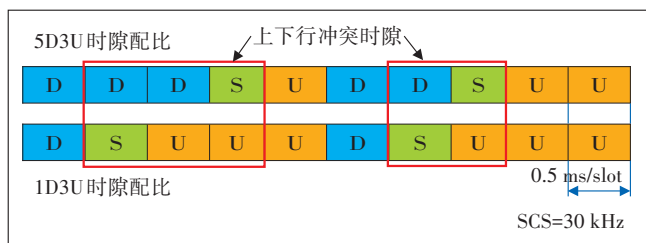


图3 5D3U和1D3U时隙结构对比

频方式部署。

在现网选择异频封闭、异频非封闭、同频非封闭场景分别进行试点验证,测试结果表明:在异频部署情况下,无论是否封闭均能取得较好效果;在同频非封闭场景,下行速率降低幅度与异频场景相当,但上行速率提升幅度较小。

a) 异频封闭场景。上行速率由 140.5 Mbit/s 提升至 273.7 Mbit/s,提升了 94.8%;下行速率由 380.3 Mbit/s 下降至 152 Mbit/s,下降了 60.0%。

b) 异频非封闭场景。上行速率由 182.3 Mbit/s 提升至 352.7 Mbit/s,提升了 93.5%;下行速率由 616.6 Mbit/s 下降至 274.8 Mbit/s,下降了 55.4%。

c) 同频非封闭场景。上行速率由 172.2 提升至 215.7 Mbit/s,提升了 25.3%,下行速率由 483.2 Mbit/s 下降至 189.7 Mbit/s,下降了 61%。

### 2.3 低时延技术

数据传输时延主要包括传输路径时延和设备处理时延,其中传输路径是关键的可优化环节,常见解决方案是用户数据面功能实体(UPF)下沉和部署多接入边缘计算(MEC),使数据不经公网转发,在基站侧就近接入园区应用系统,有效缩短传输路径<sup>[16-18]</sup>。

某运营商5G定制网的模式2和模式3均提供此解

决方案(见图4),在某5G+智慧矿山案例实践应用中,无人驾驶平台数据传输时延由 26 ms 优化至 11 ms,改善幅度达 57.7%。

基站侧布局对时延也有一定程度的影响,频繁切换、切换失败、不同切换方式等均有可能引起时延波动。5G切换方式可按小区BBU归属分为同一BBU内的小区切换、跨BBU的小区切换。BBU内切换和跨BBU切换在空口侧信令流程完全一致,但跨BBU切换相比BBU内切换,在后续BBU侧还需进行Path Switch切换流程,用于变更NG-U数据面,重新建立切换后新基站和UPF的数据隧道。

在某5G+智慧矿山案例实践测试中,跨BBU切换时延约为 70 ms,比BBU内切换时延增加约为 20 ms,因此在规划5G基站覆盖区域时,应尽量将同一BBU下的AAU(或RRU)连续成片覆盖,避免出现BBU所属覆盖范围交叉,以减少跨BBU切换,降低切换对时延的影响。

### 2.4 双层组网技术

为保障5G网络的安全稳定运行,在特别重要区域可以部署5G双层网络,优先考虑异频、共址方式部署,2层网络差异化应用上述技术,在日常运营时分别承载不同业务,紧急情况下可由一层网络接管全部业务<sup>[19-20]</sup>。

以某运营商5G频段为例,2层网络分别采用3.4、3.5 GHz异频部署,其中3.4 GHz使用8T8R基站设备,与公网异频,部署超级小区技术,具备部署1D3U大上行条件,主要承载无人驾驶矿卡业务;3.5 GHz使用32T32R基站设备,与公网同频,主要承载2C用户以及车载日志回传等其他2B业务。

