



研究与开发

基于相关性分析的 5G 高铁站间距计算方法

杨艳, 张涛, 郭希蕊

(中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100444)

摘要: 提出了一种简化限制条件的 5G 高铁站间距计算方法, 从 5G 特征入手, 考虑多种设备形态下 5G 高铁覆盖情况, 并结合高铁场景特定的限制条件, 将复杂的限制条件简化为单一限制条件, 平衡了理论研究和实际使用间的差距。从射频的角度, 分析不同的大规模 MIMO 设备形态对 5G 高铁覆盖的影响; 分析不同场景对 5G 高铁覆盖的影响; 分析 5G 高铁站间距的影响因素, 并通过计算入射角、下倾角与站高、站轨距、覆盖距离的关系, 获取简单的站间距计算式; 分析可用站高、站轨距与覆盖距离的相关性, 简化限制条件为单一参数——覆盖距离。提出的方法适用于已知站轨距、站高、站型和部署场景的单一站点的站间距评估。通过对比验证, 使用所提方法评估的站间距具备极高的准确性, 计算误差仅为 3 m, 准确率为 99.14%。

关键词: 5G; 高铁通信; 简化限制条件; 覆盖距离

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021022

Calculation method of 5G high-speed railway station spacing based on correlation analysis

YANG Yan, ZHANG Tao, GUO Xirui

Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100444, China

Abstract: A method of 5G cell station spacing for high-speed railways with simplified restriction conditions was presented that balance the gap between theoretical research and practical use. To begin, the influencing factors of 5G cell station spacing for high-speed railways were analyzed, such as incident angle, downtilt angle, station height, station gauge distance and coverage distance. Then, a simple station spacing calculation method was obtained with the restriction conditions simplified to a single parameter (coverage distance) by analyzing the correlation between available station height, gauge and coverage distance. Comparison and verification show that the cell station spacing calculation done with the proposed method has high accuracy, with a calculation error of only 3 m and an accuracy of 99.14%.

Key words: 5G, high-speed railway communication, simplified restriction condition, coverage distance

收稿日期: 2020-04-04; 修回日期: 2020-09-12

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2018YFF0301200)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project (No.2018YFF0301200)

1 引言

随着高铁的不断普及, 高铁已经成为人们出行最优先的交通工具之一。2019 年, 中国高铁总里程将突破 3 万千米, 位居世界第一。2019 年 7 月 8 日, 世界银行发布《中国的高速铁路发展》报告, 用大量翔实的数据向世界展示中国高铁: 营业里程超过世界其他国家高铁营业里程总和, 与全球各国相比, 中国高铁票价最低; 建设成本约为其他国家建设成本的 $2/3$ ^[1]。随着这种出行模式的普及化, 乘客在高铁上的无线通信也成为运营商网络竞争的排头兵, 不仅关乎运营商的品牌形象, 还直接影响用户的出行生活。

高铁通信作为一种特殊的无线通信场景, 具备差异化场景特征和超高速运行速度带来的频率偏移问题。而 5G 无线通信技术高频段工作带宽对高铁通信的影响尤为明显。如何合理地规划高铁站间距成为高铁部署的关键问题^[2], 直接关系到 5G 高铁是否建设、如何建设, 需要先对网络建设进行评估。

现在的研究主要聚焦在高铁信道建模和频谱研究, 并逐步引入人工智能等技术进行信道的智能化纠正^[3-5], 还有部分学者研究高速下如何进行天线 MIMO 成形^[6], 也有部分学者和机构开始关注高铁覆盖距离计算^[7]。高铁信道研究主要对高速和高频环境下产生的阴影衰落和多普勒频谱进行了研究, 如参考文献[3-5]中详细地介绍了高铁毫米波或太赫兹频段下通信的信道建模及如何基于 C-RNN 进行小尺度衰落估计等内容; 参考文献[6]提出使用线性卡尔蒙滤波器进行 MIMO 信道评估; 参考文献[7]介绍了一种使用线性覆盖预测方法替代圆形覆盖预测方法的新型高铁覆盖计算模型。

