



研究与开发

5G 大气波导干扰分析及规避方法研究

汪汀岚¹, 李行政¹, 左怡民², 张冬晨¹

(1. 中国移动通信集团设计院有限公司, 北京 100080;

2. 中国移动通信集团有限公司, 北京 100033)

摘要: 大气波导效应会导致时分系统产生超远距离干扰, 造成严重的网络质量劣化问题。首先, 通过系统性的原理分析对 5G 大气波导干扰成因进行详细分析; 然后, 通过大量干扰数据对 5G 受大气波导干扰小区的特征进行研究, 提出了 5G 大气波导干扰波形识别算法; 最后, 从时域、频率、空域、参数配置等方面提出了大气波导受干扰小区的规避调整方法, 降低大气波导干扰影响, 保障 5G 网络质量。

关键词: 5G 大气波导干扰; 干扰特征; 干扰识别; 干扰规避

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022067

Analysis and avoidance method of 5G atmospheric duct interference

WANG Tinglan¹, LI Xingzheng¹, ZUO Yimin², ZHANG Dongchen¹

1. China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China

2. China Mobile Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China

Abstract: Atmospheric duct effects can produce the remote interference, which will lead to serious problems of the network degradation. Firstly, a detailed analysis of the causes of 5G atmospheric duct interference was achieved through the system principle analysis. Then, a 5G atmospheric duct interference waveform identification algorithm was proposed. Finally, from the aspects of time domain, frequency, air domain, parameter configuration, etc., the avoidance and adjustment method of atmospheric duct interfered cells was proposed. The impact of the atmospheric duct interference is reduced and the quality of 5G networks is ensured.

Key words: 5G atmospheric duct interference, interference characteristic, interference identification, interference avoidance

0 引言

大气波导是一种特定的气象情况, 海面上常发生的海市蜃楼现象就是大气波导超折射造成的光学效应^[1-2]。当存在大气波导效应时, 基站发射

信号在大气波导层中发生超折射。超折射具有传播损耗低、作用距离远的特点, 由于时分系统上下行同频, 基站间上下行信号干扰问题主要通过上下行时隙保护间隔 (guard period, GP) 的设置实现, 当存在大气波导效应时, 远处基站下行信

号在传播距离起过 GP 后仍有较强的功率, 就会对近端处于上行接收时隙的基站造成严重同频干扰^[3-4]。所以, 在时分系统中, 大气波导干扰呈现干扰范围广、程度强、随天气变化的特性。

基于上述背景, 本文针对如何及时有效、准确地识别 5G 基站是否面临大气波导干扰问题开展研究工作, 提炼了 5G 大气波导干扰波形识别算法。在试点地区, 从多个维度研究受干扰小区规避调整方法及规避效果, 提升受干扰时的 5G 网络质量。

1 5G 大气波导干扰成因分析

1.1 5G 保护距离及大气波导传播距离分析

目前, 我国 5G 网络已商用, 主要采用时分双工 (time division duplexing, TDD) 制式, 并使用 2.6 GHz (2 515~2 675 MHz)、3.5 GHz (3 400~3 500 MHz)、4.9 GHz (4 800~4 900 MHz) 等频段, 以上频段易受波导影响, 易形成波导传播的分米波 (0.3~3 GHz) 及厘米波 (3~30 GHz)。因此, 存在大气波导效应时, 若基站发射信号在波导层中, 当传播距离超过 GP 后, 仍然存在较强的功率, 将对远端基站造成大气波导干扰问题^[5-8]。5G 基站间大气波导干扰问题示意图如图 1 所示。

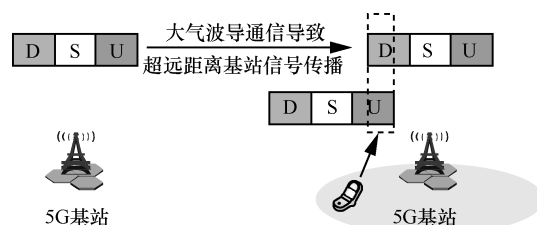


图 1 5G 基站间大气波导干扰问题示意图

在 2020 年 3 月冻结的 3GPP Release 16 (Rel-16) 标准中, 5G 新空口 (new radio, NR) 采用 10 ms 帧长度, 一个帧中含有 10 个子帧。目前, 中国移动 2.6 GHz 频段 5G 网络采用 8:2 的下行与上行子帧配比方式, 其中特殊子帧配置为 6:4:4, 这意味着 GP 有 4 个符号位的保护间隔^[4], 2.6 GHz 子帧及时隙配比示意图如图 2 所示。

