

光学学报

大气湍流对空基光学成像系统影响的仿真研究

陈欣欣^{1,2,3}, 苑克娥^{1,3*}, 时东锋^{1,3}, 黄见^{1,3}, 王英俭^{1,3}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 基于光波大气传输理论,模拟了斜程大气路径下空基光学系统的成像过程,分析了不同条件下大气湍流对成像质量的影响,并与理论结果进行了对比。当系统口径小于大气相干长度时,分辨率随口径的增大明显提高,而在系统口径大于大气相干长度后,分辨率随口径的增大逐渐趋于一稳定值,最佳口径值为 $2r_0$ (r_0 为大气相干长度)。通过对不同折射率结构常数模型的仿真可以看出,随着传输距离的增加,最小可分辨长度先是逐渐增大,在传输距离大于 50 km 后,最小可分辨长度趋于一稳定值。由此可见,当传输距离小于 50 km 时,大气湍流对光学系统成像质量的影响较大。较弱的大气湍流对空基光学系统地面分辨率的影响为 2~3 cm,而较强的大气湍流对空基光学系统地面分辨率的影响可达到 7~10 cm。对流层顶的高空湍流对成像效果的影响较为显著,若不考虑此高空湍流的影响,分辨率可提升 1.4 倍左右。

关键词 大气光学; 大气折射率结构常数; 数值模拟; 成像质量; 最小可分辨长度; 分辨率

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1801002

Simulation Study on Effect of Atmospheric Turbulence on Space-Based Optical Imaging System

Chen Xinxin^{1,2,3}, Yuan Kee^{1,3*}, Shi Dongfeng^{1,3}, Huang Jian^{1,3}, Wang Yingjian^{1,3}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

Abstract Based on the theory of light wave propagation in the atmosphere, the imaging process of a space-based optical system in a slant atmospheric path is simulated, the influence of atmospheric turbulence on imaging quality under different conditions is analyzed, and the simulation results are compared with theoretical ones. The simulation results show that when the system aperture is smaller than the atmospheric coherence length, the resolution increases significantly as the aperture enlarges. While the system aperture is larger than the atmospheric coherence length, the resolution tends to be stable gradually as the aperture increases, and the optimal aperture is about $2r_0$ (r_0 refers to the atmospheric coherence length). Through the simulation of structure constant models with different refractive indexes, it can be seen that as transmission distance increases, the minimum resolvable length improves gradually. However, when the transmission distance reaches 50 km, the length tends to be stable. Therefore, when the transmission distance is below 50 km, atmospheric turbulence has a great impact on the imaging quality of the optical system. In addition, weak atmospheric turbulence will affect the ground resolution of the optical system at a degree of 2-3 cm, while strong atmospheric turbulence will affect that at a degree of 7-10 cm. Furthermore, the high-altitude turbulence in the tropopause can greatly affect the imaging quality. If the influence of the high-altitude turbulence is ignored, the resolution can be improved by about 1.4 times.

Key words atmospheric optics; structure constant of atmospheric refractive index; numerical simulation; imaging quality;

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2021-12-22; 录用日期: 2022-01-17

基金项目: 安徽省先进激光技术实验室主任基金(AHL2021ZR01)、中国科学院青年创新促进会(2020438)、中国科学院科技创新重点实验室基金(CXJJ-20S028)

通信作者: *keyuan@aiofm.ac.cn

minimum resolvable length; resolution

1 引言

当光在大气中传播时,折射率的随机起伏会导致光波波前发生畸变,产生一系列光学湍流效应,从而降低成像系统的分辨率,使得获得的图像的质量下降^[1]。图像模糊降质不仅会给目标识别带来困难,还会造成信息的丢失。因此,研究大气湍流对光学成像系统的影响具有重要意义。

多年来,国内外研究学者开展了大量关于大气湍流对光学系统性能的影响的研究^[2-8]。1966年,Fried^[9-10]对长曝光和短曝光下光学成像系统的分辨率问题进行了深入研究。张逸新等^[11-12]和邹皓等^[13]详细讨论了不同湍流参数对光学系统成像质量的影响。随着湍流研究的深入,学者们开始寻找克服或降低湍流影响的方法。一是通过对光源的选择来减小大气湍流对光波传输的影响^[14],二是采用自适应光学技术^[15-16]实时校正大气湍流引起的相位畸变来降低大气湍流的影响。此外,通过解卷积、盲解卷积和近视解卷积等算法对获取的图像进行事后处理也可获得高分辨率的图像^[17-18]。目前关于大气湍流对光学系统影响的研究多为地基系统或星地系统,对于离地面几至几十千米的空基成像系统的报道较少。本文在理论分析的基础上,通过在路径上布置多层相位屏的方式模拟了大气湍流对光束传输的影响,借助合肥地区大气折射率结构常数模型和HV5/7模型^[19],得到了不同湍流条件下地面物体最小可分辨长度随传输距离的变化规律,定量分析了大气湍流对空基成像系统分辨率的影响。