但是这些研究只是在一种理想的环境下进行预测, 而没有与现在的 5G 设备挂钩, 导致研究成果和使用的脱钩, 其次考虑的都是 Wi-Fi+车顶回

传的方法, 而这种方法需要解决容量极限问题且存在部署风险, 很难在运营商网络中部署和使用; 最后, 现有研究没有考虑站轨距的评估方法, 与实际应用存在差别。

本文主要针对目前研究中存在的问题, 提出一种从 5G 天线射频特性出发, 结合场景特征、高铁部署限制条件等多个要素, 简化限制条件的 5G 高铁站间距预测模型, 有效地补充了研究到应用的差异。

2 5G 高铁覆盖距离

高铁覆盖距离是由基站设备能力、终端能力、路径损耗、穿透损耗、需要的边缘速率和边缘/面积覆盖占比决定的, 是高铁站间距计算的基础。其中基站和终端设备能力表现为基站或终端的发射功率及接收增益能力; 路径损耗是指信号传播中电波传输导致的信号强度下降; 穿透损耗则是信号在穿透过程中导致的信号强度下降, 在高铁中由于车厢密闭性较强, 复兴号的穿透损耗可以达到 36 dB 以上, 是影响 5G 高铁覆盖的重要因素; 需要的边缘速率是指网络覆盖边缘位置最低保障的单用户速率; 边缘/面积覆盖占比指网络覆盖的边缘位置在单小区覆盖范围的占比, 一般为 90% 或 95%。

2.1 高铁覆盖距离计算

首先 5G 高铁覆盖距离主要采用链路预算进行计算。链路预算一般由如下 4 个基本模块实现。需求分析模块: 通过需要边缘速率获取需要承载的 RB 个数。发射端功率计算模块: 通过计算发射功率和发射天线增益等获取发射端天线口单个 RB 的功率。接收机接收门限功率计算: 通过考虑具体设备的接收敏感度、编码率等参数获取接收机正常接收信号需要的每 RB 最低能量。传播中的影响参数及覆盖距离计算: 通过综合考虑发射功率、接收门限、穿透损耗和不同场景的传播模型等, 计算出覆盖距离。



(1) 需求分析模块

首先通过获取业务速率与 SINR 的关系, 然后获取 SINR 与 RB 数的关系, 完成 RB 数计算。一般通过外场试验获取业务速率与 SINR 的关系。给出 3.5 GHz 100 MHz TDD 设备的下行 (DL) 业务速率与 SINR 的对比, 如图 1 所示, 从图 1 中可以拟合出下行速率与 SINR 的关系, 从而通过业务保障速率获取需要的 SINR 预留量。

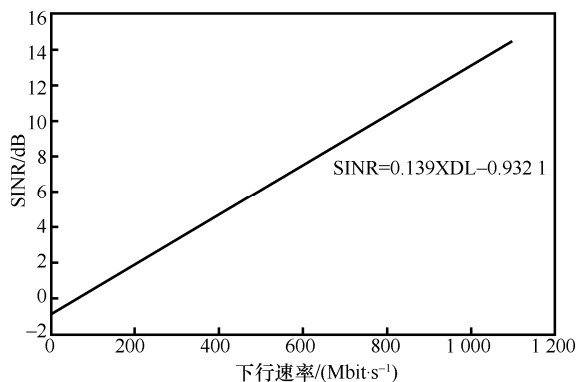


图1 下行业务速率与 SINR 的关系

由于计算可以承载的 RB 数要对该载波下的全部 RB 数分配情况进行匹配计算, 即通过比较全部 RB 分配情况的设备发射功率 (上行为终端发射功率, 下行为基站发射功率)、不同 RB 下需要分配的功率和需要边缘速率要求的 SINR 值的综合功率剩余值, 然后通过获取不同配置下最大的综合功率剩余值, 匹配出该最大综合功率剩余值对应的 RB 数, 该 RB 数就是保障速率对应的 RB 需求数。具体可以通过式 (1) 计算需要的保障速率与 RB 数, 其中, N_{RB_s} 为需要的 RB 数, P_{TX} 为发射功率, SINR 为速率要求的 SINR 值, RB_{max} 为基站可以承载的最大 RB 数。

$$\begin{aligned} & \text{for } N_{RB}=1,2,\dots, RB_{max} \\ & \quad P_{left}(N_{RB})=P_{TX}-10\lg N_{RB}-\text{SINR} \\ & \text{end} \\ & P_{left}(\text{all})=[P_{left}(1), P_{left}(2), \dots, P_{left}(RB_{max})] \\ & N_{RB_s}=N_{RB} \quad \text{when } P_{left}(N_{RB})=\max(P_{left}(\text{all})) \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 发射端功率计算模块