假定一个时隙时长为 T_s , 保护间隔为 D_{GP} , 此情况下 T_s 和 D_{GP} 分别为:

$$T_s = \frac{10}{10 \times 2 \times 14} \text{ ms} \approx 0.0357 \text{ ms} \quad (1)$$

$$D_{GP} = 4 \times 0.0357 \times 3 \times 10^5 \text{ m} = 42.84 \text{ km} \quad (2)$$

对 47 264 个试验站点的传播距离进行统计分析后, 发现存在物理距离超过 400 km 的干扰通路, 干扰通路物理平均距离均值约为 80 km, 远超过保护间隔。试验站点物理距离均值统计见表 1。

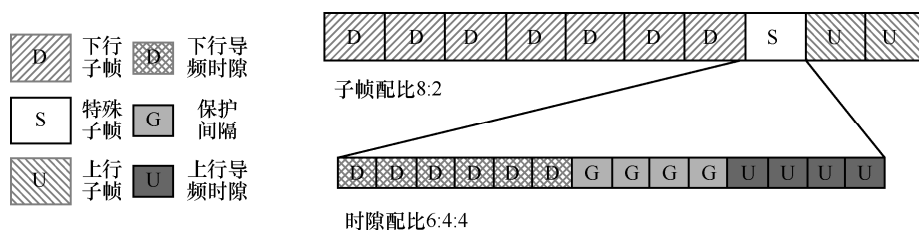


图 2 2.6 GHz 子帧及时隙配比示意图

表 1 试验站点物理距离均值统计 (单位: km)

受扰省份	施扰省份					总计
	省 1	省 2	省 3	省 4	省 5	
省 1	56	230	—	—	—	59
省 2	100	64	—	—	—	65
省 4	—	—	421	58	—	79
省 5	—	—	253	—	38	93
总计	62	65	291	58	38	80

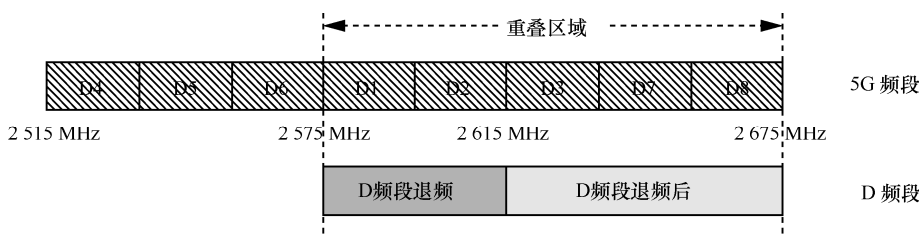


图3 D频段退频前后与5G频段重叠情况

1.2 4G系统对5G系统的大气波导干扰分析

前期中国移动4G网络D频段主要使用2 575~2 615 MHz频段,在5G商用之后,2 515~2 615 MHz频段用于5G网络,2 615~2 675 MHz频段用于4G网络,但仍有部分D1(2 575~2 595 MHz)与D2(2 595~2 615 MHz)频段4G小区未退频,如高铁专网4G覆盖场景,D频段退频前后与5G频段重叠情况如图3所示。

中国移动TD-LTE采用3:1的下行与上行配比,以及10:2:2特殊子帧配置。这意味着GP为2个正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)符号位。此情况下保护间隔约为42 km,与5G目前GP的保护间隔一致,因此同样存在4G对5G的大气波导干扰问题。

2 5G大气波导识别定位

2.1 空域及时域特征

在发生5G大气波导的区域中,会出现受干扰小区数量激增的情况。随着大气波导效应的消除,受干扰小区数量回归正常水平。由于波导传输特性,平原及海面间易产生波导效应,郊区、农村、乡镇、底层居民区及高速公路更容易受大气波导影响。可以依据受干扰小区数量激增情况识别区域内是否发生大气波导及其影响程度^[9-11]。

小区受大气波导干扰时,在受扰时隙上会产生斜坡特性。大气波导时隙受扰特性如图4所示,经研究,干扰源分布不同时会有不同的斜坡特性^[12-15],内部区域多为“平滑式”,如图4(a)所