2 数值模拟基础和仿真模型

2.1 理论基础

为了定量描述大气湍流对空基光学成像系统的影响,通常用光学系统的成像分辨率和最小可分辨长度来表征。光学系统的成像分辨率可以用调制传递函数的空间积分来求解,根据Fried理论,可推导出长曝光下球面波的归一化分辨率公式^[9],即

$$\frac{R_{\infty}}{R_{\max}} = \frac{16}{\pi} \left(\frac{D}{r_0} \right)^2 \int_0^1 u \left(\arccos u - u \sqrt{1-u^2} \right) \times \exp \left[-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} u^{5/3} \right] du, \quad (1)$$

式中: D 为接收系统口径; r_0 为大气相干长度; $u = \Omega/\Omega_0$,其中 Ω 为角频率, $\Omega_0 = D/\lambda$ 为截止角频率, λ 为光波波长; R_{∞} 为长曝光下的球面波分辨率; R_{\max} 为分辨率的极限值。

最小可分辨长度是指能够清楚分辨两个物体的最小间隔,其数值越小,表示分辨本领越强。根据瑞利判据,理想光学成像系统的角分辨率的表达式为

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}, \quad (2)$$

假设空基系统距离地面物体的距离为 L ,则空基遥感器的地面最小可分辨长度为

$$\delta_1 = 2L \tan \frac{\theta}{2} = 2L \tan \left(1.22 \frac{\lambda}{2D} \right) \approx 1.22 \frac{\lambda L}{D}, \quad (3)$$

在实际应用中,受大气湍流的影响,成像分辨率不会大于系统口径为大气相干长度的分辨率大小^[20],所以实际地面的最小可分辨长度为

$$\delta_{1, \text{actual}} \approx 1.22 \frac{\lambda L}{r_0}. \quad (4)$$

斜程传输球面波大气相干长度的表达式为

$$r_0 = \left[0.423k^2 \int_0^L C_n^2(z \sin \alpha) \left(\frac{z}{L} \right)^{5/3} dz \right]^{-3/5}, \quad (5)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; α 为仰角; z 为斜程路径上的不同位置; $z \sin \alpha$ 为垂直高度 h ; $C_n^2(h)$ 为大气折射率结构常数。将 r_0 代入地面最小可分辨长度的表达式中,可得

$$\delta_{1, \text{actual}} \approx 1.22\lambda L \left[0.423k^2 \int_0^L C_n^2(z \sin \alpha) \left(\frac{z}{L} \right)^{5/3} dz \right]^{3/5}, \quad (6)$$

$C_n^2(h)$ 的廓线表达式为

$$C_n^2(h) = a_1 h^c \exp \left(-\frac{h}{b_1} \right) + a_2 \exp \left(-\frac{h}{b_2} \right) + a_3 \exp \left(-\frac{h}{b_3} \right), \quad (7)$$

式中: $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_3, c$ 为拟合参数。式(7)等号右侧有三项:第一项表示在对流层顶经常出现的强湍流状况, c 越大强湍流层的高度越高^[22];第二项表示边界层中的湍流状况;第三项表示自由大气中的湍流状况。根据大量的实验探测结果,对式(7)中各参数进行统计拟合,HV5/7模型^[21]、合肥白天模型和合肥夜间模型^[22]中 $C_n^2(h)$ 的表达式如下。

1) Hufnagel-Valley湍流模型

$$C_n^2(h) = 8.2 \times 10^{-26} W^2 h^{10} \exp(-h) + 2.7 \times 10^{-16} \exp \left(-\frac{h}{1.5} \right) + A \exp \left(-\frac{h}{0.1} \right), \quad (8)$$

式中: A 为近地面折射率结构常量; W 为风速因子。当 $A = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, $W = 21 \text{ m/s}$ 时,Hufnagel-Valley湍流模型为HV5/7模型。

2) 合肥白天模型

$$C_n^2(h) = 8.00 \times 10^{-26} h^{13.5} \exp \left(-\frac{h}{0.88} \right) + 1.95 \times 10^{-15} \exp \left(-\frac{h}{0.11} \right) + 8.00 \times 10^{-17} \exp \left(-\frac{h}{7.5} \right). \quad (9)$$

3) 合肥夜间模型

$$C_n^2(h) = 2.8 \times 10^{-29} h^{17} \exp\left(-\frac{h}{0.7}\right) + 2.1 \times 10^{-15} \exp\left(-\frac{h}{0.1}\right) + 2.0 \times 10^{-17} \exp\left(-\frac{h}{4.8}\right). \quad (10)$$

