

基于数字高程模型的起伏地形对紫外光非直视通信的路径损耗

冯克涛¹, 李晓毅^{1*}, 吴乐华¹, 钱璇², 王申涛¹, 陈谋¹, 李梦如¹, 李昆仑³

¹陆军工程大学通信士官学校, 重庆 400035;

²中国科学院国家天文台, 北京 100101;

³中国人民解放军 78092 部队, 四川 成都 610036

摘要 针对起伏地形环境下紫外光非直视通信路径损耗大、站点选址难的问题, 提出了基于数字高程模型 (DEM) 的紫外光非直视传输的最佳收、发仰角求解方法。依托紫外光非直视单次散射模型, 研究了路径损耗与收、发仰角之间的关系。针对不同地形原始 DEM 数据, 通过插值提高分辨率, 并提出了切线传输方案。采用顺序遍历法对收、发端位置及仰角变化对通信系统路径损耗的影响进行了研究。仿真结果表明, 路径损耗在 $[10^\circ, 80^\circ]$ 收、发仰角区间内为增函数。在使用反距离加权插值法提高数据分辨率后, 路径损耗值相较原始数据分别降低了 0.014 dB、0.043 dB 和 0.385 dB。当按切线传输方案布设时, 通信系统路径损耗值最小, 设计的仿真程序可为收、发端站点科学布设提供支持。

关键词 光通信; 紫外光; 单次散射模型; 起伏地形; 路径损耗

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0606001

Path Loss of Ultraviolet Non-Line-of-Sight Communication in Rugged Terrain Based on Digital Elevation Model

Feng Ketao¹, Li Xiaoyi^{1*}, Wu Lehua¹, Qian Xuan², Wang Shentao¹, Chen Mou¹,
Li Mengru¹, Li Kunlun³

¹Communication Sergeant School, Army Engineering University, Chongqing 400035, China;

²National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³Unit 78092 of PLA, Chengdu, Sichuan 610036, China

Abstract Aiming at the problems of large path loss and difficult site selection of ultraviolet non-line-of-sight communication in rugged terrain environment, a method for solving the optimal receiving and transmitting elevation angles of ultraviolet non-line-of-sight transmission based on a digital elevation model (DEM) is proposed. Based on the ultraviolet non-line-of-sight single scattering model, the relationship between path loss and receiving and transmitting elevation angles is studied. Aiming at the original DEM data of different terrains, the resolution is improved by interpolation, and the tangent transmission scheme is proposed. The influences of the positions and elevation changes of the receiver and transmitter on the path loss of the communication system are studied by using the sequential traversal method. The simulation results show that the path loss is an increasing function of the receiving and transmitting elevation angles in the range of $[10^\circ, 80^\circ]$. After using the inverse distance weighted interpolation method to improve the data resolution, the path loss is reduced by 0.014 dB, 0.043 dB, and 0.385 dB, respectively, compared with the original data. When it is arranged according to the tangent transmission scheme, the path loss of the communication system is minimal, and the designed simulation program can provide

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-09-05; 录用日期: 2021-09-28

基金项目: 军内科研项目 (KYCQJWJK1703)

通信作者: *li_mingdong@126.com

support for the scientific layout of the receiving and transmitting stations.

Key words optical communications; ultraviolet light; single scattering model; rugged terrain; path loss

1 引言

波长位于 200~280 nm 范围内的紫外(UV)光会被大气中的臭氧分子强烈吸收,故该波段紫外光在近地面处几乎衰减至零,该波段因此得名为“日盲区”^[1]。无线紫外光通信将“日盲”紫外光作为传输媒介,通过大气分子、气溶胶等微粒的散射作用进行信息传递^[2],进而具有非直视(NLOS)传输的特点,并且还具有背景噪声小、抗电磁干扰能力强和窃听率低等优点^[3-4]。因此,其可以适应复杂的传输环境,可被作为强电磁干扰环境下集群内部的隐秘通信方式^[5-8],进而迅速受到了关注。当发射端(T)和接收端(R)间视距(LOS)内的通信路径因对准不理想或障碍物遮挡而失效时,非直视紫外光通信显示出巨大潜力,其可作为直视通信的有效补充^[9]。然而,大气信道衰减严重、障碍物阻挡和散射通信自身路径损耗高的缺陷会导致紫外光通信传输距离有限^[10],因此关于如何有效缓解紫外光非直视传输性能退化的问题引起了广泛关注^[11]。

路径损耗(PL)是反映通信系统性能优劣的重要参数之一^[12],大量学者对紫外光非直视传输损耗进行了探索研究。Wang 等^[13]推导出了紫外光非共面通信系统的路径损耗的近似闭合解。Song 等^[14]采用黎曼和的方法对非共面紫外光通信系统链路的损耗和时间响应进行了研究,并利用文献[12]中基于遍历元法的非直视非共面紫外光单次散射模型对移动场景下的通信路径损耗进行了分析。赵太飞等^[15-16]对紫外光近直视斜程传输通信链路进行了研究。Cao 等^[17]对非共面非直视紫外光的通信路径损耗进行了研究。Zheng 等^[18]利用 Mie 散射和 T 矩阵理论分析了不同浓度的雾霾和粉尘对紫外光散射传输路径损耗的影响。以上研究都未考虑起伏地形对紫外光通信链路的影响。Zhang 等^[19]采用蒙特卡罗多次散射的方法研究了长方体障碍物对非直视紫外光通信的影响。实验表明,发射器离障碍物越近,最佳接收位置离障碍物越远。Zhang^[20]采用蒙特卡罗方法对障碍物对紫外光信号在大气中传输特性的影响进行了仿真分析。结果表明,障碍物导致的检测盲区与障碍物的位置、障碍物的高度、发射仰角和接收仰角有关。Xu 等^[21]考虑障碍物的典型几何形状,采用蒙特卡罗方法研究了障碍物对紫外

光散射通信的影响。研究发现,为获得较低的路径损耗,需要选取最佳的距离和仰角,而这两个量的取值又取决于散射通信链路中障碍物的形状和位置。在文献[19-21]研究的障碍物模型中,障碍物的形状为长方体、球体和圆柱体等简易结构,且模拟的障碍物与实际起伏地形存在区别,故实用性有所欠缺。随着地理信息系统(GIS)工具和技术的发展进步,数字高程模型(DEM)在自然资源管理、环境科学和工程中有广泛的应用^[22]。然而,将 DEM 应用于紫外光非直视通信方面的研究工作尚少。

针对紫外光非直视通信站点选址方面遇到的难题,本文基于 DEM 的实际起伏地形,采用紫外光非直视单次散射模型对起伏地形对紫外光非直视通信路径损耗的影响进行了仿真研究,并提出了路径损耗最小的切线传输方案。仿真算法可为山丘、树林和建筑物等障碍物条件下紫外光非直视通信系统的布设提供科学支撑,并能有效减小路径损耗冗余。

2 传输方案对紫外光非直视单次散射通信路径损耗的影响

在传统的基于椭球坐标系的紫外光非直视单次散射信道传输模型中,由于公共散射体是不规则的多面体,因此当对公共散射体进行三重积分时,上下限的取值是不易确定的,进而通信系统路径损耗的计算较复杂^[23-24]。虽然在实际中紫外光通信是多次散射的,但是在短距离通信中单次散射传输占据主导地位^[25],故本文将单次散射模型作为研究基础。

2.1 紫外光单次散射模型

紫外光非直视单次散射模型如图 1 所示。其中, TX 是以发射端 T 为中心点的发射光束锥体, RX 是以接收端 R 为中心点的接收视场锥体, W 为两锥体中轴线的交点, I 为 R 在 T 所在平面的投影点, r 为 T 、 R 之间的直线距离, r_0 为 T 、 R 之间的相对水平距离, h 为 T 、 R 的高程差, 散射角为 $\theta_s = \theta_T + \theta_R$, ϵ 为 T 、 R 连线与水平面的夹角。紫外光非直视传输过程为发射端 T 以发射仰角 θ_T 和发散角 φ_T 向接收端方向发出光信号,接收端 R 以接收仰角 θ_R 和视场角 φ_R 接收光信号。其中, TX 与 RX 的重叠区域的有效散射体积为 V 。通常可将紫外光通信非直视链路中的单次散射过程^[26]划分为: 1) 将发射端到散射体的路径 r_1 看作一段直视链路; 2) 光子