示,沿海地市多为“陡降式”,如图4(b)所示。基于受扰小区斜坡特性可以进行小区级别是否受扰的监控。

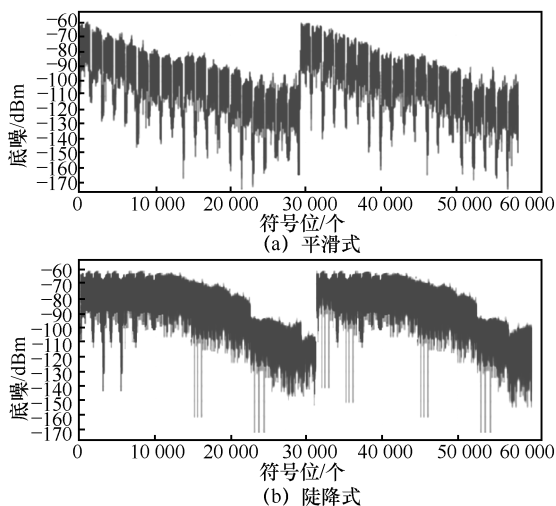


图4 大气波导时隙受扰特性

2.2 频域特征及干扰波形识别

本文通过空域特征分析可在大尺度上判断区域是否发生大气波导干扰问题,通过时域特征判断小区是否受大气波导干扰影响。为了精准区别干扰原因是4G系统对5G系统影响,还是5G自系统大气波导干扰问题,需要借助受干扰小区频域特征进行分析。

2.2.1 4G干扰信号波形研究

中国移动TD-LTE采用15 kHz子载波间隔,1个RB在频率上含有12个连续的子载波。在频域相当于180 kHz时,20 MHz带宽共有100个RB,有效带宽为18 MHz时,存在2 MHz用于保护带宽(guard band, GB)及直流分量。实际频

谱发射时,无法实现理论上的矩形波形,在有用信道带宽的两个边缘存在发射信号功率滚降,使用保护带宽可以避免有用信号间的互扰问题,本研究通过此原理实现 4G 对 5G 大气波导干扰波形的特征提炼及识别。3GPP 标准中 4G 和 5G 参数要求见表 2^[16]。

表 2 3GPP 标准中 4G 和 5G 参数要求

系统	子载波带宽 (subcarrier spacing, SCS) /kHz	支持带宽 BW/MHz	最小保护 带宽 GB/kHz	最大 RB 数 PRB
TD-LTE	15	20	1 000	100
5G NR	30	100	845	273

当大气波导效应产生时,远距离 4G D1、D2 未清频基站会对 5G 系统造成大气波导干扰影响,干扰类型分为 D1、D2、D1 与 D2,TD-LTE 对 5G 系统干扰波形如图 5 所示。

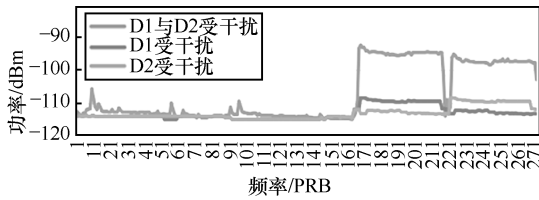


图 5 TD-LTE 对 5G 系统干扰波形

(1) 4G 系统 D1 频段干扰

2.6 GHz 频域公共参考点 A (absolute frequency point A) 为 503 172, 全局频率栅格间隔 ΔF_{Global} (granularity of the global frequency raster) 为 5, 单边带的频域位置设为 SSREF (single side resource element frequency):

$$\text{SSREF} = P_A \times \Delta F_{\text{Global}} = 2\,515.86 \text{ MHz} \quad (3)$$

5G 有效带宽下边界 $F_{\text{下边}}$ 及上边界 $F_{\text{上边}}$ 为:

$$F_{\text{下边}} = \text{SSREF} - 15 \text{ kHz} = 2\,515.845 \text{ MHz} \quad (4)$$

$$F_{\text{上边}} = F_{\text{下边}} + \text{SCS} \times 12 \times \text{PRB} = 2\,614.125 \text{ MHz} \quad (5)$$

在 D1 频段 (2 575~2 595 MHz) 20 MHz 信道带宽下,4G 有效带宽起始位置 $F_{\text{D1下边}}$ 为 2 576 MHz, 截止位置 $F_{\text{D1上边}}$ 为 2 594 MHz。折算 4G 有效带宽