在通信系统中, 一般采用 EIRP (effective isotropic radiated power, 等效全向辐射功率) 评估天线口的辐射功率或者发射功率, EIRP 一般受到发射功率 (P_{TX})、发射增益 (G_{TX})、成形增益 (F_{TX}) 和馈线损耗 (P_{loss}) 的影响, 通过式 (2) 可以获取 EIRP ($EIRP^{TX_RB}$):

$$EIRP^{TX_RB}=EIRP/N_{RB_s}=(P_{TX}+G_{TX}+F_{TX}-P_{loss})/N_{RB_s} \quad (2)$$

(3) 接收机接收门限功率计算

接收功率门限是 NR 接收信号或者终端接收信号的最低要求, 使用 P_{RX}^{limit} 表示:

$$P_{RX}^{limit}=(N_{Thermal}+NF+\text{SINR}+G_{RX})/N_{RB_s} \quad (3)$$

其中, $N_{Thermal}$ 为设备热噪声, 可以通过式 (4) 进行计算; NF 为噪声系数; SINR 为要求的边缘速率对应的 SINR 值; G_{RX} 为接收端的接收增益。

$$N_{Thermal}=kT_{tem}BW \quad (4)$$

其中, k 为 Boltzmann constant (波尔兹曼常数); T_{tem} 为 Kelvin temperature (热力学温度); BW 为带宽。

(4) 传播中的影响参数及覆盖距离计算

本部分通过综合考虑接收需求、发射端功率、路径损耗等进行计算。而从信号传播的原理来看, P_{RX} 是由发射端天线口辐射功率 $EIRP^{TX_RB}$ 、穿透损耗 BPL 和路径损耗 PL 综合作用形成的。

$$P_{RX}(r)=EIRP^{TX_RB}-BPL-PL(r) \quad (5)$$

BPL 为穿透损耗, 由于高铁的超高运动时速和 3.5 GHz 频段, 其穿透损耗很大, 如复兴号在 3.5 GHz 频段下, 穿透损耗为 35 dB。其他车型和频率下的穿透损耗情况见表 1。

表1 穿透损耗情况 (单位: dB)

车型	年份	LTE 1.8 GHz	3.5 GHz	4.9 GHz
CRH380A	2011 年	20	25	28
CRH380B	2012 年	29	34	37
复兴号 400AF	2017 年	30.1	31.6	33.9
复兴号 400BF	2018 年	31.1	35.4	35.8

表 2 3 种典型场景的路径损耗

场景	PL_0	n
密集城区	$13.54 + 20 \lg f_c - 0.6(h_{ur} - 1.5)$	3.908
郊区	$28 + 20 \lg f_c$	2.2
开阔区域	$20 \lg(40\pi f_c / 3) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77 + 0.002 \lg h)$	$(\min(0.03h^{1.72}, 10) + 0.002) / 10$

PL 由路径衰减常量 PL_0 、路径衰减因子 n 和位置 r 决定, 如式 (6) 所示。不同环境下 PL_0 和 n 都不同, 按照 3GPP 38.901 中的规定, 3 种典型场景的路径损耗见表 2。

$$PL(r) = PL_0 + 10n \lg r \quad (6)$$

目前, 在无线覆盖距离评估中主要采用统计方法, 即 $P[P_{RX}(r) > T]$ 表示在用户位于位置 r 的情况下, 基站或终端的接收功率大于门限值 T 的概率。由于位置的多样化, 需要使用平均值 $\overline{P_{RX}}(r)$ 表示。进一步来说, $P[P_{RX}(r) > T]$ 使用正常累积密度函数 (normal cumulative density function) 表示, 如式 (7) 所示^[7]。

$$P[P_{RX}(r) > T] = Q\left(\frac{T - \overline{P_{RX}}(r)}{\sigma}\right) \quad (7)$$