影响成像效果的主要大气因素除了湍流介质外还有混浊介质,混浊介质主要由离散的大气微粒(大气分子和气溶胶粒子)构成。本文在仿真中同时考虑了混浊介质气溶胶等对成像质量的影响,采用的大气分子和气溶胶消光廓线模型^[23]为

$$\alpha_m(h) = \frac{8\pi}{3} \times 1.54 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{h}{7}\right), \quad (11)$$

$$\alpha_a(h) = 50 \times 2.47 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{h}{2}\right) + 5.13 \times 10^{-6} \exp\left[-\frac{(h-20)^2}{36}\right]. \quad (12)$$

2.2 光波传输仿真模型

根据大气传输理论,在空基光学成像系统中,接收系统接收到的辐射亮度主要包括三个方面^[24],即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = I_1 + I_{\text{back}}, \quad (13)$$

式中: I 为接收系统接收到的总辐射亮度; I_1 为地面物体反射太阳辐射经大气吸收和散射后传输至接收系统的地表目标辐射亮度; I_2 为太阳辐射从大气层传输至地球表面过程中,部分被大气介质后向散射进接收系统中的辐射亮度; I_3 为地面目标物体自然地物反射到大气环境中的太阳辐射被大气介质散射进接收系统中的辐射亮度; I_{back} 为大气背景辐射。其中,只有 I_1 包含地面目标物体的光谱信息, I_2 和 I_3 为大气背景辐射。借助中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机

械研究所的通用大气辐射传输软件^[25]计算发现,当以太阳光作为照明光源进行被动成像时,在现有光学系统参数条件下辐射传输距离可以达到10 km量级。在成像过程中,在被动成像无法获取信号的情况下,可采用主动探测技术进行成像。本文的分析在主被动成像能够满足的距离条件下进行,以研究大气湍流扰动对成像分辨率的影响。大气辐射传输过程如图1所示。

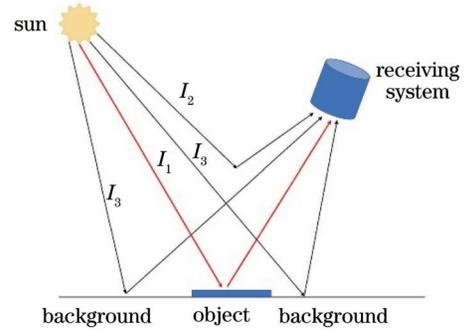


图 1 大气辐射传输过程

Fig. 1 Atmospheric radiation transfer process

图2为光波传输仿真模型图和空基成像系统对地面物体成像的模拟流程图。在模拟时,首先创建物体的场,采用在光场上施加高斯随机振幅和相位调制的方法来模拟物体的漫反射^[26],高斯随机相位调制的方差为 $(2\pi)^2$,并将振幅反射率设成均匀的。然后,采用分步相位屏法,将光束的传播分成若干段,每段利用生成的合适的相位屏代替光传播路径上湍流引起的相位起伏^[27],光束传播到相位屏时就将对应的相位扰动叠加到光场中,继续进行真空传播,到下一个相位屏处再叠加对应的相位扰动,如此重复直至最后一个相位屏处^[28]。最后,利用光学系统进行成像。

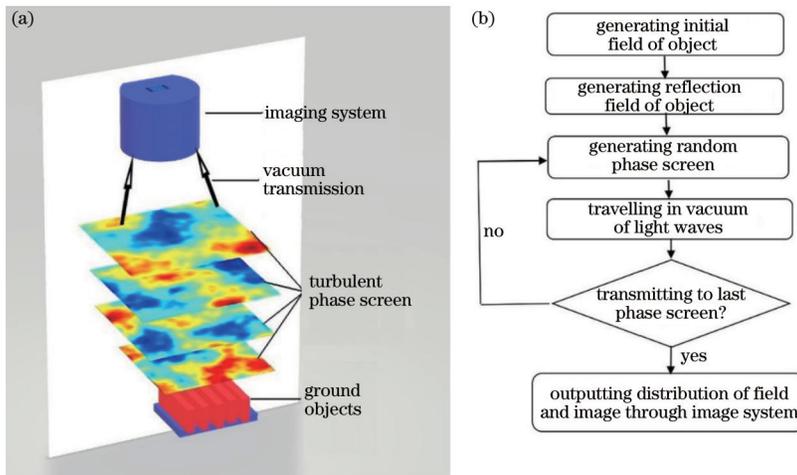


图 2 光波传输仿真。(a)仿真模型图;(b)成像模拟流程图

Fig. 2 Simulation of light wave transmission. (a) schematic diagram of simulation model; (b) flow chart of imaging simulation

