



5G 远端干扰分析与解决方案研究

李玉洁

(中国电信股份有限公司山东分公司, 山东 济南 250101)

摘 要: 远端干扰主要来源于大气波导传播, 是造成大气波导现象高发地区 5G NR 移动通信网络性能劣化的原因之一。在分析研究时分双工无线网络远端干扰产生机理的基础上, 针对性地论述了两类远端干扰管理的方案。在大气波导高发地区 5G NR 网络中针对静态增加 GP (guard period) 方案进行了验证。网络运行数据表明, 改变无线时隙子帧格式, 增加隔离符号可以有效地避免远端干扰, 提升全网性能。

关键词: 5G NR; 远端干扰管理; 热噪声干扰; 参考信号

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022143

Research on remote interference analysis and solution for 5G

LI Yujie

Shandong Branch of China Telecom Co., Ltd., Jinna 250101, China

Abstract: Remote interference mainly comes from the atmospheric ducting transmission. It is one of the reasons for the deterioration of the fifth-generation new radio (5G NR) mobile networks. Based on the analysis of the generation mechanism for the remote interference, two solution schemes were accordingly described for the remote interference management. The static increase GP (guard period) scheme was verified in the 5G NR network in areas with high atmospheric waves. Network operation data shows that the increasing guard period could avoid remote interference efficiently and thus improve the quality of the fifth-generation new radio networks.

Key words: 5G NR, remote interference management, interference over thermal noise, reference signal

0 引言

远端干扰主要源于低空大气波导现象造成的电磁波超远距离传输。在一定气象条件下, 大气近地层中形成具有一定厚度的大气薄层, 电磁波在该层中传播时衰减减小, 接收机接收到的信号功率往往比正常情况高数倍^[1-2]。时分双工 (time division duplexing, TDD) 无线网络中, 上、下行

链路采用同一载频, 大气波导现象出现时, 远端基站的下行信号经数十或数百千米的超远距离传输后仍具有较高强度。当该下行信号落入近端基站上行信号接收窗口时, 会对近端基站的上行链路造成干扰, 使上行链路的接收信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 下降, 这就是远端干扰^[3-4]。

远端干扰是 TDD 系统特有的现象。早在

2010年,文献[5]指出 TD-LTE (time division-long term evolution) 系统会面临远端干扰问题,提出了可采用修改随机接入信道格式、特殊时隙自动配置和调整天线倾角等方案解决其远端干扰问题。2017年,文献[4]探讨了大气波导对 TD-LTE 网络的影响,提出可通过提高上行链路的质量抑制远端干扰,改善网络性能,并选择3个基站做了验证。2019年,3GPP针对同步的 TDD 5G NR 网络远端干扰问题,在 3GPP Rel-16 中提出了远端干扰管理 (remote interference management, RIM) 的概念,并给出了 TDD 5G NR 网络动态 RIM 的3类实施建议^[6]。2021年,文献[3]通过仿真实验,验证了调整天线倾角抑制 5G NR 网络远端干扰方案的可行性。同年,文献[7]给出了如何在 5G NR 网络的物理层利用参考信号 (reference signal, RS) 检测大气波导引发的远端干扰问题。截至 2022 年,5G NR 网络 RIM 问题的研究集中在物理层如何准确定位远端干扰上,如何有效实施 RIM,尤其是动态 RIM 仅有建议,尚未查到现网实施案例和运行数据。

1 5G NR 远端干扰现象和原理

TDD 网络中,为避免上行链路符号和下行链路符号之间的串扰,会在两者之间插入保护间隔 (guard period, GP), TDD 5G NR 网络远端干扰原理如图 1 所示。当存在大气波导现象时,远端

基站 (也称施扰站) 发出的信号经过超远距离的传输,下行符号落入了近端基站 (也称为受扰站) 的上行符号接收窗口内,造成远端基站的发送信号对近端基站接收信号的干扰,即远端干扰。