其中, σ 为表征不同场景的正态分布阴影衰落的标准差 (standard deviation of the normally distributed shadowing fading), Q 函数定义如下:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (8)$$

因此式 (7) 可以变为如下形式:

$$P[P_{RX}(r) > T] = 1 - \int_{-\infty}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(P_{RX}(r) - \overline{P_{RX}}(r))^2}{2\sigma^2}\right) d(P_{RX}(r)) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{T - \overline{P_{RX}}(r)}{\sigma\sqrt{2}}\right) \quad (9)$$

P_{in} 表示要求的面积覆盖率, 使用式 (10) 可以计算出覆盖范围为 R 时的面积覆盖率。

$$P_{in} = 1 - P[P_{RX}(R) > P_{RX}^{limit}] = 0.5 + 0.5 \operatorname{erf}\left(\frac{P_{RX}^{limit} - (EIRP^{TX_RB} - BPL - PL)}{\sigma\sqrt{2}}\right) \quad (10)$$

根据式 (10) 可以推导出一定面积覆盖率下的覆盖距离, 如式 (11) 所示:

$$R = 10^{\frac{(EIRP^{TX_RB} - P_{RX}^{limit} - BPL - PL_0 + \sigma\sqrt{2}\operatorname{erf}^{-1}(2P_{in} - 1))}{10n}} \quad (11)$$

2.2 5G 高铁设备及覆盖距离分析

目前 5G 高铁设备主要采用 8TR 设备或者 64TR 设备, 且在计算时需要按照复兴号进行规划。因此通过对高铁场景和 5G 设备的分析, 获取不同 NR 设备的最大覆盖距离, 见表 3。

表 3 不同 TR 数-阵子数下 NR 设备的最大覆盖距离 (单位: m)

场景	8TR	64TR
密集城区	107	128
城区&郊区	234	320
开阔区域	697	955

3 5G 站间距计算方法

3.1 5G 高铁站间距限制条件

本节将系统地分析影响站间距的主要因素。总体上来说, 影响因素分为显著和非显著两类。显著因素可以认为是从站间距公式中获取的, 如站轨距、覆盖范围和重叠覆盖区; 非显著因素则是设备性能或者频段导致的一些不易察觉的因素, 如入射角和下倾角。下面主要研究隐形因素。高铁站间距与约束条件的关系如图 2 所示, 给出了涉及的各种参数和变量间的关系。

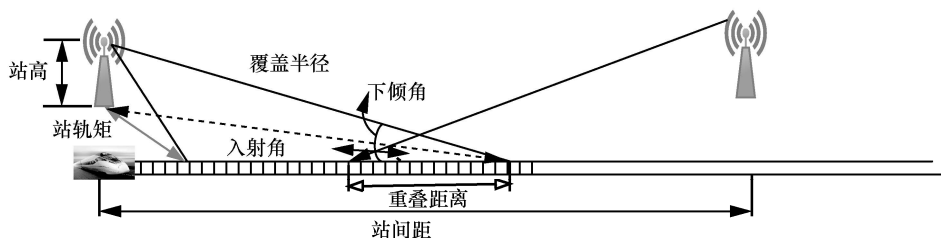


图2 高铁站间距与约束条件的关系

(1) 5G 高铁站间距计算

与宏网部署不同, 高铁部署是一种定向窄带覆盖的场景。且高铁高封闭性导致了高穿透损耗, 这就说明计算高铁站间距需要综合考虑覆盖范围的影响, 同时还考虑站高、站轨距的综合影响。如图 2 所示, 高铁覆盖无法从近站点开始, 因此受到站高、站轨距的影响, 同时 5G 高铁超高速运行速度对列车的穿透损耗也有较大的影响, 因此 5G 高速场景的站间距是多个影响因素共同作用的, 计算难度大。

