

移网结构调优 提升调制解调效率技术研究与应用

Research and Application of Optimizing Mobile Network Structure to Improve Modulation and Demodulation Efficiency Technology

梁松柏, 郭颖悟, 孙慧珠, 李婷婷 (中国联通河南分公司, 河南 郑州 450008)

Liang Songbai, Guo Yingwu, Sun Huizhu, Li Tingting (China Unicom Henan Branch, Zhengzhou 450008, China)

摘要:

如何科学高效地优化网络结构,降低重叠覆盖,从而提升调制解调效率,提高质量和容量成为当今无线通信领域面临的重要挑战之一。采用理论研究、干扰矩阵关联分析、数字孪生技术等手段,高效发现、定位、解决重叠覆盖问题,快速提升调制解调效率。研究了重叠覆盖分析方法,助力移动无线网络智能调优,最终形成一套标本兼治、提升调制解调效率和网络质量容量的优化体系,已在业界快速推广应用。

关键词:

5G; 调制解调; 聚类; 干扰矩阵; 天线寻优

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.03.009

文章编号: 1007-3043(2025)03-0048-06

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:

How to scientifically and efficiently optimize network structure to reduce overlapping coverage and improve modulation and demodulation efficiency, thereby improving quality and capacity, is a major challenge faced by operators. It adopts theoretical research, interference matrix correlation analysis, digital twin technology and other means to efficiently discover, locate, and solve overlapping coverage problems, and quickly improve modulation and demodulation efficiency. It studies the overlapping coverage analysis method to assist in intelligent optimization of mobile wireless networks, ultimately forming an optimization system that addresses both the symptoms and root causes, improves modulation and demodulation efficiency, and enhances network quality and capacity, and this system has been rapidly promoted and applied in the industry.

Keywords:

5G; Modulation and demodulation; Clustering; Interference matrix; Antenna feedback optimization

引用格式: 梁松柏, 郭颖悟, 孙慧珠, 等. 移网结构调优提升调制解调效率技术研究与应用[J]. 邮电设计技术, 2025(3): 48-53.

1 概述

在无线通信中,调制解调技术发挥着至关重要的作用。其主要功能是将多个基带信号迁移至不同的载频,从而实现多路复用,进而提升空口信道的利用率。更高效的调制解调有助于更充分地利用频谱资源。从系统角度来看,调制解调过程是一个闭环,涉及到调制、解调、反馈和再优化等步骤。在5G^[1-2]技术

中,低阶调制主要依赖于相位调制,而高阶调制则结合了振幅和相位键控。随着调制阶数的提高,归一化因子会相应减小。解调作为调制的逆过程,其效率同样影响到频谱的利用率;因为高阶调制信号在解调端信号复原所需的信噪比增加。

提高信噪比是提升调制解调效率的一种有效方法。信噪比是指信号与噪声之间的比值,它反映了信号在传输过程中受到的干扰程度。当信噪比较低时,信号会被噪声淹没,导致解调出错或误码率增加;而当信噪比较高时,信号的传输质量会得到显著提升,

收稿日期: 2025-02-10

从而可以更好地进行调制解调, 提高系统的整体效率。当前运营商网络中影响无线网信噪比的主要因素是网络结构不合理导致的重叠覆盖。如何科学高效地优化网络结构, 降低重叠覆盖, 进而提升调制解调效率, 提高质量和容量是本文研究的重点。

2 重叠覆盖对调制解调影响分析

2.1 调制解调定义

调制就是把信号形式转换成适合在信道中传输的一个过程, 可分为基带调制和载波调制。本文所讨论的是载波调制, 载波调制就是把调制信号骑到载波上, 方法就是用调制信号去控制载波参数, 使载波的1个参数或者几个参数按照调制信号的规律变化。