在散射体内进行散射;3)将散射体到接收端的路径 r_2 看作一段直视链路。

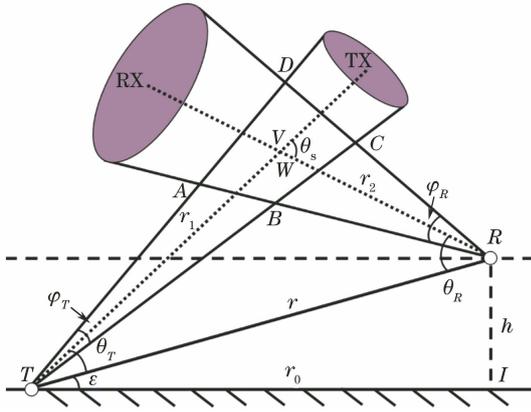


图 1 紫外光非直视单次散射通信模型

Fig. 1 Single scattering communication model of ultraviolet non-line-of-sight light

考虑路径损耗和大气衰减作用,紫外光单次散射通信的接收光功率的表达式^[25]为

$$P_r = \frac{P_t A_r K_s P_s \varphi_T \varphi_R^2 \sin(\theta_T + \theta_R)}{32\pi^3 r \sin \theta_R \left(1 - \cos \frac{\varphi_T}{2}\right)} \exp\left[-\frac{K_e r (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)}\right], \quad (1)$$

式中: P_t 为发射功率; A_r 为接收端的孔径面积; $K_e = K_s + K_a$ 为大气信道衰减系数,其中 K_s 为散

射系数, K_a 为吸收系数; P_s 为 θ_s 的相函数,其表达式为

$$P_s = \frac{K_R}{K_s} p_R(\cos \theta_s) + \frac{K_M}{K_s} p_M(\cos \theta_s), \quad (2)$$

式中: K_R 为瑞利散射系数; K_M 为米氏散射系数。同时, $K_s = K_R + K_M$ 。

瑞利散射相函数表达式^[27]为

$$p_R(\cos \theta_s) = \frac{3[1 + 3\gamma + (1 - \gamma)\cos^2 \theta_s]}{16\pi(1 + 2\gamma)}, \quad (3)$$

式中: γ 为模型参数。

米氏散射相函数表达式^[27]为

$$p_M(\cos \theta_s) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta_s)^{3/2}} + f \frac{3\cos^2 \theta_s - 1}{2(1 + g^2)^{3/2}} \right], \quad (4)$$

式中: g 为可调的不对称因子; f 为散射因子。

通过文献[28]的实验发现:当 θ_R 在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 范围内, θ_T 在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 范围内时,(1)式与实验结果符合程度较高;当在范围外时,(1)式与实验结构的误差较大。

2.2 无遮挡时 θ_T, θ_R 对路径损耗的影响

紫外光散射通信系统中无地物遮挡时的传输示意图如图 2 所示。此时,(1)式成立,系统路径损耗 L_p 的表达式^[17]为

$$L_p = 10 \lg \frac{P_t}{P} = 10 \lg \left\{ \frac{32\pi^3 r \sin \theta_R \left(1 - \cos \frac{\varphi_T}{2}\right)}{A_r K_s P_s \varphi_T \varphi_R^2 \sin(\theta_T + \theta_R)} \exp\left[\frac{K_e r (\sin \theta_T + \sin \theta_R)}{\sin(\theta_T + \theta_R)}\right] \right\}, \quad (5)$$

其中, L_p 的单位为 dB。

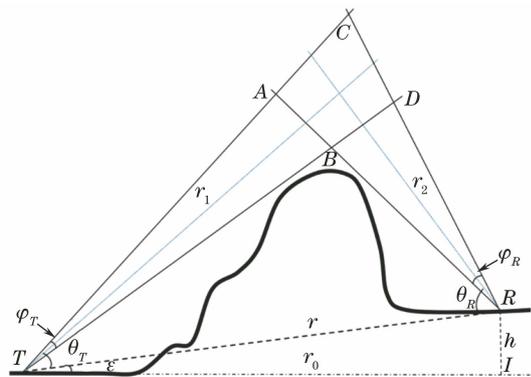


图 2 无地物遮挡时的传输示意图

Fig. 2 Transmission diagram without obscure objects

文献[29-31]未从函数单调性上进行分析,为准确掌握(5)式关于 θ_T 和 θ_R 的函数特性,利用 MATLAB 进行仿真计算,仿真参数如表 1 所示,仿

真结果如图 3 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	266
Transmitting power P_t /W	0.02
Receiving aperture area A_r /m ²	1.77×10^{-4}
Divergence angle φ_T /($^\circ$)	30
Field of view of receiver φ_R /($^\circ$)	30
Absorption coefficient K_a /m ⁻¹	7.45×10^{-4}
Rayleigh scattering coefficient K_R /m ⁻¹	2.58×10^{-4}
Mie scattering coefficient K_M /m ⁻¹	8.87×10^{-4}
Parameter of Rayleigh scattering phase function γ	0.017
Asymmetry factor of Mie scattering phase function g	0.72
Scattering factor of Mie scattering phase function f	0.5
Communication baseline distance r /m	100

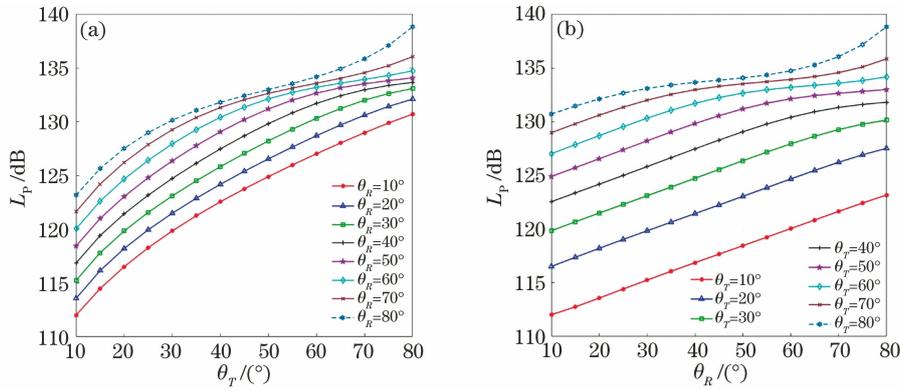


图 3 L_P 随 θ_T 和 θ_R 的变化。(a) θ_T ; (b) θ_R

Fig. 3 L_P varying with θ_T and θ_R . (a) θ_T ; (b) θ_R

在图 3(a)中,分别设定 θ_R 的值为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$, 可以发现,当 $\theta_T \in [10^\circ, 80^\circ]$ 时,8 条曲线均呈递增趋势,这表明 L_P 随着 θ_T 值的增大而单调递增。

同理,在图 3(b)中,分别设定 θ_T 的值为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$, 可以发现,当 $\theta_R \in [10^\circ, 80^\circ]$ 时,8 条曲线均呈递增趋势,这表明 L_P 随着 θ_R 值的增大而单调递增。

综合分析图 3 可知,在实验条件下, L_P 对 $\theta_T \in [10^\circ, 80^\circ]$ 和 $\theta_R \in [10^\circ, 80^\circ]$ 为增函数,故 θ_T 和 θ_R 值越大,相应的 L_P 值也越大。

2.3 地物遮挡时 θ_T 、 θ_R 对路径损耗的影响

当 θ_T 、 θ_R 过小(被收、发端之间的障碍物遮挡)时,从发射端到散射体和散射体到接收端的光子被障碍物阻挡,如图 4 所示。由文献[32-33]可知:当收、发锥体之间没有山体遮挡时,多面体 $ABCD$ 为其近似有效散射体;当有山体遮挡时,显然不能使用 V_{ABCD} 近似有效散射体积 V 。点 E' 、 F' 分别为最大斜率切点, $\angle BTE' = \Delta\alpha$, $\angle BRF' = \Delta\beta$, 设 TX' 是以发射端 T 为中心点的发射光束锥体(上边沿为 TC , 下边沿为 TD_3), RX' 是以接收端 R 为中心点的接收视场锥体(上边沿为 TC , 下边沿为 RA_3)。由于 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 值较小,故可借鉴文献[32-33]中的模型,使用 $V_{A_3B_3D_3C}$ 近似有效散射体积 V 。此时,接收仰角、发射仰角、发散角和接收视场角均发生变化,具体表达式为

$$\begin{cases} \theta'_T = \theta_T - \Delta\alpha/2 \\ \varphi'_T = \varphi_T - \Delta\alpha \\ \theta'_R = \theta_R - \Delta\beta/2 \\ \varphi'_R = \varphi_R - \Delta\beta \end{cases}, \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式可计算得到有障碍物遮挡时的路径损耗近似值。

