



网络

5G 专网的精准覆盖研究

赵婧博¹, 董石磊¹, 黄婷钰², 陈梦霞³, 黄鹏¹

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209; 2. 北京邮电大学, 北京 100876;
3. 中国电信股份有限公司北京分公司, 北京 100010)

摘要: 5G 专网因其可定制化、性能稳定、安全可靠等特点成为各行各业的新型信息化基础设施, 同时行业基于对业务稳定性、确定性、节能、低成本等方面更高的要求, 迫切需要 5G 专网能够实现相比公网更加精准高效的覆盖。以自动化立体仓库作为典型行业业务场景, 提出一种通过搭建小型实验环境对传播模型校正来提升 5G 专网精准覆盖的方法。基于对自动化立体仓库典型空间的增益进行精细化建模仿真, 结合典型测试环境的 RSRP (reference signal receiving power) 测试数据实现对传播模型的精准校正, 按照行业终端的业务 SLA (service-level agreement) 要求可得到通用不同尺寸自动化立体仓库的 5G 专网精准覆盖参数。

关键词: 5G 专网; 传播模型; 路径传播损耗; 巷道; 天线平均增益

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2022117

Research on accurate and efficient coverage of 5G private network

ZHAO Jingbo¹, DONG Shilei¹, HUANG Tingyu², CHEN Mengxia³, HUANG Peng¹

1. Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

3. Beijing Branch of China Telecom Co., Ltd., Beijing 100010, China

Abstract: 5G private network has become a new information infrastructure in all trades and professions because of its customizability, stable performance, safety and reliability. At the same time, due to the industry's higher requirements for business stability, certainty, energy conservation and low cost, 5G private network is urgently needed to achieve more accurate and efficient coverage than the public network. Taking the automated warehouse as a typical industry business scenario, a method to improve the accurate coverage of 5G private network by building a small experimental environment and optimizing the propagation model was proposed. Based on the refined modeling and simulation of the antenna gain of the typical space of the automated three-dimensional warehouse, combined with the test RSRP (Reference Signal Receiving Power) data of the typical space, the propagation model can be accurately corrected. According to the service level agreement (SLA) requirements of the industry terminal, the 5G private network accurate coverage parameters common to automated three-dimensional warehouses of different sizes can be obtained.

Key words: 5G private network, propagation model, path propagation loss, roadway, antenna average gain

0 引言

我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段, 各行各业数字化转型的步伐正持续加快。行业客户的网联化需求越发多样、生产柔性要求强、应用场景更加复杂、安全保障等级要求更高, 而传统的有线、Wi-Fi、集群等行业专网技术难以满足行业客户数字化转型的需求, 5G 技术成为各行各业构建新型数字化基础设施的更优选择。但前期对 5G 技术的研究主要聚焦于公众用户场景, 网络建设中参考的业务需求和传播模型基于公众市场的特征, 遵循尽力而为的原则, 通过先建设后补点的方式逐步提升网络的质量。但行业客户的业务特征对网络的确定性和稳定性要求更高, 需要一次性满足业务运行质量要求, 且对网络建设的成本更敏感, 如何针对行业客户的场景和业务特征定制化的提供更精准的网络覆盖成为了大规模推广 5G 专网技术的关键。

以物流行业为例, 物流行业是支撑国民经济发展的基础性、战略性、先导性产业, 2020 年 4 月国家邮政局和工业和信息化部联合印发《关于促进快递业与制造业深度融合发展的意见》指出, 要加快推动 5G 等新技术与制造业供应链的深度融合, 提升基础设施、装备和作业系统的信息化、自动化和智能化水平。其中自动化立体仓库作为物流行业重要基础设施, 集中了大量的物流自动化智能装备, 而传统的有线、Wi-Fi 等网络技术难以满足这些自动化智能装备在大范围多障碍物遮挡情况高速移动的业务质量, 限制了自动化立体仓库容量和作业效率的进一步提升, 因此基于 5G 专网的自动化立体仓库成为了重要的研究方向, 可作为 5G 专网精准覆盖研究的典型行业场景。

1 5G 专网精准覆盖方法研究

5G 公网的覆盖需兼顾城市空间的复杂多样性, 受限于站址资源的不确定性和人群流动的随

机性, 因此网络的覆盖效果难以用仿真的方式实现精准计算, 需在网络建设后进行大量路测优化工作才能获取较为准确的覆盖效果数据, 常常需要通过增加站点弥补前期覆盖规划的盲点问题。而对以自动化立体仓库为典型的行业空间使用 5G 专网进行覆盖时, 其空间特征有着很强的相似性, 空间内基站天线位置的布放不受限, 自动化设备的运行和分布有比较确定的规律, 因此可以探索通过建模仿真的方式更加精准地计算从而实现指导 5G 专网精准覆盖, 避免建设后期网络优化调整和补盲带来的生产中断影响。

为了联合研发验证基于 5G 专网的自动化立体仓库系统, 中国电信研究院和某物流公司在共同建设的 5G 智能物流联合创新实验室中搭建了小型的业务测试环境。通过对小型的自动化立体仓库的典型空间进行业务特征和运行分析, 并为典型空间内的天线增益分布情况进行 MATLAB 建模仿真, 确定最佳天线挂高和下倾角, 再结合基于 5G 专网的智能叉车、穿梭车的业务 SLA 研发测试数据获取支持业务稳定运行的最低 RSRP 数据, 最后通过小型测试环境的实测传播路径损耗数据对传播模型精准校正, 得到可通用于不同尺寸自动化立体仓库的 5G 专网精准覆盖参数, 即针对自动化立体仓库巷道的特定长度和高度以及运行的自动化装备特征, 提供满足业务运行需求的精准网络覆盖参数, 包括天线挂高、下倾角、基站最低发射功率, 进而用于指导设备选型和精准的 5G 专网建设。自动化立体仓库 5G 专网精准覆盖方法流程如图 1 所示。

