

基于改进射线追踪法的变电站 5G 信道路径损耗快速求解

林睿¹, 唐波^{1,2}, 李逸峰¹, 朱振东¹, 刘思煜¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 由于 5G 信号频率高, 导致传统算法求解信道路径损耗时计算规模极大, 必须寻求变电站内 5G 信道路径损耗的快速求解方法, 以实现信道与信号接收端的快速适配, 保证 5G 信号的接收质量。针对传统算法在处理并矢反绕射系数时计算量极大的问题, 突破传统 5G 信道寻迹确认并矢反绕射系数的方法, 提出一种基于奇异值分解的方法对信道矩阵进行降维求解。首先, 采用射线管模型对信道进行划分, 通过结点对信道矩阵内入射角信息进行分块, 摒弃其中重复和对信道路径损耗贡献极小的入射角信息。然后, 通过奇异值分解算法实现矩阵降维, 以降维后的信道矩阵代入并矢反绕射系数求解公式, 实现 5G 信道路径损耗的快速求解。最后, 以 AAU5270E 型 5G 基站天线为例, 以实验测量数据计算结果为基准, 进行了所提算法与传统算法的计算结果对比。结果表明, 文中所提方法准确度损失仅为 1.31%, 数据的压缩压缩比达 84.89, 计算量的数量级比传统算法降低了 10^5 。

关键词: 5G 信道路径损耗; 并矢反绕射系数; 奇异值分解; 信道矩阵; 快速求解

Fast Solution of 5G Channel Path Loss in Substation Based on Improved Ray Tracing Method

LIN Rui¹, TANG Bo^{1,2}, LI Yifeng¹, ZHU Zhendong¹, LIU Siyu¹

(1. College of Electricity and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: Due to the high frequency of 5G signals, which leads to an extremely large computational scale when traditional algorithms solve the channel path loss, it is necessary to seek a fast solution method for the 5G channel path loss in the substation in order to achieve a fast adaptation of the channel to the signal receiver and to ensure the reception quality of the 5G signals. Aiming at the problem that traditional algorithms are extremely computationally intensive when dealing with the parallel vector inverse surround coefficients, we break through the traditional method of confirming the parallel vector inverse surround coefficients of the 5G channel tracing and propose a method based on the singular value decomposition for the dimensionality reduction of the channel matrix to solve the problem. Firstly, the ray tube model is used to divide the channel, and the incident angle information within the channel matrix is chunked through the nodes to discard the duplicates and those that contribute very little to the channel path loss. Then, matrix dimensionality reduction is achieved by singular value decomposition algorithm, and the dimensionality reduced channel matrix is substituted into the sum-vector inverse wrap-around coefficient solution formula to achieve the fast solution of 5G channel path loss. Finally, a comparison of the computational results of the proposed algorithm with those of the traditional algorithm is carried out by taking the 5G base station antenna of AAU5270E as an example and using the computational results of the experimental measurement data as a benchmark. The results show that the accuracy loss of the method proposed in the paper is only 1.31%, the compression of the data is 84.89, and the order of magnitude of the computation is 10^5 lower than that of the traditional algorithm.

Key words: 5G channel path loss; parallel vector inverse winding coefficient; singular value decomposition; channel matrix; fast solution

0 引言

近年来, 5G 通信技术在变电站内得到了广泛应用, 其通信质量问题也随之突显^[1]。工程中常采用 5G

信道路径损耗表征 5G 信号的通信质量^[2], 并采用射线追踪算法对其进行求解^[3]。求解速度将直接决定信道与信号接收端的适配速度, 影响 5G 信号的传输质量^[4]。然而, 5G 信号频率较高, 相较于其他频段的

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5217L021000X)。

Project Supported by Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation(5217L021000X).

信号穿透性较差,更易在站内大量电大尺寸金属设备障碍面上发生折反射,致使采用该算法求解信道路径损耗时,需进行更多次分段寻迹,导致计算量过大而无法接受^[5]。因此,减少传统信道路径损耗算法中的5G信道寻迹次数,是解决变电站内5G信道损耗求解的关键。

最初获取无线信号信道路径损耗的方法是采用经验公式^[6]。但经验公式的准确性依托大量来源于特定变电站的实验测试数据,当该经验公式应用于其他变电站时,存在普适性差而导致误差过大的问题^[7]。为此,文[8]提出了基于随机几何理论的数学模型方法。但该方法采用的瑞利分布概率密度函数中期望和方差均为时间无关变量,无法表征5G信道路径的相对时延特性,致使求解精度较低。后续研究^[9-10]进一步提出了基于几何光学(geometrical optics, GO)和一致性绕射理论(uniform theory of diffraction, UTD)的射线追踪法。该算法采用寻迹相交测试^[11],较全面地获取了5G折反射信号的信道路径。但由于计算过程中多次分段寻迹,每次分段后的信道路径需重新与全部障碍面进行相交测试,造成寻迹次数过多而难以求解^[12]。因此,若采用射线追踪算法对变电站内5G信道路径损耗求解,必须减少寻迹次数。

在实际工程中,其实也遇到了类似于变电站5G信道路径损耗快速求解的问题。如文[13]在研究城市地铁和无人机高速移动下的5G信道路径损耗时,利用5G信号传输的多径效应^[14],构造出5G信号稀疏信道矩阵,然后依据多次分段寻迹相交测试的特征值对矩阵进行降维,以此改进射线追踪算法。但变电站相比高速运动的地铁和无人机而言,5G信号与障碍面位置相对固定,导致5G折反射信道路径寻迹相交测试无法被忽略,构造的信道矩阵稠密,且具有较大的矩阵条件数^[15],难以获取5G信道的本质低维空间。因此,若要采用矩阵降维的方法对变电站5G信道路径损耗进行求解,需将其时延特性参数化,并进行信道矩阵填充,以此降低矩阵的秩,从而实现射线追踪算法的快速求解。