在进行数值模拟计算时,需要对计算参量进行选取,尤其是关于相位屏的创建,需要满足一定的约束条件,才能正确地以离散相位屏代替连续相位^[29-30]。计算参量的选取主要包括抽样网格间距 Δx 、抽样网格点

数 N 和相位屏间距 Δz 的选取,对于网格间距的选取,需要满足的条件为

$$\Delta x > \frac{\lambda z}{2(L' - D)}, \quad (14)$$

$$\Delta x < \begin{cases} \pi \sqrt{\lambda L'}, & \text{strong fluctuation condition,} \\ \pi r_0, & \text{weak fluctuation condition} \end{cases} \quad (15)$$

式中: L' 为网格宽度。

对相位屏间距而言,在惯性区内,通常认为大气湍流得到了充分发展,并满足局地均匀各向同性的条件,即

$$\Delta z < (k^2 C_n^2)^{-\frac{3}{8}} \quad (16)$$

Martin 和 Flatté^[31] 根据光强起伏的特性确定了选取相位屏间距的经验条件,要求归一化方差满足

$$\beta_1^2(\Delta z) < \begin{cases} 0.1 \beta_1^2(L'), & \text{weak fluctuation condition} \\ 0.1, & \text{strong fluctuation condition} \end{cases} \quad (17)$$

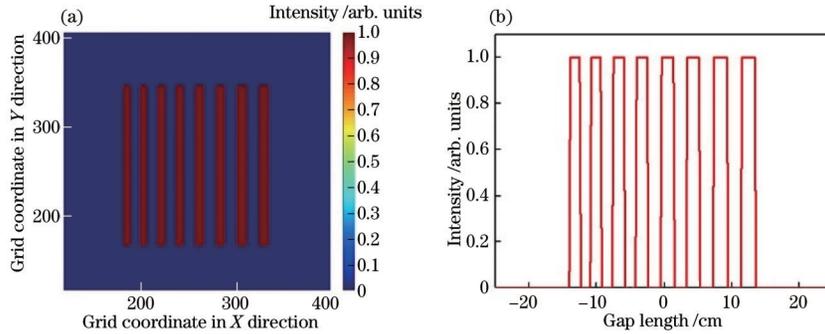


图 3 原始图像及其二维光强分布。(a)原始图像;(b)光强分布

Fig. 3 Original image and two-dimensional light intensity distribution. (a) Original image; (b) intensity distribution

表 1 数值仿真参数

Table 1 Numerical simulation parameters

Parameter	Description
Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	0.5
Number of grids N	512×512
Independent transmission time	100
Imaging time	15
Transmission distance L / km	20
Grid size $\Delta x / \text{m}$	0.00475
Atmospheric coherence length r_0 / m	0.3667
Aperture size D / m	0.1000, 0.2500, 0.3667, 0.5500, 0.7334, 0.9168
Constant model of atmospheric refractive index structure $C_n^2 / \text{m}^{-2/3}$	HV5/7

根据瑞利判据,当一个圆斑像的中心刚好落在另一个圆斑像的边缘上时,这两个像刚好可以被分辨。在满足瑞利判据时,两圆斑重叠区的鞍点光强约为每个圆斑中心光强的 73.5%^[32],由此可判断物体可分辨的最小长度。图 4 给出了固定传输距离为 20 km 时不同接收口径下的成像结果及其二维光强分布图。

由图 4 可以看出:随着接收口径的增大,最小可分辨长度逐渐减小,换句话说,接收口径 D 越大,成像质量越高,能够分辨的细节越多;当 D 增大到 $2r_0$ 时,成像得到最佳结果,再继续增大口径,成像质量并没有明显改变。这与 Fried 得出的归一化分辨率随接收口径的变化结果相一致:当 $D < r_0$ 时,分辨率随着口径的增大

至于抽样网格点数 N ,可根据网格间距 Δx 和网格宽度 L' 来确定。

3 数值仿真结果及分析

3.1 接收口径对成像质量的影响

选取的漫反射体是如图 3 所示的条纹图像,条纹及间隔宽度从左到右依次增大,条纹及间隔宽度从左到右分别为 4.275、4.750、5.225、5.700 cm,每种间隔的条纹有两条。根据 2.2 节的约束条件,表 1 列举了传输距离为 20 km 下的仿真参数,其中独立传输次数是相位屏之间真空传输的段数,成像次数是指长曝光成像需要进行仿真成像的次数。模拟仿真了 100 次随机相位散射光的独立传输过程,最后所成的像为 15 次数值仿真的平均结果。

明显提高;当 $D > r_0$ 时,分辨率随系统口径的增大而逐渐趋于一稳定值,此时大气湍流强度是系统分辨率的主要制约因素。此结果表明所提数值仿真程序是准确可靠的。