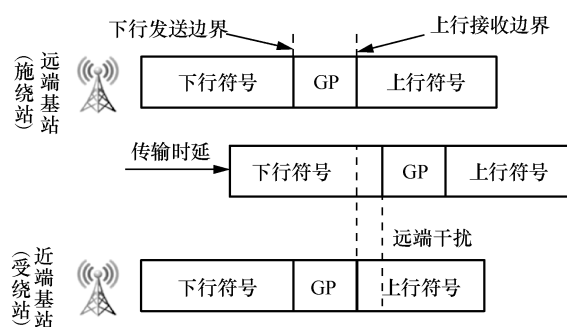


图1 TDD 5G NR 网络远端干扰原理

遭受远端干扰的射频符号时域波形呈现斜波形状,称为斜波状热噪声干扰 (interference over thermal noise, IoT)^[6],远端干扰的网络测试 IoT 如图 2 所示,根据现网测试数据绘出的无线时隙特殊 (S) 子帧与其相邻上行子帧的 IoT 强度图。可以看出,从符号 3~10 开始遭受远端干扰,符号 3~11 和 3~12 遭受的干扰最大,之后远端干扰逐渐下降。分析原因,发现受扰站遭受的远端干扰由不同距离的多个施扰站的干扰信号累积而成, IoT 成因如图 3 所示。

图 3 中,施扰站#1 距离受扰站最远,传播时延最大,其下行信号影响受扰站的上行符号数最

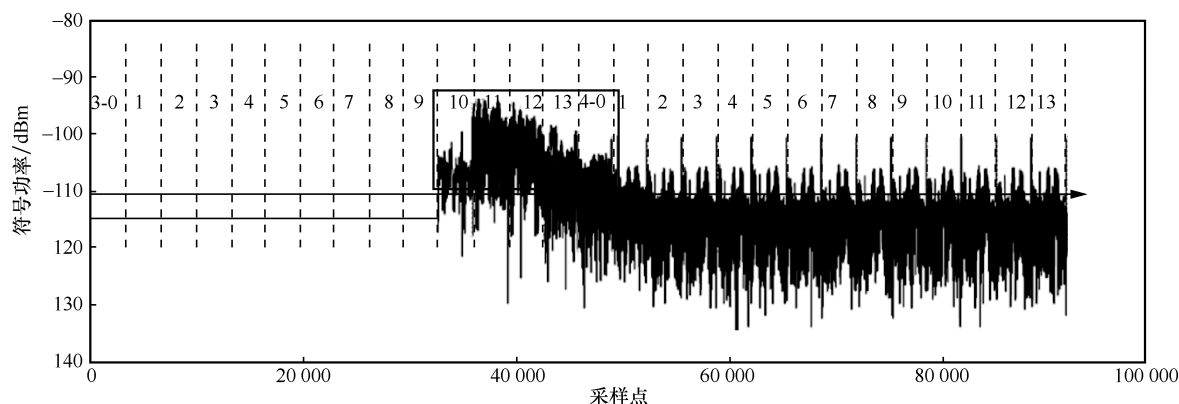


图2 远端干扰的网络测试 IoT



多；而施扰站#3 距离受扰站最近，其下行信号仅干扰了受扰站的 2 个 GP。

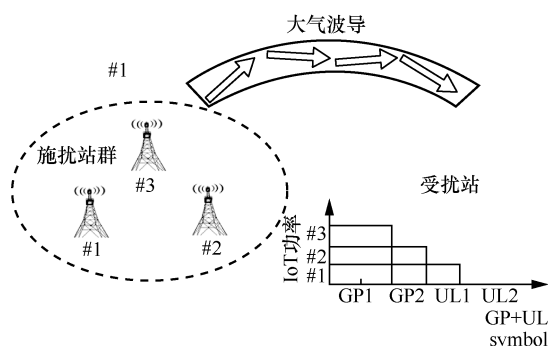


图 3 IoT 成因

分析现网运行数据得出结论，可在 5G NR 网管系统中检测最后一个 GP 功率（单位为 dBm）辅助判断是否存在远端干扰。当最后一个 GP 功率大于 -107 dBm 时，即可判定发生远端干扰。