2 自动化立体仓库空间特征及天线增益建模仿真

2.1 自动化立体仓库空间特征分析

近年来, 随着国家加强土地资源管理, 土地资源日渐紧张, 使得土地使用成本不断增加, 促使企业需要充分利用有限空间, 提高现有土地的

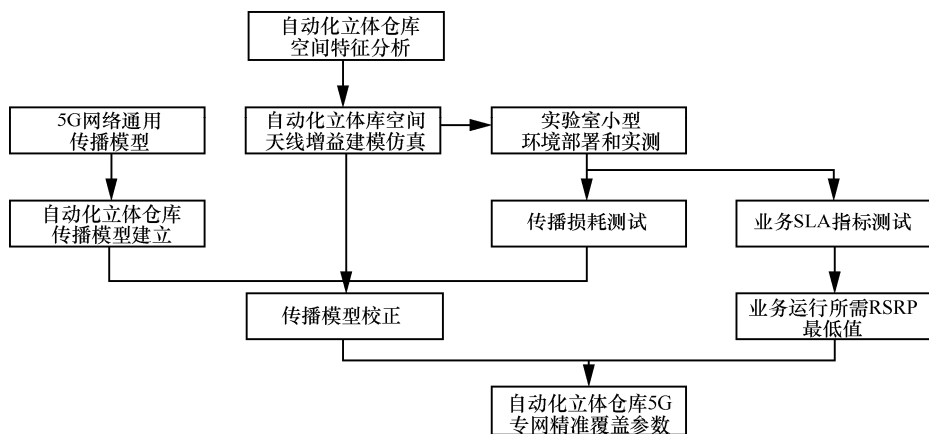


图1 自动化立体仓库 5G 专网精准覆盖方法流程

利用率。自动化立体库的应用摒弃了传统仓库的水平拓展模式，转向立体拓展，一般采用高层货架储存单元货物，用相应的物料搬运设备进行货物入库和出库作业的仓库，并尽量减低货架之间巷道的间距，具有较高的土地利用率和库存容积率，可减少企业的土地成本，成为未来物流仓储发展的主要形态。根据商务部流通业发展司数据显示，截至 2018 年年底，全国自动化立体仓库面积约 2.91 亿平方米，保有量在 5 000 座左右。GGII 数据显示，2019 年中国自动化立体仓库保有量上升到 6 000 座左右，预期未来几年自动化立体仓库仍将保持高速增长，且向着更高更大更密集的趋势发展^[1-6]。

自动化立体仓库系统主要有 3 种类型：以高位叉车作为主要搬运工具的高位叉车仓储系统、以巷道堆垛机为搬运工具的堆垛机式仓储系统、

多层穿梭车在货架上充当搬运工具的多层穿梭车仓储系统^[2]。

典型的高位叉车系统空间示意图如图 2 所示^[1]。



图2 高位叉车系统空间示意图

典型的堆垛机仓储系统空间示意图如图 3 所示^[11]。

典型的多层穿梭车仓储系统如图 4 和图 5 所示^[6]。



(a)



(b)

图3 堆垛机仓储系统空间示意图



图4 多层穿梭车示意图

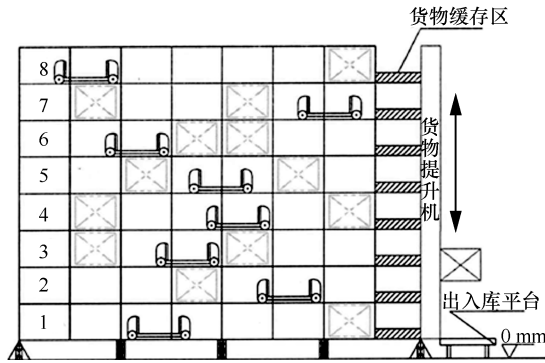


图5 穿梭车分层空间示意图

这3种类型的自动化立体仓库有类似的空间结构,即货架密集,货架上货物密度很大,货架间的巷道作为存取货物的搬运工具车运行空间,是巷道式矩形立方体,因此网络覆盖只需考虑巷道空间。但同时其主要搬运工具的设计和运行规律差异较大。其中高位叉车和堆垛机的控制单元沿巷道的水平移动,同时控制货叉垂直起升作业,巷道的间距通常在1.5~3 m,典型高度在10 m左右,长度50 m左右,每个巷道一般只有1~2台高位叉车或堆垛机运行,因此空间内通信需求主要为贯通式巷道空间的低密度连接。而多层穿梭系统的巷道是分层的,每层都有独立的穿梭车,穿梭车的控制单元沿单层的水平货架移动,一个巷道内根据层数不同可能有十几台甚至几十台穿梭车独立运行,巷道间距可进一步降低到1 m,高度可达30 m以上,长度超过100 m,每隔3~5层巷道中间一般设置一层金属网格状维护平台,因此多层穿梭车系统的空间内通信需求主要为分层式巷道空间的高密度连接。

2.2 自动化立体仓库的天线增益建模仿真

基站天线与接收端之间的位置关系如图6所示,假设点A(0, h_m)为基站天线的位置,点B为接收端设备的位置,点C为基站天线直射在巷道的位置。 d_{mn} 为接收端与基站天线的水平距离, d_{3D} 为接收端与基站天线的直线距离, ϕ_i 为基站天线的垂直下倾角, ϕ_r 为接收端到基站天线的接收下倾角。基站天线与接收端之间位置关系如图6所示。