为此,文中在传统射线追踪算法的基础上,借鉴构造信道矩阵的思想,结合变电站内5G信号经设备折反射的路径分布特点,引入奇异值分解法^[16](singular value decomposition, SVD)对5G信道路径矩阵降维,实现了变电站内5G信道路径损耗的快速求解。该算法在河南官渡500 kV变电站的求解分析中得到了成功应用,对后续改进算法具有一定的指导意义。

1 5G 信道路径损耗及其现有算法分析

1.1 变电站内 5G 信道路径损耗

实际工程中,5G基站天线常架设于主控室楼顶。当5G基站天线正常工作时,定向发射出的高频电磁波一部分被信号接收端直接接收^[17];另一部分经由站内密集的金属设备,在设备的表面或边缘处发生反射和绕射后被信号接收端接收,最终形成变电站内5G信道见图1。

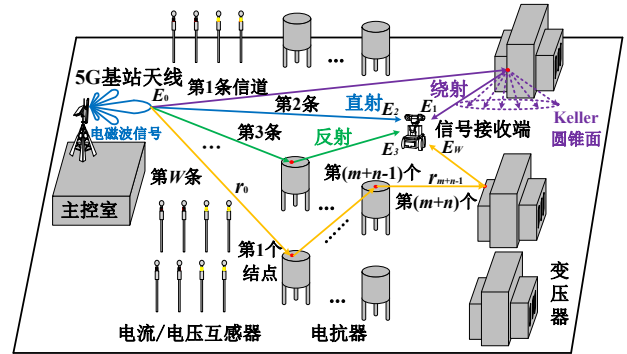


图1 变电站内5G信道示意图

Fig. 1 Schematic of 5G channel in substation

根据射线管模型,对5G信道进行划分可得到如图1所示的各条电磁波信号传播路径^[18]。各路径的电磁波与设备表面或边缘接触的位置称为结点,结点处电磁波传播方向与设备接触面法线方向形成的夹角称为入射角,而结点坐标与入射角均可根据费马原理^[19-20]计算得到。在此基础上可根据结点坐标与入射角信息,确定每条传播路径中产生直射、反射和绕射的次数和位置。当电磁波直射传播到终点时,电磁损耗仅受空气介质影响,由此产生的损耗称为直射损耗^[20]。当电磁波经过反射传播到下一结点时,电磁损耗主要来自于设备表面产生的感应电流热效应,由此产生的损耗称为反射损耗^[20]。而当电磁波在设备边缘处发生绕射时,将在设备边缘结点处形成Keller圆锥面^[20],在圆锥面上,绕射电磁波由于相位不同发生干涉效应,从而产生绕射损耗^[20]。

根据上述传播过程中的损耗来源,可求得电磁波信号在传播过程中的能量总损耗,即5G信道的路径损耗。

1.2 传统射线追踪算法及其缺陷

目前,变电站内信道路径损耗求解最常用的算法是射线追踪法。该算法首先将站内所有电磁波信号的入射角信息以矩阵的形式进行存储,该矩阵定义为信道矩阵,再利用信道矩阵求出反射和绕射的损耗参数,最后由损耗参数得到电磁波信号在信号接收端的

总辐射场强,用以表征信道路径损耗^[21]。

总辐射场强的求解公式为^[21]

$$\begin{cases} \mathbf{E} = \sum_{w=1}^W \mathbf{E}_w \\ \mathbf{E}_w = \mathbf{E}_0 \frac{e^{-jk r_0}}{r_0} \cdot \prod_{h=1}^m \bar{\mathbf{R}}_h \cdot \prod_{i=1}^n \bar{\mathbf{D}}_i \cdot \prod_{s=1}^{m+n} A_s(r_s) \cdot e^{-jk r_s} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: \mathbf{E} 为信号接收端接受的总辐射场强; W 为电磁波信号的信道总数; \mathbf{E}_w 为第 w 条信道的在信号接收端的辐射场强; \mathbf{E}_0 为该条信道的初始辐射场强; r_0 为该条信道的电磁波信号由起点到第 1 个结点的距离; m 、 n 分别为该条信道出现反射、绕射的总次数; $\bar{\mathbf{R}}_h$ 为根据信道矩阵确定的该条信道第 h 次反射的并矢反射系数^[20]; $\bar{\mathbf{D}}_i$ 为根据信道矩阵确定的该条信道第 i 次绕射的并矢绕射系数; $A_s(r_s)$ 为该条信道第 s 个结点的辐射场振幅扩散因子; $e^{-jk r_s}$ 为该条信道第 s 个结点的辐射场相位函数; r_s 为第 s 个结点到第 $s+1$ 个结点的距离。

式(1)中,最复杂的计算过程在于 $\bar{\mathbf{R}}_h$ 和 $\bar{\mathbf{D}}_i$ 的求解,这两个系数需通过信道矩阵迭代求解^[11]。根据信道矩阵的定义^[11],信道矩阵的维度由每条信道中产生的入射角信息总数量决定。而当任一条信道的电磁波信号在设备边缘发生绕射后,将在结点处形成 Keller 圆锥面,产生大量相等的入射角信息。这些重复的入射角信息会导致矩阵维度大幅增加,计算量也随之大幅增加。

此外,由于每条信道的能量分布并非均匀,主要集中在少数信道中^[22]。能量分布较小的信道对总辐射场的求解结果贡献极小^[22],对其进行完整的路径损耗求解的实际意义不大。传统求解过程将信道矩阵内的冗余信息和贡献较小的信息也进行了迭代运算,占用了大量的计算资源,显然可以减少。

可见,传统射线追踪算法的主要缺陷,在于对能量分布较小信道中的入射角信息也进行了存储与计算,导致信道矩阵的规模过大,引入了不必要的计算量。

1.3 改进射线追踪算法的整体求解思路

根据 1.2 节的分析可知,弥补传统射线追踪算法缺陷的关键,在于找到一种方法,能够摒弃信道矩阵内的大量冗余信息,降低信道矩阵迭代求解 $\bar{\mathbf{R}}_h$ 和 $\bar{\mathbf{D}}_i$ 的计算规模,从而减少求解信道路径损耗的计算量。

