



基于 LTE 测量报告的 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G SA 覆盖评估方法

陆健贤¹, 黄济丘¹, 胡明星², 林衡华³

(1. 中国电信股份有限公司云浮分公司, 广东 云浮 527300;

2. 广东省电信规划设计院有限公司, 广东 广州 510630;

3. 中国电信股份有限公司研究院, 广东 广州 510630)

摘要: 2.1 GHz 频段重耕是城区 5G 网络部署需要研究的重要课题。分析了仿真预测网络覆盖存在的缺陷。考虑绝大部分 5G 基站与 LTE 同址并采用相同或相似工参的情况, 提出了基于 LTE 测量报告的 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G SA 覆盖评估方法。该方法首先建立同址 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G SA 覆盖差异模型并通过测试验证其准确性, 然后根据 LTE 测量报告、覆盖差异模型及速率与链路损耗关系评估两个频段的覆盖质量。评估实例表明, 因城区 LTE 网络覆盖具有 10 dB 余量, 同址 20 MHz 带宽内的 2.1 GHz 5G 重耕仅在 1~10 Mbit/s 上行速率覆盖率较 3.5 GHz 有 1.3~5.2 个百分点的增益。

关键词: 2.1 GHz 频段重耕; 5G SA 覆盖; 测量报告; 波束成形

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022032

An approach of LTE measurement report based 2.1 GHz and 3.5 GHz 5G SA coverage evaluation

LU Jianxian¹, HUANG Jiqui¹, HU Mingxing², LIN Henghua³

1. Yunfu Branch of China Telecom Co., Ltd., Yunfu 527300, China

2. Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunications Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

3. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

Abstract: 2.1 GHz refarming is a key issue for the evolution of 5G network. Limitations of network simulation were analyzed. Since most of 5G sites were co-sited with LTE and adopted the same or similar engineering parameters, an approach of 2.1 GHz and 3.5 GHz 5G SA network coverage evaluation was proposed. A co-site coverage differential model between 2.1 GHz and 3.5 GHz 5G SA was given and its accuracy was verified by field trial. Then the coverage of two frequencies were predicted based on LTE MR, the differential model and the uplink rate curve relative to link loss. The evaluation instance indicates only 1.3~5.2 pp coverage gain is achieved at uplink rate between 1 Mbit/s and 10 Mbit/s by refarming 2.1 GHz within 20 MHz bandwidth, because of the 10 dB margin of LTE coverage.

Key words: 2.1 GHz refarming, 5G SA coverage, measurement report, beamforming



0 引言

2021年8月,工业和信息化部在世界5G大会开幕式上公布的数据显示,我国已开通建发5G基站99.3万个,5G网络已覆盖全国所有地级市、95%以上县区和35%乡镇地区。因3.5 GHz频段较高,且设备价格和能耗远高于LTE,使用低频段低成本提升5G覆盖已成为业界共识。中国电信与中国联通均已获得2.1 GHz的5G频率使用许可,并在郊区、乡镇部署2.1 GHz 5G基站。而在市区、县区等区域,相对3.5 GHz网络,全面重耕2.1 GHz频段能否显著提升5G网络覆盖,是网络发展需要研究的重要课题。从链路预算、单站测试结果看,1.8 GHz/2.1 GHz 5G单个基站的覆盖能力优于3.5 GHz^[1-2]。但在5G和LTE普遍同址的情况下,重耕2.1 GHz的覆盖增益,除了从单站微观层面,还必须从网络全局层面准确评估。

本文分析了网络仿真存在的缺陷,根据绝大部分5G基站利旧LTE站址并继承LTE工参的情况,提出了基于LTE测量报告(measurement report, MR)的2.1 GHz和3.5 GHz 5G SA(standalone,独立组网)网络覆盖评估方法。该方法首先建立同址2.1 GHz和3.5 GHz 5G覆盖差异模型,并利用该模型、LTE MR以及上行速率与链路损耗关系预测5G覆盖率。最后,通过实例对比2.1 GHz相对3.5 GHz的覆盖增益。

1 网络仿真的缺陷

网络部署前可通过仿真预测覆盖质量,但以下3个缺陷降低了预测结果的可信度。

(1) 传播模型误差

对于射线跟踪模型,大部分仿真工具的室外覆盖均值误差可控制在4 dB以内^[3],但因缺少建筑室内结构数据,仿真一般基于穿透损耗和室内每米损耗预测室内覆盖,准确性较低。

(2) 用户分布模型误差

基于测距和位置指纹的室外定位平均误差为数十米至上百米^[4-5],但室内用户的精准定位非常困难。仿真通常根据各小区业务量、室内外比例等输入参数随机散布用户。由于难以获取和模拟真实用户分布,该因素对仿真准确性的影响远比传播模型严重。

(3) 未对室内分布系统建模

实际网络中,重要建筑普遍建设分布系统用于解决深度覆盖问题,其吸纳的业务量占比可达10%~30%。但因建模的复杂性,大规模网络仿真并未纳入室内分布系统,而只是针对室外基站,导致仿真结果与实际网络存在较大偏差。

MR是由网络控制终端周期性上报RSRP(reference signal receiving power,参考信号接收功率)、RSRQ(reference signal receiving quality,参考信号接收质量)等测量报告而生成的大数据,反映了实际用户真实感知的网络覆盖质量,被广泛应用于网络规划和优化^[6-8]。因MR包含小区标识,可按需筛选得到室外基站和室内分布系统的MR数据,针对性地分析两者对网络覆盖的影响。

以某城区约25 km²面积、包含107个1.8 GHz LTE基站的区域为例,使用5 m精度地图和射线跟踪模型对该区域进行仿真,根据实测数据设置各类型建筑穿透损耗和室内每米损耗,具体见表1,局部仿真结果如图1所示。

表1 穿透损耗和室内每米损耗

建筑类型	高层建筑	普通建筑	大型建筑	其他
穿透损耗/dB	19.8	15.9	23.0	12.0
室内每米损耗/dB	0.76	0.54	1.15	0.66



图1 某城区局部区域覆盖仿真结果

表 2 仿真结果与 MR 统计对比

数据来源		仿真结果		MR 统计	
用户分布		全部室外	室内 70%	全部室内	实际分布
RSRP 均值/dBm		-79.21	-87.71	-91.34	-92.13
RSRP 分布	≥ -85	71.19%	44.18%	32.60%	26.36%
	-110~-85	27.63%	49.98%	59.57%	70.58%
	< -110	1.18%	5.84%	7.83%	3.06%