所对应的 5G 物理资源块 (physical RB, PRB) 的起始位置 $\text{PRB}_{\text{start}}$ (PRB 编号由 0 起) 与截止位置 PRB_{stop} 为:

$$\text{PRB}_{\text{start}} = \frac{(F_{\text{D1下边}} - F_{\text{下边}})}{\text{SCS} \times 12} - 1 \approx 166 \quad (6)$$

$$\text{PRB}_{\text{stop}} = \text{PRB} - \frac{(F_{\text{上边}} - F_{\text{D1上边}})}{\text{SCS} \times 12} - 1 \approx 217 \quad (7)$$

同理, D1 对应的 5G PRB 数的范围约为 [163,219]。D1 干扰波形特征是 4G 有效带宽对应的 PRB 受扰底噪抬升明显, 保护带宽对应 PRB 不易受干扰。基于此原理 D1 干扰识别算法描述如下。

- 干扰门限值为 IS_T ;
- D1 频段受扰 PRB 均值与未受扰 PRB 均值底噪差值 $\text{PRB}_{\text{差}} > 1 \text{ dB}$, $\text{PRB}_{\text{差}} = (\text{PRB}_{166 \sim 217})_{\text{均}} - [(\text{PRB}_{163 \sim 165})_{\text{均}} + (\text{PRB}_{218 \sim 219})_{\text{均}}] / 2 > 1$ 即 $> 1 \text{ dB}$, 且受扰 PRB 均值 $\text{PRB}_{\text{均}} > \text{IS}_T$;
- 通过 PUCCH 调用原理剔除 5G 网内干扰影响, 要求满足 $(\text{PRB}_{166 \sim 217})_{\text{均}} - (\text{PRB}_{170 \sim 165})_{\text{均}} - \text{AVR}$ 的绝对值 $< 0.5 \text{ dB}$ 。

(2) 4G 系统 D2 频段干扰

D2 频段 (2 595~2 615 MHz) 对应的 5G PRB 数范围约为 [219,272], 4G 有用信号带宽为 2 596~2 614 MHz, 折算 5G PRB 范围约为 [221,272]。与 D1 干扰区别在于 D2 频段上边沿邻近 4G 有效带宽上边沿, 则 4G 上边保护带宽在 5G 有效带宽中无法完全检测, 基于此原理 D2 干扰识别算法描述如下。

- 干扰门限值为 IS_T ;
- D2 频段受扰 PRB 均值与未受扰 PRB 均值底噪差值 $\text{PRB}_{\text{差}} > 1 \text{ dB}$, 即 $\text{PRB}_{\text{差}} = (\text{PRB}_{221 \sim 272})_{\text{均}} - \text{PRB}_{220} > 1 \text{ dB}$ 且受扰 PRB 均值 $\text{PRB}_{\text{均}} > \text{IS}_T$;
- 通过 PUCCH 调用原理剔除 5G 网内干扰影响, 要求满足 $(\text{PRB}_{221 \sim 272})_{\text{均}} - (\text{PRB}_{225 \sim 269})_{\text{均}}$ 的绝对值 $< 0.5 \text{ dB}$ 。



(3) 4G 系统 D1 与 D2 共同干扰

大气波导受扰小区存在大量受多个干扰基站叠加影响的情况,当 D1、D2 频段同时受干扰时,存在以下两种情况。

- 同时满足 D1 及 D2 干扰识别特征。
- 由于受扰功率较大存在时域到频域的能量泄露,PRB220 底噪也受到干扰抬升,此时 D2 干扰识别中施、受扰间差值特征不明显,识别时去除此条特征。

2.2.2 5G 自系统大气波导干扰频域特征

(1) 5G 系统主同步信号干扰

5G 系统同步信号和 PBCH 块(synchronization signal and PBCH block, SSB)频域占用 240 个子载波,即连续的 20 个 PRB。此情况会导致整体底噪抬升,干扰识别算法描述如下。