3.2 不同高度、不同湍流强度廓线模型对成像质量的影响

为研究不同高度、不同湍流强度对成像质量的影响,仿真计算了不同折射率结构常数模型下最小可分辨长度随传输距离的变化,主要针对合肥白天模型、合肥夜间模型和 HV5/7 模型进行分析。图 5 给出了 C_n^2 和 r_0 随传输距离的变化情况。从图 5(a)可以看出,合肥白天模型有极大值 $5.3 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$,而合肥夜间模

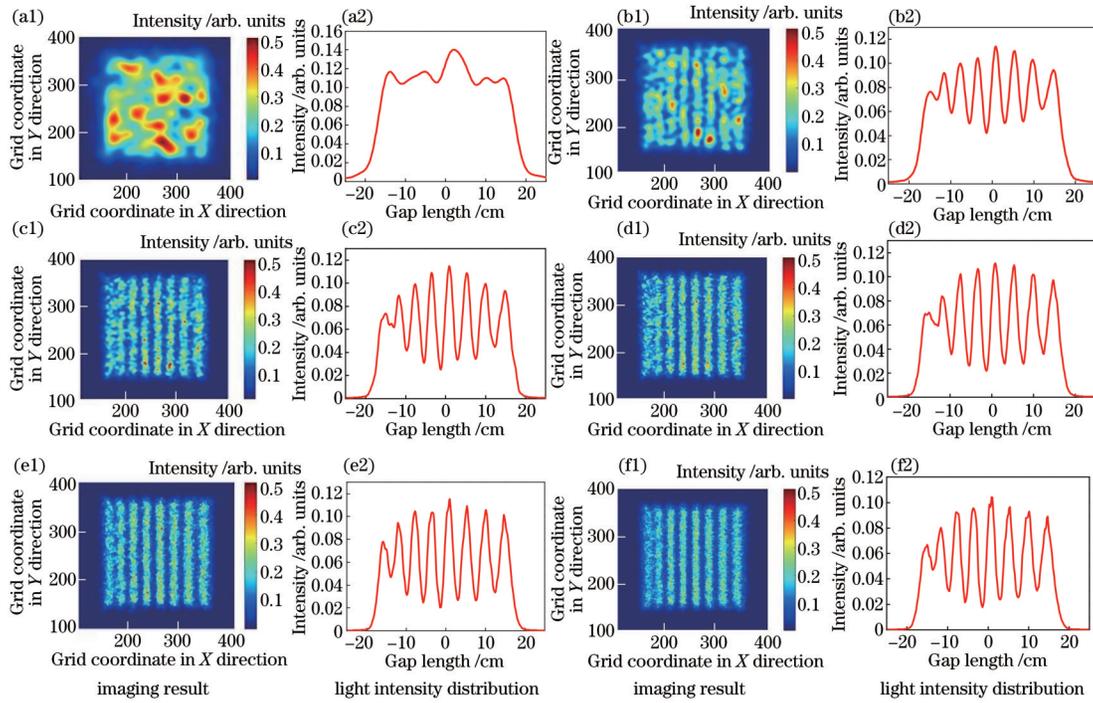


图 4 不同 D 下的成像结果及其二维光强分布。(a1)(a2) $D=0.10\text{ m}$; (b1)(b2) $D=0.25\text{ m}$; (c1)(c2) $D=r_0$; (d1)(d2) $D=1.5r_0$; (e1)(e2) $D=2.0r_0$; (f1)(f2) $D=2.5r_0$

Fig. 4 Imaging result and two-dimensional light intensity distribution under different D . (a1)(a2) $D=0.10\text{ m}$; (b1)(b2) $D=0.25\text{ m}$; (c1)(c2) $D=r_0$; (d1)(d2) $D=1.5r_0$; (e1)(e2) $D=2.0r_0$; (f1)(f2) $D=2.5r_0$

型的极大值为 $4.2 \times 10^{-16}\text{ m}^{-2/3}$, 白天模型的 C_n^2 比夜间的要大 1 个数量级。三种模型中合肥白天模型的湍流强度最强, HV5/7 模型次之, 合肥夜间模型的湍流