对信道矩阵中存在的大量冗余信息进行摒弃,实际上是对信道矩阵内能量分布较少电磁波信道存储的入射角信息进行摒弃。而这就需要明确每条信道的

能量分布对总信道路径损耗的影响程度,也即每条信道在信道矩阵内对应的特征值。大量冗余信息的存在,致使信道矩阵维度急剧增大,矩阵的数值稳定性大幅度下降成为奇异矩阵^[23],此时的特征值成为奇异值。基于此,对信道矩阵进行降维时,可考虑采用基于奇异值分解的矩阵降维法,得到左、右奇异向量矩阵以及奇异值对角矩阵^[23]。奇异值对角矩阵用以明确各信道对应奇异值大小,并通过矩阵的秩确定需掘弃的奇异值个数。最后,为了验证掘弃后的对角矩阵与原对角矩阵可相互替代,可通过奇异值分解范数比性质^[23]验证两者的映射关系。

虽然此时得到的奇异值对角矩阵已掘弃了冗余信息,而左、右奇异向量矩阵未进行对应降维,致使左、右奇异向量矩阵与对角矩阵的维度不对应,无法还原出降维后的信道矩阵,也就无法明确剩余的信道路径入射角信息。因此,求解时还需考虑对左、右奇异向量矩阵进行重构,使得两个矩阵与奇异值对角矩阵的维度相互对应,从而推出降维后的信道矩阵。基于此,通过 GO 和 UTD 的系数求解方法,结合降维后的信道矩阵,对各信道路径结点处的 $\bar{\mathbf{R}}_h$ 和 $\bar{\mathbf{D}}_i$ 进行迭代求解。

解决了上述问题后,即可降低传统射线追踪算法的计算量,从而实现改进射线追踪算法在变电站内 5G 信道路径损耗快速求解中的应用。该求解算法在研究不同变电站内的变电站信道路径损耗时,对任一设备种类及其分布明确的 5G 变电站,均可按照 1.1 节所提方式对信道路径进行建模,构建对应的信道矩阵。再利用上述矩阵降维算法对信道矩阵中能量贡献较小且计算量大的冗余信息进行掘弃,提升求解速度,可推广至任意变电站内 5G 信道路径损耗的快速求解中。

2 5G 信道路径损耗快速计算方法

2.1 变电站 5G 信道矩阵的构建

求解低频信号时,通常仅需一条信道的辐射场强即可描述总辐射场强。但 5G 信号属于高频信号极易出现波动现象,仅凭一条信道无法描述 5G 信号在传播过程中的辐射场强的振幅扩散和相位变化。为此,射线追踪算法通常采用多条信道辐射场的矢量叠加来求解总辐射场强,如何进行信道划分就成为了关键问题。

由于 5G 信号的波前呈球面扩散,通常将发射点等效为理想球面。从已有的研究来看,内接正二十面体发射模型容易细分和控制波前大小,常被用做信号发射端的射线管模型。如图 2 所示,模型首先对整

个球面的进行划分,判断电磁波传播途径是否在其划分范围内。若有多条传播途径在同一个管状射线范围内,算法会将所有能量均一为同一能量值,并判定该条传播路径为一条信道。因此,范围划分将直接决定信道的数量及信道求解精度。

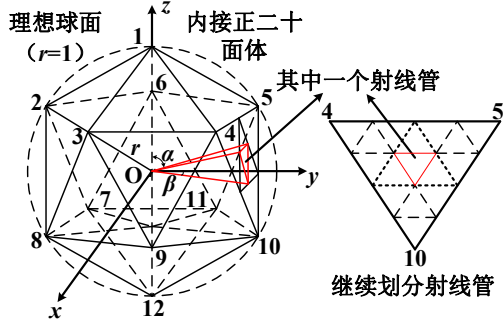


图2 射线管模型的划分示意图

Fig. 2 Schematic division of the ray tube model

而考虑到文中的目标是在保证求解精度的前提下,掘弃冗余和能量较小的信道,信道数量越多,剩余的信道求解精度也就越高。而传统的划分方式过于粗糙,可能导致实际传播路径中部分能量差异较大的路径在均一化过程中能量特征被弱化,造成原本应进行计算的信道被掘弃,致使信道路径损耗求解出现较大误差。因此,为了提升剩余信道求解精度,可继续对正二十面体进行划分,以此提高计算精度。

如图3所示,由于射线管以管的传播代替了信号的传播,因此信号在设备表面处的结点R包含于此接触范围abcd内。

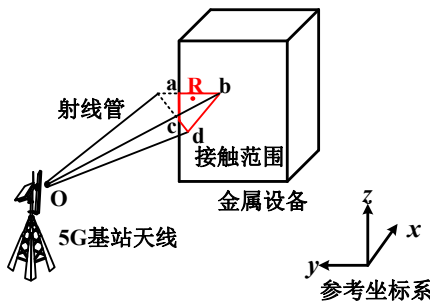


图3 射线管与金属设备的接触范围

Fig. 3 Range of contact between radiation tubes and metal equipment

在此基础上,采用基于GO的光程函数,结合费马原理对光程函数求极值和接触范围的边界限制可得到全部结点坐标^[20],并利用矢量的内积原理,得到结点处入射角的余弦值^[24]。得到每个结点的入射角后,若存在w条信道,每条信道存在m次反射和n次绕射,则存在m+n个结点,此时的信道矩阵H可表示为

$$\mathbf{H}_{p \times (m+n)} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{p1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{1(m+n)} & \cdots & \gamma_{p(m+n)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中,由于存在绕射的情况,使矩阵维度增加,故 $p > w$ 。