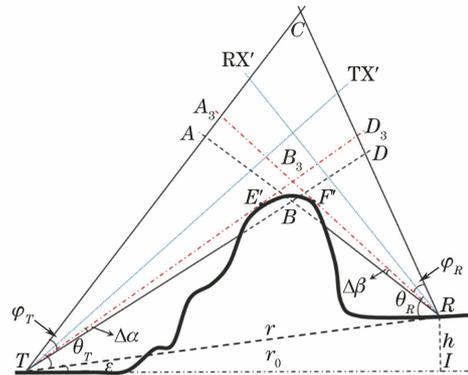


图 4 地物遮挡时的传输示意图

Fig. 4 Transmission diagram with obscure objects

2.4 传输方案选择

在实际应用中,当 TX 和 RX 锥体的下边沿恰好均与山体相切且无地物遮挡时,传输状态如图 5 所示,记该种状态为切线传输,路径损耗为 L_{P1} 。在图 5 中,点 E' 、 F' 分别为山体轮廓线相对 T 和 R 的最大斜率切点。

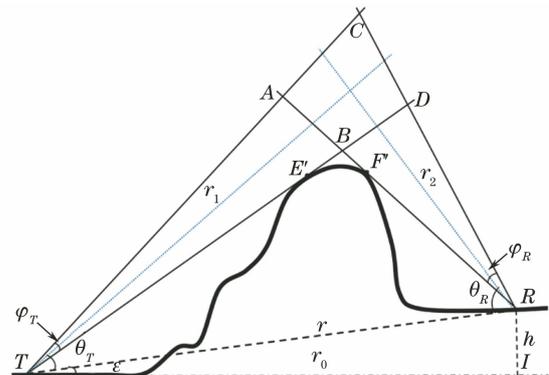


图 5 切线传输示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tangent transmission

当 θ_T 、 θ_R 过大, TX 和 RX 锥体的下边沿都高过山体时,传输示意图如图 2 所示,记该种状态为高仰角传输,路径损耗为 L_{P2} 。由 2.2 节分析可知,相

较切线传输方案, 高仰角传输的 θ_T, θ_R 更大, 故会产生更大的路径损耗, 即 $L_{P2} > L_{P1}$ 。

当 θ_T, θ_R 过小, 被收、发端之间的障碍物遮挡时, 传输示意图如图 4 所示, 记该种状态为遮挡传输, 路径损耗为 L_{P3} 。由于传输路径被地物遮挡, 故有效散射体积 V 减小、能量损失, 此时路径损耗增大, 故相较切线传输方案, 有 $L_{P3} > L_{P1}$ 。

综上所述, $\min\{L_{P1}, L_{P2}, L_{P3}\} = L_{P1}$, 故在选择传输方案时应尽量选择切线传输方案。

3 起伏地形环境下的单次散射传输特性

3.1 起伏地形模型

DEM 是对地表起伏的三维描述, 是一种具有特定分辨率的栅格数据模型^[34], 坡度、曲率和坡向等地貌特性均可依托 DEM 派生。在 GIS 中, DEM 有多种表示方法, 主要包括等高线模型 (Contour DEM)、规则网格 (RSG) 模型和不规则三角网 (TIN) 模型三种基本模型^[35]。其中, 规则网格模型具有结构简单、易于计算机处理和广泛应用等特点, 故选用规则网络模型作为地理信息标准数据格式。规则网格地形模型如图 6 所示, 其数学表达形式为

$$G(p, q) = (X(p), Y(p), H(p, q)), \quad (7)$$

式中: $G(p, q)$ 表示第 p 行与第 q 列地形网格分割线的交点, 即图 6 中的网格交点, 且 $p \in [1, P], q \in [1, Q]$, 其中 P, Q 分别表示 X, Y 两维地形网格分割线数量的最大值; H 表示网格交点的高度。

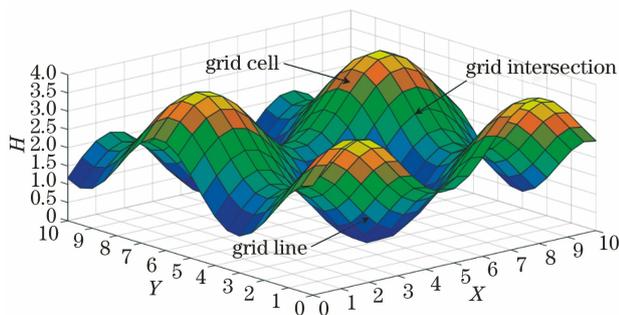


图 6 规则网格地形模型

Fig. 6 Regular grid terrain model

3.2 基于数字高程模型数据确定收、发仰角最佳值

根据地形 DEM 数据求取收、发仰角最佳值的过程主要包括 8 个步骤, 如图 7 所示, 具体步骤如下。

1) 导入山体的初始 DEM 数据, 分辨率为 $2d$ 。记 x, y 和 h 维的数据分别为集合 X_1, Y_1 和 H_1 。山体 DEM 示意图如图 8 所示, 记发射端 T (用五角星表示) 的坐标为 (x_T, y_T, h_T) , 接收端 R (用圆圈

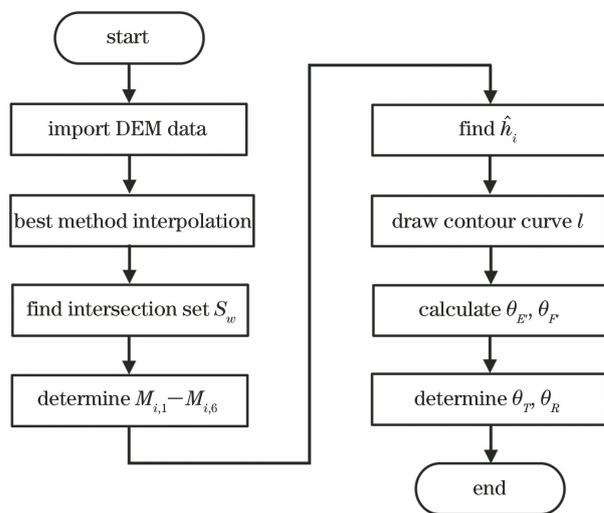


图 7 基于 DEM 求取收、发仰角最佳值流程

Fig. 7 Process of obtaining optimal values of receiving and transmitting elevations based on DEM

表示) 的坐标为 (x_R, y_R, h_R) 。

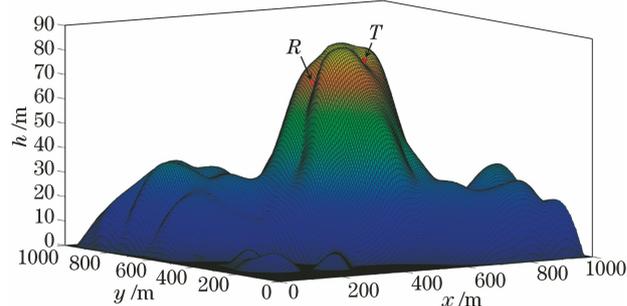


图 8 山体 DEM 示意图

Fig. 8 DEM sketch map of mountain

2) 对 DEM 数据进行插值测试, 并选择最佳方法插值。在后续的步骤 5) 中, 需要求解过 TR 连线且垂直于 xoy 平面的纵切面 L 与 DEM 网格线交点的高程预测值。为提升预测精度, 在本步骤中首先对山体 DEM 数据进行插值测试, 挑选出最佳的插值方法, 然后选择最佳插值方法进行插值以提升 DEM 数据分辨率, 进而恢复地形局部地貌, 此时分辨率变为 d 。

DEM 数据承载了地表起伏、地貌形态和地势走向等重要信息, 由于区域内的空间信息是通过离散采样的方式获得的, 故实际地形局部信息会缺失, 这在一定程度上会影响地形的真实反映。有效的实用方法是依托现有的地形数据信息, 选用合适的插值方法以利用实测点信息估计所需点信息^[36], 提升 DEM 数据分辨率, 进而提高地形的辨识度。本质上许多空间插值方法都是通过相邻样本点测量值的加权平均值预测得到特定位置的高程值^[37], 估计公

式^[38]通常为

$$z(\hat{a}_0) = \sum_{n=1}^N w_n(a_0) z(a_n), \quad (8)$$

式中: n 为样本点序号; N 为样本点总数; $z(\hat{a}_0)$ 为待插值点的属性值; $z(a_n)$ 为样本点 a_n 的属性值; $w_n(a_0)$ 为附加到样本点 a_0 的权重; \hat{a}_0 为待插值点的预测点; a_0 为待插值点。

由于不同插值方法从相同数据源计算得到的插值各不相同, 故为检验插值方法的有效性, 必须对插值方法进行适用性比较评估^[39]。DEM 精度评价方法主要有检查点法、剖面法和等高线套合分析法等^[40-41]。本文采用检查点法对插值点的高程值与相应实测高程值的偏差进行精度评价, 3 个量分别为平均相对误差 (MAE, E_{MAE})、均方根误差 (RMSE, E_{RMSE}) 和相关系数 R , 具体表达式为

$$E_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |b_n - \hat{b}_n|, \quad (9)$$

$$E_{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (b_n - \hat{b}_n)^2 \right]^{1/2}, \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N (b_n - \bar{b})(\hat{b}_n - \bar{\hat{b}})}{\left[\sum_{n=1}^N (b_n - \bar{b})^2 \sum_{n=1}^N (\hat{b}_n - \bar{\hat{b}})^2 \right]^{1/2}}, \quad (11)$$