强度最弱。根据图 5(b), 三种模型下 15~20 km 的大气相干长度范围内有极小值, 表明此高度范围的大气湍流对成像质量的影响较大。

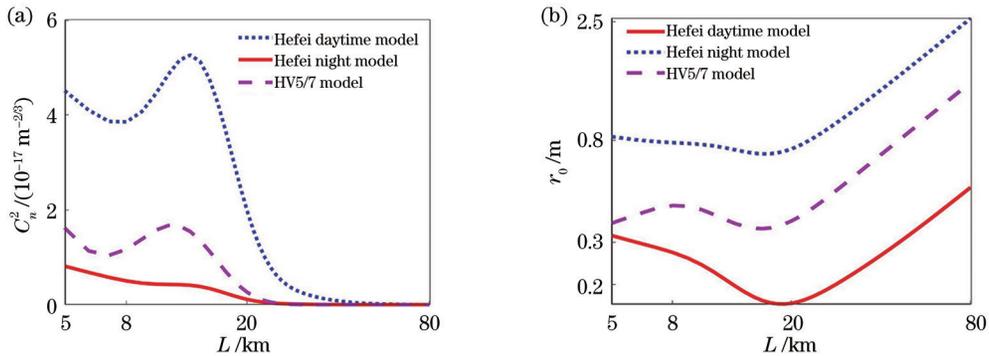


图 5 大气折射率结构常数和大气相干长度随传输距离的变化。(a) 大气折射率结构常数随传输距离的变化; (b) 大气相干长度随传输距离的变化

Fig. 5 Atmospheric refractive index structure constant and atmospheric coherence length varying with transmission distance. (a) Atmospheric refractive index structure constant varying with transmission distance; (b) atmospheric coherence length varying with transmission distance

通过在不同高度下设置不同的网格尺寸, 来计算最小可分辨长度随高度的变化。仿真过程中光波波长为 $\lambda=0.50\text{ }\mu\text{m}$, 网格数为 512×512 , 传输距离从 5 km 逐渐增加到 80 km。为了准确寻找最佳最小可分辨长度, 在计算每个传输距离条件成像时, 分别设置漫反射体的条纹及间隔宽度为 $2\Delta x, 3\Delta x, \dots, 13\Delta x$ 进行仿真计算。

图 6 和图 7 分别为 HV5/7 模型在传输距离为

30 km 和 50 km 下的成像结果。在 30 km 传输距离下, 网格大小设置为 $\Delta x=0.007\text{ m}$, 图 6(a1)、(a2) 和图 6(b1)、(b2) 的条纹及间隔宽度分别为 $4\Delta x$ 和 $5\Delta x$, 由瑞利判据可知, $4\Delta x$ 的条纹间隔不可分辨, $5\Delta x$ 的条纹间隔可分辨, 则 30 km 传输距离下仿真计算的地面最小可分辨长度为 $\delta_{l, \text{actual}}=5 \times 0.007\text{ m}=0.035\text{ m}$ 。同理, 50 km 传输距离下仿真计算的地面最小可分辨长度为 0.0366 m 。

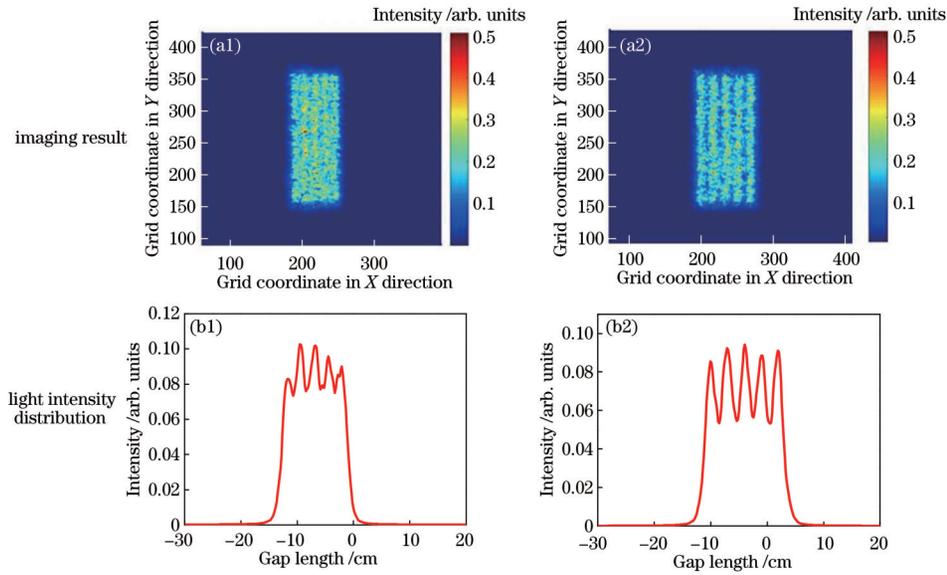


图 6 30 km 传输距离下的成像结果及其二维光强分布。(a1)(a2)条纹及间隔宽度为0.028 m;(b1)(b2)条纹及间隔宽度为0.035 m
 Fig. 6 Imaging result and two-dimensional light intensity distribution at 30 km transmission distance. (a1)(a2) Width of fringe and interval is 0.028 m; (b1)(b2) width of fringe and interval is 0.035 m