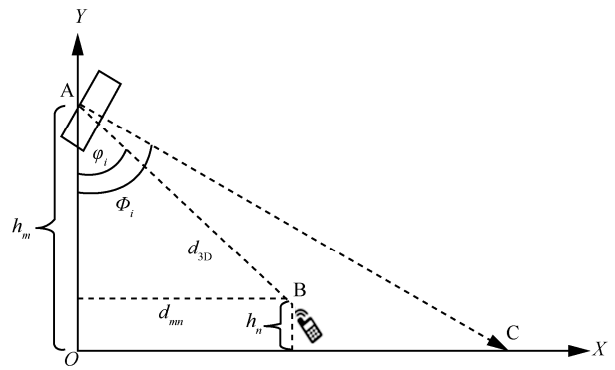


图6 基站天线与接收端之间的位置关系

对于移动的接收端来说,基站天线垂直下倾角和接收下倾角不相同,因此假设 α_i 为实验基站天线到接收端的方向与其发射方向间的垂直偏角,关系式(1)所示^[8-10]:

$$\alpha_i = \phi_i - \phi_r = \phi_i - \arctan \frac{d_{mn}}{h_m - h_n} \quad (1)$$

根据3GPP TR25.996协议。基站天线与接收端设备的垂直增益为:

$$A_v(\alpha_i) = -\min \left[12 \left(\frac{\alpha_i}{\delta_{3dB}} \right)^2, SLA_v \right] \quad (2)$$

其中, δ_{3dB} 为垂直半功率波束宽度, SLA_v 为旁瓣最大衰减,假设天线垂直下倾角理想的可调范围设置为 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 。

基站天线对巷道各个位置的平均增益为:

$$A_n(\alpha_i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N -\min[-A_v(\alpha_i), SLA_v] \quad (3)$$

其中, N 为接收端在巷道内的均匀分布的接收端位置数量。



贯通式巷道空间内,接收信号端位于高位叉车或堆垛机上,因此接收端信号高度保持不变。但是分层式巷道空间内多台穿梭车垂直分布,因此信号接收端高度是有差异的。本文对以下两种空间内的天线增益分别进行建模。

3.2.1 分层式巷道空间的天线增益建模仿真

为了验证天线挂高与巷道长度之间的关系,建模巷道长度分别为 30/1 000 m 的空间,不同穿梭车的信号接收端高度是有差异的,接收端高度取值范围 0~6.5 m,垂直半功率波束宽度 $\delta_{3dB} = 30^\circ$, $SLA_v = 23$ dB。建模假设均匀分布的接收端位置数量 N 取值分别为 300/10 000,构建以穿梭车为接收端在整个巷道平均增益为目标函数的优化模型,以基站天线挂高和天线倾角为参数,通过遍历算法求解建模最优解。通过 MATLAB 平台仿真获得优化模型如图 7 和图 8 所示。

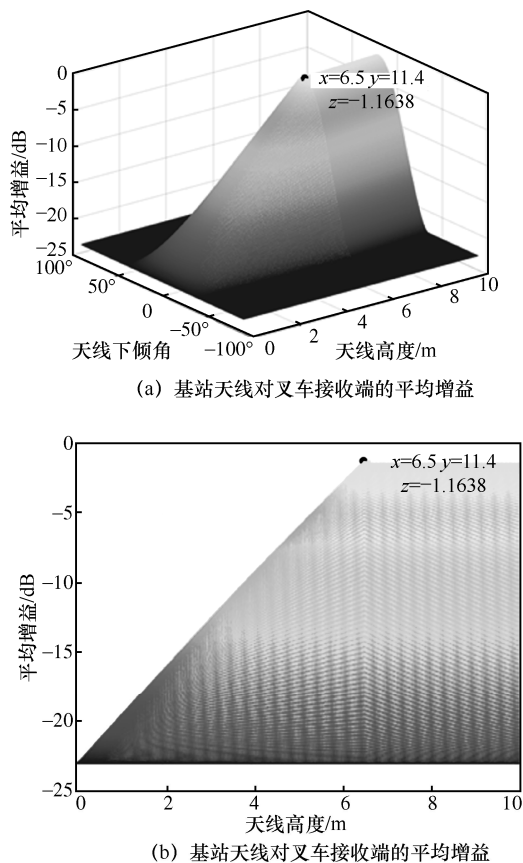


图 7 巷道平均增益优化模型 (巷道长度为 30 m)