- 干扰门限值为 IS_T ;
- D2 频段受扰 PRB 均值与未受扰 PRB 均值底噪差值 $PRB_{\text{差}} > 3 \text{ dB}$,即 $PRB_{\text{差}} = (PRB0 \sim PRB19)_{\text{均}} - (PRB21 \sim PRB22)_{\text{均}} > 3 \text{ dB}$,且受扰 PRB 均值 $PRB_{\text{均}} > IS_T$;
- 大气波导为阻塞波形,为避免其他类型干扰影响,需要判定受扰 PRB0~PRB19 的方差 $PRB_{\sigma^2} < 0.3$ 。

(2) 5G 系统 SIB1 消息干扰

由于主流 5G 设备厂商 SIB1 消息是在初始 BWP 中发送,发送位置占用前 50 个 RB,由于此信息功率较强,可能会泄露部分能量导致 PRB0~PRB51 整体底噪抬升,干扰识别算法描述如下。

- 干扰门限值为 IS_T ;
- D2 频段受扰 PRB 均值与未受扰 PRB 均值底噪差值 $PRB_{\text{差}} > 3 \text{ dB}$,即 $PRB_{\text{差}} = (PRB0 \sim PRB51)_{\text{均}} - (PRB51 \sim PRB53)_{\text{均}} > 3 \text{ dB}$,且受扰 PRB 均值 $PRB_{\text{均}} > IS_T$;
- 大气波导是阻塞波形,为避免其他类型干扰影响,需判定受扰(PRB0~PRB19)的方差 $PRB_{\sigma^2} < 0.3$ 。

(3) 全频段干扰

全频段干扰在频域无明显波形特征,主要呈现全频段阻塞干扰的整体抬升形态。为此补充时域对比方案,识别算法描述如下。

- 由于大气波导通路同时影响 4G 与 5G 系统,利用已知 4G 大气波导天标记记录,统计 5G 无大气波导天的小时粒度干扰小区数均值标尺。
- 天粒度监控 0:00—9:00、22:00—23:00 小时级干扰小区数,当某地市小时级干扰小区数相对标尺增量超过 100 个,且干扰小区占相对标尺比例增加 5%时,判定此小时存在大气波导干扰,标记小区信息表。
- 标记大气波导小时小区清单集,剔除同日未标记大气波导小区清单集,获得当天疑似发送大气波导小区列表。

3 5G 大气波导规避方案

3.1 5G 大气波导规避建议

通过 15 min 粒度底噪数据实时分析,获取地市干扰激增情况,当识别出受大气波导影响时,可以从时域、频率、空域、参数配置等方面进行受干扰小区的规避调整,及时缓解干扰影响。可根据严重程度,依次采用以下调整方案。

方案 1 开启设备厂商远端干扰管理(remote interference management, RIM)规避功能,使小区具备自适应规避大气波导干扰影响的能力。

方案 2 基于 TDD 信道传播的互易性,调整受扰小区特殊子帧配置至 6:6:2,增加保护间隔至 $64.26 \text{ km}^{[15,17]}$ 。

方案 3 暂时关断小区部分受干扰的上行符号,避免受干扰严重频段承载用户。

方案 4 增大受扰小区的电调下倾角,降低干扰影响^[18-19]。

方案 5 将受干扰严重的小区进行暂时分流,待干扰情况缓解后再进行回调。

3.2 优化效果评估

根据 2021 年 4—5 月 5G 大气波导影响区域关联性分析, 选择存在大气波导通路的 7 个地市中, 19 953 个基站共计 59 971 个小区作为规避方案的试验区域。在同年 6—8 月, 对受大气波导干扰影响的小区进行规避方案应用。通过对比方案实施前后通路中小区性能指标的变化, 研究规避方案的作用。同时, 由于大气环境相同, 4G 与 5G 大气波导干扰整体情况具有趋同性。目前, 4G 系统已具备通过特征序列检测机制准确判断大气波导干扰通路及干扰影响强度的能力。所以, 利用同区域 4G 大气波导影响程度标尺作为 5G 大气波导影响程度的参考, 研究不同程度大气波导影响条件下 5G 规避方案的应用效果。

3.2.1 干扰指标评估

收集试验区域大气波导天中, 5G 受干扰小区占比与同覆盖区域 4G 受干扰小区的变化趋势对比, 试验区大气波导发生日干扰小区占比趋势如图 6 所示, 试验区域中, 4G 小区受大气波导影响呈上升趋势, 5G 小区在未应用规避措施前与 4G 趋势相同。应用规避措施后, 5G 受干扰小区占比上升趋势变缓。2021 年 7 月初, 随着规避方案应用范围的扩大, 受影响情况得到极大缓解。