仿真结果与同一区域 107 个基站的 MR 统计对比见表 2。通常认为约 70% 的用户位于室内^[9]，则仿真的 RSRP 均值比实际高 4.42 dB，仿真 RSRP 优良 (≥ -85 dBm) 的比例比实际高 17.82 个百分点、RSRP 弱 (< -110 dBm) 的比例高 2.78 个百分点。仿真总体预测结果偏乐观而弱覆盖区域的预测结果偏悲观，与实际偏差较大。仿真的 RSRP 均值的优良比例偏高主要受传播模型和用户分布模型误差的影响；而 RSRP 值弱的比例偏高则是由于仿真中没有考虑室内分布系统对覆盖的提升。因此，覆盖评估应充分利用 MR 数据，尽可能地避免网络仿真误差。

2 基于 LTE MR 评估 5G 覆盖的可行性

虽然 MR 真实反映网络覆盖，但现阶段无法通过 MR 数据直接比较 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G 网络的覆盖：首先，城区尚未规模开展 2.1 GHz 频段的 5G 重耕，不具备 MR 数据；其次，城区 5G 网络距全覆盖尚有较大差距，3.5 GHz 的 MR 还不能准确反映网络覆盖情况。为解决上述问题，本文提出了基于 LTE MR 的 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G 覆盖评估方法，可行性分析如下。

(1) 通过 1.8 GHz/2.1 GHz LTE MR 预测 2.1 GHz 5G 覆盖

除个别地下停车场和电梯外，1.8 GHz/2.1 GHz LTE 已实现城区全覆盖。可预期，为节约成本、加快建设，2.1 GHz 重耕将通过 LTE 设备升级或更换 LTE/5G 双模设备并利旧原 LTE 天馈实现。

由于频率接近且同天馈，重耕后的 2.1 GHz 5G 具有与 LTE 基本一致的无线传播特性。同时，5G 用户是 4G 用户的子集。两者具有基本相同的传播和用户分布特性，只需用 1.8 GHz/2.1 GHz LTE 室外基站 MR 的 RSRP 数据减去两者频率的路径损耗差值，即可得到重耕后 2.1 GHz 5G 覆盖预测，避免了仿真传播模型、用户分布以及室内分布系统导致的误差。

(2) 通过同址 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G 覆盖差异模型预测 3.5 GHz 5G 覆盖

为控制租金，除少量因物业原因无法新增设备的站址以及用于补盲的微基站外，3.5 GHz 5G 基站均与 LTE 基站同址部署。某城区 1 315 个 3.5 GHz 5G 小区和同址 1.8 GHz/2.1 GHz LTE 小区的工参差异见表 3，大部分 5G 小区继承了同址 LTE 小区的工参。LTE 小区的天线挂高、方向角、下倾角是综合各种因素多次优化后的结果。对相同的无线环境和站址，5G 小区的工参受限于同样的因素，必然采用与原 LTE 小区相同或相似的设置。个别 5G 小区与 LTE 小区的天线方向差异较大，是在 5G 尚未达到全覆盖的情况下为改善特定目标覆盖而采取的调整。

基于 LTE MR 预测 3.5 GHz 5G 覆盖同样避免了用户分布模型引入的误差。考虑到绝大部分 3.5 GHz 5G 基站利旧 LTE 站址，通过建立同址 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G 覆盖差异模型、利用 LTE MR 数据可预测 3.5 GHz 5G 覆盖率，预测的准确性取决于该差异模型。差异模型分为基准模型和修正因子模



表3 某城区 3.5 GHz 5G 小区与同址 1.8 GHz/2.1 GHz LTE 小区的工参差异

工参	均值	标准差	说明
天线挂高/m	-2.3	5.8	88%的 5G 小区和 LTE 小区的天线挂高差绝对值小于 5 m
方向角	-0.6°	24.2°	74%的 5G 小区和 LTE 小区的天线方向一致
下倾角	1.7°	3.4°	75%的 5G 小区和 LTE 小区的天线下倾角差的绝对值小于 4°

注：天线挂高差=3.5 GHz 天线挂高-2.1 GHz 天线挂高，方向角和下倾角差也按相同方式计算。

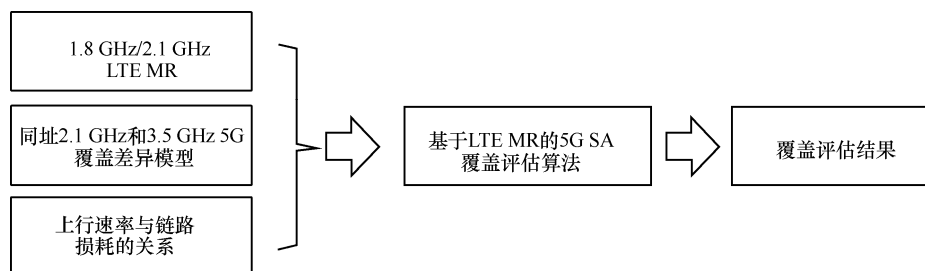


图2 覆盖评估方法的总体架构

型两部分在第3节详细论述，其中同址同工参的基准模型与频率、天线相关，模型参数通过对典型站址测试获取；而同址不同工参的修正因子模型基于传播模型和天线波瓣图建模，并可通过实验验证其准确性。

3 评估方法的模型和算法

3.1 总体架构

本文覆盖评估的目的是得到 2.1 GHz 频段重耕相对 3.5 GHz 5G 网络的覆盖增益以支撑投资决策。评估方法基于以下 2 个条件：第一，只评估某一区域的总体覆盖率，而不预测特定点的覆盖质量；第二，只评估 5G 室外基站覆盖质量。在目前 LTE 室内分布系统覆盖的区域，5G 同样也必须建设室内分布系统才能实现良好覆盖。因此，两个频段的覆盖差异主要体现在室外基站而非室内分布系统覆盖的区域。评估方法总体架构如图 2 所示。

3.2 同址 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G 覆盖差异模型

3.2.1 建模方法

由于波束成形提升覆盖并抑制干扰，3.5 GHz 5G 的PDCCH覆盖优于 1.8 GHz LTE，与 1.8 GHz LTE

同址的 3.5 GHz 5G 覆盖受限于上行链路^[1]。终端到基站的链路损耗 L 如式 (1) 所示：

$$L = PL(d, h, f) - G_{BS}(\theta, \varphi) + L_f \text{ dB} \quad (1)$$

其中， PL 为路径损耗（含穿透损耗）， G_{BS} 为基站天线增益， L_f 为馈线损耗， d 为基站与终端之间的距离， f 为频率， h 为天线挂高， θ 和 φ 分别为基站天线至终端连线与基站天线水平面和垂直面主瓣方向的夹角，几何关系如图 3 所示。