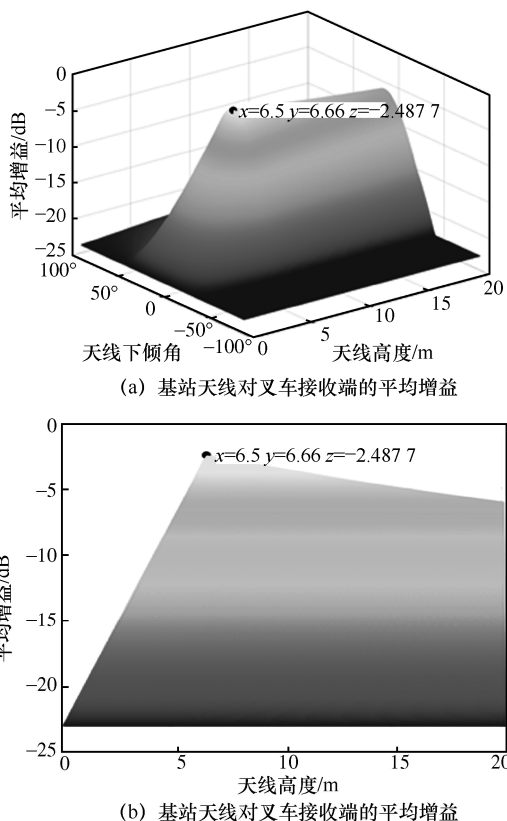
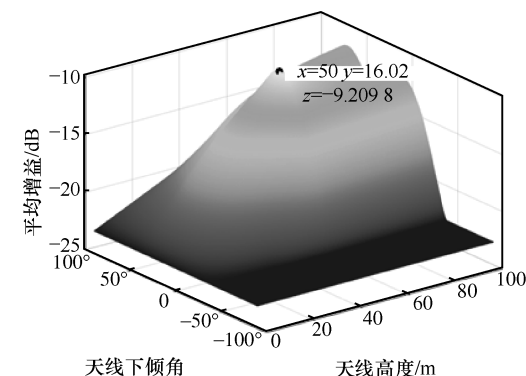


图 8 巷道平均增益优化模型 (巷道长度为 1 000 m)

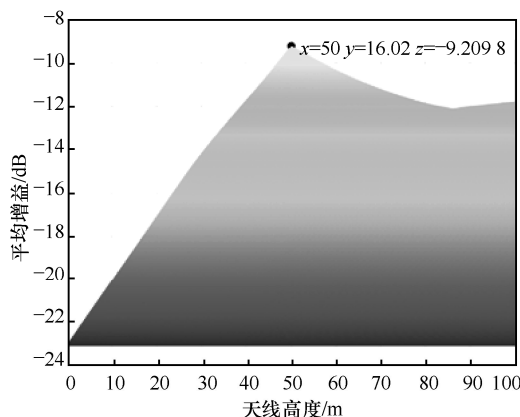
由图 7 和图 8 中的结果可见,穿梭车接收端在巷道的整体平均增益是呈曲面分布。对于长度为 30 m 的巷道,在天线高度为 6.5 m,天线倾角为 11.4° 时,曲面的顶点即为平均增益的最大值 -1.1638 dB。对于长度为 1 000 m 的巷道,在天线高度为 6.5 m,天线倾角为 6.66° 时,曲面的顶点即为平均增益的最大值 -2.4877 dB。得到结论是巷道内天线平均增益的最大值时的天线高度与巷道长度无关。

为了验证天线挂高与终端最高位置数值之间的关系,修改接收端高度取值范围为 0~50 m,重新通过 MATLAB 平台仿真获得优化模型的立体方位图如图 9 所示,当天线挂高为 50 m,下倾角为 16.02° 时,可获得天线在空间内的最大平均增益值。

结合以上建模仿真结果可知,针对分层式巷道空间,5G 专网的精准覆盖参数中,天线挂高应与接收端最高位置保持一致,下倾角可结合巷道长度和接收端最大高度计算得到。



(a) 基站天线对叉车接收端的平均增益



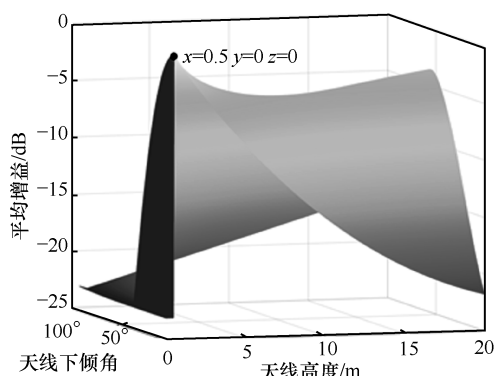
(b) 基站天线对叉车接收端的平均增益

图9 巷道平均增益优化模型
(巷道长度为1000m, 接收端最大高度50m)

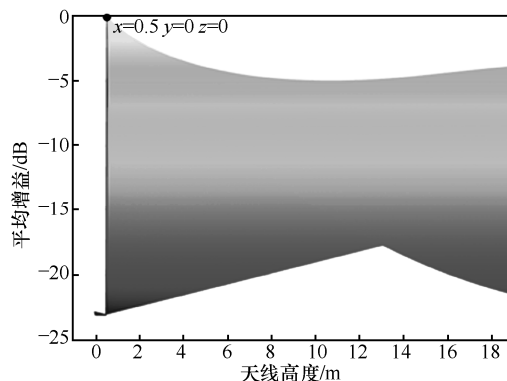
2.2.2 贯通式巷道空间的天线增益建模仿真

因高位叉车和堆垛机的控制单位位置高度固定, 建模假设高位叉车的信号接收端高度为0.5 m, 位置数量 N 取值为10 000, 巷道长度取值100 m。天线挂高参考典型高度取值范围为0~20 m, 垂直半功率波束宽度 $\delta_{3dB} = 30^\circ$, $SLA_p = 23$ dB。构建以叉车接收端在整个巷道平均增益为目标函数的优化模型, 以基站天线挂高和天线倾角为参数, 通过 MATLAB 平台仿真获得优化模型的立体方位图如图10所示。

由图10中结果可知, 叉车接收端高度为0.5 m, 当天线高度为0.5 m, 下倾角为 0° 时, 叉车接收端获得平均增益最大值。即针对贯通式巷道空间, 5G专网的精准覆盖参数中, 天线挂高应与自动化装备的控制单元位置保持一致, 天线下倾角为 0° 。