调制在无线通信中有如下3个主要作用。

a) 无线传输中, 天线的尺寸一般是电磁波波长的1/10左右, 基带信号通常包含较低频率的分量, 通过载波调制至高频, 就可以提高发射效率。

b) 将多个基带信号分别搬移到不同的载频上, 可实现多路复用, 提高信道利用率。

c) 扩展信号带宽, 提高系统抗干扰能力。

2.2 无线通信中常用的调制方式

2.2.1 调制方式演进

从3G到5G, 数据信道的调制方式演进如表1所示。

表1 不同制式下的调制方式

3G	4G LTE	5G NR
QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	$\pi/2$ -BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM

表1中的调制方式针对的是数据信道(PUSCH/PDSCH), 对于控制信道、广播信道等会有差别。

4G/5G网络中的低阶调制PSK(Phase Shift Keying), 无论是QBPS还是 $\pi/2$ -PSK都是仅相位调制。

对于5G NR, 设定256QAM是为了提高系统容量, 设定 $\pi/2$ -BPSK是为了提高小区边缘的覆盖(仅在transforming precoding启用时可以采用)。

2.2.2 调制映射的公式

最新版的5G协议3GPP TS 38.211^[3]第5.1节中给出了调制映射公式。在传输过程中, 调制方式可能会发生变化。为了使所有映射有一样的平均功率, 需要对映射进行归一化。映射后的复数值乘上一个归一化的量, 即可得到输出数据。如表2所示, 归一化因子

表2 调制归一化因子

调制方式	归一化因子
BPSK	$1/\sqrt{2}$
QPSK	$1/\sqrt{2}$
16QAM	$1/\sqrt{10}$
64QAM	$1/\sqrt{42}$
256QAM	$1/\sqrt{170}$

的值根据不同的调制模式而不同。

2.3 信噪比对调制解调的影响

2.3.1 星座图

星座图是由相位和幅度共同绘制。以QPSK调制为例, 由于幅度固定仅有相位变化, 所以在星座图中坐标点都是分布在一个圆上。MQAM调制, 由于幅度相位均变化, 所以在星座图中坐标点都是分布在多个圆上。

星座图展示了QAM^[4]格式中比特率与符号率之间的关系。比特率是指单位时间内所处理或者传递的比特位的个数, 符号率是指单位时间内所能发送的符号数。比特率= $(\log_2 S) \times$ 符号率, S为星座图上的点数。信号调制带宽与符号率有关。以16QAM格式为例, 每个符号表示着4个二进制位的一种可能组合。对于这4个二进制位来说, 总共可能有16个组合。换言之, 每个16QAM符号可以表示4个二进制位的一种组合。而对于32QAM制式每个符号表示5个二进制位, 所以不同的调制方式的比特率不同(见图1)。

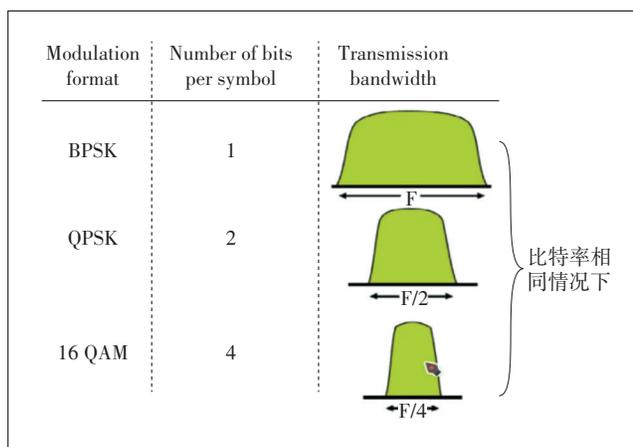


图1 不同调制方式的传输带宽

选择高阶调制提升了比特率, 提高了带宽利用率, 但减小了2个星座图点之间的距离。

2.3.2 噪声功率对星座图的影响

在噪声的作用下^[5-6],星座图上的信号点会形成一个“云团”(见图2),当接收机判决时,将受干扰的采样点与码元门限进行比较判断,随着噪声的增加,受干扰的信号点可能会“跨越”门限,形成误判。调制阶数越高,2个码点之间的间距越小,则对信噪比的要求也越高。