2.2 矩阵降维算法的选取

根据1.2节的分析可知,信道矩阵是求解5G信号并矢反绕射系数的重要参量。当5G信号在信道矩阵内的结点处发生反射或绕射时,根据GO和UTD理论可确定入射场与接收端的场强之间的矢量关系,但该过程对每个结点均需构建关于并矢反绕射系数的三阶矩阵方程,计算复杂度高^[20]。为此,射线追踪算法采用射线坐标系,得到该坐标系下并矢反绕射系数的简化形式为^[20]

$$\begin{cases} \overline{\mathbf{R}}_h = \begin{pmatrix} R_{\perp} & 0 \\ 0 & R_{\parallel} \end{pmatrix} \\ \overline{\mathbf{D}}_i = \begin{pmatrix} D_e & 0 \\ 0 & D_m \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中:

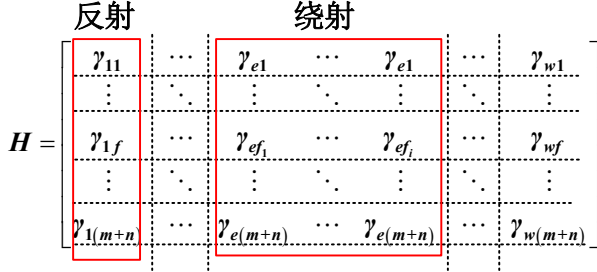
$$\begin{cases} R_{\perp} = \frac{\cos \gamma - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \gamma}}{\cos \gamma + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \gamma}} \\ R_{\parallel} = \frac{\varepsilon \cos \gamma - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \gamma}}{\varepsilon \cos \gamma + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \gamma}} \end{cases} \quad (4)$$

$$D_{e,m} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi k}} \left[\frac{1}{\pi - |\varphi_1 - \varphi_2|} + \frac{1}{\pi + |\varphi_1 - \varphi_2|} \right] \quad (5)$$

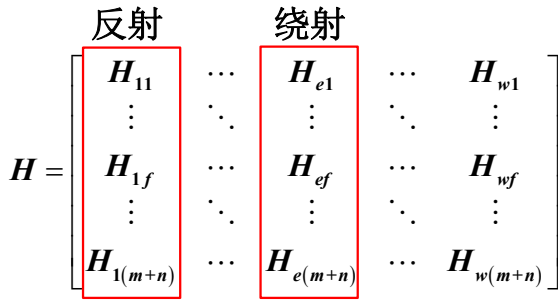
式(3)-(5)中: R_{\perp} 为正交极化方向的反射系数; R_{\parallel} 为水平极化方向的反射系数; D_e 为正交极化方向的电极化绕射系数; D_m 为水平极化方向的磁极化绕射系数; $D_{e,m}$ 为一致性绕射系数;在反射系数中, γ 为5G信号反射的入射角, ε 为设备相对介电常数;在绕射系数中, φ_1 为入射波与入射平面的外侧夹角, φ_2 为绕射波与入射平面的外侧夹角,此时的入射角 $\gamma = \pi - |\varphi_1 - \varphi_2|$; k 为波数。

由此可见, $\overline{\mathbf{R}}_h$ 和 $\overline{\mathbf{D}}_i$ 仅与5G信号的入射角 γ 有关。现有处理方法仅针对每个入射角进行计算,并不考虑多个入射角和结点之间的对应关系。导致当某一结点出现绕射时会使相同的入射角信息重复出现,带来大量计算量。而对一个结点相同的信息进行重复计算意义不大,因此可考虑通过矩阵分块明确入射角与结点间的对应关系,去除多余的信息,以提升计算效率。

而 5G 信号的入射角存储于信道矩阵内，因此，如图 4(a)所示，可在求解每个结点的 $\bar{\mathbf{R}}_h$ 或 $\bar{\mathbf{D}}_i$ 时，对信道矩阵进行分块处理得到子矩阵，将同一结点的全部入射角划分到同一子矩阵内。



(a) 不同传播形式的矩阵分块示意图



(b) 矩阵分块后的子矩阵示意图

图 4 信道矩阵分块示意图

Fig. 4 Schematic diagram of channel matrix chunking

划分过程如图 4 所示，当 5G 信号发生反射时，子矩阵仅包含一个入射角元素，可将子矩阵直接带入式(4)求解 $\bar{\mathbf{R}}_h$ 。而当 5G 信号的第 e 条信道第 f 个结点处发生绕射时，按照图 4(b)的划分方式，此类结点的子矩阵均为行向量矩阵，且行向量内的元素均相等，这些重复的冗余信息将增加矩阵的维度，导致子矩阵无法直接代入式(5)。

此外，对于能量较弱信道的结点进行式(4)、(5)的计算对于总辐射场求解的结果影响不大，可考虑减少此类结点 $\bar{\mathbf{R}}_h$ 和 $\bar{\mathbf{D}}_i$ 的计算，以降低计算量。

奇异值分解技术(SVD)作为现代信号处理一个重要的手段，能从高维的病态矩阵中快速挖掘代数特性和潜在的特征信息。在信号处理的过程中，信号具有的能量越大，奇异值越大的特点，因此可快速的区分出每条信道能量对计算结果的贡献，有效的减少重复和无效信息。此外，相较于其他矩阵降维方法，奇异值分解法可适用于任意矩阵^[23]，更适用于解决如变电站内 5G 信道矩阵这一类非对称方阵的降维问题。综上所述，可考虑采用奇异值分解法对信道矩阵进行降维。

2.3 SVD 算法求解信道路径损耗

根据奇异值分解的定义，对于信道矩阵 $\mathbf{H}_{p \times (m+n)}$ ，必然存在正交矩阵 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 满足下列关系