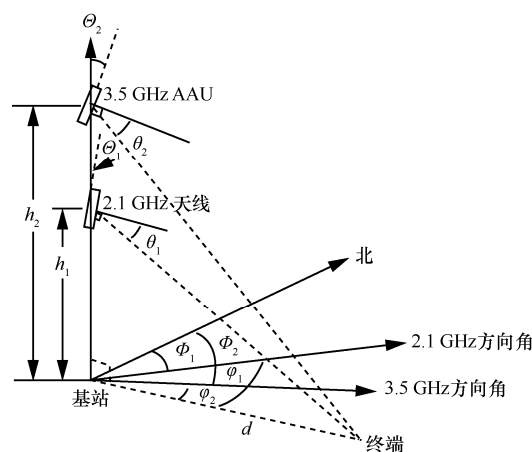


图3 同址覆盖差异模型参数几何关系

其中， θ_1 、 θ_2 分别为 2.1 GHz 和 3.5 GHz 天线下倾角， φ_1 和 φ_2 分别为 2.1 GHz 和 3.5 GHz 天线方向角。将终端天线理想化为增益为 0 dBi 的各向同

性天线。对于最大增益为 A_{BS} 的基站天线, $A_H(\theta)$ 和 $A_E(\varphi)$ 分别表示归一化水平面和垂直面波瓣图中 θ 、 φ 方向的增益, 则 $G_{BS}(\theta, \varphi)$ 可表示为:

$$G_{BS}(\theta, \varphi) = A_{BS} + A_H(\theta) + A_E(\varphi) \quad (2)$$

2.1 GHz、3.5 GHz 两个频段基站和终端的主要参数差异见表 4。

表 4 两个频段基站和终端的主要参数差异

频段		3.5 GHz	2.1 GHz
基站	天线配置	64T64R	4T4R
	天线增益/dBi	25	17
	噪声系数/dB	3.5	2.5
	馈线损耗/dB	0	1
终端	天线配置	2T4R	1T4R
	发射功率/dBm	26	23

预测路径损耗可采用经验模型或确定性模型。若缺少准确的地图、地物的电磁参数, 确定性模型与经验模型相比无明显优势^[10]。因此, 本文主要采取 UMa 模型^[11]计算路径损耗。

同址覆盖差异模型算法如下。

步骤 1 根据典型区域同址同工参的 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G 基站实测数据建立基准差异模型 $\Delta L_{\text{baseline}}$ 。

步骤 2 根据 UMa 模型计算两者天线挂高差 Δh 的修正因子 $CF(\Delta h)$, 其中 $\Delta h = h_2 - h_1$ 。

步骤 3 根据天线波瓣图计算两者天线下倾角差 $\Delta\theta$ 和方向角差 $\Delta\phi$ 的修正因子 $CF(\Delta\theta)$ 和 $CF(\Delta\phi)$, 其中, $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ 。

步骤 4 按式(3)计算 2.1 GHz 和 3.5 GHz 5G 链路损耗差值 ΔL :

$$\Delta L = \Delta L_{\text{baseline}} + CF(\Delta h) - CF(\Delta\theta) - CF(\Delta\phi) \text{ dB} \quad (3)$$

3.2.2 基准差异模型

(1) 频率的影响

UMa 模型非视距的路径损耗如式 (4) 所示。

$$\begin{aligned} PL_{3D-UMa-NLOS} = & 161.04 - 7.1 \lg W + \\ & 7.5 \lg h - \left(24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_{BS}} \right)^2 \right) \lg h_{BS} + \\ & (43.42 - 3.1 \lg h_{BS})(\lg d_{3D} - 3) + \\ & 20 \lg f_c - (3.2(\lg 17.625)^2 - 4.97) - \\ & 0.6(h_{UT} - 1.5) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, W 为街道宽度, h 为平均建筑高度, h_{BS} 为基站高度, d_{3D} 为基站到终端的 3 维距离 (单位为 m), h_{UT} 为终端高度, f_c 为频率 (GHz)。

在高度为 40 m、6 m 的两个站址, 对 1 978 MHz 和 3 481 MHz 连续波对比测试, 两个频段路径损耗差分布如图 4 所示, 路径损耗差均值为 5.50~6.50 dB。选取不需要建设室内分布系统的住宅楼、商用楼、临街商铺 3 个典型场景, 测试两个频段室内的路径损耗差见表 5, 两者路径损耗差均值为 8.03~11.90 dB。

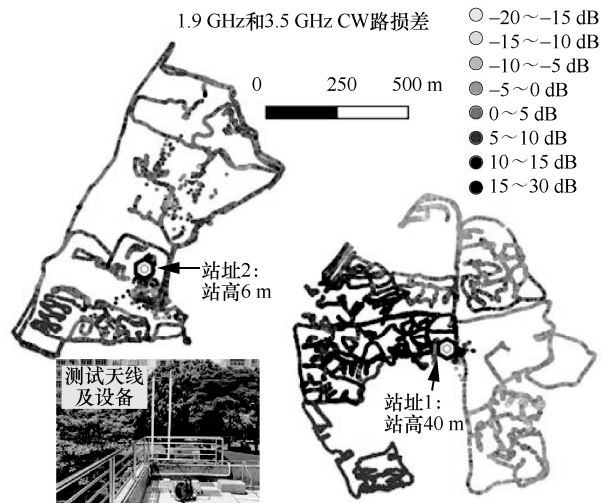


图 4 两个频段连续波路径损耗差分布

表 5 两个频段连续波路径损耗差测试结果

场景		均值/dB	标准差/dB
室外	站高 6 m	5.50	4.10
	站高 40 m	6.50	7.36
室内	住宅楼	11.90	5.78
	商用楼	11.79	5.48
	临街商铺	8.03	4.17