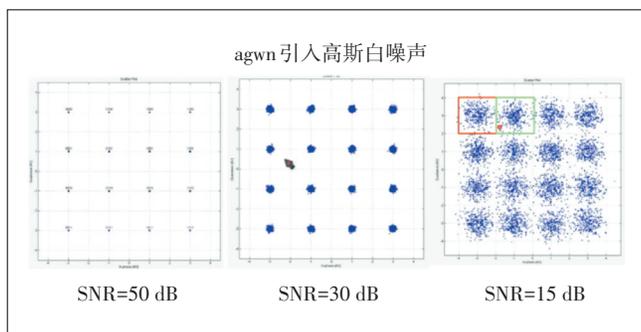


图2 白噪声对星座图的影响

2.4 重叠覆盖与信噪比关系

重叠覆盖样本定义:在服务小区电平值大于等于-105 dBm的情况下,若终端实测上报的网络信号数据单(样本)存在邻区电平减去服务小区电平的绝对值小于等于6 dB的情况;且这样的邻区个数大于等于3时,则认为该样本为重叠覆盖样本。

则干扰大小顺序为:存在3个这样的邻区<存在4个这样的邻区<存在5个这样的邻区……

结论:通过对重叠覆盖邻区数分析,随着强干扰邻区数量的增加,低阶调制占比越来越高,表明重叠覆盖度越高,信噪比越差(见表3)。

在实际的网络环境中,重叠覆盖区域广泛存在,导致信噪比变差,进而影响了调制解调的效率。此

表3 重叠覆盖与CQI关联分析

邻区电平 - 服务小区电平 ≤ 6 dB的邻区数	CQI0-6 占比/%	CQI0-6 采样点	总采样点
0	2.15	1 950	90 808
1	9.72	4 654	47 905
2	21.97	3 930	17 886
3	38.97	2 269	5 822
4	55.68	1 009	1 812
5	69.06	337	488
6	80.67	96	119
7	92.86	39	42
8	100.00	11	11
9	100.00	1	1

外,目前缺乏系统性的方法来进行重叠覆盖的优化分析,这成为通信行业长期面临的一大难题。

3 聚类算法精准识别重叠覆盖区域

3.1 利用指纹库算法填充MRO经纬度

MR的全称是“Measurement Report”,即测量报告。在无线通信中,MR记录了UE在业务保持过程中的服务小区/邻区ID、RSRP、RSRQ、TA、AOA、CQI、MCS、PHR等无线测量信息。

将MR数据赋予位置信息,并利用具备位置信息的MR数据进行GIS渲染,是无线网规网优的常用方法,它可以帮助网规网优工程师更全面、准确地评估和分析网络,提升工作效率。基于MR信息提供室外高精度定位能力,也可满足对定位精度要求较高的场景的需求,构建围绕位置信息的流量热力、人口分布、人群迁徙、职住全景等服务能力,满足公共安全、智慧旅游、城市规划、区域价值评估等行业客户需求。

通过对全省数据进行结构化,以及训练一个RF模型,验证当前数据的整体平均定位精度。当模型调优至一定精度后即可进入第2阶段,实施MR数据的定位。为了构建更加精确的位置能力,采集MR数据,建好数据模型,并基于定位算法输出用户经纬度,计算全省定位的平均精度。整个方案通过spark任务实现。

数据训练情况如下。

a) 区分室外及室内数据(根据位移、移动方的建筑物数据库等区分)。

b) 区分高、中、低3种不同级别精度的数据。

c) 尽量使用高精度数据,数据量不足时再使用中精度数据。

d) 机器学习模型^[7]先考虑使用室外高精度数据,达到一定验证精度后再考虑加入室内高精度数据混合建模。

3.2 采用Postgresql将MRO数据进行栅格化

MRO数据量巨大,使得传统数据库难以实现快速查询。本文通过分布式数据库Postgresql,将海量轨迹数据用空间索引的形式存储在具有多备份且安全的分布式集群上。然而传统分布式数据库并不直接支持空间索引,为此需要通过Postgresql为MRO数据设计特殊的行键结构,才能取得更佳查询效率。