(a) 基站天线对叉车接收端的平均增益



(b) 基站天线对叉车接收端的平均增益

图10 巷道平均增益优化模型 (巷道长度100 m)

3 自动化立体仓库传播模型建立

3.1 5G 通用的传播模型的分析

3GPP TR 38.901 中基于多个公众覆盖场景定义了适用于5G NR 0.5~100 GHz的传播模型, 包含Uma、RMa、UMi-street 和 InH-office 4类场景^[6,7], 不同模型的具体适用范围如下所示。

(1) Uma (城区宏站)^[14]

适用于建筑物分布比较密集的区域。此场景主要包括各省会城市的商业中心和密集写字楼区域。该类场景基站天线挂高高于周围建筑物楼顶高度(如25~30 m), 用户在地平面高度(约1.5 m), 站间距不超过500 m。

(2) RMa (农村宏站)^[14]

适用于建筑物分布非常稀疏的区域。此类场景主要包括我国大部分的农村区域和少数不发达的乡镇区域。该类场景基站天线挂高在10~150 m, 用户在地平面高度(约1.5 m), 站间距一直到5 000 m。



(3) UMi-street (城区微站)^[14]

旨在还原真实的城市街道、开放区域等场景,如城市或车站广场、城市主要干道;典型开放区域宽度约为 50~100 m, 包含用户密集的开阔场地和城市街道。该类场景基站天线挂高为 10 m, 用户在地平面高度(约 1.5~22.5 m), 站间距等于或小于 200 m。

(4) InH-office (室内热点)^[14]

InH-office 模型是 3GPP TR38.901 协议中定义的室内无线电波传播的路径损耗模型,旨在还原各种真实典型的室内部署场景。该模型中信道的测量频率范围为 0.5~100 GHz, 信号传播有效距离为 1~150 m, 此类场景典型的办公环境包括开放式隔间区域、有围墙的办公室、开放区域、走廊等。

本文以自动化立体仓库空间作为典型场景,对其在巷道中的路径损耗模型进行研究。结合自动化立体仓库的空间特征对比以上 4 类通用模型,选取最接近的 InH-office 模型进行校正。

3.2 自动化立体仓库传播模型建立

传播模型是通过对传播路径损耗的计算来反映地形、障碍物和人为环境对电磁波传播的影响,计算式与频段、传播路径、所处地物、基站和终端的高度密切相关。

InH-office 传播模型在 LOS/NLOS 场景对传播路径损耗的计算式如下。

在视距传播 (LOS) 条件如下。

$$PH_{\text{InH-LOS}} = 32.4 + 17.3 \lg(d_{3D}) + 20 \lg(f_c) \quad (4)$$

在非视距传播 (NLOS) 条件下:

$$PH_{\text{InH-NLOS}} = 32.4 + 31.9 \lg(d_{3D}) + 20 \lg(f_c) \quad (5)$$

$$d_{3D} = \sqrt{(h_m - h_n)^2 + d_{mn}^2} \quad (6)$$

其中, $PH_{\text{InH-LOS}}$ 为视距传播下的路径损耗, $PH_{\text{InH-NLOS}}$ 为非视距传播下的路径损耗, h_m 为基站天线的有效高度, h_n 为用户终端有效高度, d_{mn} 为移动端到基站的水平距离, d_{3D} 为移动端到基站的直线距离, f_c 为基站所采用的信号载频。

3GPP 中的 InH-office 模型是在室内办公等场景

根据大量的测试数据后得到的经验模型,但是对立体仓库等特定空间场景会出现较大误差。因此根据实验室搭建的业务测试环境对基础传播模型进行校正以得到匹配自动化立体仓库巷道环境的更精准的传播模型。综合参考式 (4)~式 (6), 可以初步建立自动化立体仓库空间的传播模型式为:

$$PL = k_1 + 20 \lg(f_c) + k_2 \lg(d_{3D}) \quad (7)$$

使用 Python 最小二乘算法对其进行非线性拟合, 求出 k_1 和 k_2 的值, 即可校正出自动化立体仓库的精准传播模型。

4 实验室自动化立体仓库小型环境测试

本文中的实验室是在不同区域搭建了用于小型的高位叉车业务和多层穿梭车业务测试的巷道环境,按照前文自动化立体仓库的最佳天线增益模型,通过仿真测算出实验室两种巷道环境下的最佳天线挂高和下倾角,分别选用可调功率范围较大的基站设备,实现了 5G 专网信号覆盖。在总长度为 30 m 的分层式巷道空间,天线挂高为 6.5 m, 最优天线倾角为 11.4°。在贯通式巷道空间,天线挂高与控制单元位置保持一致为 0.5 m, 天线倾角为 0。

4.1 自动化立体仓库行业终端的业务 SLA 测试

在业务 SLA 测试阶段,结合自动化立体仓库系统的整体作业效率、运行速度、数据吞吐量和可靠性等要求,经过多次测试综合平均后得到智能叉车业务系统稳定运行所需的最低 RSRP 值为 -75 dBm, 多层穿梭车业务系统运行所需的最低 RSRP 值为 -85.6 dBm, 堆垛机业务系统运行所需的最低 RSRP 值为 -90 dBm。

4.2 实验室传播路径损耗测试

在 5G 智能物流联合创新实验室中搭建的小型业务测试环境相对封闭和简单,因此可简化基站馈电损耗、穿透损耗、人体遮挡损耗等干扰和噪声因子,简化后的路径损耗计算式为^[12-16]

$$\text{路径损耗} = P_T - \text{RSRP} + 10 \times \log(12 \times N_{\text{blocks}}) + G_T + G_R \quad (8)$$