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (6)$$

式(6)中

$$\begin{cases} \mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}_1 & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} \end{bmatrix}, \mathbf{\Sigma}_1 = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_d), \text{rank}(\mathbf{\Sigma}) = d \\ \mathbf{H}\mathbf{v}_k = \begin{cases} \sigma_k \mathbf{u}_k, k = 1, 2, \dots, d \\ 0, k = d + 1, d + 2, \dots, m + n \end{cases} \\ \mathbf{u}_k^H \mathbf{H} = \begin{cases} \sigma_k \mathbf{v}_k^T, k = 1, 2, \dots, d \\ 0, k = d + 1, d + 2, \dots, m + n \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中： $\mathbf{U}_{p \times p}$ 为信道矩阵的左奇异向量矩阵， \mathbf{u}_k 为 \mathbf{U} 的列向量； $\mathbf{V}_{(m+n) \times (m+n)}$ 为信道矩阵的右奇异向量矩阵， \mathbf{v}_k 为 \mathbf{V} 的列向量； $\mathbf{\Sigma}$ 为奇异值对角矩阵； σ_k 为各信道的奇异值，满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_d > 0$ ； d 为奇异值对角矩阵的秩； \mathbf{H} 为矩阵的共轭； \mathbf{T} 为矩阵的转置。

根据奇异值的物理含义可知，当结点具有的能量越大，该结点的奇异值越大^[23]，也即对最终计算结果的能量贡献越大。式(7)中，奇异值对角矩阵中各信道路径结点的奇异值沿对角线排列，当结点处发生绕射将产生大量连续且重复的奇异值。此时保留其中一个奇异值即可表征该结点的入射角信息对总辐射场的贡献，剩余部分可作为冗余信息被摒弃。

由此得到矩阵虽然摒弃了重复的冗余信息，一定程度上降低了计算规模。但其中还存在大量为零或趋近于零的奇异值，这些奇异值对应的入射角信息对总辐射场的贡献极小，对其进行计算意义不大。因此，可寻求一种方法以摒弃贡献极小的入射角信息，以进一步降低计算规模。

在矩阵分析领域，有一种通过有效秩取舍趋近于 0 的奇异值的方法。该方法首先构建一个摒弃掉冗余信息的矩阵作为初始的中间矩阵，对中间矩阵的奇异值进行排序，得到从大到小排列的中间矩阵；逐次去除奇异值最小的数据，计算由此得到的每个矩阵与原始矩阵的 Frobenius 范数比值；选择比值最接近于 1 的中间矩阵作为有效秩矩阵保留。

其中，求解 Frobenius 范数的过程较复杂，可利用奇异值对角矩阵正交不变的原理进行求解

$$\|\mathbf{H}\|_F = \|\mathbf{\Sigma}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{m+n} |\gamma_{ij}|^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^d \sigma_k^2} \quad (8)$$

式(8)中： $\|\mathbf{H}\|_F$ 为中间矩阵的 Frobenius 范数， γ_{ij} 为信道矩阵内各入射角元素； $\|\mathbf{\Sigma}\|_F$ 为奇异值对角矩阵的 Frobenius 范数。

有效秩矩阵与中间矩阵的 Frobenius 范数的关系为

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu(d) = \frac{\|\mathbf{H}^d\|_F}{\|\mathbf{H}\|_F} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^d \sigma_i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^h \sigma_j}}, h = \min\{p, m+n\} \\ \nu(d) \geq \zeta \end{array} \right. \quad (9)$$

式(9)中： $\|\mathbf{H}^d\|_F$ 为有效秩矩阵的 Frobenius 范数； h 为原始信道矩阵的秩； ζ 为无限趋近于 1 的阈值。

按照矩阵相似的性质^[23]可知，若两个矩阵能够相互替代那么范数比，也即区分冗余信息和有效信息的判定阈值将无限趋近于(1±0.05%)，若小于此范围则说明有关键信息被去除，在此范围内说明冗余信息被全部筛出，大于此范围说明有冗余信息未被去除。因此满足式(9)内不等关系的最大整数即为信道矩阵的有效秩。此时，可将大于有效秩部分的奇异值进行掘弃，也即掘弃了对总辐射场贡献较小的信道入射角信息。

由于此时的奇异值对角矩阵已经降维，与原左右奇异向量矩阵维度不匹配，故需要对左右向量矩阵进行重构。由于降维过程利用最小二乘思想进行有效秩估计，故可利用矩阵方程的最小二乘解性质，得到左右奇异向量与信道矩阵之间的关系为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{E}^r = \mathbf{H} \cdot \mathbf{E}^d \\ \hat{\mathbf{h}}_{LS} = \sum_{i=1}^d (\hat{\mathbf{u}}_i^H \mathbf{E}^r / \hat{\sigma}_i) \hat{\mathbf{v}}_i \end{array} \right. \quad (10)$$

式(10)中： \mathbf{E}^r 为接收端辐射场强的列矩阵； \mathbf{E}^d 为入射辐射场强的列矩阵； $\hat{\mathbf{h}}_{LS}$ 为信道矩阵 \mathbf{H} 列向量的最小二乘解。

此时，可利用奇异值分解的逆运算的得到降维后的信道矩阵。降维后的信道矩阵由于掘弃了冗余信息，矩阵分块后绕射的子矩阵也仅包含单个入射角元素，可直接代入式(5)求解 $\bar{\mathbf{D}}_i$ 。同时，由于掘弃了对总辐射场强贡献较小的入射角信息，进一步减少了 $\bar{\mathbf{R}}_i$ 和 $\bar{\mathbf{D}}_i$ 的计算量。再根据传统射线追踪方法即可得到总辐射场强，进而得到 5G 信道路径损耗^[3]。

2.4 快速算法的计算量分析

为说明基于 SVD 算法的变电站内 5G 信道路径损耗的快速求解效果，可采用数据压缩比、计算复杂度和求解误差作为评估参量。定义数据压缩比公式如下

$$\Delta \varepsilon = \frac{\kappa_{\text{data}}}{\chi_{\text{data}}} \quad (11)$$

式(11)中： $\Delta \varepsilon$ 为数据压缩比； κ_{data} 为基于传统射线跟踪算法信道矩阵占用的内存空间； χ_{data} 为基于 SVD 算法降维的信道矩阵占用的内存空间。