式中: b_n 和 \hat{b}_n 分别代表第 n 个实测数据和插值数据; \bar{b} 和 $\bar{\hat{b}}$ 分别代表实测值和插值数据的算数平均值。

3) 求解 L 水平投影与 DEM 网格指定轴 w (w 取 x 或 y) 方向的交点集合 S'_w 。若记 L 与 DEM 网格指定轴 w 方向的交点集合为 $S_w = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, 则 T, R 和 S_w 在 xoy 平面的投影分别为 T', R' 和 $S'_w = \{S'_1, S'_2, \dots, S'_n\}$, 如图 9 所示。

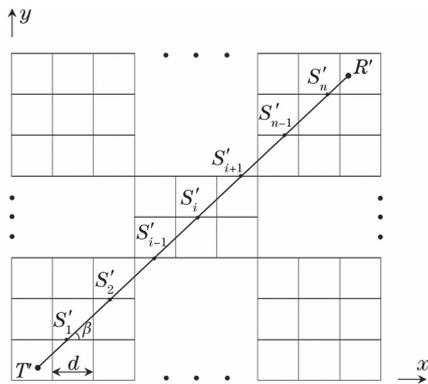


图 9 纵切面 L 在 xoy 平面的投影示意图

Fig. 9 Projection diagram of longitudinal section L on xoy plane

记 $T'R'$ 与 x 轴的夹角为 β , 分析图 9 可知, 当 $\beta \in [45^\circ, 135^\circ]$ 时, 线段 $T'R'$ 与沿 x 轴方向的 DEM 网格线交点数不少于沿 y 轴方向的交点数, 有利于提高后续插值确定交点坐标的精确度。此时, $T'R'$ 的表达式为

$$x = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \cdot y + \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{y_2 - y_1}, \quad (12)$$

式中: $y \in [\min(y_1, y_2), \max(y_1, y_2)]$, 步长为 d 。

同理, 当 $\beta \notin [45^\circ, 135^\circ]$ 时, 线段 $T'R'$ 与沿 y 轴方向的 DEM 网格线交点数不少于沿 x 轴方向的交点数。此时, $T'R'$ 的表达式为

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x + \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2 - x_1}, \quad (13)$$

式中: $x \in [\min(x_1, x_2), \max(x_1, x_2)]$, 步长为 d 。

4) 采用 6 点矩形搜索方式确定最邻近 S_i 的 6 个网格点的坐标。记 S_i 的坐标为 (x_i, y_i, \hat{h}_i) , 其中

x_i, y_i 分别表示沿 x 轴、 y 轴的坐标值。由于 S_i 不一定位于网格交点位置, 故高程值用插值估计值 \hat{h}_i 表示。将邻近 S_i 的 6 个网格点分别记作 $M_{i,1} \sim M_{i,6}$, 其在 xoy 平面的投影点为 $M'_{i,1} \sim M'_{i,6}$, 如图 10 所示。当 S_i 与网格点 $G(p, q)$ 之间的欧氏距离小于 $d/1000$ 时, 判定二者重合, 直接赋予网格点高程数据 $H(p, q)$ 。当 S_i 与网格点不重合时: 若 $\beta \in [45^\circ, 135^\circ]$, 则按照图 10(a) 选取 $M_{i,1} \sim M_{i,6}$, 其坐标值见表 2 中的项目 A; 若 $\beta \notin [45^\circ, 135^\circ]$, 则按照图 10(b) 选取 $M_{i,1} \sim M_{i,6}$, 其坐标值见表 2 中的项目 B。其中, 表 2 中的 $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整。

5) 选择合适的插值方法, 并利用点 $M_{i,1} \sim M_{i,6}$

求解出 S_i 的高程估计值 \hat{h}_i 。

6) 绘制纵切面 L 的轮廓曲线 l 。以 T' 为坐标原点, $T'R'$ 连线为 x' 轴, 绘制纵切面 L 中 T 到 R 的轮廓曲线图, 如图 11 所示。

7) 计算收、发端最大切线角。当 $\beta \in [45^\circ, 135^\circ]$ 时, 曲线 l 的分辨率为 $d' = d/\sin \beta$ 。当 $\beta \notin [45^\circ, 135^\circ]$ 时, 曲线 l 的分辨率为 $d' = |d/\cos \beta|$ 。因此, 可知曲线 l 的分辨率范围为 $d' \in [d, \sqrt{2}d]$ 。图 12 为最大切线角示意图。其中, 点 E, F 分别为曲线 l 上各点相对 T 和 R 的最大斜率点, 对应的角度为 θ_E, θ_F 。点 E', F' 分别为曲线 l 相对 T 和 R 的最大斜率切点, 对应的角度为 $\theta_{E'}, \theta_{F'}$ 。显然, $\theta_{E'}, \theta_{F'}$ 才是所需求解的收、发端最大切线角, 但 l 包含的数据是离散的, 故无法直接求取 $\theta_{E'}, \theta_{F'}$ 。

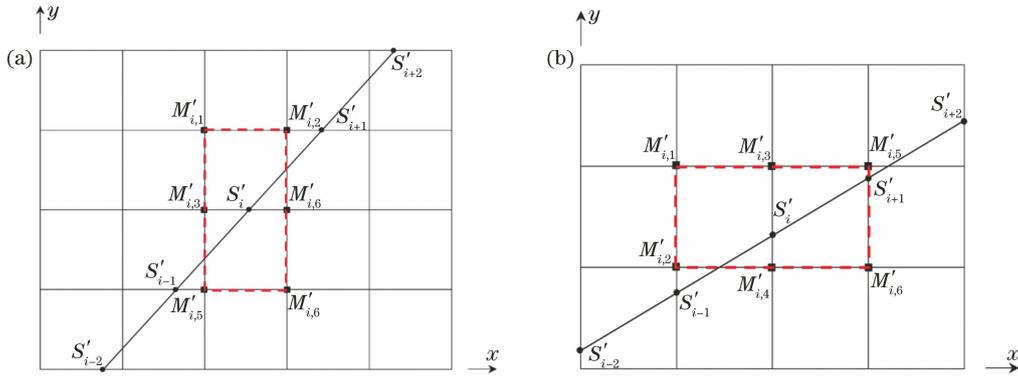


图 10 邻近网格点选择示意图。(a)沿 y 轴方向;(b)沿 x 轴方向

Fig. 10 Schematic diagram of adjacent grid point selection. (a) Along y axis; (b) along x axis

表 2 $M_{i,1} \sim M_{i,6}$ 的坐标值

Table 2 Coordinate values of $M_{i,1} \sim M_{i,6}$

Item	Grid point	x		y		h	
		Coordinate	Value	Coordinate	Value	Coordinate	Value
A	$M_{i,1}$	$X_{i,1}$	$X[\text{floor}(x_i/d)+1]$	$Y_{i,1}$	$Y(y_i/d+2)$	$H_{i,1}$	$H[\text{floor}(x_i/d)+1, y_i/d+2]$
	$M_{i,2}$	$X_{i,2}$	$X[\text{floor}(x_i/d)+2]$	$Y_{i,2}$	$Y(y_i/d+2)$	$H_{i,2}$	$H[\text{floor}(x_i/d)+2, y_i/d+2]$
	$M_{i,3}$	$X_{i,3}$	$X[\text{floor}(x_i/d)+1]$	$Y_{i,3}$	$Y(y_i/d+1)$	$H_{i,3}$	$H[\text{floor}(x_i/d)+1, y_i/d+1]$
	$M_{i,4}$	$X_{i,4}$	$X[\text{floor}(x_i/d)+2]$	$Y_{i,4}$	$Y(y_i/d+1)$	$H_{i,4}$	$H[\text{floor}(x_i/d)+2, y_i/d+1]$
	$M_{i,5}$	$X_{i,5}$	$X[\text{floor}(x_i/d)+1]$	$Y_{i,5}$	$Y(y_i/d)$	$H_{i,5}$	$H[\text{floor}(x_i/d)+1, y_i/d]$
	$M_{i,6}$	$X_{i,6}$	$X[\text{floor}(x_i/d)+2]$	$Y_{i,6}$	$Y(y_i/d)$	$H_{i,6}$	$H[\text{floor}(x_i/d)+2, y_i/d]$
B	$M_{i,1}$	$X_{i,1}$	$X(x_i/d)$	$Y_{i,1}$	$Y[\text{floor}(y_i/d)+2]$	$H_{i,1}$	$H[x_i/d, \text{floor}(y_i/d)+2]$
	$M_{i,2}$	$X_{i,2}$	$X(x_i/d)$	$Y_{i,2}$	$Y[\text{floor}(y_i/d)+1]$	$H_{i,2}$	$H[x_i/d, \text{floor}(y_i/d)+1]$
	$M_{i,3}$	$X_{i,3}$	$X(x_i/d+1)$	$Y_{i,3}$	$Y[\text{floor}(y_i/d)+2]$	$H_{i,3}$	$H[x_i/d+1, \text{floor}(y_i/d)+2]$
	$M_{i,4}$	$X_{i,4}$	$X(x_i/d+1)$	$Y_{i,4}$	$Y[\text{floor}(y_i/d)+1]$	$H_{i,4}$	$H[x_i/d+1, \text{floor}(y_i/d)+1]$
	$M_{i,5}$	$X_{i,5}$	$X(x_i/d+2)$	$Y_{i,5}$	$Y[\text{floor}(y_i/d)+2]$	$H_{i,5}$	$H[x_i/d+2, \text{floor}(y_i/d)+2]$
	$M_{i,6}$	$X_{i,6}$	$X(x_i/d+2)$	$Y_{i,6}$	$Y[\text{floor}(y_i/d)+1]$	$H_{i,6}$	$H[x_i/d+2, \text{floor}(y_i/d)+1]$