3.2.2 性能指标评估

收集试验区域大气波导天中, 5G 受干扰小区无线掉线率、无线接通率、无线切换成功率 3 项性能指标的变化趋势。试验区大气波导发生日性能指标趋势如图 7 所示, 由图 7 (a) 可以看出, 试验区域中小区无线掉线率指标由规避措施前的 2.43% 提升至下降 1.87%, 降低了 0.56 个百分点。从图 7 (b) 和图 7 (c) 可以观察到, 无线接通率及无线切换成功率指标无明显优化。

经过试验区域情况评估, 5G 大气波导规避方案可以有效缓解大气波导对受扰小区的干扰影响, 降低用户掉线率, 减小对用户感知的影响。

4 结束语

5G 系统大规模建设完成的同时, 大气波导问题随之而来。本文针对 5G 大气波导的特性及波形特征进行了研究, 提炼得到有效的识别方法, 有助于快速、精准地定位 5G 大气波导发生时刻及受扰范围。通过规避方案实现受扰片区基站自适应调整, 有效缓解 5G 大气波导大面积发生时的严重影响。后续将继续开展干扰源站点定位研究, 进一步从根源改善大气波导发生时刻的干扰影响, 同时均衡调整所带来的资源损失问题, 以及开展预测研究, 提前预防大气波导所导致的小区受扰问题。