由于信道矩阵是矢量矩阵方程的解，必然包含实部和虚部，故该数据可采用双精度浮点数记录，占用 8 bit 的内存空间。由 2.1 节的分析可知，由于结点处绕射的存在，信道矩阵为 $p \times (m+n)$ 维，因此，基于传统射线跟踪算法的、信道矩阵所占磁盘空间为 $8p(m+n)$ bytes。当采取 SVD 算法对信道进行降维，仅需对冗余信息和总辐射场贡献较小的信息之外的 t 个入射角信息进行存储，而重构后的信道矩阵为方阵，此时占用磁盘空间为 $8t^2$ bytes。因此，数据压缩比为 $8p(m+n)/8t^2$ 。

从计算复杂度的角度，结合式(8)信道矩阵 \mathbf{H} 可以近似表示为左奇异值矩阵 $\mathbf{U}_{(m+n) \times t}$ 、奇异值对角矩阵 $\mathbf{\Sigma}_{t \times t}$ 和右奇异值矩阵转置即 $\mathbf{V}_{p \times t}$ 的点乘。这样原本计算复杂度为 $O((m+n) \times p)$ ，经过基于 SVD 矩阵降维算法之后计算复杂度为 $O((m+n+p+t) \times t)$ 。由于 t 的值远小于 m 、 n 和 p 的值，因此结合计算复杂度和计算量分析可知利用 SVD 算法可有效减少计算复杂度。

将基于传统射线跟踪算法所得的信道路径损耗与 SVD 法求解的信道路径损耗做差，并取绝对值作为求解精度损失 ΔS 。

3 河南官渡 500 kV 变电站 5G 信道路径损耗

实验验证

3.1 实验概况及信道路径损耗计算

为了说明改进射线追踪算法运用于变电站内 5G 信道路径损耗求解符合工程需求。本文选取如文献[3]所述的传统射线追踪算法，本文所提改进射线追踪算法和实验实测数据进行对比验证。采用与文献[3]相同的布置方式进行了变电站内 5G 信道路径损耗的辐射场测试实验。在河南某 500 kV 变电站金属设备附近的 7 个测试点的辐射场强进行测量并计算信道路径损耗。实验布置见图 5，5G 天线设置在南侧主控楼顶，距地面 10 m，距变电站设备区的边界 15 m。5G 天线型号为 AAU5270E，天线的信号发射功率为 15 W，工作频率为 2.5 GHz，测量仪器为 3075X-R 频谱仪，EST3117 接收天线。



图5 天线位置及接收设备的布置

Fig. 5 Antenna location and receiving equipment arrangement

变电站内的7个测点分布示意图见图6，均分布于金属设备集中区域，7个测点与发射天线的距离依次递增。在辐射场的测量过程中，接收天线设置在1.7 m的高度，接收天线连接到频谱分析仪上。根据频谱仪的辐射场数据计算信道路径损耗结果见表1。

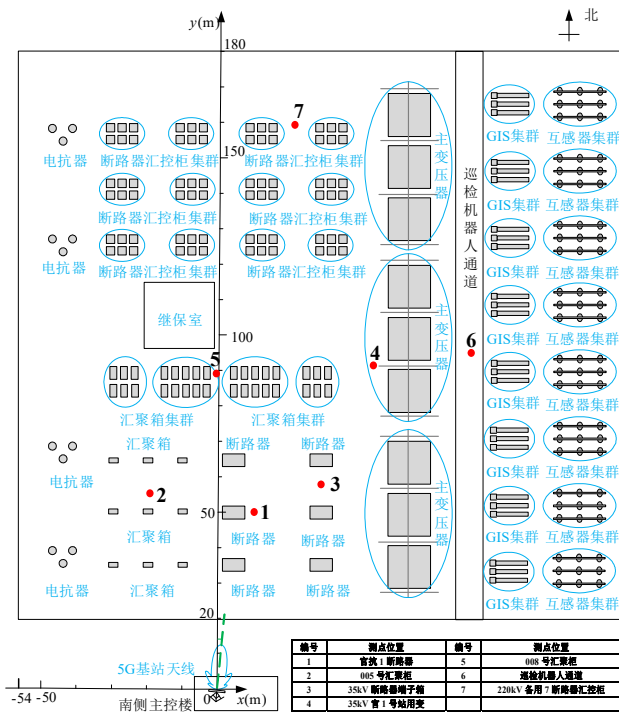


图6 7个测点在变电站内的分布

Fig. 6 Distribution of the 7 measurement points within the substation

表1 变电站内5G信道路径损耗计算结果

Table 1 Calculation results of 5G channel path loss in substation

测点	设备名称	设备与天线的距离/m	信道路径损耗/dB
1	1号断路器	50.5	64.62
2	5号汇集柜	55.3	69.41
3	断路器端子箱	58.9	69.12

4	1号主变压器	90.9	73.13
5	8号汇集柜	89.2	70.02
6	巡检机器人通道	95.5	75.24
7	7号断路器汇控	160	87.18

文中改进了射线追踪算法，为验证改进算法能在保证计算精度的前提下，提高信道路径损耗的求解速度，以上述实验场景7个测点的信道路径损耗作为基准值，将射线追踪算法计算的信道路径损耗作为对照值，计算求解精度损失 ΔS 。

3.2 计算结果及分析

根据图6变电站内设备和测点的分布位置，在Altair FEKO内建立了变电站的三维模型，并根据文[3]对三维模型中部分设备进行了简化。然后分别利用传统射线算法和改进射线追踪算法计算每个接收点的信道路径损耗，并与实验测量数据计算出的信道路径损耗值进行比较。比较结果见图7，误差分布见表2。