在双层网络部署基于业务的迁移技术实现上述

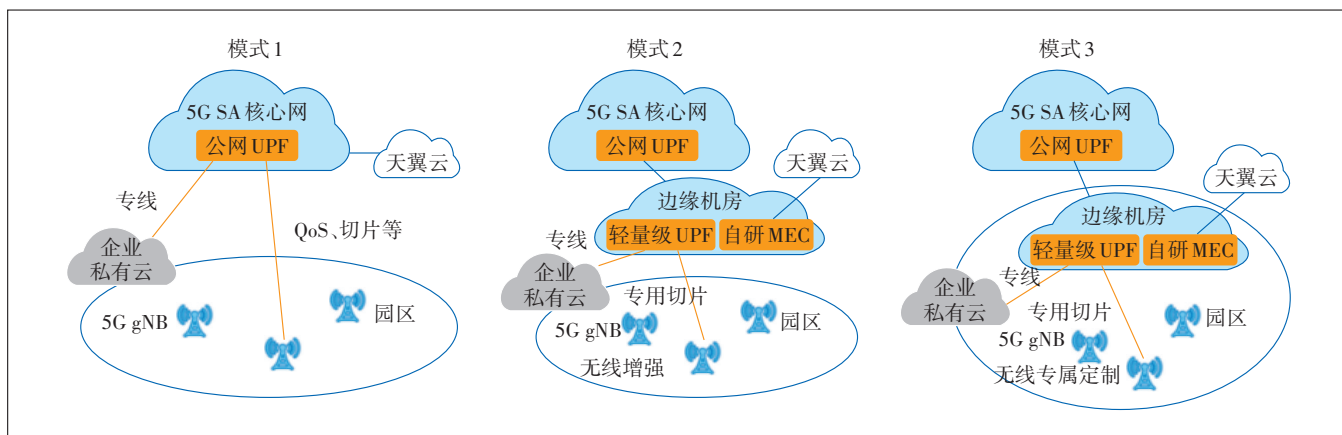


图4 某运营商5G定制网3种模式组网结构

策略。基于业务的迁移支持为每一种切片或5G QoS等级(5QI)配置对应的异频或异系统迁移目标频点组。当开通此功能时,基站会监控终端的业务状态,如果终端的业务(切片或者5QI)发生变化,则基站触发终端向目标频点组的迁移过程,将终端迁移到对应的目标频点,实现业务分层。

在某5G+智慧矿山项目实践中,双层网络业务迁移策略配置为:32T32R重选优先级高于8T8R网络,空闲态所有用户优先驻留在32T32R网络;在32T32R网络上部署基于业务的迁移,通过5QI+切片实现2B用户迁移至8T8R网络上,2C用户留在32T32R网络上,达到业务分层、避免2C用户影响2B用户的目的(见图5)。