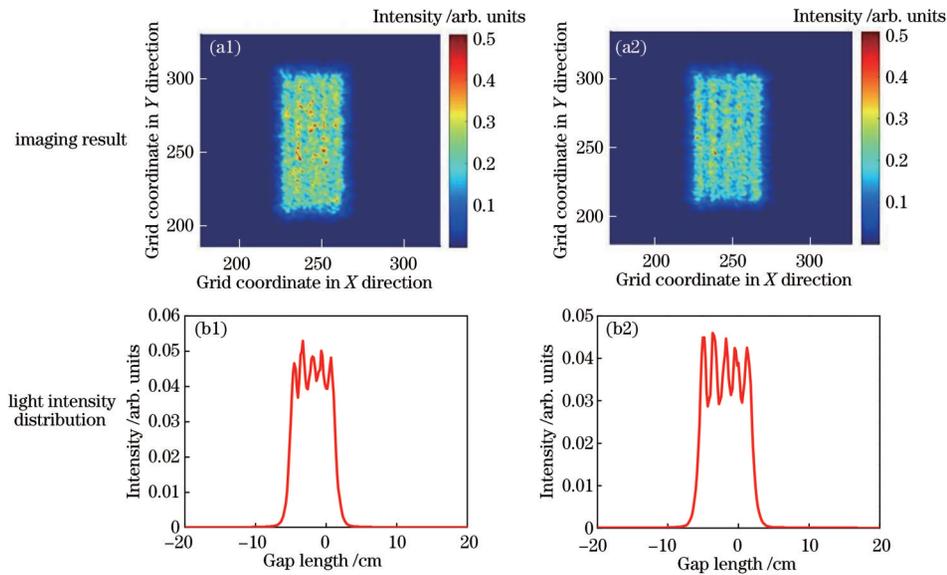


图 7 50 km 传输距离下的成像结果及其二维光强分布。(a1)(a2)条纹及间隔宽度为0.0305 m;(b1)(b2)条纹及间隔宽度为0.0366 m
 Fig. 7 Imaging result and two-dimensional light intensity distribution at 50 km transmission distance. (a1)(a2) Width of fringe and interval is 0.0305 m; (b1)(b2) width of fringe and interval is 0.0366 m

在不同高度下设置不同的网格尺寸,并对不同条纹及间距宽度的物体进行仿真,来计算 HV5/7 模型在不同传输距离下最小可分辨长度的结果,其与理论计算的结果同时显示在表 2 中。从表 2 中数据可以看出,仿真计算结果与理论结果具有较好的一致性。当传输距离从 5 km 增加到 30 km 时,理论和仿真计算的地面物体最小可分辨长度随传输距离的增加而显著增加。当传输距离大于 30 km 时,最小可分辨长度逐渐趋于一稳定值,随高度的变化其变化很小。

采用同样的方法对合肥夜间模型和合肥白天模型进行仿真,将三种湍流模型条件下得到的数值仿真结

果和理论计算结果同时显示在图 8 中。可以看出:对于 20 km 以下的传输距离,最小可分辨长度随传输距离的增加而显著增加;在 20~50 km 的传输距离下,最小可分辨长度缓慢增加;对于 50 km 以上的传输距离,最小可分辨长度趋于一稳定值,不再随距离的变化而变化。由此可见,在空基光学成像系统中,对于 50 km 以下的传输距离,大气湍流对成像质量的影响不可忽略。对于合肥模型,当在 80 km 传输距离下对物体进行成像时,白天模型湍流强,可识别的最小可分辨长度为 7.3 cm 左右,而夜间模型湍流弱,可识别的最小分辨长度能够达到 2.3 cm,分辨能力是白天模型的 3 倍

表 2 HV5/7 模型在不同传输距离下大气湍流成像的地面最小可分辨长度结果

Table 2 Results of minimum resolvable length of ground object in atmospheric turbulence imaging under different transmission distances by HV5/7 model

Transmission distance /km	Grid size /m	Distinguishable mesh number	Theoretical minimum resolvable length /m	Actual minimum resolvable length /m
5	0.00213	4	0.00849	0.00852
10	0.00373	4	0.01497	0.01492
15	0.00382	6	0.02684	0.02292
20	0.00540	5	0.03329	0.02700
30	0.00700	5	0.03505	0.03500
40	0.00702	5	0.03505	0.03510
50	0.00610	6	0.03503	0.03660
60	0.00730	5	0.03503	0.03650
70	0.00740	5	0.03503	0.03700
80	0.00740	5	0.03503	0.03700

左右。较弱的大气湍流对空基光学系统地面分辨率的影响为 2~3 cm, 较强的大气湍流对空基光学系统地面分辨率的影响可达 7~10 cm, 即对地面分辨率为亚米级的光学系统来说, 大气湍流对成像质量的影响不可忽略。图 8 中数值仿真结果与理论计算结果存在微小偏差的原因: 一是理论计算过程中采用了很多的近似; 二是数值仿真过程中相位屏的网格大小不可能无限小, 且条纹图像的间距取网格大小的整数倍, 会使结果存在一定的偏差。