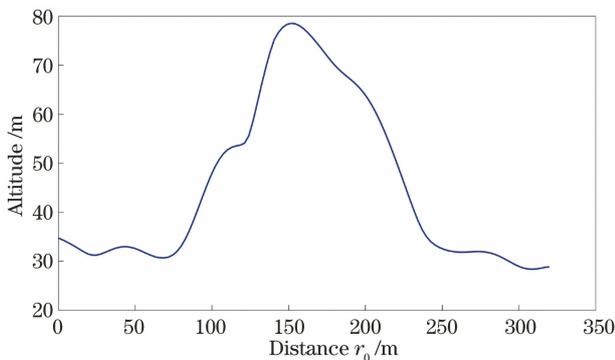


图 11 纵切面 L 的轮廓曲线示意图

Fig. 11 Schematic diagram of outline curve of longitudinal section L

当山体的初始 DEM 分辨率足够高 (d 足够小) 时, E 、 F 各自非常逼近 E' 、 F' , 可看作切点逼近点,

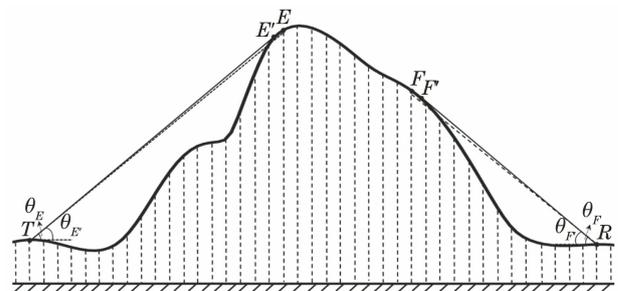


图 12 最大切线角示意图

Fig. 12 Schematic diagram of maximum tangent angle

此时有 $\theta_E \approx \theta_{E'}$ 、 $\theta_F \approx \theta_{F'}$ 。当 DEM 分辨率较低时, 网格间距相对较大, 这会导致最大斜率点与最大斜率切点二者差值较大进而直接制约计算精度。在工程上可采用合适的内插方法对山体初始 DEM 数据进行插值以提升分辨率, 在恢复出地形地貌后可利

用切点逼近点进行近似计算。

8) 确定发射仰角和接收仰角。在图 1 中,以 T 所在的高程水平面为基准, T 、 R 高程差为 $h = h_R - h_T$ 。 T 、 R 之间的相对水平距离为

$$r_0 = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2} \quad (14)$$

T 、 R 之间的直线距离为

$$r = \sqrt{(x_T - x_R)^2 + (y_T - y_R)^2 + (h_T - h_R)^2} \quad (15)$$

分析可知, TR 连线与水平面的夹角为

$$\varepsilon = \arctan \frac{h}{r_0} \quad (16)$$

结合图 1 和图 12 可知,发射仰角为

$$\theta_T = \theta_E + \varphi_T / 2 - \varepsilon, \quad (17)$$

接收仰角为

$$\theta_R = \theta_F + \varphi_R / 2 + \varepsilon. \quad (18)$$

由(17)式可知,若 θ_E 和 φ_T 保持不变,则 θ_T 仅随 ε 变化。由(18)式可知,若 θ_F 和 φ_R 保持不变,则 θ_R 仅随 ε 变化。

3.3 数字高程模型数据误差要求

由于紫外光非直视单次散射通信的有效传输距离有限,故为提高收、发仰角最佳值的计算精度,须对地形 DEM 初始数据及插值方法效果提出精度需求。

设定地形 DEM 的分辨率为 d ,插值测试的平均相对误差为 E_{MAE} ,纵切面 L 的轮廓曲线 l 的分辨率为 d' ,故收、发端之间的直线距离范围为 $[d', 100]$ 。DEM 数据误差引起的收、发仰角误差的最大值为

$$\Delta\theta_{\max} = \arctan(E_{MAE}/d'). \quad (19)$$

设定角度误差的上限值为 α ,若 $\Delta\theta_{\max} \leq \alpha$,则 DEM 数据符合误差要求。反之,则需要更换 DEM 数据或插值方法。本文仿真参照 5% 的误差上限标准,计算得到 α 为 0.01 rad。

4 起伏地形对紫外光非直视通信传输影响的仿真分析

4.1 实验对象

以典型山地的 DEM 地形图作为研究对象,将初始地形记作“地形 I”,区域范围为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,分辨率为 5 m,地形点数为 201×201 ,如图 13 所示。

4.2 插值方法选择

选用反距离加权(IDW)插值法^[42]、双线性插值法(BI)^[43]和普通克里金(OK)插值法^[44]对 DEM 实

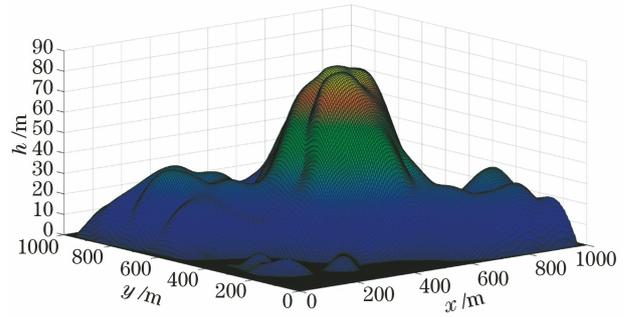


图 13 地形 I

Fig. 13 Terrain I

验地形数据进行插值对比分析,并挑选出最佳方案。仿真环境为搭载 Intel Core i7 2.8 GHz 处理器且内存为 24 GB 的 MECHREVO(X6Ti-S),操作系统为 Windows 10 专业版 64 位,使用 MATLAB 2019b 作为仿真平台。地形插值效果对比如表 3 所示。

表 3 地形插值效果对比

Table 3 Comparison of terrain interpolation effect

Method	E_{MAE}/m	E_{RMSE}/m	R	Average time /s
BI	0.07194	0.17034	0.99997	0.0149
OK	0.28027	0.48169	0.99983	1.9843
IDW	0.04805	0.15014	0.99998	0.0431

表 3 中的耗时为仿真实验 30 次的平均结果,分析可知:BI 算法耗时最短,IDW 算法次之,OK 算法耗时最长,相对 BI 算法 IDW 算法耗时增加 189.3%;在 E_{MAE} 对比中,IDW 算法为最小,相对次佳算法降低 49.7%;在 E_{RMSE} 对比中,IDW 算法为最小,相对次佳算法降低 11.8%。在实验地形插值效果对比中,虽然 IDW 算法耗时不是最小,但是其 E_{MAE} 和 E_{RMSE} 值均为最小且 R 值最大,表明插值后的 DEM 数据相对初始数据的偏差最小,更加符合实际地形地貌特征。按(19)式计算得到 $\Delta\theta_{\max}$ 为 9.6×10^{-3} rad,小于设定的 0.01 rad,符合 DEM 数据误差要求,表明地形 DEM 数据及插值方法有效。

在综合对比后选用 IDW 算法对地形 I 进行插值,进而得到地形 II,区域范围仍为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,分辨率变化为 2.5 m,地形点数变化为 401×401 。

4.3 仿真实验

4.3.1 数字高程模型数据插值对通信系统路径损耗计算的影响

为检验插值前后收、发端最大切线角的角度变化对路径损耗计算的影响,设计了仿真实验。仿真条件同表 1,在实验地形 I 和 II 中任意选择 3 组收、

发端对应位置进行测试。各组实验收、发端位置如图 14 所示,其中五角星表示发射端,圆圈表示接收端。实验结果如表 4 所示。

分析表 4 可知,地形 II 中求得的收、发端最大切线角值均比地形 I 对应值大,该现象背后的机制为分辨率更高的地形 II 包含的地形数据与实际地形更加接近,此时通信系统发射锥体 TX 和接收锥体 RX 被遮蔽的局部地物点被恢复。此时,若按照地形 I 中的参数值进行布设,则会导致 TX、RX 被山体遮挡,根据(6)式换算得到被山体遮挡时的 TX'、RX' 相关参数,代入(5)式计算得到有障碍物遮挡时的路