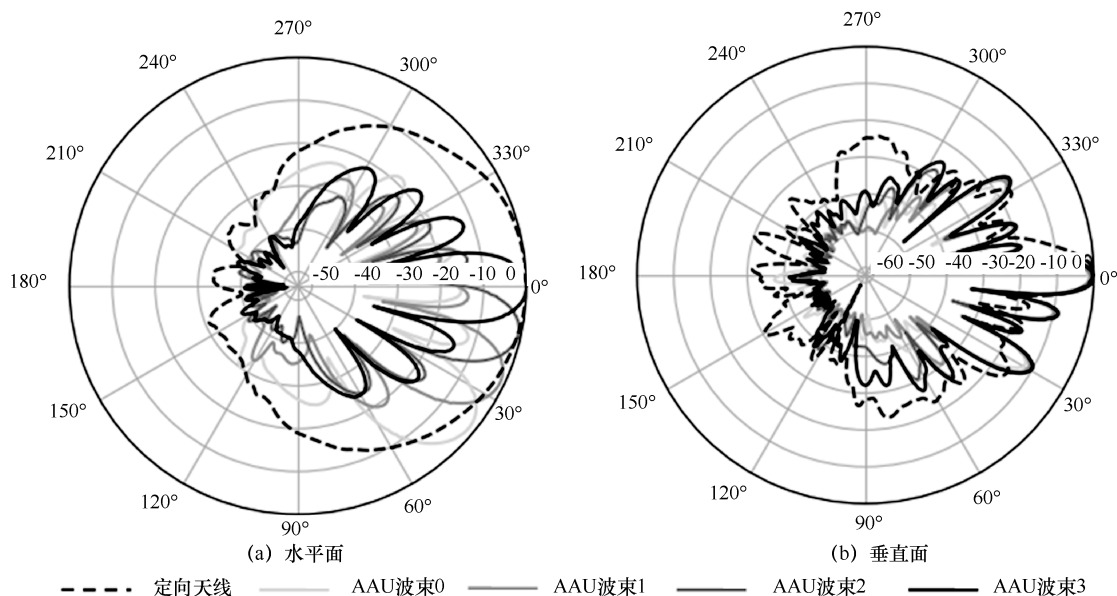


图5 1.8 GHz/2.1 GHz LTE 定向天线与3.5 GHz AAU 波瓣图对比

(2) 天线的影响

1.8 GHz/2.1 GHz LTE 定向天线与3.5 GHz AAU 波瓣图对比如图5所示。定向天线增益约17 dBi、水平半功率角约65°、垂直半功率角约7.5°。市区3.5 GHz 5G 基站SSB (synchronization signal and PBCH block, 同步信号和PBCH块) 一般采用7波束配置, 波束3增益为25 dBi, 水平半功率角约13°, 垂直半功率角约6°。主流64T64R AAU采用数字波束成形, 含192个振子^[12-13], 每3个振子构成1个增益约10 dBi的天线单元, 共64个天线单元(±45°极化各一半)。理论上阵列增益等于天线单元数量^[14], 64T64R AAU 阵列增益为 $10 \times \lg(64/2) = 15$ dB, 总天线增益=10+15=25 dBi。微波暗室测试的AAU最大增益约为25 dBi, 与理论值一致。典型的SSB水平扫描范围配置为105°, 较定向天线的65°水平半功率角宽, 扇区边缘区域覆盖能力更强。

(3) 典型站址的模型参数

理想情况下每个扇区覆盖120°的区域, 因此选取室外测试范围为天线方向±60°、半径500 m的扇形区域。室内测试点包括3个住宅楼、4个商用楼和7个临街商铺。对于每一个室内点, 测试前均调整基站天线使其主瓣方向指向该

点。链路损耗差计算如式(5)、式(6)所示。

$$L_{3.5\text{NR}/2.1\text{NR}} = \text{ss_PBCH_BlockPower}_{3.5\text{NR}/2.1\text{NR}} - \text{RSRP}_{3.5\text{NR}/2.1\text{NR}} \quad (5)$$

$$\Delta L_{\text{baseline}} = L_{3.5\text{NR}} - L_{2.1\text{NR}} \quad (6)$$

两个频段室外和室内链路损耗差见表6, 分布如图6所示, 服从正态分布。同址同工参3.5 GHz 5G 室外覆盖优于2.1 GHz, 与文献[15]的结论一致。

表6 两个频段5G 室外和室内链路损耗测试结果

链路损耗差/dB		均值	标准差
室外		-3.38	5.22
室内	住宅	3.18	5.13
	商用楼	3.44	5.05
	临街商铺	-0.33	3.67

从用户的生活轨迹, 可以合理假设其在各类建筑室内的分布: 一般19:00至次日7:00用户位于家中, 其他时间位于工作、消费娱乐场所。按停留时间, 用户在住宅、商用楼及临街商铺的分布概率 P_i 分别取0.5、0.25和0.25, 3类室内场景链路损耗差均值 μ_i 和标准差 σ_i 取值见表6, 则根据式(7)、式(8), 室内链路损耗差均值 $\mu=2.37$ dB、标准差 $\sigma=5.03$ dB。

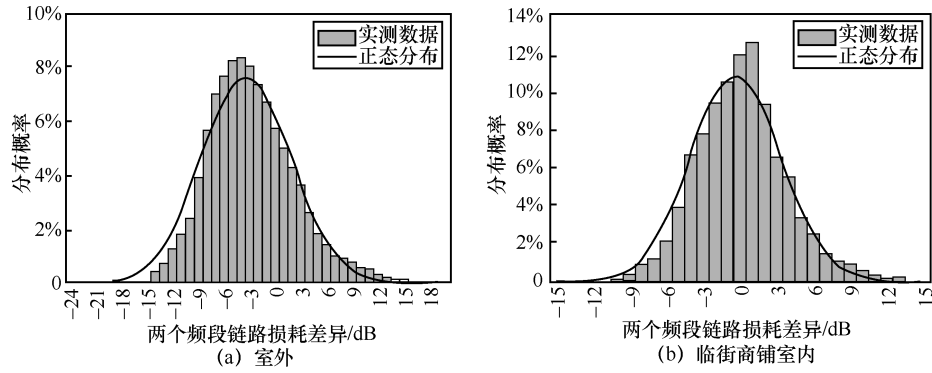


图 6 两个频段 5G 链路损耗差分布

$$\mu = 0.5\mu_1 + 0.25\mu_2 + 0.25\mu_3 \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\sigma_i^2 + \mu_i^2) P_i - \mu^2} \quad (8)$$

AAU 水平半功率角宽于定向天线, 在扇区边缘, AAU 相对定向天线的增益优势更明显, 如直接采用上述计算结果将低估 3.5 GHz 的室内覆盖质量。选取 6 个测试点, 通过调整天线方向使被测室内点分别位于天线主瓣和偏离主瓣 60° 两个方位, 测试结果见表 7。可见偏离主瓣 60° 方位的链路损耗差较主瓣方位减少了 3.21 dB。假设各类建筑在各方位均匀分布, 引入方位角修正因子 $\Delta\mu = 3.21 \times 0.5 = 1.61$ dB, 将两个频段链路损耗差室内均值修正为: $\mu' = \mu - \Delta\mu = 0.76$ dB。