根据文献[1-2, 8-9]，大气波导的出现与大气温度和湿度密切相关。常常出现在内陆地区的春夏和夏秋过渡期以及沿海地区的海洋大气环境中。一旦出现，仅持续几小时，从而造成位于该环境中的网络性能时好时坏。因此如何有效地实施 RIM，消除或规避远端干扰，确保网络的鲁棒性，引起了广泛研究兴趣，也被写进了 3GPP 5G NR 的标准中^[6]。

通过分析青岛市 5G NR 网络（3.5 GHz TDD 系统）数据，发现当站点天线过高、天线倾角过小时，易导致信号在大气波导中超远距离传播。青岛市独特地理位置，濒临黄海，海岸线长，部分区域无高山阻挡，大气波导现象经常出现，TDD 移动网络易发生远端干扰。

2 远端干扰对网络的影响

远端干扰导致近端基站接收 SINR 下降，造成掉线、接入失败、低速率等一系列影响用户体验的问题。远端干扰越强，最后一个 GP 功率越高，掉线率、速率等用户感知指标越差。青岛市电信 5G NR 网络 2021 年 8 月的远端干扰与网络

数据见表 1，可以看出，随着干扰水平的下降，掉线率、无线接入失败率下降，上、下行感知速率上升。极端情况下，当干扰水平 ≥ -80 dBm 时，掉线率高达 37.77%、无线接入失败率为 4.51%、下行感知速率为 63.25 Mbit/s，上行感知速率为 0.32 Mbit/s；而干扰水平降至 -110 dBm 以下，上述 4 个指标分别为 2.22%、0.88%、206.47 Mbit/s 和 3.48 Mbit/s，分别提高大约 17、5、3 和 10 倍以上。

表 1 远端干扰与网络数据

干扰/dBm	掉线率	无线接入失败率	上行感知速率/(Mbit·s ⁻¹)	下行感知速率/(Mbit·s ⁻¹)
≥ -80	37.77%	4.51%	0.32	63.25
$-85 \sim -80$	19.73%	2.72%	0.65	78.45
$-90 \sim -85$	13.71%	2.16%	0.78	93.62
$-95 \sim -90$	8.46%	1.67%	1.07	109.11
$-100 \sim -95$	4.78%	1.29%	1.27	128.65
$-105 \sim -100$	3.40%	1.03%	2.05	159.82
$-110 \sim -105$	2.85%	0.99%	2.34	181.74
≤ -110	2.22%	0.88%	3.48	206.47

3 5G NR 远端干扰管理方案

RIM 方案分为静态方案和动态方案两类。静态方案包括：

- 修改无线帧格式，增加 GP 以避免远端基站下行符号干扰近端基站上行符号；
- 降低天线高度和射频发送功率，并调整天线倾角。

动态方案也称为自适应远端干扰规避，是 5G NR 网管系统实时观测 GP 的功率，或者通过发送 RS 判断远端干扰是否出现，进而采用适当的远端干扰消除方案，以达到规避远端干扰的目的。

3.1 静态 RIM 方案

(1) 增加 GP 以提升近端基站抗远端干扰能力

从图 1 远端干扰产生的原因可以看出，若施扰站发出信号的传播时延小于 GP 的时间，即可

克服远端干扰。

5G NR 无线帧格式如图 4 所示, 图 4 (a) 是 5G NR 网络 (3.5 GHz TDD) 无线帧格式, 其中, D 表示传输下行信号的子帧, U 表示传输上行信号的子帧, S 表示特殊子帧, 作用是完成下行子帧和上行子帧的转换和隔离。图 4 (b) 是 S 子帧的时隙格式, 由连续 10 个 D、接着 2 个 GP、最后 2 个 U 构成。

5G NR 参数为子载波间隔 30 kHz、子帧长度 0.5 ms, 即每个符号的长度为 $\frac{1}{28}$ ms, 因此一个 GP 符号可以抵御 10.7 km 以内的干扰。目前, S 子帧的时隙符号配比为 D:GP:U=10:2:2, 只能抵御 21.4 km 以内的干扰, 导致受到 30~40 km 外的远端干扰比较严重。可以尝试将 S 子帧的时隙符号配比修改为 D:GP:U=8:4:2, 即增加两个 GP, 此时抗远端干扰的距离为 $10.7 \text{ km} \times 4 = 42.8 \text{ km}$, 理论上可以有效解决目前存在的远端干扰, 增加 GP 以提高抗干扰能力示意图如图 5 所示。