其中, P_T 是发射功率, RSRP 是参考信号接收功率, G_R 是接收天线增益, G_T 是发射天线增益, N_{blocks} 为 RB (resource block) 数量。巷道区间内具体点位的发射天线增益 G_T 是根据第 3.2 节中建模仿真计算得到的值。将实测数据与式 (7) 进行最小二乘法拟合, 可得到校正后的传播模型式。

表 1 5G 系统参数

参数	取值
中心频率	3.5 GHz
带宽	100 MHz
接收天线增益	0 dBi
最大发射天线增益	12 dBi
RB 数	273
子载波数	12

4.2.1 分层式巷道空间的传播路径损耗测试

巷道 1 长约 30 m, 宽约 1 m, 高度约 6.5 m

的多层穿梭车系统空间。使用中国电信 5G 频段, 根据建模仿真结果, 设计 5G 天线挂高为 6.5 m, 下倾角 11.4° , 垂直半功率波束宽度 $\delta_{3\text{dB}} = 30^\circ$, $\text{SLA}_v = 23 \text{ dB}$ 。采用的基站为发射功率从 0.5~100 W 可调。测量时, 将接收天线放置在不同层的穿梭车上, 通过测量多个时刻接收信号强度取平均值的方式获取该位置的信号强度。测量时的系统参数见表 1, 在发射功率为 1 W、94 W 实测数据见表 2、表 3。

本文通过最小二乘法进行拟合后得到分层式巷道空间的传播模型式为:

$$\text{PL} = 56 \log(d_{3\text{D}}) + 20 \log(f_c) + 5.9 \quad (9)$$

实测基站数据与校正前的仿真对比如图 11 所示, 由于货架、货物、金属网格状维护平台对信号传播的影响, 实测的路径损耗曲线明显更为陡

表 2 发射功率为 1 W 时的实测数据

收发端距离 $d_{m'}/\text{m}$	终端高度 h_{UT}/m	RSRP/dBm	传播路径损耗/dB	G_T/dBi
10	0.5	-66	70.76	6.9
11.5	0.5	-67	73.39	8.53
13	0.5	-67	74.48	9.62
14.5	0.5	-75	83.23	10.37
16	0.5	-76	84.75	10.89
17.5	0.5	-77	86.11	11.25
19	0.5	-78	87.36	11.5
20.5	0.5	-80	89.54	11.68
22	0.5	-82	91.67	11.81
23.5	0.5	-85	94.75	11.89
25	0.5	-82	91.81	11.95
26.5	0.5	-83	92.84	11.98
28	0.5	-88	97.854	11.994
10	6.5	-65	73.127	10.267
11.5	6.5	-69	77.127	10.267
13	6.5	-67	75.127	10.267
14.5	6.5	-76	84.127	10.267
16	6.5	-74	82.127	10.267
17.5	6.5	-76	84.127	10.267
19	6.5	-79	87.127	10.267
20.5	6.5	-77	85.127	10.267
22	6.5	-80	88.127	10.267
23.5	6.5	-81	89.127	10.267
25	6.5	-85	93.127	10.267
26.5	6.5	-86	94.127	10.267
28	6.5	-87	95.127	10.267



表 3 发射功率为 94 W 时的实测数据

收发端距离 d_{mn}/m	终端高度 h_{UT}/m	RSRP/dBm	传播路径损耗/dB	G_T/dBi
10	0.5	-49	73.5	6.9
11.5	0.5	-50	76.13	8.53
13	0.5	-52	77.22	9.62
14.5	0.5	-54	81.97	10.37
16	0.5	-61	89.49	10.89
17.5	0.5	-62	90.85	11.25
19	0.5	-60	89.1	11.5
20.5	0.5	-63	92.28	11.68
22	0.5	-68	97.41	11.81
23.5	0.5	-69	98.49	11.89
25	0.5	-70	99.55	11.95
26.5	0.5	-73	102.58	11.98
28	0.5	-70	99.54	11.994
10	6.5	-52	79.87	10.267
11.5	6.5	-53	80.87	10.267
13	6.5	-56	89.87	10.267
14.5	6.5	-58	85.87	10.267
16	6.5	-59	86.87	10.267
17.5	6.5	-61	88.87	10.267
19	6.5	-63	90.87	10.267
20.5	6.5	-67	94.87	10.267
22	6.5	-65	92.87	10.267
23.5	6.5	-64	91.87	10.267
25	6.5	-69	96.87	10.267
26.5	6.5	-70	97.87	10.267
28	6.5	-75	102.87	10.267