通过建立XZ2T索引,能高效地管理类似MRO点。如图3所示,XZ2T索引按照固定顺序,并通过XZ2索引将经纬度空间范围映射到50×50栅格区域中,然后

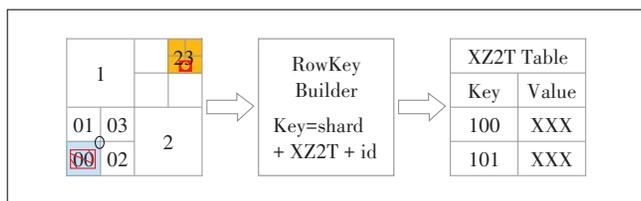


图3 XZ2T索引

再组合采样点编号和栅格编码值为存储键,再将其键和数据存储在分布式数据库中以进行重叠覆盖率计算操作。

对每个栅格内的采样点计算栅格重叠覆盖率:

$$\text{栅格重叠覆盖率} = \frac{\text{栅格}(50 \times 50 \text{ m})\text{中重叠覆盖度} \geq 3\text{的采样点数}}{\text{总采样点数}} \times 100\% \quad (1)$$

对于栅格(50×50 m)中MR总数大于等于3且栅格重叠覆盖率大于等于20%的栅格标记为高重叠覆盖栅格。

3.3 基于DBSCAN算法对重叠覆盖栅格聚类

使用Python编程和DBSCAN密度聚类算法对高重叠覆盖栅格进行聚类,其中eps=100 m, min_samples=500个,具体算法如下:

a) 选取任意一个点,然后找到到这个点的距离小于等于eps的所有点。如果距起始点的距离在eps之内的数据点个数小于min_samples,则这个点则被标记为噪声。如果距离在eps之内的数据点个数大于min_samples,则这个点被标记为核心样本,同时被分配一个新的簇标签。

b) 访问该点的所有邻点(在距离eps以内)。如果它们还没有被分配一个簇,则将刚创建的新的簇标签分配给它们。如果它们是核心样本,那么就依次访问其邻点,以此类推,簇逐渐增大,直到在簇的eps距离内没有更多的核心样本为止。