5G 高铁站间距使用式 (12) 计算:

$$Dz = 2\sqrt{(R^2 - Dg^2)} - Or \quad (12)$$

其中, Dz 为站间距, R 为覆盖距离, Dg 为站轨距, Or 为重叠覆盖距离。

(2) 入射角

入射角是在高铁覆盖中需要考虑的一个重要影响因素, 主要是指基站与用户的连线与轨道方向的夹角, 在图 2 中使用 θ 表示, 如式 (13) 所示, 从式 (13) 中可知, 入射角与站轨距 Dg 、覆盖范围 R 和站高 h 相关。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{Dg}{\sqrt{R^2 - h^2}}\right) \quad (13)$$

室外至车体内隔断穿透损耗, 以高铁列车 CRH3 级别 (300 km/h) 为例的穿透损耗值与信号入射角的关系如图 3 所示。从图 3 中可知, 当入射角小于 10° , 穿透损耗下降得严重, 因此在常规规划中要求入射角大于 10° 。

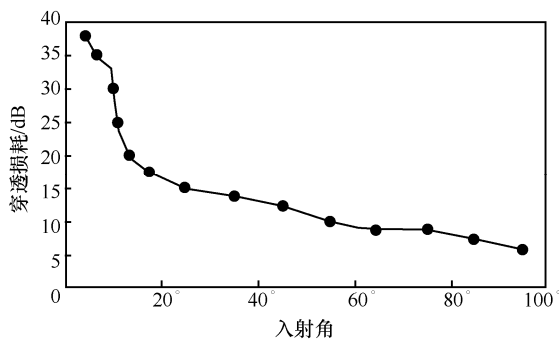


图3 入射角对穿透损耗的影响

(3) 下倾角

下倾角主要是指天线和垂直面的夹角, 表征基站天面的下倾情况, 决定基站覆盖的范围, 一般分为机械下倾和电下倾两种, 一般要求机械下倾不大于 0.5 倍的水平波瓣角。5G 使用大规模 MIMO 天线, 其与传统天线差别较大, 使用垂直面极限扫描取代原有的电调, 具有更好的性能。从天线仿真情况可知, 2×4 单元组阵的设备极限下倾角为 23° , 3×4 单元组阵的设备极限下倾角为 13° 。按照不同参数间关系, 下倾角可以使用式 (14) 计算:

$$\alpha = \arccos \frac{Dg \times \left(\frac{1}{\sin^2 \theta} + \frac{1}{\tan^2 \theta} - 1 \right)}{2 \tan \theta \sqrt{h^2 + \frac{Dg^2}{\sin^2 \theta}}} \quad (14)$$

3.2 5G 高铁站间距计算方法

根据第 2 节和第 3.1 节给出的高铁覆盖距离和限制条件, 可以计算出不同覆盖距离、站高、站轨距与站间距之间的关系, 具体流程如下。

算法 1

(1) 生成数据组

for $R=50:1\ 500$ for $h=15:35$ for $Dg=15:300$ if $R \leq 130$ 设置 $Or=0$, 计算 Dz, θ, α ;else if $R \leq 320$ 设置 $Or=150$, 计算 Dz, θ, α ;

else

设置 $Or=200$, 计算 Dz, θ, α ;

end

end

end

(2) 对数据进行过滤分析

for all $\{R, h, Dg, Dz, \theta, \alpha\}$ if $\geq 10^\circ \cap 0 < \alpha < 23^\circ$ or 33° 记录 $\{R, h, Dg, Dz, \theta, \alpha\}$ 为有效数据

end

end

离散化的站间距与站高、站轨距、覆盖距离的关系如图 4 所示。

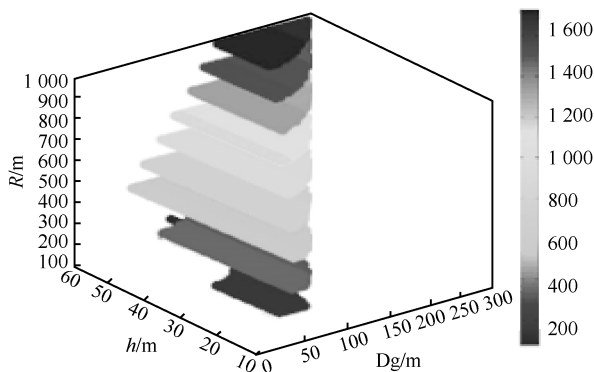


图 4 离散化的站间距与站高、站轨距、覆盖距离的关系

从图 4 中可以发现, 站间距与站高、覆盖距离、站轨距强相关, 尤其与覆盖半径的相关性最大, 即在不同的覆盖半径下, 站高和站轨距的取值差异较大, 从整体来看, 呈现出“纺锤形”。进