表 7 不同方位的 5G 链路损耗差均值

方位	主瓣方向	偏离主瓣 60°	差值
链路损耗差/dB	1.05	-2.16	3.21

3.2.3 修正因子模型

(1) 天线挂高差值修正因子 $CF(\Delta h)$

根据式 (4) 可知, 距离基站 d 处, 天线挂高差 Δh 产生的链路损耗差 $CF(d, \Delta h)$ 为:

$$CF(d, \Delta h) = - \left(24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_1 + \Delta h} \right)^2 \right) \cdot \lg(h_1 + \Delta h) + (43.42 - 3.1 \lg(h_1 + \Delta h)) \cdot (\lg d_{3D2} - 3) + \left(24.37 - 3.7 \left(\frac{h}{h_1} \right)^2 \right) \lg h_1 - (43.42 - 3.1 \lg h_1) (\lg d_{3D1} - 3) \quad (9)$$

其中, 将小区简化成覆盖范围为 120° 、半径为 R m 的扇区并对链路损耗差加权平均得到 $CF(\Delta h)$, 其中, 权重为距离基站 d 、宽度 1 m 的扇环相对整个扇区的面积占比:

$$CF(\Delta h) = \sum_{d=0}^{R-1} \frac{\frac{1}{3} \pi [(d+1)^2 - d^2]}{\frac{1}{3} \pi R^2} CF(d, \Delta h) = \quad (10)$$

$$\sum_{d=0}^{R-1} \frac{(2d+1)}{R^2} CF(d, \Delta h)$$

(2) 天线倾角差值修正因子 $CF(\Delta \theta)$

由图 3 中天线的挂高、下倾及距离关系, 可知在距离基站 d 处, θ_1 和 θ_2 为:

$$\theta_1 = \begin{cases} (90 - \theta_1) - \arctan \frac{d}{h_1}, & d \leq \frac{h_1}{\tan(\theta_1)} \\ 360 - \left[\arctan \frac{d}{h_1} - (90 - \theta_1) \right], & d > \frac{h_1}{\tan(\theta_1)} \end{cases} \quad (11)$$

$$\theta_2 = \begin{cases} 90 - (\theta_1 + \Delta \theta) - \arctan \frac{d}{h_1 + \Delta h}, & d \leq \frac{h_1 + \Delta h}{\tan(\theta_1 + \Delta \theta)} \\ 360 - \left[\arctan \frac{d}{h_1 + \Delta h} - 90 + (\theta_1 + \Delta \theta) \right], & d > \frac{h_1 + \Delta h}{\tan(\theta_1 + \Delta \theta)} \end{cases} \quad (12)$$

天线倾角差值 $\Delta \theta$ 产生的链路损耗差值 $CF(d, \Delta \theta)$ 为:



$$CF(d, \Delta\Theta) = [A_{E2}(\theta_2(d, \Delta\Theta)) - A_{E1}(\theta_1(d))] - [A_{E2}(\theta_2(d, 0)) - A_{E1}(\theta_1(d))] \quad (13)$$

按照天线挂高差值修正因子的加权平均方法, 小区的 antennas 下倾差值修正因子加权平均值为:

$$CF(\Delta\Theta) = \sum_{d=0}^{R-1} \frac{(2d+1)}{R^2} CF(d, \Delta\Theta) \quad (14)$$

(3) 天线方向角差值修正因子 $CF(\Delta\Theta)$

根据天线方向和波瓣图, 在天线 φ_l 方向处, 天线方向差 $\Delta\Theta$ 产生的链路损耗差值 $CF(\varphi_l, \Delta\Theta)$ 如式 (16) 所示。

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \Delta\Theta \quad (15)$$

$$CF(\varphi_l, \Delta\Theta) = [A_{H2}(\varphi_1 - \Delta\Theta) - A_{H1}(\varphi_1)] - [A_{H2}(\varphi_1) - A_{H1}(\varphi_1)] \quad (16)$$

对天线方向 $\pm 60^\circ$ 范围加权平均, 小区天线方向角差值修正因子为:

$$CF(\Delta\Theta) = \frac{1}{120} \sum_{\varphi_1=-60}^{60} CF(\varphi_1, \Delta\Theta) \quad (17)$$

为验证修正因子模型预测准确性, 以天线挂高 63 m、方向 230° 、下倾 10° 的 5G 小区为基准, 调整天线方向、下倾、挂高, 在 $230^\circ \pm 60^\circ$ 、500 m 范围的

扇形区域, 工参调整后相对基准设置的 RSRP 差异测试结果见表 8, 模型预测误差在 $-1.67 \text{ dB} \sim 1.76 \text{ dB}$ 。

3.3 上行速率与链路损耗的关系

若发射天线等功率分配, 非频率选择性信道的点对点 MIMO 信道容量如式 (18) 所示^[16], 其中 n_T 和 n_R 分别为发射和接收天线数量, I_{nR} 为单位矩阵, P 为发射功率, $\mathbf{G}$ 为信道矩阵 (上标 H 表示共轭转置), N 为底噪:

$$C = \text{lb} \left[\det \left[I_{n_R} + \frac{P}{n_T N} \mathbf{G} \mathbf{G}^H \right] \right] \text{bit} / (\text{s} \cdot \text{Hz}) \quad (18)$$

参考文献[17], 将信道矩阵分解为大尺度衰落 β 和小尺度衰落信道矩阵 $\mathbf{H}$ 两部分, 则 β 为所示的从终端到基站链路损耗。

$$\mathbf{G} = \beta^{1/2} \mathbf{H} \quad (19)$$

$$\beta = 10^{-L \times 0.1} = 10^{-(\text{PL} - G_{\text{BS}} + L_r) \times 0.1} \quad (20)$$

信道容量可表示为式 (21), 其中 v_ℓ 为 $\mathbf{H}$ 的奇异值。

$$C = \sum_{\ell=1}^{\min(n_R, n_T)} \text{lb} \left(1 + \frac{P \beta v_\ell^2}{N} \right) \text{bit} / (\text{s} \cdot \text{Hz}) \quad (21)$$