径损耗。在 3 组实验中,采用地形 I 中参数计算得到的路径损耗相较地形 II 分别增大 0.014 dB, 0.043 dB,0.385 dB。

4.3.2 收、发仰角增大对通信系统路径损耗计算的影响

经过 2.2 节对(5)式的仿真分析可知,(5)式相对 θ_T 和 θ_R 都是增函数。为研究二者的增量 $\Delta\theta_T$ 、 $\Delta\theta_R$ 对通信系统路径损耗的影响,设计了 4 组实验。各组初始的 θ_T 和 θ_R 相等,且分别为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$,而后分别递增 $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$,分别计算各组角度变化后相对初始条件下的路径损耗增长率,结果如表 5 所示。

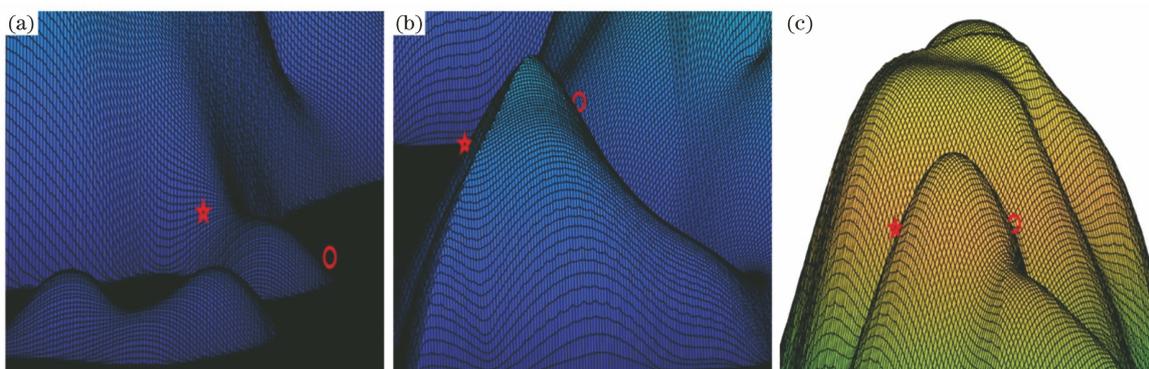


图 14 收、发端位置示意图。(a)第 1 组;(b)第 2 组;(c)第 3 组

Fig. 14 Schematic diagram of locations of receiving and transmitting ends. (a) Group 1; (b) group 2; (c) group 3

表 4 切线角和路径损耗

Table 4 Tangent angle and path loss

Group	1			2			3		
	$\theta_E/(\circ)$	$\theta_F/(\circ)$	L_p/dB	$\theta_E/(\circ)$	$\theta_F/(\circ)$	L_p/dB	$\theta_E/(\circ)$	$\theta_F/(\circ)$	L_p/dB
Terrain I	4.36	7.07	114.466	17.76	14.68	116.167	20.23	21.35	117.290
Terrain II	4.78	7.42	114.452	18.02	15.13	116.124	20.51	23.15	116.905

表 5 路径损耗增长率

Table 5 Growth rate of path loss

(θ_T, θ_R)	Growth rate / %						
$(11^\circ, 11^\circ)$	5.48	$(21^\circ, 21^\circ)$	3.81	$(31^\circ, 31^\circ)$	3.74	$(41^\circ, 41^\circ)$	2.87
$(12^\circ, 12^\circ)$	10.35	$(22^\circ, 22^\circ)$	7.46	$(32^\circ, 32^\circ)$	7.31	$(42^\circ, 42^\circ)$	5.50
$(13^\circ, 13^\circ)$	14.71	$(23^\circ, 23^\circ)$	10.96	$(33^\circ, 33^\circ)$	10.70	$(43^\circ, 43^\circ)$	7.92

纵向分析表 5 可知,各组 θ_T 、 θ_R 初始值相同,随着 $\Delta\theta_T$ 、 $\Delta\theta_R$ 值的递增,路径损耗比也同步递增。横向分析表 5 可知,当各组增加相同的 $\Delta\theta_T$ 和 $\Delta\theta_R$ 时,随着 θ_T 、 θ_R 初始值的递增,路径损耗的增幅在递减。综上所述,当增加相同的 $\Delta\theta_T$ 和 $\Delta\theta_R$ 时, θ_T 、 θ_R 越小,路径损耗增幅越明显。

4.3.3 收、发端布设规划

在紫外光非直视通信系统中,路径损耗与信噪比和误码率息息相关^[45]。在实际运用过程中,为获取尽可能低的路径损耗,需要根据地形地貌特点,对收、发端站点布设进行科学规划。本实验依托地形 II,根据散射通信实际应用场景设置仿真实验,使用

基于 DEM 的紫外光非直视传输最佳收、发仰角求解方法设计仿真程序。将发射端 T 固定,采用由远至近的顺序遍历法移动接收端 R ,计算位于山体轮廓线 l 上每一个点对应的 θ_T 和 θ_R 的最佳值及其相应的路径损耗。实验结果如图 15~17 所示。其中,图 15(a)、图 16(a)和图 17(a)显示发射端(用五角星

表示)及初始接收端(用圆圈表示)的位置。图 15(b)、图 16(b)和图 17(b)表示过发射端和初始接收端的剖面图。图 15(c)、图 16(c)和图 17(c)表示接收端 R 位于每一个步进点时对应的 θ_T 和 θ_R 的最佳值。图 15(d)、图 16(d)和图 17(d)表示当各点取 θ_T 和 θ_R 最佳值时求得的路径损耗。

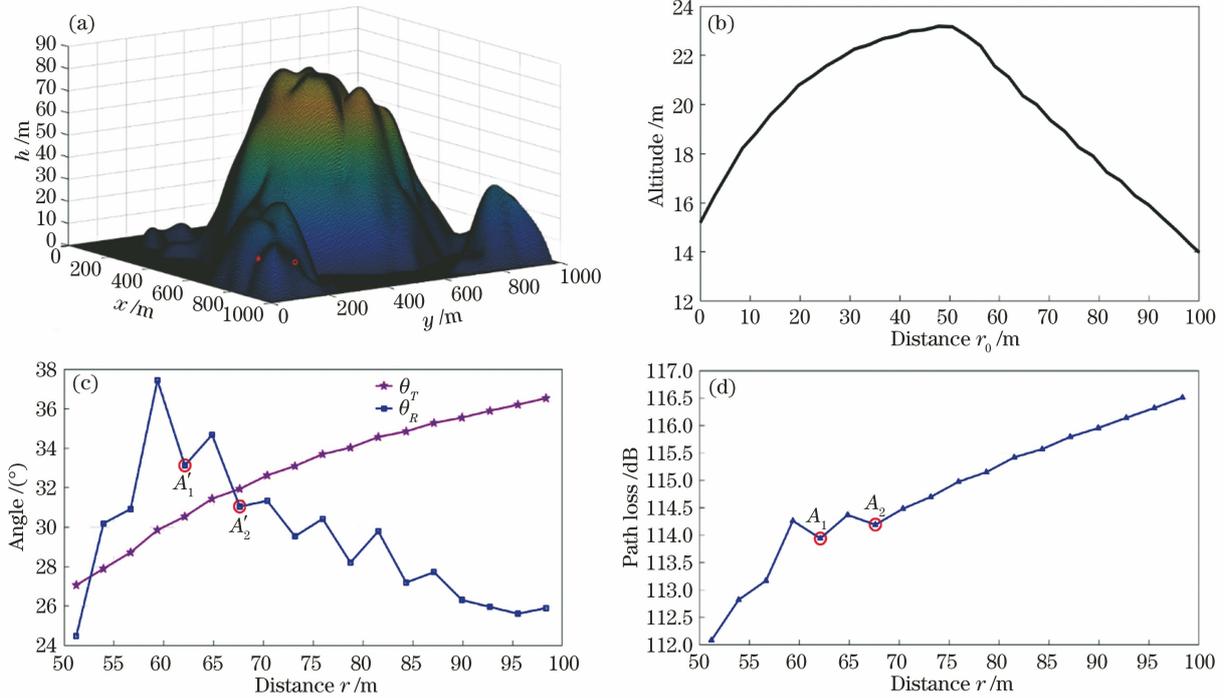


图 15 实验 1 的结果。(a) DEM 位置示意图;(b)剖面图;(c)最佳的 θ_T 和 θ_R ;(d)路径损耗

Fig. 15 Results of experiment 1. (a) Location diagram of DEM; (b) profile diagram; (c) optimal θ_T and θ_R ; (d) path loss