c) 选取另一个还未被访问过的点,重复相同的过程。

以某城区MRO数据为例(见图4),利用上述方法共生成重叠覆盖距离区域107个,准确率为98%。

4 重叠覆盖区域中高干扰贡献度小区识别

4.1 干扰贡献度

通过重叠覆盖集中区域的精准识别,将高干扰栅格的集中区域汇聚,然后计算各小区的干扰贡献度,以此来衡量小区对网络中其他小区的干扰情况,干扰

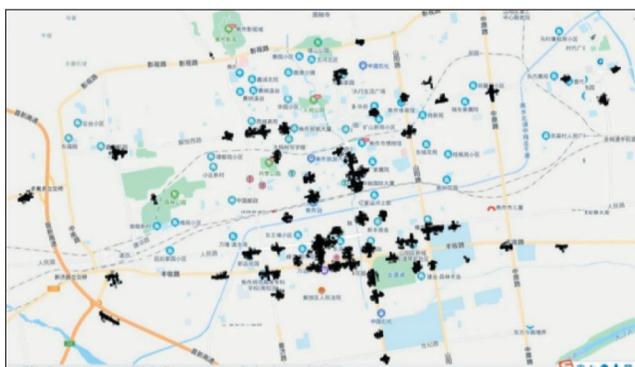


图4 某城区聚类重叠覆盖集中区域

贡献度越大的小区,表示对重叠覆盖影响较大,可作为网络进一步优化调整的参考。干扰贡献度计算原理示意如图5所示。

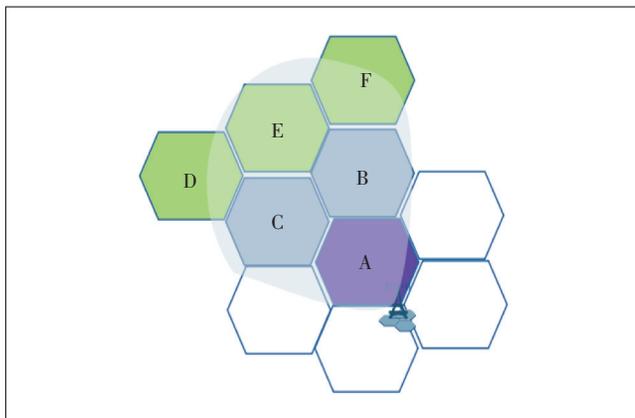


图5 干扰贡献度计算原理示意

图5中A块是服务小区主覆盖区域,B、C、D、E、F为被重叠覆盖干扰的区域。

定义小区的干扰贡献度c为:

$$c = \frac{b}{x + y} \quad (2)$$

其中,b表示该小区作为重叠覆盖小区列表中邻区的采样点数量,x表示该小区作为主服务小区的采样点数量,y表示该小区作为重叠覆盖小区列表中邻区的采样点数量。

按照小区干扰贡献度大小,列出干扰贡献度TOP小区(严重等级),小区的干扰贡献度越高,作为干扰邻区的采样次数越多,重叠覆盖越严重。

4.2 干扰矩阵

通过邻区终端上报的MR数据中包含的PHR信息(终端的发射功率余量,用于计算终端发射功率)和测量到的受干扰小区的RSRP值,计算邻区终端上行信

号到受干扰小区的信号强度:

上行干扰信号强度=邻区终端上行发射功率-
终端到受干扰小区路损(路损通过测量到的受干扰
小区的RSRP计算) (3)

然后将邻区下所有终端对受干扰小区产生的上行干扰强度进行叠加,最终得出各邻区的上行干扰对受干扰小区的影响因子,即上行矩阵。可据此对网络结构进行调整。

图6所示为干扰示意。

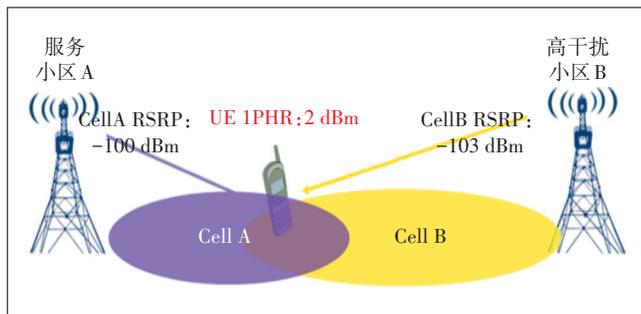


图6 干扰示意

具体计算方法如下。

通过MR中的PHR干扰余量计算邻区(服务小区)终端发射功率:

$$TxPower \approx 23 - PHR \quad (4)$$

通过MR中的RSRP和功率配置计算高干扰小区路径损耗:

$$PL = RxPower - RSRP \quad (5)$$

得出邻区对干扰小区的上行干扰量:

$$N_a = TxPower - PL \quad (6)$$

重复上述计算,得到邻区的所有终端对高干扰小区的上行干扰量,求和: $\sum N_a$ 。

计算高干扰小区的所有邻区对其上行干扰量,计算干扰系数 σ ,输出干扰矩阵:

$$N = \sum N_a + \sum N_a + \dots \quad (7)$$

$$\sigma = \left(\sum N_a \right) / N \quad (8)$$

5 重叠覆盖度分析

分析数据主要来源于路测数据(见表4)和MR文件(见表5)。无论是数据还是MR文件,基本的数据源采样终端(路测终端、MR采样用户终端)采集到的采样点数据包括主服务小区信息、邻区信息、位置信息等。故在分析数据源时,采样点是统一的。