峭，校正后的传播模型在较远的巷道情况下已经接近非视距传播模型计算结果。

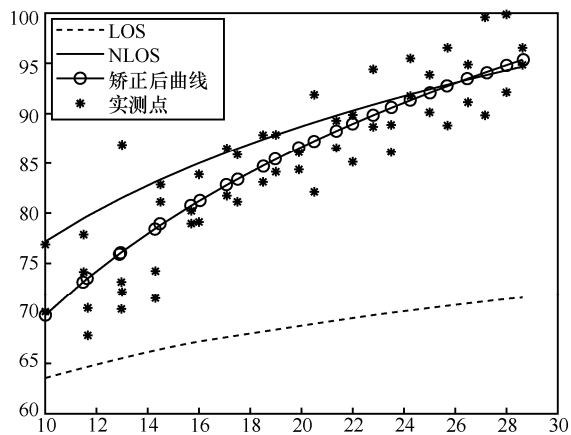


图 11 不同情况的路径损耗随基站至终端的直线距离变化曲线

4.2.2 贯通式巷道空间的传播路径损耗测试

巷道 2 长约 90 m，宽约 3 m，高度约 7 m，接近高位叉车和堆垛机系统空间。使用中国电信 5G 频段，根据建模仿真结果，设计 5G 天线挂高为 0.5 m，下倾角 0° ，天线安装在巷道一端，选用天线的垂直半功率波束宽度 $\delta_{3\text{dB}} = 30^\circ$ 、 $\text{SLA}_v = 23 \text{ dB}$ ，由图 10 可知建模仿真的 G_t 值结果均为最大发射天线增益。采用的基站为发射功率从 0.5~50 W 可调。测量时，接收天线放置在高度为 0.5 m 的叉车上，通过测量多个时刻接收信号强度取平均值的方式获取该位置的信号强度。

表 1 为测量时的系统参数，发射功率为 2 W、10 W、40 W 实测数据见表 4、5、6。

表 4 发射功率 P_t 为 2 W 时的实测数据

收发端距离 d_{mn}/m	RSRP/dBm	传播路径损耗/dB
8	-65.9	76.4
24	-73.8	84.3
40	-76.5	87.0
56	-78.5	89.0
72	-79.8	90.3
88	-82.6	93.1

表 5 发射功率 P_t 为 10 W 时的实测数据

收发端距离 d_{mn}/m	RSRP/dBm	传播路径损耗/dB
8	-53.3	70.8
24	-59.0	76.5
40	-75.0	92.5
56	-78.6	96.1
72	-77.0	94.5
88	-78.3	95.8

表 6 发射功率 P_t 为 40 W 时的实测数据

收发端距离 d_{mn}/m	RSRP/dBm	传播路径损耗/dB
8	-52.0	75.5
24	-61.0	84.5
40	-70.0	93.5
56	-68.5	92.0
72	-76.0	99.5
88	-70.8	94.3

本文通过最小二乘法进行拟合后得到贯通式巷道空间的传播模型为:

$$PL = 23.18 \log(d_{3D}) + 20 \log(f_c) + 40.86 \quad (10)$$

将实测基站数据与校正前的仿真对比如图 12 所示, 经过校正后的传播模型相对原室内通用模型的精准度更高。

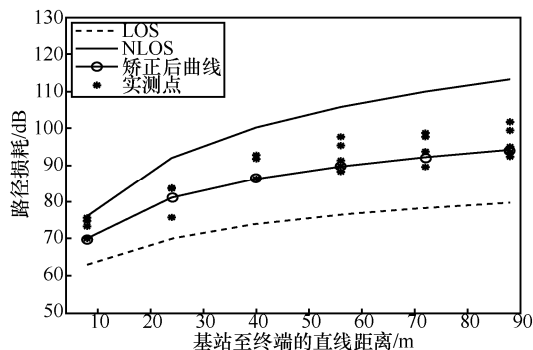


图 12 不同情况的路径损耗随基站至终端的直线距离变化曲线

5 自动化立体仓库的 5G 专网精准覆盖参数计算和应用

针对巷道 d_{mn} 为 100 m 的高位叉车系统, 在满足高位叉车业务所需最低 RSRP 为 -75 dBm 时, 天线挂高需与高位叉车控制单元接收天线高度保持一致, 下倾角为 0° , 单巷道覆盖所需要的最小发射功率为 44.56 W。

针对巷道 d_{mn} 为 20 m 的堆垛机系统, 在天线满足堆垛机业务所需最低 RSRP 为 -90 dBm 时, 天线挂高需与堆垛机控制器控制单元接收天线高度保持一致, 下倾角为 0° , 单巷道覆盖所需要的最小发射功率 37.20 mW。

针对巷道 d_{mn} 为 54 m, 高 11 m 的多层穿梭车系统, 在满足穿梭车业务所需最低 RSRP 为 -85.6 dBm 时, 天线挂高 11 m, 下倾角为 12.42° , 单巷道覆盖所需要的最小发射功率为 160 W。

针对巷道 d_{mn} 为 65 m, 高 11 m 的多层穿梭车系统, 在满足穿梭车业务所需最低 RSRP 为 -85.6 dBm 时, 天线挂高 11 m, 下倾角为 11.52° , 单巷道覆盖所需要的最小发射功率为 320 W。

针对巷道 d_{mn} 为 70 m, 高 22 m 的多层穿梭车系统, 在满足穿梭车业务所需最低 RSRP 为 -85.6 dBm 时, 天线挂高 22 m, 下倾角为 11.5° , 单巷道覆盖所需要的最小发射功率为 578.83 W。

当前通信设备厂商的 5G 基站设计主要是为了最高性价比满足公网不同空间特征的需求, 且为了做到规模化和标准化, 按发射功率主要分为 320 W、160 W、20 W、250 mW 等档型号, 单设备成本虽按功率降低依次递减, 但单位覆盖面积成本和维护成本却依次递增。因此结合不同尺寸自动化立体仓库的空间特征, 为了尽量减少设备运行过程中的切换和干扰, 降低部署和优化维护成本, 在做 5G 专网精准覆盖时应选择适配发射功率挡位的无线设备。未来更优的方案是在自动化立体仓储系统设计初就综合考虑 5G 专网精准覆盖的参数, 从而实现空间和 5G 设备参数最优匹配的一体化设计。