LTE 和 5G 均为宽带系统, OFDM 将上行带宽 B 分解为 $12N_{\text{RB}}$ 个子载频, 因 B 远小于载频频率, 可认为 β 不变, 根据文献[18], 上行速率可用式 (22) 表示:

表 8 修正因子预测值与实测值对比

场景	挂高/m	方向	下倾	SSB RSRP 差异/dB		
				实测值	模型预测值	误差
基准	63	230°	10°	-91.06	—	—
方向调整	63	220°	10°	-0.82	-0.59	0.23
		200°	10°	-3.67	-4.45	-0.78
		170°	10°	-10.09	-11.77	-1.67
下倾调整	63	230°	7°	-3.05	-2.24	0.81
		230°	13°	-3.00	-1.24	1.76
高度调整	58	230°	10°	-0.85	-0.88	-0.03

$$C = \frac{B}{12N_{RB}} \sum_{i=0}^{12N_{RB}-1} \text{lb} \left(\det \left[I_{n_R} + \frac{P_{UT}}{12N_{RB}n_T N} G_i G_i^H \right] \right) = \frac{B}{12N_{RB}} \sum_{i=0}^{12N_{RB}-1} \sum_{\ell=1}^{\min(n_R, n_T)} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{UT} \beta v_{\ell i}^2}{12N_{RB} N} \right) \text{bit/s} \quad (22)$$

即上行速率受限于上行带宽 B 、终端发射功率 P_{UT} 、从终端到基站链路损耗 β 以及无线环境。图 7 是 5G 及 LTE 上行速率随链路损耗变化的测试结果。因测试小区为无负载小区，曲线中的链路损耗已减去 3 dB 作为上行干扰余量。

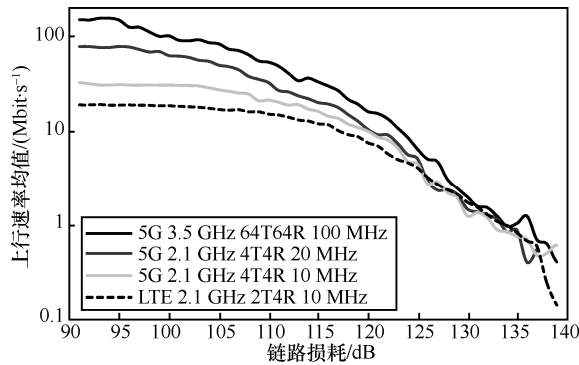


图 7 5G 及 LTE 上行速率随链路损耗变化的测试结果

对于链路损耗小于 126 dB 的中、近区域，10 MHz 带宽的 2.1 GHz 5G 速率高于 LTE。5G 上行引入了 256QAM 调制^[19]，较 LTE 的 64QAM 速率提高 1.33 倍，10 MHz 带宽 5G 的 N_{RB} 为 52^[20]，较 LTE 提升 4%，因此在非功率受限区域，5G 通过高阶调制和更多 RB 获得显著增益。而对于链路损耗大于 126 dB 的远区，终端因发射功率受限无法调度更多 RB 及高阶调制，20 MHz、10 MHz 的 5G 及 LTE 上行速率基本相当。

对于相同的链路损耗，3.5 GHz 上行速率高于 20 MHz 带宽的 2.1 GHz。在中、近区域，3.5 GHz 因更高的带宽及双发射天线获得更高的上行速率。而在距离基站较远的功率受限区域，由于 3.5 GHz 终端最大发射功率比 2.1 GHz 高，在相同链路损耗下，3.5 GHz 具有更高的接收 SINR，因此其速率也高于 2.1 GHz。

3.4 基于 LTE MR 的 5G 覆盖评估算法

本文采用按小区聚类的 MR 数据评估 5G 覆

盖质量。计算中将带有 AGPS (assisted global positioning system, 辅助全球卫星定位系统) 信息的 MR 归类为室外，其他 MR 归类为室内。

从用户感知定义 2 个 5G 覆盖指标如下。

(1) 5G 网络驻留比：现网 5G 到 LTE 重定向的 RSRP 门限一般设置为 -120 dBm，ss-PBCH-BlockPower 一般设置为 18 dBm，因此终端驻留 5G 的链路损耗门限 $L_{2.1NR}$ 和 $L_{3.5NR}$ 为 138 dB。

(2) 上行速率 r 的覆盖率：根据图 8，若速率 r Mbit/s 对应的链路损耗门限值为 L_{th} ，则上行速率均值不低于 r 的覆盖率为 P (链路损耗 $\leq L_{th}$)。

评估算法描述如下。

输入 评估区域的 1.8 GHz/2.1 GHz 室外 LTE 小区 MR 及工参、3.5 GHz 5G 小区工参。

输出 5G 网络驻留比及上行速率覆盖率。

步骤 1 对按小区聚类的 I 个 1.8/2.1 GHz 室外小区 MR 数据，以 1 dB 步长 (总步长为 J) 分别统计室外样本的 RSRP MR 分布矩阵 $\mathbf{ODM}_{I \times J}$ 和室内样本的 RSRP MR 分布矩阵 $\mathbf{IDM}_{I \times J}$ ，其中矩阵 $\mathbf{ODM}$ 中每一元素 $\mathbf{ODM}[i, j]$ 为小区 i 中 RSRP 测量值等于 RSRP_j 的 AGPS MR 样本数量，矩阵 $\mathbf{IDM}$ 中每一元素 $\mathbf{IDM}[i, j]$ 为小区 i 中 RSRP 测量值等于 RSRP_j 的全量 MR 样本数量减去 AGPS MR 样本数量。

步骤 2 计算 $\mathbf{IDM}[i, j]$ 和 $\mathbf{ODM}[i, j]$ 所对应的 2.1 GHz 链路损耗 L_j^i ，其中 referencePower_i 为小区 i 的 RS 功率，1.8 GHz 小区加 1 dB 为其与 2.1 GHz 的链路损耗差值：

$$L_j^i = \begin{cases} \text{referencePower}_i - \text{RSRP}_j, & \text{小区 } i \text{ 为 2.1 GHz LTE} \\ \text{referencePower}_i - \text{RSRP}_j + 1, & \text{小区 } i \text{ 为 1.8 GHz LTE} \end{cases} \quad (23)$$

步骤 3 预测小区 i 满足驻留 2.1 GHz 5G 的 MR 样本数量 $\text{CC}_{2.1NR}(i)$ ：

$$\text{CC}_{2.1NR}(i) = \sum_{j=1}^J (\mathbf{IDM}[i, j] (\text{当 } L_j^i \leq L_{2.1NR} \text{ 时}) + \mathbf{ODM}[i, j] (\text{当 } L_j^i \leq L_{2.1NR} \text{ 时})) \quad (24)$$