基于上述分析数据,输出重叠覆盖小区、重叠覆盖栅格和小区干扰贡献度。

表4 基于路测数据的输入

longi-tude	latitude	Data-Time	Carrier-Freq	Serving RSRP	Serving PCI	ECI(eNode-BID/CELLID)	1st PCI in Neighboring Cells	1st RSRP in Neighboring Cells	2st PCI in Neighboring Cells	2st RSRP in Neighboring Cells	3st PCI in Neighboring Cells	3st RSRP in Neighboring Cells
113.644	34.793 1	22:50:23	1 650	-96.7	229	263155/51	149	-101.63	147	-102.31	-	-

表5 基于MR文件数据的输入

ululeNo deBiD	ucserCar rierFreq	usPhysC allId	ucRsrp Rslt	aNeighCellRst(0). ulEutranCellId	aNeighCellRst(0). usPhysCellId	aNeighCellRst(0). UcRsrpRslt	aNeighCellRst(1). ulEutranCellId	aNeighCellRst(1). usPhysCellId	aNeighCellRst(1). UcRsrpRslt
263155	1 650	229	72	262990-49	149	71	262990-51	147	74

a) 重叠覆盖小区。当小区重叠覆盖度大于某一门限时(默认0.05,可根据实际情况调整),认为该小区是重叠覆盖小区,找出每一个重叠覆盖小区的TOP干扰小区(默认找出3个,可根据实际情况调整)(见表6)。

b) 重叠覆盖栅格。当栅格中重叠覆盖点次数高于门限(默认大于等于3,可根据实际情况调整),栅格重叠覆盖度大于某一门限(默认0.2,可根据实际情况调整)时,认为该栅格是重叠覆盖栅格,并按栅格重叠覆盖度排序(见表7)。

表6 干扰小区实例

站点名	小区标识	干扰小区干扰总得分	干扰小区干扰贡献度	被干扰小区站点名	被干扰小区ID	TOP干扰的数目
某酒店	49	0.058 9	0.429 2	某印刷厂	50	2
某酒店	49	0.058 9	0.429 2	某酒店	50	2
某酒店	51	0.688 9	0.735 5	某9号楼	49	4
某酒店	51	0.688 9	0.735 5	某印刷厂	50	4
某酒店	51	0.688 9	0.735 5	某印刷厂	51	4
某酒店	51	0.688 9	0.735 5	某酒店	49	4

c) 小区干扰贡献度。遍历所有重叠覆盖小区,提

表7 重叠覆盖栅格示例

栅格经度	栅格纬度	小区标识	小区	栅格主服平均电平/dBm	栅格主频点	栅格内重叠覆盖样本数	栅格内总样本数	栅格内重叠覆盖样本占比/%
xxx	yyy	49	ZZFH003550	-97.79	1 650	139	348	40
xxx	yyy	49	ZZFH00355_0	-99.70	1 650	52	115	45
xxx	yyy	49	ZZFH003550	-98.86	1 650	46	142	32
xxx	yyy	49	Z2FH00355_0	-79.46	1 650	10	48	21
xxx	yyy	50	ZZFH00355_1	-98.70	1 650	35	104	34
xxx	yyy	0	ZZFH003551	-98.93	1 650	32	95	34
xxx	yyy	50	ZZFH00355_1	-101.26	1 650	40	182	22
xxx	yyy	50	Z2FH003551	-102.12	1 650	22	96	23
xxx	yyy	50	ZZFH00355_1	-104.87	1 650	164	671	24
xxx	yyy	0	ZZFH003551	-89.23	1 650	18	65	28
xxx	yyy	51	ZZFH003552	-90.73	1 650	424	1 703	25
xxx	yyy	51	ZZFH00355_2	-92.75	1 650	29	135	21
xxx	yyy	51	ZZFH00355_2	-83.51	1 650	54	229	24
xxx	yyy	51	ZZFH003552	-96.94	1 650	23	96	24
xxx	yyy	51	ZZFH003552	-94.23	1 650	20	113	25