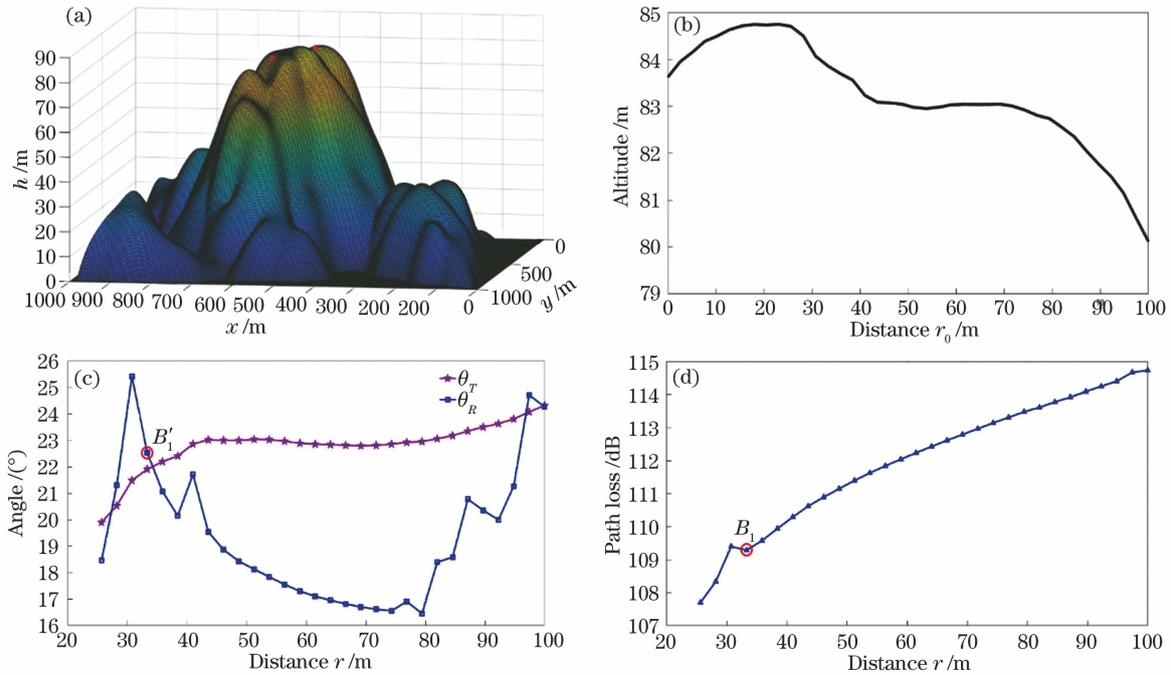


图 16 实验 2 的结果。(a) DEM 位置示意图;(b)剖面图;(c)最佳的 θ_T 和 θ_R ;(d)路径损耗

Fig. 16 Results of experiment 2. (a) Location diagram of DEM; (b) profile diagram; (c) optimal θ_T and θ_R ; (d) path loss

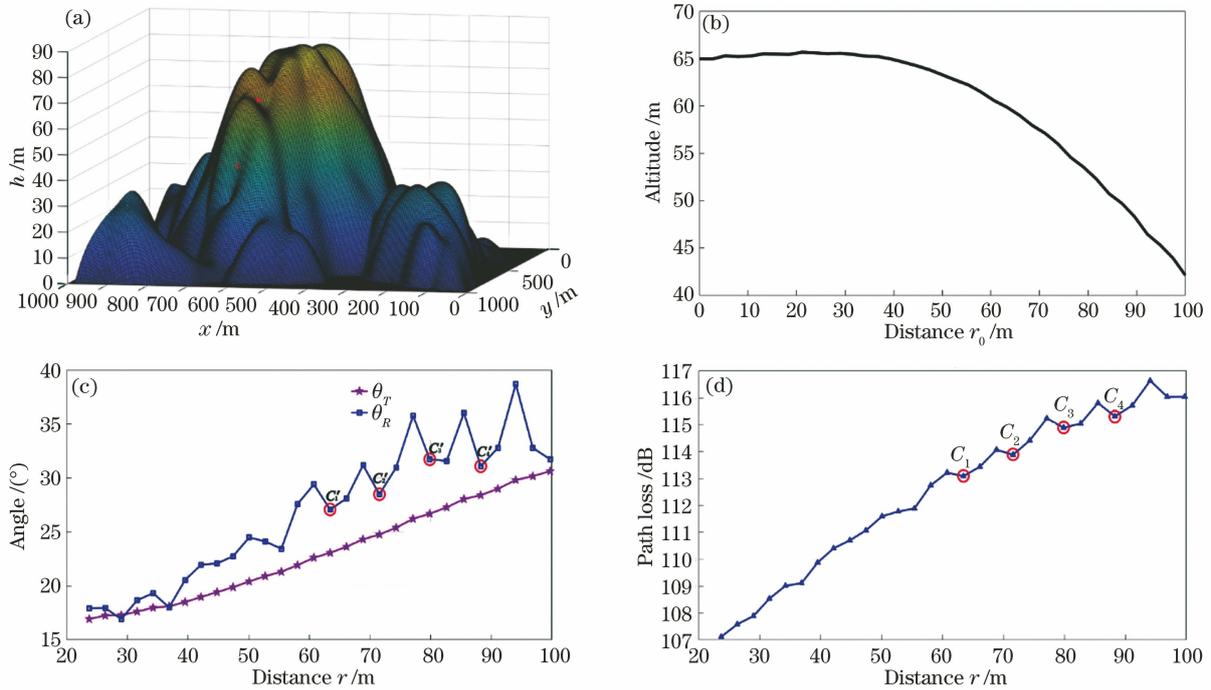


图 17 实验 3 的结果。(a) DEM 位置示意图;(b)剖面图;(c)最佳的 θ_T 和 θ_R ;(d)路径损耗

Fig. 17 Results of experiment 3. (a) Location diagram of DEM; (b) profile diagram; (c) optimal θ_T and θ_R ; (d) path loss

由图 15(a)、(b),图 16(a)、(b)和图 17(a)、(b)可知,收、发端之间均不能通视。图 15(b)所示的收、发端之间存在 1 个较高的山包,山顶两侧地势比较陡。图 16(b)所示的收、发端之间存在 2 个为较平坦的山包,靠近发射端一侧地势相对平缓,靠近接收端一侧则存在较大起伏。图 17(b)所示的收、发端之间没有山包,发射端一侧几乎没有较高的地物遮挡,地势非常平坦,而在接收端一侧地势相对较陡峭。

由图 15(c)、图 16(c)和图 17(c)可知,随着接收端逐渐向发射端靠拢,发射仰角平缓减小,而接收仰角存在波动。出现该现象的原因是在接收端移动过程中,收、发端相对位置持续发生变化,受起伏地形影响, θ_R 最佳值起伏明显。同时, ϵ 也在发生细微变化,这会引起 θ_T 的最佳值产生微弱起伏。此外,从图 16(c)中可以发现,接收仰角在 31 m 和 97 m 距离处分别出现峰值,这是因为当接收端在 76.9~100.0 m 范围内移动时会受右侧山包遮挡,而当其在 25.7~76.9 m 范围内移动时会受左侧山包遮挡。

由图 15(d)、图 16(d)和图 17(d)可知,随着接收端逐渐向发射端靠拢,路径损耗总体上呈现出线性递减趋势且起伏不大。分析各图中圆圈标注的点,其值略小于左、右邻点,故该点为局部极小值点。出现距离较左邻点更远而损耗却更小的情况的原因

在于局部区域内的地势变化造成切点位置发生较大位移,引起 θ_R 最佳值发生突然减小,此时路径损耗值与 r 之间并非正相关。以图 17(d)为例,共有 4 个局部极小值点,依次为 $C_1 \sim C_4$,从位置上与图 17(c)中的 $C'_1 \sim C'_4$ 相对应。随着地势变化引起的切点位置发生的较大位移, $C'_1 \sim C'_4$ 相较各自的左邻点急剧下降,这直接导致了路径损耗局部极小值 $C_1 \sim C_4$ 的出现。

若将紫外光非直视通信站点布设在路径损耗的极小值位置,则通信系统的路径损耗将达到局部最小,这有益于提高系统的通信效能。

5 结 论

依托紫外光非直视单次散射模型,提出了基于 DEM 的紫外光非直视传输最佳收、发仰角的求解方法,并研究分析了起伏地形对紫外光通信单次散射路径损耗的影响。仿真结果表明:在起伏地形环境下,切线传输方案的路径损耗值最小;DEM 数据经过有效插值可以恢复出局部地物点,提高求解收、发端最大切线角精度,减小因地物遮蔽引起的损耗。所提方法可为有效降低紫外光非直视通信路径损耗提供理论和算法支持。在固定通信应用中,可依托 DEM 数据绘制路径损耗图,利用局部极小值点进行站点科学规划布设。在移动通信应用中,根据前、后车行进中的实时位置,自适应调整收、发仰角实现切