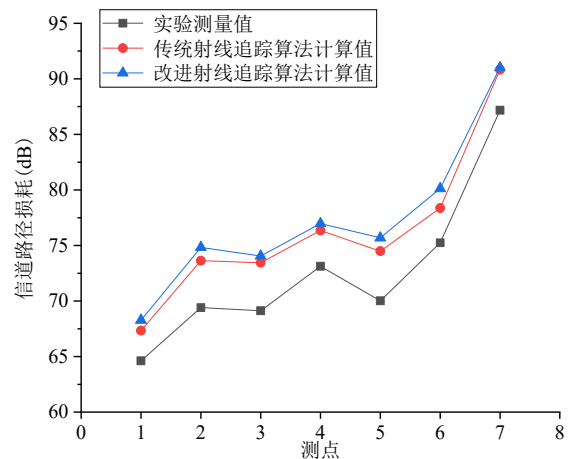


图7 两种算法与测试结果的比较

Fig. 7 Comparison of two algorithms and test results

表2 两种算法对比结果的求解精度损失

Table 2 Loss of solution accuracy for the comparison results of the two algorithms

测点	传统射线追踪法	改进射线追踪法	求解误差 $\Delta S/dB$
	结果/dB	结果/dB	
1	67.34	68.28	0.94
2	73.63	74.84	1.21
3	73.45	74.05	0.60
4	76.35	76.98	0.63
5	74.49	75.69	1.20
6	78.37	80.12	1.75
7	90.83	91.02	0.19

从误差分布来看，传统射线追踪算法和改进射线

追踪法求取的信道路径损耗差值基本在 1.5 dB 以下。以测量结果为基准值,最终得到基于改进射线追踪法求取信道路径损耗平均求解精度损失为 1.31%,与实验数据的误差为 3.47%,符合变电站测量标准《GB/Z 17799.6—2017》中小于 5%的误差裕度标准。因此,采用改进射线追踪算法求解信道路径损耗式,可保证求解的准确性。

为了说明基于改进射线追踪算法的信道路径损耗具有快速求解的效果,见图 8,以离 5G 基站天线最近的测点 1 和最远的测点 7 为例,描述改进前后的射线追踪算法考虑的信道数据量。统计了射线追踪算法改进前后信道的数据量见表 3。

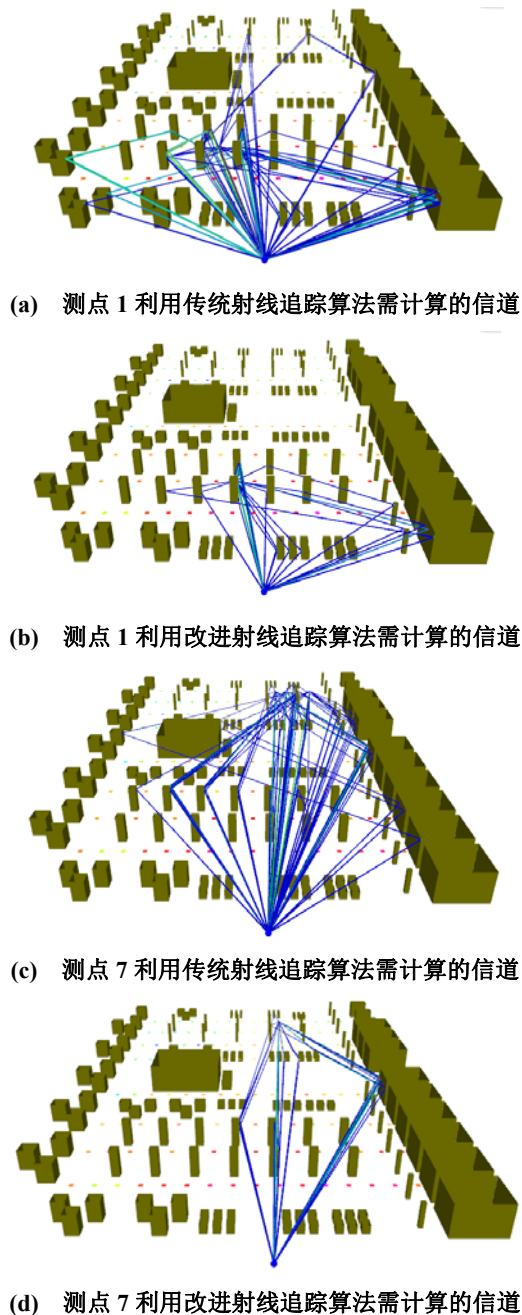


图 8 两种算法在两个测点计算对比图

Fig. 8 Comparison of the two algorithms at two measurement points

表 3 两种算法求解效果比较

Table 3 Comparison of the effectiveness of the two algorithms in solving

求解方法	信道矩阵平均数据量	占用存储空间 /bytes	压缩比 ($\Delta\epsilon$)
传统	360×360	1 036 800	84.89
改进	394×31	8 274	

结合表 3 可知,传统射线追踪算法中的冗余信息计算占用的内存高达 80%,采用改进射线追踪算法求解变电站内 5G 信道路径损耗,可以显著降低求解的计算量,信道矩阵平均数据的压缩比可达 84.89。同时分析本例中两种方法的计算量,传统射线追踪法时,计算量达 2.592×10^9 ;而改进射线追踪法的计算量为 $(360+360+360+31) \times 31 = 3.44 \times 10^4$,改进射线追踪法计算量的数量级比传统方法降低了 10^5 ,实现了 5G 信道路径损耗的快速计算。

4 结论

文中提出的基于改进射线追踪算法的 5G 信道路径损耗的求解方法,摒弃了传统射线追踪算法的信道矩阵内重复和对最终结果贡献较小的信道路径,所需的计算资源大为降低。文中以 AAU5270E 型 5G 基站天线为例,分别采用改进前后的射线追踪算法求解 5G 信道路径损耗,对比分析发现基于改进射线追踪算法求取 5G 信道路径损耗的精度损失仅为 1.31%,数据压缩比可达 84.89,数据计算量的数量级比传统射线追踪算法降低了 10^5 。

参考文献:

[1] 李佳迪,汤会增,相黎阳,等. 基于 5G 与 AR 技术的高压 GIS 数字化运检平台设计与研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 83-93.
LI Jiadi, TANG Huiheng, XIANG Liyang, et al. Design and study on digital operation and inspection platform of UHV GIS based on 5G and AR technology[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 83-93.