取其中作为干扰邻区的小区,计算、统计并输出这些作为干扰邻区的次数以及干扰贡献度,并按小区重叠覆盖度排序;找出在重叠覆盖样本中,作为TOP干扰小区出现次数最多的TOP小区,即为区域TOP干扰小区,遍历所有受其干扰的重叠覆盖小区,找出TOP被干扰小区。小区干扰贡献度的广度体现在计算干扰的总次数的多少,深度体现在干扰信号的强弱,此指标越大,说明该评估小区对整体区域的干扰贡献越大,越应该进行勘测优化。

6 应用效果

本文所提技术在某省联通进行了全省试点及推广应用。该项目强化了数字信息基础设施支撑能力,并在数字技术融合创新上实现了新突破。具体应用效果如下。

a) 网络质量提升。干扰水平达到最优,全网平均CQI明显提升,由10.33提升至12.13,与之匹配的CQI问题小区比例从最初的33%降低至3.35%。

b) 用户感知提升。通过该技术应用,用户感知速率提升12.8%,移动网络质量投诉、万人投诉率逐年下降,降幅分别达70%、40%。

c) 网络效能提升。通过该技术应用,64QAM以上高阶调制方式占比提升8.52个百分点,频谱资源利用率提升7.35个百分点,整网容量提升10%,等同于节

省了1张10M带宽的中频网络,累计节省建设投资及运维成本43 395万元。

d) 生产效能提升。传统的重叠覆盖分析耗时耗力且准确度低,通过聚类算法精准识别重叠覆盖栅格及干扰矩阵分析高贡献度小区,地(市)相关工作人员效率提升将近20倍,且能有效节省现场测试的车辆和终端费用。

7 结论

本文通过理论研究,提出了利用聚类算法精准识别重叠覆盖区域、干扰矩阵分析发现高贡献度问题小区以及智能天馈寻优降低重叠覆盖等方法,快速提升了调制解调效率和网络质量容量。重叠覆盖分析方法利用干扰矩阵关联分析、数字孪生技术等手段助力移动无线网络智能调优,最终形成一套标本兼治、提升调制解调效率和网络质量容量的优化体系,通过压降重叠覆盖,实现网络结构的高效优化和调制解调效率的快速提升,最终达到提高网络质量、容量和用户感知这一重要目标。

参考文献:

- [1] 王庆扬,谢沛荣,熊尚坤,等. 5G关键技术与标准综述[J]. 电信科学,2017,33(11):112-122.
- [2] 杜昌瀚. 高频段宽带无线通信接收信号处理关键技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2018.
- [3] 3GPP. Physical channels and modulation (Release 16) : 3GPP TS 38.211 [S/OL]. [2024-11-24]. ftp://3gpp.org/Specs/latest/Rel-16/38_series/.
- [4] 杨国翔. QAM系统中抑制相位噪声算法的研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [5] 袁亚玲. 基于星座图设计的相位噪声抑制算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [6] 姬晓辉,孙泽宇,阎奔,等. 基于压缩感知的高阶MIMO系统信道估值算法[J]. 计算机工程与应用,2019,55(19):153-159.
- [7] 汤健成. 基于深度学习的信号相位噪声估计与优化判决[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.

作者简介:

梁松柏,毕业于北京大学,高级工程师,硕士,主要从事无线网络优化工作;郭颖悟,毕业于郑州大学,高级工程师,硕士,主要从事无线网络优化工作;孙慧珠,毕业于桂林电子科技大学,高级工程师,硕士,主要从事无线网络优化工作;李婷婷,毕业于桂林电子科技大学,初级工程师,硕士,主要从事无线网络优化工作。