线传输,从而有效降低路径损耗,提高系统的通信效能。

参 考 文 献

- [1] Wu M L, Han D H, Zhang X, et al. Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5422-5430.
- [2] Xu C M, Zhang H M, Cheng J L. Effects of haze particles and fog droplets on NLOS ultraviolet communication channels[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23259-23269.
- [3] Ardakani M H, Uysal M. Relay-assisted OFDM for ultraviolet communications: performance analysis and optimization [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(1): 607-618.
- [4] Sun Y, Gong C, Xu Z Y, et al. Link gain and pulse width broadening evaluation of non-line-of-sight optical wireless scattering communication over broad spectra[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 7900212.
- [5] Zhao T F, Lin Y R, Ma Q W, et al. Energy balance algorithm for wireless ultraviolet secret communication in UAV formation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(12): 2969-2975.
赵太飞, 林亚茹, 马倩文, 等. 无人机编队中无线紫外光隐秘通信的能耗均衡算法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(12): 2969-2975.
- [6] Zhao T F, Gao Y Y, Zhang Y. An area coverage algorithm for non-line-of-sight ultraviolet communication network [J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 32(2): 269-280.
- [7] Yuan R Z, Ma J S. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication [J]. *China Communications*, 2016, 13(6): 63-75.
- [8] Zhao T F, Liu P, Ma Q W. Wireless ultraviolet guided method of unmanned aerial vehicle matching terrain flight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0206001.
赵太飞, 刘萍, 马倩文. 无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0206001.
- [9] Gong C, Huang B Y, Xu Z Y. Correlation and outage probability of NLOS SIMO optical wireless scattering communication channels under turbulence [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2016, 8(12): 928-937.
- [10] Zhang X W, Zhao S H, Li Y J, et al. Multi-channel directional media access control protocol for airborne ultraviolet communication based on space division multiplexing[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3): 451-455.
张曦文, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于空分复用的多信道机间紫外光通信定向 MAC 协议 [J]. *激光技术*, 2016, 40(3): 451-455.
- [11] Arya S, Chung Y H. Amplify-and-forward multihop non-line-of-sight ultraviolet communication in the gamma-gamma fading channel[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2019, 11(8): 422-436.
- [12] Song P, Liu C, Zhu L, et al. Analysis of single-scatter path loss in wireless ultraviolet communication in mobile scene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0406001.
宋鹏, 刘春, 朱磊, 等. 移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析 [J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0406001.
- [13] Wang L J, Xu Z Y, Sadler B M. An approximate closed-form link loss model for non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1224-1226.
- [14] Song P, Zhou X L, Song F, et al. Riemann sum method for non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry [J]. *Optics Communications*, 2017, 405: 400-405.
- [15] Zhao T F, Yang L Y, Leng Y X, et al. Diversity receiving technology of ultraviolet approximate-line-of-sight communication in helicopter assisted landing [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(2): 238-245.
赵太飞, 杨黎洋, 冷昱欣, 等. 直升机助降中紫外光近直视通信分集接收技术 [J]. *激光技术*, 2019, 43(2): 238-245.
- [16] Zhao T F, Bao H, Ma X Y. Performance analysis of ALOS link by wireless UV MIMO in helicopter assisted landing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1022002.
赵太飞, 包鹤, 马欣媛. 无线紫外光 MIMO 直升机助降 ALOS 链路性能分析 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1022002.
- [17] Cao T, Song J, Pan C Y. Simplified closed-form single-scatter path loss model of non-line-of-sight ultraviolet communications in noncoplanar geometry [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57(2): 6100209.
- [18] Zheng X, Tang Y F, Du J Y. Analysis of transmission characteristics of non-line-of-sight ultraviolet light under complex channel conditions [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2021, 336: 01012.
- [19] Zhang H L, Yin H W, Jia H H, et al. Study of

- effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21216-21226.
- [20] Zhang L Q. Obstacle impact on the UV-light atmospheric transmission characteristics[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 321/322/323/324: 507-512.
- [21] Xu C M, Zhang H M. Monte-Carlo based modeling for ultraviolet non-line-of-sight communication channels with typical obstacles[C]//2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), October 15-17, 2015, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2015: 15636571.
- [22] Habib M. Evaluation of DEM interpolation techniques for characterizing terrain roughness [J]. *CATENA*, 2021, 198: 105072.
- [23] Zuo Y, Xiao H F, Wu J, et al. A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels [J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10359-10369.
- [24] Elshimy M A, Hranilovic S. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(3): 420-428.
- [25] Zhao T F, Li Y M, Xu S, et al. Research on optimum multi-hop relay of wireless ultraviolet communication in military vehicle secret formation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(11): 2636-2642.
赵太飞, 李永明, 许杉, 等. 军车隐秘编队的无线紫外光通信最优多跳中继研究[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(11): 2636-2642.
- [26] Zhao T F, Ke X Z. Monte Carlo simulations for non-line-of-sight ultraviolet scattering coverage area [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(11): 114208.
赵太飞, 柯熙政. Monte Carlo 方法模拟非直视紫外光散射覆盖范围 [J]. *物理学报*, 2012, 61(11): 114208.
- [27] Li S H, Sun X J, Zhang R W, et al. Optical scattering communication under various aerosol types based on a new non-line-of-sight propagation model [J]. *Optik*, 2018, 164: 362-370.
- [28] He Q F, Sadler B M, Xu Z Y. Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7464: 74640H.
- [29] Chen G, Xu Z Y, Ding H P, et al. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications [J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3929-3940.
- [30] Hou W J, Liu C H, Lu F P, et al. Non-line-of-sight ultraviolet single-scatter path loss model [J]. *Photonic Network Communications*, 2018, 35(2): 251-257.
- [31] Wu T F, Ma J S, Yuan R Z, et al. Single-scatter model for short-range ultraviolet communication in a narrow beam case [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(3): 265-268.
- [32] Sunstein D E. A scatter communications link at ultraviolet frequencies[J]. *Massachusetts Institute of Technology*, 2005: 1-59.
- [33] Zhao T F, Feng Y L, Ke X Z, et al. Research on the coverage area of communication in the solar-blind UV communication network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2229-2235.
赵太飞, 冯艳玲, 柯熙政, 等. “日盲”紫外光通信网络中节点覆盖范围研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2229-2235.
- [34] Habib M, Alzubi Y, Malkawi A, et al. Impact of interpolation techniques on the accuracy of large-scale digital elevation model[J]. *Open Geosciences*, 2020, 12(1): 190-202.
- [35] Li Z L, Lin Q. Digital elevation model[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
李志林, 林庆. 数字高程模型[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [36] Ikechukwu M N, Ebinne E, Idorenyin U, et al. Accuracy assessment and comparative analysis of IDW, Spline and Kriging in spatial interpolation of landform (topography): an experimental study [J]. *Journal of Geographic Information System*, 2017, 9(3): 354-371.
- [37] Morgan R S, El-Hady M A, Rahim I S, et al. Evaluation of various interpolation techniques for estimation of selected soil properties [J]. *International Journal of GEOMATE*, 2017, 13(38): 23-30.
- [38] Barbulescu A, Bautu A, Bautu E. Optimizing inverse distance weighting with particle swarm optimization [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 2054.
- [39] Arun P V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods [J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2013, 16(2): 133-139.
- [40] Mukherjee S, Joshi P K, Mukherjee S, et al. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM) [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 205-217.
- [41] Dong Y S, Chang H C, Chen W T, et al. Accuracy assessment of GDEM, SRTM, and DLR-SRTM in northeastern China [J]. *Geocarto International*, 2015, 30(7): 779-792.

- [42] Bărbulescu A, Șerban C, Indrean M L. Computing the beta parameter in IDW interpolation by using a genetic algorithm[J]. *Water*, 2021, 13(6): 863.
- [43] Kim K H, Shim P S, Shin S. An alternative bilinear interpolation method between spherical grids [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(3): 123.
- [44] Al-Mutairi N, Alsahli M, Ibrahim M, et al. Spatial enhancement of DEM using interpolation methods: a case study of Kuwait's coastal zones[J]. *American Journal of Remote Sensing*, 2019, 7(1): 5.
- [45] Ma Y Z, Cheng F F, Jia H T, et al. Performance of SIMO NLOS UV communication system in a foggy environment[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1106007.
马愈昭, 程飞帆, 贾惠婷, 等. 雾天环境下 SIMO NLOS 紫外光通信系统性能研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1106007.