一步地加大覆盖距离间的间隔, 发现站间距与覆盖距离间有极大的相关性, 但是同时要求满足站高和站轨距的限制。

(1) 站间距计算公式

基于计算出的站间距、覆盖距离、站高、站轨距, 拟合出站间距计算公式, 均方根误差 (root MSE) 为 4.161 9, 拟合判定系数 (R-Square) 为 0.999 9。

$$Dz = \begin{cases} 5.9876 - 0.7466Dg - 0.4541h + 2.1439R, & R \leq 130 \\ -152.9926 - 0.7381Dg - 0.1858h + 2.1546R, & 130 < R \leq 320 \\ -200.2479 - 0.5878Dg - 0.1179h + 2.0886R, & R > 320 \end{cases}$$

DgRange of values, $h \in$ Range of values

(15)

(2) 限制条件与覆盖距离的转化

通过提取站轨距与覆盖距离、站高与覆盖距离的相关性, 发现站轨距与覆盖距离有较好的相关性, 站轨距与覆盖距离的关系如图 5 所示, 站高与覆盖距离的关系如图 6 所示。

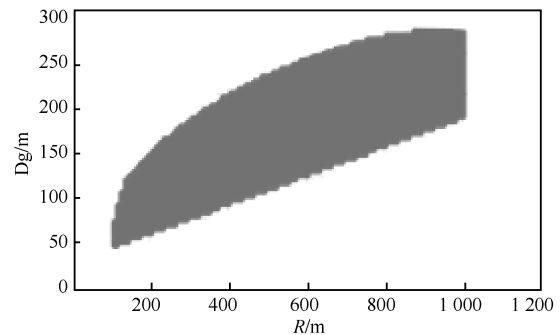


图 5 站轨距与覆盖距离的关系

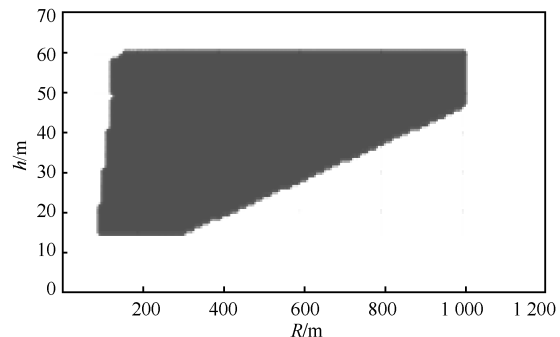


图 6 站高与覆盖距离的关系



由于需要提取站高和站轨距的边界,因此进行了进一步的分析,获取了站高、站轨距上限和下限与覆盖距离的关系,如图7、图8所示。

本文进一步地分析了站高、站轨距上限和下限与覆盖距离的相关性,结果见表4~表7,3个相关系数均大于0.92,即具有强相关性。

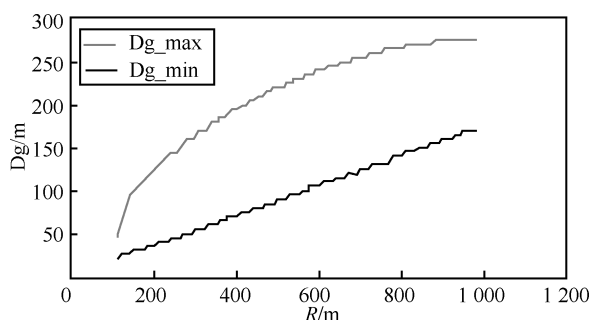


图7 站轨距取值范围与覆盖距离的关系

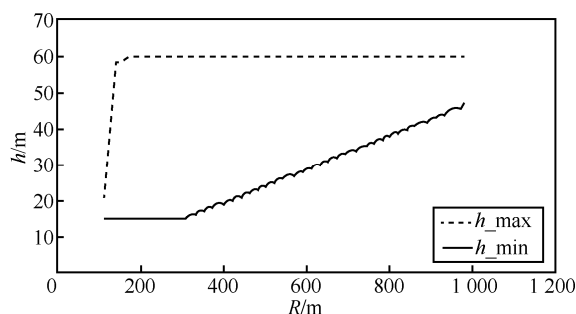


图8 站高取值范围与覆盖距离的关系

表4 站轨距的上限-覆盖半径相关性

Pearson	Spearman	Kendall
0.951 8	0.998 5	0.983 5

表5 站轨距的下限-覆盖半径相关性

Pearson	Spearman	Kendall
0.999 3	0.999 4	0.988

表6 站高的上限-覆盖半径相关性

Pearson	Spearman	Kendall
0.921 2	0.991	0.975 9

表7 站高的下限-覆盖半径相关性

Pearson	Spearman	Kendall
0.985 7	0.993	0.966 8

基于上面的分析,获取站高-覆盖距离、站轨距-覆盖距离间的关系如下所示。

(1) 站轨距取值范围上限与覆盖距离的关系

$$Dg_{\max} = -10^{-14} R^6 + 4 \times 10^{-11} R^5 - 5 \times 10^{-8} R^4 + 4 \times 10^{-5} R^3 - 0.014 6 R^2 + 3.297 R - 172.95 \quad (16)$$