[2] 耿绥燕,胡 玮,丁海成,等. 基于 3D 电子地图和信道实测数据的市区路径损耗机器学习模型研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(10): 3524-3531.
GENG Suiyan, HU Wei, DING Haicheng, et al. Research on urban path loss model by machine learning based on 3D electronic Maps and Channel measurements[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(10):

3524-3531.

- [3] LI Yifeng, WANG Shuang, TANG Bo, et al. Analysis of 5G channel loss and its influencing factors in substation based on ray tracing algorithm[J]. The Journal of Engineering, 2023, 2023(3): 1-10.
- [4] SWINDLEHURST A L, AYANOGLU E, HEYDARI P, et al. Millimeter-wave massive MIMO : The next wireless revolution?[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(9): 56-62.
- [5] 郭雅婷. 基于射线跟踪加速算法的 5G 室内复杂场景无线信道建模研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- GUO Yating. Study on wireless channel modeling of 5G indoor complex scene based on ray tracing acceleration algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [6] 卫佩佩, 杜晓燕, 江长荫. 对流层散射超视距信道传输损耗快慢衰落特性研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(7): 1745-1751.
- WEI Peipei, DU Xiaoyan, JIANG Changyin. Study on tropospheric scatter beyond-line-of-sight channel transmission loss for short-term and long-term fading[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(7): 1745-1751.
- [7] 杨大成. 移动传播环境[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- YANG Dacheng. Mobile communication environment[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [8] 黄炎, 李兵, 何怡刚. 数字化变电站无线监测系统信道分析[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(6): 42-45.
- HUANG Yan, LI Bing, HE Yigang. Channel analysis of wireless monitoring system in digital substation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(6): 42-45.
- [9] ISHII T K, YEN Y H, KIPP R J. Improvement of microwave power distribution by the use of the first order principle of geometrical optics for scientific microwave oven cavity[J]. Journal of Microwave Power, 2016, 14(3): 201-208.
- [10] PATHAK P H, CARLUCCIO G, ALBANI M. The uniform geometrical theory of diffraction and Some of its applications[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2013, 55(4): 41-69.
- [11] LIU G, SHE J, LU W, et al. 3D deterministic ray tracing method for massive MIMO Channel modelling and parameters extraction[J]. IET Communications, 2020, 14(18): 3169-3174.
- [12] 赵友平, 郭嘉琦. 一种改进的 SBR 射线跟踪信道仿真方法[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(5): 1-7.
- ZHAO Youping, GUO Jiaqi. An improved SBR ray-tracing channel simulation method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(5): 1-7.
- [13] LI Hanpeng, CHEN Xiaomin, MAO Kai, et al. Air-to-ground path loss prediction using ray tracing and measurement data jointly driven DNN[J]. Computer Communications, 2022(196): 268-276.
- [14] 夏炎. 面向室内外卫星定位的多径检测与抑制技术研究[J]. 测绘学报, 2023, 52(8): 1413.
- XIA Yan. Research on multipath detection and mitigation technology for indoor and outdoor satellite positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(8): 1413.
- [15] 陈永, 蒋丰源, 詹芝贤. 多尺度残差注意力的高速铁路 OFDM 信道估计[J]. 电子科技大学学报, 2023, 52(4): 512-522.
- CHEN Yong, JIANG Fengyuan, ZHAN Zhixian. Channel estimation of OFDM in high-speed railway based on multi-scale residual attention network[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2023, 52(4): 512-522.
- [16] 刘霄涵, 王渝红, 胡松伶, 等. 基于 SVD-SVM 的 HVDC 换流器故障诊断[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 86-91.
- LIU Xiaohan, WANG Yuhong, HU Songling, et al. Fault diagnosis for HVDC converters based on SVD-SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10): 86-91.
- [17] YANG F, YANG K D, SHI Y, et al. Impact of evaporation duct on line-of-sight propagation of electromagnetic waves[J]. Journal of Physics: Conference Series. 2023, 2486(1): 012060.
- [18] 吕娜. 射线追踪算法中射线管模型改进方法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- LYU Na. Research of the method to improve the ray tube model in ray tracing algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [19] EMMANUEL R, DIDIER F. Detailed derivation of the generalized snell-descartes laws from fermat's principle[J]. Journal of the Optical Society of America. a, Optics, Image Science, and Vision, 2023, 40(4): 676-681.
- [20] 阮颖峥. 电磁射线理论基础[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1989.
- RUAN Yingzheng. Fundamentals of Electromagnetic Ray Theory[M]. Chengdu: Chengdu Institute of Telecommunications Engineering Press, 1989.
- [21] 刘忠玉. 室内外场景下基于射线追踪算法的无线信道预测

研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

LIU Zhongyu. A study of radio channel prediction based on ray tracing algorithm for outdoor and indoor scenarios[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.

[22]LI Xingjian, FANG Jun, LI Hongbin, et al. Millimeter wave channel estimation via exploiting joint sparse and low-rank structures[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(2): 1123-1133.

[23]张贤达. 矩阵的分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

ZHANG Xianda. Matrix analysis and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[24]KAKIUCHI N, OCHIAI J, TAKEUCHI M, et al. Inner product of RGB unit vectors for simple and versatile detection of color transition[J]. Analytical Sciences: The International Journal of the Japan Society for Analytical Chemistry, 2021, 37(1): 3-5.

林 睿(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事输变电系统电磁环境的研究(通信作者)(E-mail: 1040094707@qq.com)。

唐 波(1978—), 男, 博士研究生, 教授, 主要从事输变电系统电磁环境及超特高压输电技术的研究(E-mail: mt49424@163.com)。

李逸峰(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事输变电系统电磁环境的研究(E-mail: 541306390@qq.com)。