这种方法的缺点是 D:GP:U=8:4:2 的时隙符号配比不是 3GPP 规定的标准模式, 某些厂商的设备不支持。

(2) 避免信号通过大气波导传播, 以减少干扰源

统计发现, 现网施扰站一般为超高基站、大功率基站和下倾角较小基站等。这样的基站存在大气波导的环境中, 极易造成信号沿大气波导传输, 成为可超远覆盖的站点。文献[3]详细研究了利用 5G NR 大规模天线阵列调整天线倾角的 RIM 方案, 并以琼海海峡大气环境为背景, 通过软件仿真验证了该方案的有效性。

3.2 动态 RIM 方案

静态增加 GP 可以有效地解决远端干扰问题。但是增加 GP 会占用下行 (或上行) 链路资源, 影响网络传输效率。另外, 大气波导现象并非一直存在。在没有大气波导时采用具有多个 GP 的子帧必然造成资源浪费。动态 RIM 试图解决这一问题。

2019 年 3 月, 3GPP 在 5G NR Rel-16 中给出了宏蜂窝同步 TDD 5G NR 网络动态 RIM 的 3 类实施方案的建议^[6]。这些方案需要借助 RS。方案规定 RS 的收/发必须位于图 1 中的下行发送边界之后和上行接收边界之前。受扰站发出 RS_1 给施扰站, 声明自己遭受了远端干扰并辅助施扰站判