步骤4 按覆盖差异模型计算小区*i*的2.1 GHz和3.5 GHz链路损耗差值 ΔL 。

步骤5 预测小区*i*满足驻留3.5 GHz 5G的MR样本数量 $CC_{3.5NR}(i)$:

$$CC_{3.5NR}(i) = \sum_{j=1}^J \left(\text{IDM}[i, j] P(L_j^i + \Delta L \leq L_{3.5NR}^r) + \text{ODM}[i, j] P(L_j^i + \Delta L \leq L_{3.5NR}^r) \right) \quad (25)$$

其中,

$$P(L_j^i + \Delta L \leq L_{3.5NR}^r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{L_{3.5NR}^r - L_j^i - \text{CF}(\Delta h) + \text{CF}(\Delta \theta) + \text{CF}(\Delta \phi)} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

其中, μ 、 σ 为基准差异模型的室外或室内链路损耗均值和标准差, 取值见第3.2.2节。

步骤6 预测小区*i*满足2.1 GHz 5G上行速率不低于*r*的MR样本数量 $RC_{2.1NR}$:

$$RC_{2.1NR}(i) = \sum_{j=1}^J \left(\text{IDM}[i, j] \left(\text{当 } L_j^i \leq L_{2.1NR}^r \right) + \text{ODM}[i, j] \left(\text{当 } L_j^i \leq L_{2.1NR}^r \right) \right) \quad (26)$$

其中, $L_{2.1NR}^r$ 为图7中2.1 GHz 5G速率*r*对应的链路损耗。

步骤7 预测小区*i*满足3.5 GHz 5G上行速率不低于*r*的MR样本数量 $RC_{3.5NR}$ 。

$$RC_{3.5NR}(i) = \sum_{j=1}^J \left(\text{IDM}[i, j] P(L_j^i + \Delta L \leq L_{3.5NR}^r) + \text{ODM}[i, j] P(L_j^i + \Delta L \leq L_{3.5NR}^r) \right) \quad (27)$$

其中, $L_{3.5NR}^r$ 为图7中3.5 GHz 5G速率*r*对应的链路损耗。

步骤8 预测评估区域2.1 GHz和3.5 GHz 5G网络驻留比 $CP_{2.1NR}$ 和 $CP_{3.5NR}$:

$$CP_{2.1NR} = \frac{\sum_{i=1}^I CC_{2.1NR}(i)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{IDM}[i, j] + \text{ODM}[i, j])} \quad (28)$$

$$CP_{3.5NR} = \frac{\sum_{i=1}^I CC_{3.5NR}(i)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{IDM}[i, j] + \text{ODM}[i, j])} \quad (29)$$

步骤9 预测评估区域2.1 GHz和3.5 GHz 5G速率不低于*r*的概率 $RP_{2.1NR}$ 和 $RP_{3.5NR}$:

$$RP_{2.1NR} = \frac{\sum_{i=1}^I RC_{2.1NR}(i)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{IDM}[i, j] + \text{ODM}[i, j])} \quad (30)$$

$$RP_{3.5NR} = \frac{\sum_{i=1}^I RC_{3.5NR}(i)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\text{IDM}[i, j] + \text{ODM}[i, j])} \quad (31)$$

4 评估实例

某大城市局部区域面积约80 km², 建筑物平均高度30 m, 同址5G/LTE基站210个, 其中2.1 GHz+1.8 GHz LTE载波聚合基站157个、1.8 GHz基站53个, LTE网络MR统计如图8所示, RSRP均值为-92.3 dBm, 网络覆盖良好。

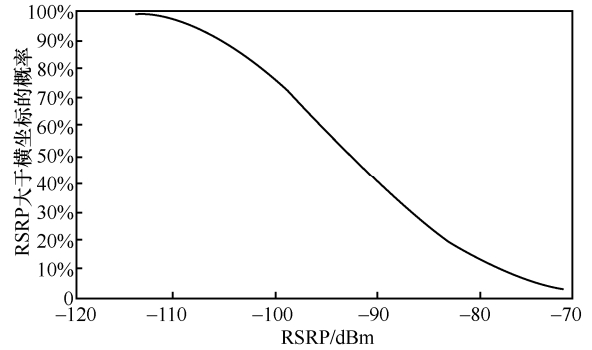


图8 某大城市局部区域1.8 GHz/2.1 GHz LTE RSRP MR分布

根据第3节的评估方法, 以LTE覆盖为基准, 两个频段5G网络覆盖指标见表9、表10。2.1 GHz频段重耕后的覆盖与3.5 GHz对比如下。

(1) 5G网络驻留比

2.1 GHz 5G驻留比较3.5 GHz提升约1.4个百分点。

(2) 上行速率

对于不超过20 MHz带宽的2.1 GHz 5G, 10 Mbit/s以上的上行速率覆盖率劣于3.5 GHz, 在1~10 Mbit/s区间, 2.1 GHz相对3.5 GHz具有1.3~5.2个百分点的覆盖提升, 增益较为有限。

表9 2.1 GHz和3.5 GHz 5G网络驻留比

频段/GHz	5G网络驻留比
2.1	99.9%
3.5	98.5%

造成该结果的原因是城区LTE站间距余量较大。LTE规划要求城区上行速率不低于256 kbit/s的面积覆盖概率为95%。由图7可知, LTE上行速率256 kbit/s对应的链路损耗约为137 dB, 而根据MR统计, 现网95%区域的链路损耗不大于127 dB, 即实际网络具有约10 dB的覆盖余量。该余量主要由3个原因造成: 首先, 现实中大量用户在室外或分布系统区域使用网络, 而LTE网络规划的站间距计算均假设用户位于室内, 城区预留了18~20 dB的穿透损耗余量, 站间距规划值较为保守; 其次, 1.8 GHz/2.1 GHz LTE并非按全新网络的理想网格布局, 而是在原有的800 MHz CDMA站址基础上内插新站址加密而成, 实际站间距小于规划值; 再次, 为弥补选点偏移, 局部补点导致过多的重叠覆盖。