6 结束语

本文针对自动化立体仓库的空间特征进行研究和分类,通过实测数据结合仿真建模对巷道的传播损耗模型进行校正,进而得到可通用于不同尺寸自动化立体仓库的 5G 专网精准覆盖参数计算方法,更有利于进一步降低 5G 专网的建设和优化维护成本从而加快自动化立体仓库的 5G 专网应用速度。未来随着自动化立体仓库的市场规模进一步发展,传播模型的校正研究还可以进一步考虑并行多个巷道和不同类型货物阻隔的因素,可用于指导 5G 基站设备厂商深度定制更符合自动化立体仓库等行业需求的设备。

本文以自动化立体仓库为例提出的通过小型空间实测数据对传播模型校正,进而提升 5G 专网精准覆盖的方法,可以应用在需要 5G 专网精准覆盖的各行业场景中。能够有效指导通信行业为各行各业深度定制 5G 专网服务,可加快工厂仓库等建筑方案与 5G 专网方案的深度协同。未来,有望将 5G 专网设备与电力设施一样纳入各行业基础设施的建设标准中进行一体化设计。

参考文献:

- [1] 牛秀明. 货架: 仓储的中流砥柱[J]. 物流技术(装备版), 2012, 31(12): 82-83.
NIU X M. Shelf: The mainstay of warehousing [J]. Logistics Technology (Equipment), 2012, 31(12): 82-83.
- [2] 李璐. 自动化立体仓库专利技术综述[J]. 物流技术与应用, 2019, 24(7): 116-122.
LI L. Overview of patent technologies for AS/RS[J]. Logistics & Material Handling, 2019, 24(7): 116-122.
- [3] 汤洪涛, 程晓雅, 李修琳, 等. 跨层跨巷道穿梭车仓储系统复合作业路径优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021: 1-27.
YANG H T, CHEN X Y, LI X L, et al. Cross-layer cross-lane shuttle storage system composite operation path optimization[J]. Computer integrated manufacturing system, 2021: 1-27.
- [4] 黄强. 5G 技术在物流智能仓储中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2020(15): 33-36.
HUANG Q. The application of 5G technology in logistics intelligent warehousing [J]. New Technology & New Products of China, 2020(15): 33-36.
- [5] 马文凯, 吴耀华, 吴颖颖, 等. 基于进化算法的跨巷道多层穿梭车仓储系统研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 216-224.
MA W K, WU Y H, WU Y Y, et al. Research on cross-aisles multi-shuttle warehouse system based on evolutionary algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 216-224.
- [6] 于皎. 自动化立体仓库多层穿梭车多维智能动态调度模型研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2016.
YU J. Research on multi-dimensional intelligent dynamic scheduling model of multi-layer shuttle vehicle of automated three-dimensional warehouse[D]. Kunming: Yunnan University of Finance and Economics, 2016.
- [7] 3GPP. 3GPP V14.3.0: 3rd Generation: TR 38.901[S]. 2020.
- [8] Partnership project; technical specification group radio access network; study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release14) [EB]. 2018.
- [9] 3GPP. 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; study on 3D channel model for LTE (Release12): 3GPP TR 36.873 V12.7.0[EB]. 2018.
- [10] 蔡佳祺, 万海斌, 孙友明, 等. 基于人工蜂群算法的基站天线方位角与下倾角自优化方法[J]. 电信科学, 2021, 37(1): 69-75.
CAI J Q, WAN H B, SUN Y M, et al. Artificial bee colony algorithm based self-optimization of base station antenna azimuth and down-tilt angles[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(1): 69-75.
- [11] 易诗妍. 物流拣选自动补货系统研究与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
YI S Y. Research and design of automated inbound system in order picking logistics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [12] 赵伟康. 5G 传播损耗及链路预算[J]. 中国新通信, 2019, 21(24): 8-9.
ZHAO W K. 5G propagation loss and link budget [J]. China New Telecommunications, 2019, 21(24): 8-9.
- [13] 陈杨, 杨芙蓉, 余扬尧. 5G 覆盖能力研究[J]. 通信技术, 2018, 51(12): 2866-2873. CHEN Y, YANG F R, YU Y Y. Research on 5G coverage capability[J]. Communications Technology, 2018, 51(12): 2866-2873.
- [14] 袁周阳, 赵伟康, 吴迪. 基于 UMa 和 RMa 传播模型的 5G 覆盖性能研究[J]. 移动通信, 2020, 44(10): 1-6.
YUAN Z Y, ZHAO W K, WU D. Research on 5G coverage performance based on UMa and RMa propagation models[J]. Mobile Communications, 2020, 44(10): 1-6.
- [15] 3GPP. 3rd Generation: TR 38.901 V14.3.0[S]. 2020.
- [16] 阮金波. 基于射线追踪法的 5G 室内无线网络规划与优化研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
RUAN J B. Research on indoor wireless network planning and

optimization of 5G based on ray tracing method[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.

[作者简介]



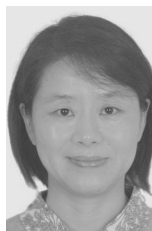
赵婧博（1981—），女，中国电信股份有限公司研究院工程师，主要研究方向为 5G 专网、5G 行业应用研究。



董石磊（1980—），男，中国电信股份有限公司研究院高级工程师，主要研究方向为 5G 定制网可视化、5G 行业应用。



黄婷钰（1995—），女，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为无线网络规划与 5G 专网优化。



陈梦霞（1970—），女，中国电信股份有限公司北京分公司工程师，主要研究方向为 5G 通信技术、交通物流及工业互联网等行业应用研究

黄鹏（1979—），男，中国电信股份有限公司研究院高级工程师，主要研究方向为 5G 行业应用、5G 定制网。