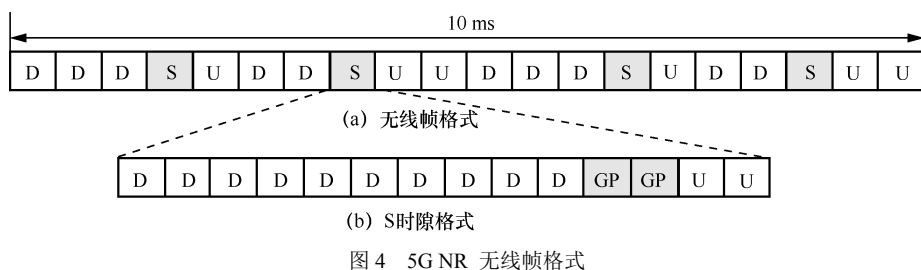


图 4 5G NR 无线帧格式

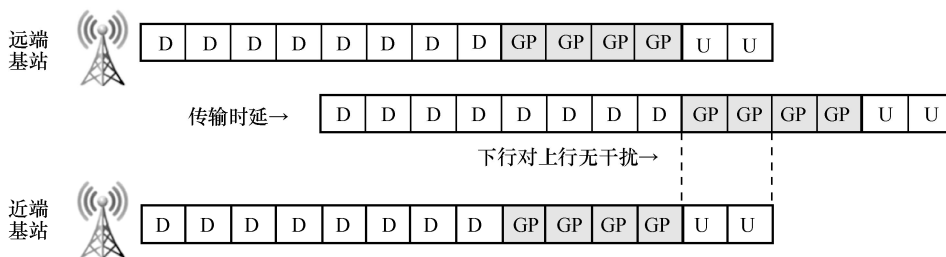


图 5 增加 GP 以提高抗干扰能力示意图



断大气波导是否仍存在;施扰站发送 RS_2 给受扰站,协助受扰站判断大气波导是否仍然存在。动态 RIM 的基本实施流程如下(动态 RIM 流程如图 6 所示)。

- 大气波导现象发生,受扰站开始遭受远端干扰。
- 受扰站观测斜波状 IoT 超过某一阈值(如最后一个 GP 功率>-107 dBm 或其他指标),判定遭受远端干扰,开始定期发送 RS_1 给施扰站,并启动 RS_2 的检测。施扰站检测斜波状 IoT 后,开始启动 RS_1 监视。
- 施扰站收到 RS_1 后,根据 RS_1 判断大气波导造成的时延,启动远端干扰消除方案,如改变 S 子帧的时隙符号配比,根据时延大小将若干下行符号改为 GP 等;同时利用 GP 周期发送 RS_2。
- 若受扰站检测到 RS_2,则继续发送 RS_1,同时检测 IoT 强度。一旦发现 RS_2 停止发送且 IoT 回到正常水平,即可判断大气波导现象消失,已无远端干扰,停止发送 RS_1。
- 施扰站持续接收到 RS_1 期间保持远端干扰消除方案。一旦发现 RS_1 消失(IoT 回归正常),则停止运行远端干扰消除方案,恢复到远端干扰消除之前的网络配置状态。

事实上,大气波导发生时,会有大量基站既为施扰站又为受扰站,且斜波状 IoT 是多个施扰站的干扰信号叠加形成的。因此动态 RIM 能否成功实施,RIM RS 信号尤为重要。区别于 5G NR

网络中用于用户设备解调和测量的 RS,RIM RS 必须应对较大的传输时延,因此需具备如下基本功能:

- 能够提供大气波导是否存在的信息;
- 能够为施扰站提供受扰站有多少个上行符号受到远端干扰的影响;
- 最好能携带施扰站的标识。

3GPP 建议采用长度为 31 的 Gold 序列(伪随机序列)作为 RIMRS,以梳状方式插入两个正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)符号中。仿真实验表明,这种方案检测远端干扰,正确检测概率达 90%以上。

动态 RIM 还有很多问题亟待解决。文献[7]仅研究了在物理层如何检测远端干扰的算法,但是一旦检测到远端干扰发生或消失,如何传递启动或停止远端干扰消除的信令、采用什么样的消除方案并确保指令的执行,则需要操作维护管理(operation administration and maintenance, OAM)系统的协调和调度。2019 年至今,现网中如何实现动态 RIM,未见报道。

动态 RIM 的实施,需要无线电接入网(radio access network, RAN)、接入和移动管理功能(access and mobility management function, AMF)以及 OAM 的协同工作才能完成。协调网络资源、修改相关网元的功能,升级软件版本,单靠运营商是无法实现的。

3.3 远端干扰解决方案验证效果评估

2021 年 9 月,在山东省青岛市对方案进行了现网验证。分析青岛 5G NR 现网数据,发现



图 6 动态 RIM 流程

青岛地区大气波导现象发生时,远端干扰的影响距离在 30~40 km。因此,将青岛全网 S 子帧的时隙符号配比从 D:GP:U=10:2:2 修改为 D:GP:U=8:4:2,即增加 2 个 GP,从而远端干扰抵抗距离从 21.4 km 提升至 42.8 km。因为减少了 2 个下行符号,理论上下行峰值速率会下降,下降幅度为 $4/90=4.4\%$,即峰值速率下降到 50 Mbit/s 左右。

S 子帧修改后青岛电信网络总体 KPI 改善明显,S 时隙结构调整后的 KPI 变化如图 7 所示。可以看出,数据流建立的成功率和无线接通率明显提高,掉线率显著下降。

本次调整 S 子帧前后,专门对青岛所有区域进行了测试,修改时隙配比后全网小区干扰水平变化见表 2。可以看出,修改前,干扰水平大于 -105 dBm 的小区高达 6 163 个,而修改后,仅剩 462 个。而且干扰大于 -100 dBm 的小区从 4 928 个降至 101 个,表明远端干扰得到了很好的抑制。

表 2 修改时隙配比后全网小区干扰水平变化

调整时隙符号配比前		调整时隙符号配比后	
干扰值/dBm	小区数	干扰值/dBm	小区数
-100~-0	4 928	-100~-0	101
-105~-100	1 235	-105~-100	351
-110~-105	1 204	-110~-105	2 036
-115~-110	287	-115~-110	5 137
-120~-115	290	-120~-115	319