式(16)为拟合的站轨距取值上限与覆盖距离间的关系,实现覆盖距离 R 与站轨距上限 $Dg_{\max}$ 一一对应的关系,其拟合判定系数(R^2)为0.998 5,具有极好的准确性和相关性。

(2) 站轨距取值范围下限与覆盖距离的关系

$$Dg_{\min} = 0.173 9 R + 1.686 3 \quad (17)$$

站轨距取值范围的下限基本呈线性,使用线性拟合可以达到极好的准确性, $R^2 = 0.998 6$ 。

(3) 站高取值范围上限与覆盖距离的关系

$$h_{\max} = \begin{cases} -0.000 740 7 R^3 + 0.286 4 R^2 - 35.6 R + 1455, & 90 < R < 160 \\ 60, & 160 \leq R < 955 \end{cases} \quad (18)$$

根据现网基站的建设情况,基站的站高一般为15~60 m,因此,本文中站高 h 的取值也满足这一基本要求,式(18)给出一个分段函数,其拟合指标 R^2 为0.984 6。

(4) 站高取值范围下限与覆盖距离的关系

$$h_{\min} = \begin{cases} 15, & R < 320 \\ 0.047 R + 0.675 4, & 320 \leq R \leq 955 \end{cases} \quad (19)$$

站高取值范围下限也服从分段分布,且拟合指标 R^2 为0.999。

3.3 对比验证

随机地选取50组数据进行验证。验证结果分别以整体准确性和单个采样点准确性两个维度给出,这样既可以从宏观的角度进行分析对比,也可以深入微观进行说明。

使用平均准确度衡量预测算法的相对精度,定义如式(20)所示,还使用站间距差值衡

量绝对精度, 如式 (21)、式 (22) 所示。式 (20) 通过对比随机选出的 50 组链路预算和理论计算获取和站间距数据, 与采用本文提出的方法计算的站间距数据间的平均相对差距来评估算法的准确性, 计算得出本文方法的准确率为 99.14%。

$$\text{Acc} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\text{Dz}(i) - \text{Dz}_R(i)}{\text{Dz}_R(i)} \right|}{N} \quad (20)$$

式 (21)、式 (22) 是对实际的站间距、按照本文方法计算的站间距的最大差距和累加平均站间距差距的评估, 通过计算可知最大站间距差值为 19.779 1 m, 平均站间距差值为 3.097 9 m。

$$\max \text{Dz} = \max \left(\left| \text{Dz}(i) - \text{Dz}_R(i) \right|, i = 1, 2, \dots, N \right) \quad (21)$$

$$\text{meanDz} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \text{Dz}(i) - \text{Dz}_R(i) \right|}{N} \quad (22)$$