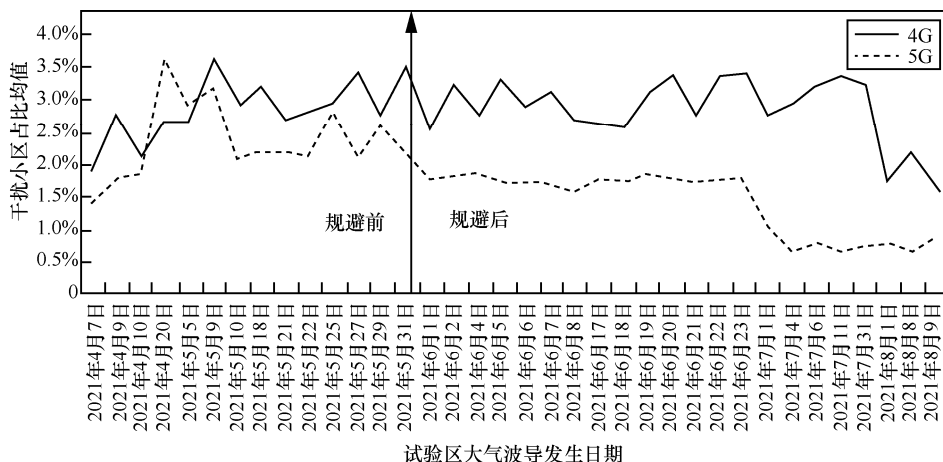


图 6 试验区大气波导发生日干扰小区占比趋势

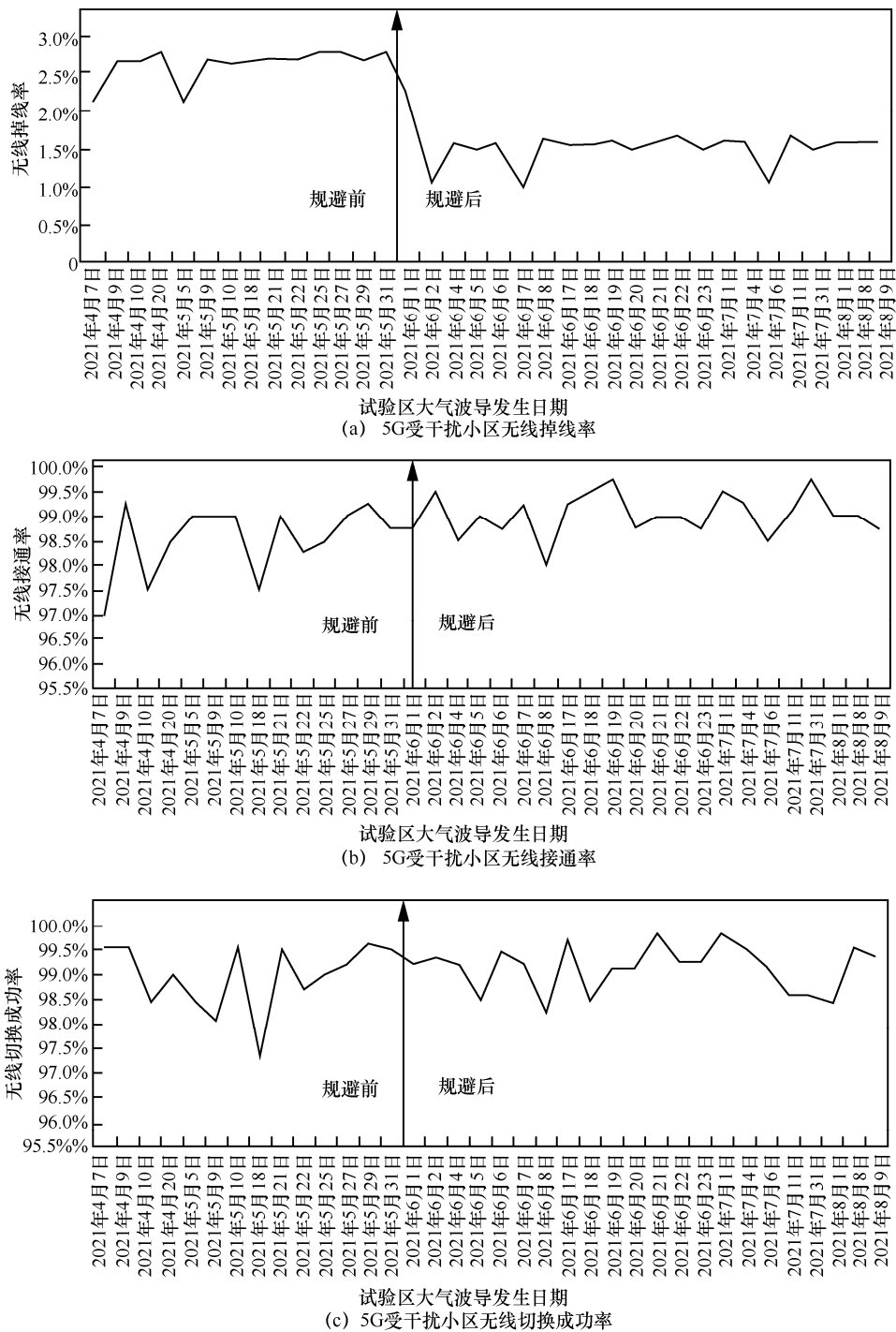


图7 试验区大气波导发生日性能指标趋势

参考文献:

- [1] 康士峰, 张玉生, 王红光. 对流层大气波导[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
KANG S F, ZHANG Y S, WANG H G. Atmospheric duct in the troposphere[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 赵小龙. 电磁波在大气波导环境中的特性及其应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 13-14.
ZHAO X L. Research on propagation characteristic of electromagnetic wave and its application in atmospheric duct[D]. Xi'an: Xidian University, 2008: 13-14.
- [3] 张瑜, 吴少华. 大气波导传播类型及特性分析[J]. 电波科学学报, 2009, 24(1): 185-190.