另外,对青岛市 3 个区调整 S 子帧前后下行速率进行了测试,符号配比调整后平均下行速率变化结果见表 3。可以看出全网平均下行速率提升 90 Mbit/s,用户感知改善明显。理论上,S 子帧的时隙符号配比改变后,下行符号数减少,下行峰值速率应下降 50 Mbit/s 左右。但是由于空口质量变好,全网下行速率反而改善较多。其中,黄岛区提升最大,达到 125 Mbit/s。分析原因,发现黄岛大气波导现象最严重,调整之前受远端干扰影响的小区最多。调整后,各小区远端干扰下降明显,因而速率提升最大。

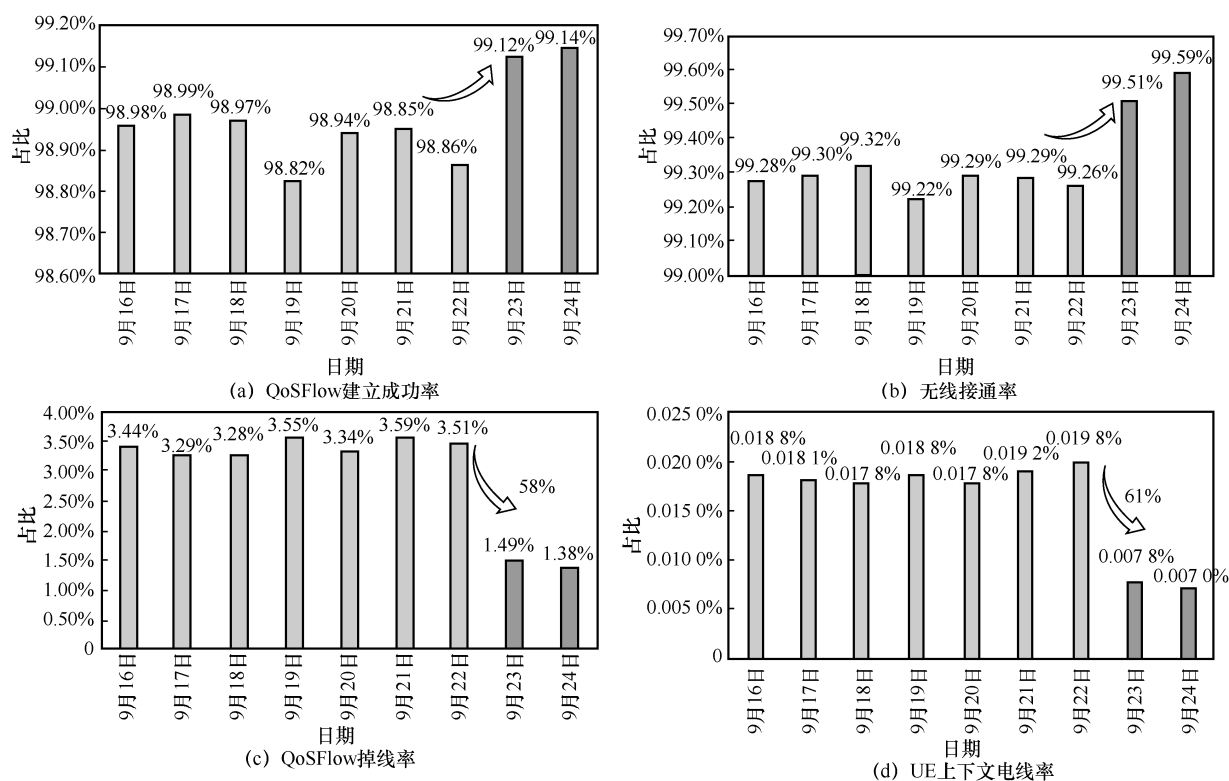


图 7 S 时隙结构调整后的 KPI 变化

表3 符号配比调整后平均下行速率变化/(Mbit·s⁻¹)