5 结束语

为了尽可能避免网络仿真的预测误差, 本文提出了基于LTE MR的5G SA覆盖评估方法。评估实例表明, 由于LTE站间距具有较大余量, 相对于已建成的3.5 GHz 5G网络, 20 MHz带宽内2.1 GHz重耕的覆盖增益有限。在4G流量仍显著超过5G流量的情况下, 市区2.1 GHz大带宽重耕的条件并不成熟。虽然通过动态频谱共享(dynamic spectrum sharing, DSS)^[21]可实现LTE和5G在2.1 GHz频

段的同时部署, 但DSS的LTE和5G速率比同带宽纯LTE的速率低3%~6%^[22], 若无显著的覆盖增益, 采用DSS得不偿失。因此, 近期市区2.1 GHz重耕主要用于站址难以获取的大型楼盘、城中村等弱覆盖区域以及接入原有无源分布系统快速低成本实现5G室内覆盖。中远期来看, 随着4G流量向5G迁移, 可将原2.1 GHz LTE设备逐步升级或替换为LTE/5G双模设备, 通过载波聚合或超级上行提升速率。

参考文献:

- [1] LEI W, SOONG A C K, LIU J H, et al. 5G system design: an end to end perspective[M]. Cham: Springer, 2020.
- [2] 曹广山, 马丹, 李凤花, 等. 2.1和3.5 GHz频段在5G网络中的应用建议[J]. 邮电设计技术, 2020(6): 6-10.
CAO G S, MA D, LI F H, et al. Suggestions on the application of 2.1 and 3.5 GHz bands in 5G network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(6): 6-10.
- [3] MBUGUA A W, CHEN Y, RASCHKOWSKI L, et al. Review on ray tracing channel simulation accuracy in sub-6 GHz outdoor deployment scenarios[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2020(2): 22-37.
- [4] 倪磊. 基于LTE信令数据的指纹定位方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
NI L. A fingerprint localization algorithm based on LTE signaling data [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [5] 裴登科. 基于测量报告的LTE终端室外定位算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
PEI D K. Research on outdoor localization algorithms of LTE terminal based on measurement report[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [6] 陈德金, 张晶颜, 季文君. 基于LTE AGPS MR的小区覆盖相关性邻区配置方法研究[J]. 电信技术, 2019(2): 14-16.
CHEN D J, ZHANG J Y, JI W J. Research on neighborhood configuration method of cell coverage correlation based on LTE AGPS MR [J]. Telecommunications Technology, 2019(2): 14-16.
- [7] 王希. 基于MR数据与机器学习的LTE用户感知评估方法[J]. 移动通信, 2018, 42(8): 21-26.
WANG X. LTE user perception assessment method based on

表10 2.1 GHz和3.5 GHz 5G不同上行速率的覆盖率

频段/GHz	带宽/MHz	上行速率覆盖率					
		30 Mbit/s	20 Mbit/s	10 Mbit/s	5 Mbit/s	3 Mbit/s	1 Mbit/s
2.1	20	47.3%	65.2%	80.5%	91.9%	93.5%	99.3%
	10	25.0%	50.9%	77.8%	87.9%	91.9%	99.0%
3.5	100	61.4%	67.3%	80.5%	86.7%	90.0%	97.7%



- MR data and machine learning[J]. Mobile Communications, 2018, 42(8): 21-26.
- [8] 赵明峰, 黄建辉, 梁金山, 等. 基于MR与扫频数据的LTE-FDD重叠覆盖优化方法[J]. 电信科学, 2019, 35(S1): 124-128.
ZHAO M F, HUANG J H, LIANG J S, et al. LTE-FDD overlapping coverage optimization method based on MR and scanning data[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(S1): 124-128.
- [9] ZHANG X C. LTE Optimization Engineering Handbook[M]. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte., Ltd., 2017.
- [10] THRANE J, ZIBAR D, CHRISTIANSEN H L. Comparison of empirical and ray-tracing models for mobile communication systems at 2.6 GHz[C]//Proceedings of 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [11] 3GPP. Study on 3D channel model for LTE (Release 12): TR 36.873 V12.7.0 [S], 2017.
- [12] 许浩, 刘琛. 一种5G室内覆盖解决方案[J]. 电信科学, 2020, 36(10): 120-125.
XU H, LIU C. A solution for 5G indoor coverage[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(10): 120-125.
- [13] 刘光毅, 王启星, 刘建军, 等. 3.5 GHz 5G 新空口基站设计与外场实验研[J]. 通信学报, 2019, 40(2): 24-30.
LIU G Y, WANG Q X, LIU J J, et al. Latest progress on 3.5 GHz 5G NR trial[J]. Journal on Communications, 2019, 40(2): 24-30.
- [14] ALI Z, FREDRIK A, et al. 5G physical layer principles. models and technology components[M]. London: Academic Press, 2018.
- [15] HALVARSSON B, SIMONSSON A, ELGCRONA A, et al. 5G NR testbed 3.5 GHz coverage results[C]//Proceedings of 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [16] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communications, 1998, 6(3): 311-335.
- [17] RUSEK F, PERSSON D, LAU B K, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40-60.
- [18] STABLER O, HOPPE R. MIMO channel capacity computed with 3D ray tracing model[C]//Proceedings of 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2009: 2271-2275.
- [19] 3GPP. Physical layer procedures for data (Release 16): TS 38.214 V16.0.0[S], 2019.
- [20] 3GPP. User equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (Release 16): TS38.101-1 V16.5.0[S], 2020.
- [21] LEI W, ZHIHENG G, YONG W, et al. 4G/5G spectrum sharing: efficient 5G deployment to serve enhanced mobile broadband and Internet of things applications[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018, 13(4): 28-39.
- [22] 周阅天, 胡春雷, 侯佳, 等. 20 MHz 动态频谱共享的组网性能分析与验证[J]. 移动通信, 2021, 45(2): 13-17, 32.
ZHOU Y T, HU C L, HOU J, et al. Performance analysis and experimental verification of 20MHz dynamic spectrum sharing network[J]. Mobile Communications, 2021, 45(2): 13-17, 32.

[作者简介]



陆健贤(1975—), 男, 中国电信股份有限公司云浮分公司正高级工程师, 主要研究方向为移动网络规划、优化、移动网络关键技术应用等。

黄济丘(1977—), 男, 现就职于中国电信股份有限公司云浮分公司, 主要研究方向为移动网络规划、优化、移动网络关键技术应用等。

胡明星(1988—), 男, 现就职于广东省电信规划设计院有限公司, 主要研究方向为无线网、承载网、传送网规划及设计等。

林衡华(1979—), 男, 现就职于中国电信股份有限公司研究院, 主要研究方向为移动通信网络关键技术性能及应用等。