- ZHANG Y, WU S H. Analysis of types and characteristics of atmospheric duct propagation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(1): 185-190.
- [4] 官莉, 顾松山, 火焰, 等. 大气波导形成条件及传播路径模拟[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(5): 632-637.
- GUAN L, GU S S, HUO Y, et al. Necessary conditions for forming duct propagation and simulation of electromagnetic wave propagation[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2003, 26(5): 632-637.
- [5] 宋玉珍, 刘炼. 利用 GPS 探测海洋大气环境和大气波导[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(7): 153-155.
- SONG Y Z, LIU L. Detect the ocean atmosphere environment and the atmosphere wave-guide by use of GPS[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(7): 153-155.
- [6] 杨超, 郭立新, 李宏强, 等. 大气波导中电波传播特性的研究[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 1097-1102.
- YANG C, GUO L X, LI H Q, et al. Study the propagation characteristic of radio wave in atmospheric duct[J]. Journal of Xi-dian University (Natural Science), 2009, 36(6): 1097-1102.
- [7] 陈涛, 李行政, 韩云波, 等. 大气波导干扰定位与优化平台技术研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2018, 31(7): 72-76.
- CHEN T, LI X Z, HAN Y B, et al. Research on atmospheric duct interference location and optimization platform[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2018, 31(7): 72-76.
- [8] 汪汀岚, 张冬晨, 李行政, 等. 基于模块化架构搭建 LTE 干扰自动诊断平台[J]. 数字通信世界, 2020(11): 5-8.
- WANG T L, ZHANG D C, LI X Z, et al. Automatic LTE interference diagnosis platform based on modular architecture[J]. Digital Communication World, 2020(11): 5-8.
- [9] 蔺发军. 海上大气波导的统计分析[J]. 电波科学学报, 2005, 20(1): 64-68.
- LIN F J. Statistic analysis of the atmospheric duct on the sea[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(1): 64-68.
- [10] 唐海川, 王华, 李云波. 黄海部分海域大气波导分布规律及成因[J]. 海洋技术, 2008, 27(1): 115-117.
- TANG H C, WANG H, LI Y B. Distribution pattern and origin of atmospheric duct in some parts of the Yellow Sea area[J]. Ocean Technique, 2008, 27(1): 115-117.
- [11] 陈莉, 高山红, 康士峰, 等. 中国近海大气波导的时空特征分析[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 702-708.
- CHEN L, GAO S H, KANG S F, et al. Statistical analysis on spatial-temporal features of atmospheric ducts over Chinese regional seas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(4): 702-708.
- [12] 邵茗. 天线在降低 TD-LTE 系统大气波导干扰中的运用[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2017, 30(3): 54-57.
- SHAO M. Application of antenna in reducing atmospheric duct interference in TD-LTE system[J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017, 30(3): 54-57.
- [13] 王国梁, 赵康成. TD-LTE 系统的大气波导干扰与防治[J]. 山东通信技术, 2016, 36(4): 10-13.
- WANG G L, ZHAO K C. Prevention and governance of atmospheric duct interference in TD-LTE networks[J]. Shandong Communication Technology, 2016, 36(4): 10-13.
- [14] 刘毅, 牛海涛, 张震刚, 等. TD-LTE 大气波导效应导致干扰研究[J]. 移动通信, 2017, 41(5): 36-40.
- LIU Y, NIU H T, ZHANG Z G, et al. Investigation on interference resulting from TD-LTE atmospheric duct effect[J]. Mobile communications, 2017, 41(5): 36-40.
- [15] 孙天宇, 周婷, 杨旸. TD-LTE 网络中大气波导干扰的分析与预测[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(2): 19-24.
- SUN T Y, ZHOU T, YANG Y. Analysis and prediction of atmospheric duct interference in TD-LTE networks[J]. ZTE Technology Journal, 2018, 24(2): 19-24.
- [16] 3GPP. Base station (BS) radio transmission and reception: TS 38.104 v17.3.0[S]. 2019.
- [17] 杨波. 大气波导通信技术对 TD-LTE 产生的干扰及优化方案研究[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(1): 18-20.
- YANG B. Study on the interference and optimization of TD-LTE by atmospheric waveguide communication technology[J]. Digital Technology and Application, 2018, 36(1): 18-20.
- [18] 张龙, 邓伟, 江天明, 等. TD-LTE 大气波导干扰传播规律及优化方案研究[J]. 移动通信, 2017, 41(20): 16-21.
- ZHANG L, DENG W, JIANG T M, et al. Research on propagation law and optimization solutions of atmospheric duct interference for TD-LTE[J]. Mobile Communications, 2017, 41(20): 16-21.
- [19] 李行政, 周胜, 左怡民, 等. 2.6 GHz 频段 5G 网络大气波导干扰问题分析[C]//2020 中国信息通信大会(CICC 2020). 北京: 人民邮电出版社, 2020: 511-515.
- LI X Z, ZHOU S, ZUO Y M, et al. Analysis of interference due to atmospheric duct of 5G network in 2.6 GHz band[C]//China Institute of Communications Conference 2020(CICC 2020). Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2020: 511-515.

[作者简介]



汪汀岚(1989-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司工程师, 主要研究方向为无线通信、网络优化等。

李行政(1987-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师, 主要研究方向为无线通信、干扰优化等。

左怡民(1977-), 女, 中国移动通信集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为移动通信网络优化。

张冬晨(1981-), 男, 博士, 中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师, 主要研究方向为电磁干扰、移动通信网络优化等。