区域	调整前	调整后
黄岛	414.1	539.3
胶州	410.6	501.1
胶南	458.5	499.8

3.4 动态 RIM 性能预测与展望

尽管青岛的静态 RIM 方案效果良好,但是在没有远端干扰期间,这种增加 GP 的方案势必会影响 5G NR 网络的下行速率。青岛电信联盟 5G NR 网络修改 S 子帧时隙配比正常运行半年后,本文选取山东省潍坊市奎文区和诸城市的网络运行数据与青岛市黄岛区和胶州市进行了对比。奎文区与黄岛区、诸城市与胶州市单位面积内 5G NR (3.5 GHz 频段) 基站的数量相当,但是因潍坊的两区市是内陆地区,极少发生远端干扰,故 S 子帧的时隙配比仍然采用 D:GP:U=10:2:2。两个地区 2022 年 3 月的用户感知速率对比见表 4,可以看出潍坊两区市的用户下行感知速率明显高于青岛两区市。奎文区比黄岛区高 21.73%,诸城市比胶州市高 29.63%。假设青岛市一年内发生大气波导的时间累计 4 个月,若采用动态改变时隙配比的 RIM 方案,青岛两区市的用户下行感知速率应能提高 15%左右。

表4 用户感知速率对比

市县	用户上行感知速率/(Mbit·s ⁻¹)	用户下行感知速率/(Mbit·s ⁻¹)
青岛黄岛区	5.6	237.9
青岛胶州市	5.1	258.2
潍坊奎文区	5.4	289.6
潍坊诸城市	7.7	334.7

4 结束语

本文分析了 TDD 5G NR 网络远端干扰产生的原因,提出解决方案,并在山东省青岛市电信 5G 网中进行了修改特殊子帧符号配比的优化验证。结果表明,通过减少下行符号增加 GP,能够在不影响下行速率的情况,有效地抑制远端干扰,

提升全网性能。

在实验过程中发现,青岛全网修改 S 子帧后,远端干扰下降显著。与青岛比邻的潍坊高密市、日照等城市,由于仍然采用原符号配比方案,总干扰水平上升明显。因此,此方法的使用与推广要考虑全省乃至全国的一致性,以确保全网干扰最优。

可以预见,采用动态 RIM 可以更好地克服远端干扰,提升全网性能。因此,今后将致力于实践 5G NR 网络动态 RIM 的解决方案,联合电信研究院和设备制造商将动态 RIM 的各种方案移植到现网中,进行验证测试,以期尽快找到具有指导性的实施方案。

参考文献:

- [1] 姚展予,赵柏林,李万彪,等. 大气波导特征分析及其对电磁波传播的影响[J]. 气象学报, 2000, 58(5): 605-616.
YAO Z Y, ZHAO B L, LI W B, et al. The analysis on characteristics of atmospheric duct and its effects on the propagation of electromagnetic wave[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2000, 58(5): 605-616.
- [2] TURTON J D. An introduction to radio ducting[J]. Meteorological Magazine, 1988, 117(1393): 245-254.
- [3] 赵飞龙. 5G 大气波导干扰形成条件及其规避方法研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(1): 109-115, 126.
ZHAO F L. Forming interference of atmospheric duct in 5G and avoid method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(1): 109-115, 126.
- [4] 刘毅,牛海涛,张振刚,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.
- [5] 曲嘉杰,李新,邓伟,等. TD-LTE 远距离同频干扰问题研究[J]. 电信科学, 2010, 26(10): 152-158.
QU J J, LI X, DENG W, et al. Research on the problem of TD-LTE long-distance same-frequency interference [J]. Telecommunications Science, 2010, 26(10): 152-158.
- [6] 3GPP. Study on remote interference management for NR: TR 38866-g10 [S]. 2019.

- [7] PERALTA E, LEVANEN T, MÄENPÄÄ M, et al. Remote interference management in 5G new radio: methods and performance[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2021, 2021(45): 1-22.
- [8] 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.
- [9] ZHAO B L, ZHEN J M, HU C D, et al. Study on clouds and

marine atmospheric boundary layer[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1992, 9(4): 383-396.

[作者简介]



李玉洁(1969—), 男, 中国电信股份有限公司山东分公司高级工程师, 主要研究方向为LTE和5G移动网络的工程实现与优化。