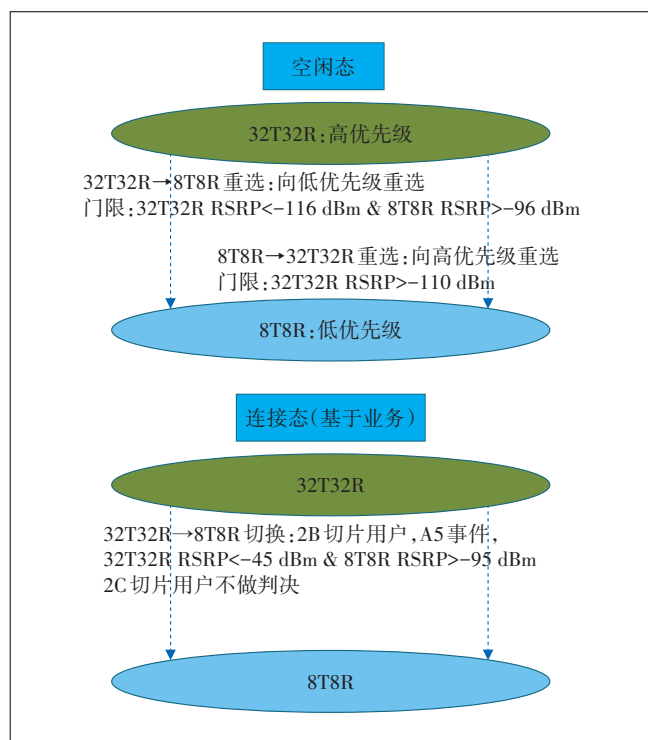


图5 双层网络业务分层策略

### 3 结束语

5G+智慧矿山是5G赋能千行百业的典型应用,系统的平稳运营和企业安全生产要求5G网络在信号覆盖、网络速率、传输时延、网络运行等方面提供高可靠性保障,通过项目实践验证,超级小区、1D3U、低时延、双层组网等技术在适用场景下取得了较好的应用效果,为5G+智慧矿山应用的深入推广和迭代创新提供了有力支撑,具有较好的可复制性和实用性。

### 参考文献:

- [1] 程恩旺,杨芳震. 5G助力智慧矿山数字化转型[J]. 通信世界, 2022(6):45-46.
- [2] 任朝恩. 基于5G无线网络技术的智慧矿山方案研究[J]. 电视技术, 2022,46(4):156-158.
- [3] 柳东林,任志刚,王鹏,等. 工业5G蜂窝无线技术在智慧矿山的应用[J]. 装备制造技术, 2022(8):29-33.
- [4] 刘昕,付元,李晨鑫. 5G特性在智慧矿山中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2022,48(10):136-141.
- [5] 盛国庆,殷亮子. 浅析露天矿山无人驾驶矿卡的维护与管理[J]. 工程机械与维修, 2022(5):21-23.
- [6] 魏文. 移动通信系统中电波传播模型的研究与应用[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
- [7] 李斌杰,耿鲁静,张斌,等. 5G重叠覆盖对网络性能影响的研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2022,35(11):51-54.
- [8] 康宏建. 聚焦5G波束覆盖优化提升客户感知[J]. 中国电信业, 2022(4):78-80.
- [9] 柯颖,宋兴华,王飞,等. 5G双工演进技术研究[J]. 电信科学, 2022,38(10):140-152.
- [10] 王婧. 5G移动通信网络用户带宽和时隙资源最优配置问题研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2019.
- [11] 章勋. 超级小区合并技术在高铁场景中的研究与应用[J]. 长江信息通信, 2021,34(10):156-158.
- [12] 李新玥,杨艳,张涛. 5G MU-MIMO关键技术和性能研究[J]. 邮电设计技术, 2019(12):46-51.
- [13] 孔磊,周雷,吴频,等. 5G+智慧矿山中的上行关键技术[J]. 移动通信, 2022,46(8):92-98.
- [14] 龚艳萍. 5G上行增强技术的比较浅析[J]. 电信科学, 2020(S01):4.
- [15] 张勃,秦小飞,冯毅,等. 5G专网无线能力提升技术研究[J]. 邮电设计技术, 2021(10):9-12.
- [16] 曹仰忠. 5G专网在智慧矿山的应用[J]. 电信快报, 2022(11):10-13.
- [17] 任朝恩. 基于5G无线网络技术的智慧矿山方案研究[J]. 电视技术, 2022,46(4):156-158.
- [18] 刘海鹏,周淑秋. 多接入边缘计算在智慧矿山网络中应用分析[J]. 工矿自动化, 2022,48(3):26-31.
- [19] 雷志勇. 5G三频混合组网在西湾露天煤矿智能化建设中的应用[J]. 露天采矿技术, 2022,37(3):64-67.
- [20] 马小龙,雷健,王晓琦. 基于三频组网的4.9 GHz时隙翻转技术在西湾煤矿的应用[J]. 控制与信息技术, 2022(5):101-105.

#### 作者简介:

刘通,毕业于西安电子科技大学,高级工程师,学士,主要从事无线网络优化、无线大数据分析、无线IT支撑系统建设等工作;但德东,毕业于合肥工业大学,硕士,主要从事5G无线网络的优化、5G行业专网支撑等工作;陈大明,毕业于安徽大学,工程师,硕士,主要从事5G无线网络的优化工作。