每个点的真实数据与计算数据的关系如图 9 所示, 每个采样点的预测准确度如图 10 所示。

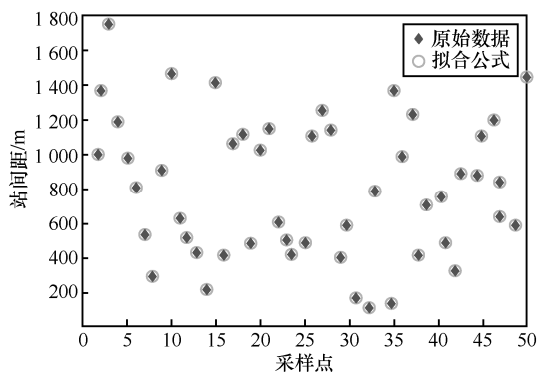


图9 每个点的真实数据与计算数据的关系

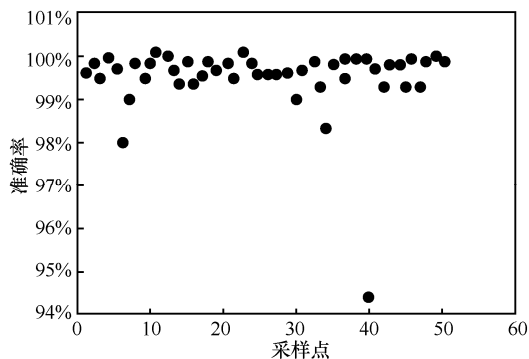


图10 每个采样点的预测准确度

4 结束语

本文系统地介绍了与 5G 高铁通信的覆盖相关的问题, 从 5G 设备入手, 详细地分析了不同场景下 5G 高铁的覆盖计算方法, 并分析了影响 5G 站间距的因素, 进一步地将 5G 高铁站间距问题简化为有限条件的最优化距离问题, 并将此限制极限问题使用相关性简化的方法进行分析, 形成了一种高准确性的站间距评估方法, 解决了理论研究与实际应用间存在差异的问题。

后续研究还将以站间距、站高、站轨距等为输入参数, 并结合场景信息, 计算覆盖半径, 进而获取 5G 高铁设备选型信息, 解决实际使用中的设备选型问题, 提高高铁建设的性价比。本方法目前是基于单一站点站间距规划给出的, 但是也适用于在小区合并情况下进行站间距评估, 但是在评估过程中由于小区合并后重叠覆盖区减少导致站间距增大, 可以通过重新线性拟合进行计算。

参考文献:

- [1] 领跑智能高铁 2.0 中国高铁标准已成全球标准[Z]. 2019. Leading smart high-speed rail 2.0 China's high-speed rail standard has become a global standard[Z]. 2019.
- [2] STÜBER G L. Principles of mobile communication[M]. New York: Springer, 2011.
- [3] WU Y, JIANG B, LU N. A descriptor system approach for estimation of incipient faults with application to high-speed railway traction devices[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(10): 2108-2118.
- [4] GUAN K, AI B, PENG B, et al. Towards realistic high-speed train channels at 5G millimeter-wave band—part I: paradigm, significance analysis, and scenario reconstruction[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9112-9128.
- [5] GUO Q, LIU L, XU W, et al. An improved faster R-CNN for high-speed railway dropper detection[J]. IEEE Access, 2020(8): 105622-105633.
- [6] XU K, SHEN Z, WANG Y, et al. Location-aided mMIMO channel tracking and hybrid beamforming for high-speed rail-



way communications: an angle-domain approach[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 93-104.

- [7] AI B, HE R S, LI G K, et al. Determination of cell coverage area and its applications in high-speed railway environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 3515-3525.

[作者简介]



杨艳（1984—），女，博士，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要从事无线通信关键技术研究工作。



张涛（1979—），男，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要从事移动通信技术标准化、组网应用方案研究工作。



郭希蕊（1982—），男，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要从事移动通信技术标准化、组网应用方案研究工作。