3.3 对流层顶的高空湍流对成像质量的影响

根据大气折射率结构常数模型 C_n^2 公式的各项含义, 可计算对流层顶高空湍流对成像结果的影响。图 9 为合肥白天模型下无对流层顶高空湍流和有对流层顶高空湍流的仿真成像结果。图 10 展示了上述两种情况下最小可分辨长度随传输距离的变化。在 80 km 的传输距离下, 无高空湍流时最小可分辨长度为 5.18 cm, 而有高空湍流时最小可分辨长度为

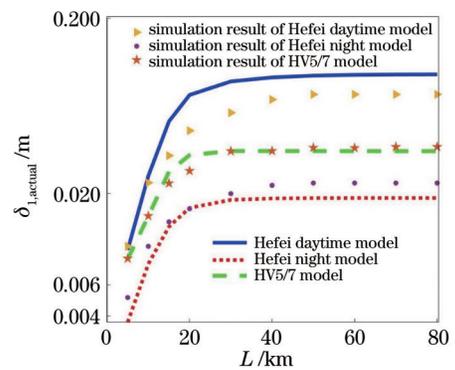


图 8 不同湍流模型下最小可分辨长度随传输距离的变化
Fig. 8 Minimum resolvable length varying with transmission distance under different turbulence models

7.30 cm。此时, 与有高空湍流的情况相比, 无高空湍流时的分辨能力提升为 1.4 倍左右。由此可见, 对流层顶的高空湍流对成像分辨率的影响是显著的。

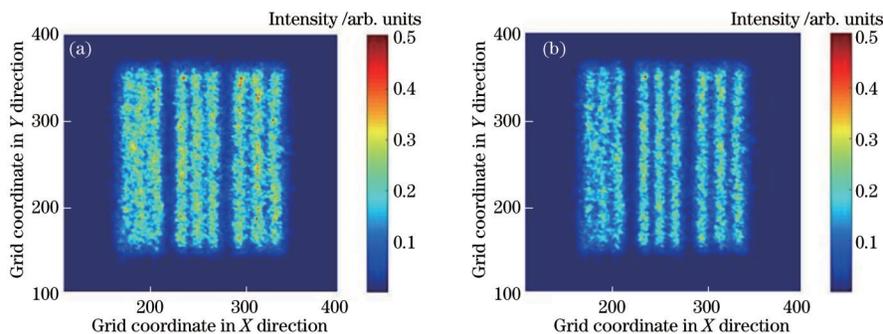


图 9 成像结果。(a) 有高空湍流; (b) 无高空湍流
Fig. 9 Imaging results. (a) Adding upper tropopause turbulence; (b) ignoring upper tropopause turbulence

4 结 论

当成像系统与待成像目标之间存在大气干扰时, 大气湍流效应会导致成像质量退化。基于光波传输仿真模型, 用多层湍流相位屏来表示大气传输路径上湍流引起的相位扰动, 仿真计算了合肥白天模型、合肥夜

间模型和 HV5/7 模型下大气湍流对成像质量的影响。仿真结果表明: 系统口径 D 越大, 成像质量越高, 最佳口径大小为 $2r_0$; 当口径增大到 $2r_0$ 时, 再增大口径并不能提升分辨率, 此时成像分辨率主要受大气湍流的影响。进一步研究的结果表明, 空基光学成像系统合肥夜间模型分辨能力是白天模型的 3 倍左右, 对地面分

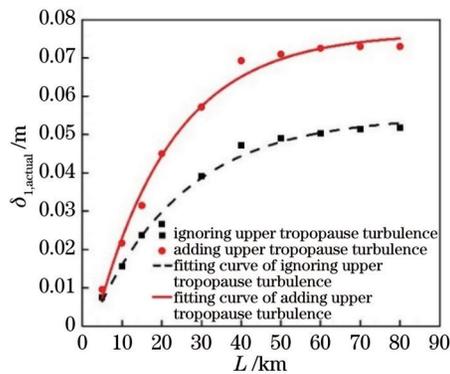


图 10 有无对流层顶高空湍流时最小可分辨长度随传输距离的变化

Fig. 10 Minimum resolvable length varying with transmission distance when adding upper tropopause turbulence and ignoring upper tropopause turbulence

分辨率为亚米级的光学系统来说,大气湍流对成像质量的影响不可忽略。此外,对流层顶的高空湍流对成像质量的影响较为显著,在忽略此高空湍流的情况下,分辨率可提升 1.4 倍左右。后续将根据仿真结果寻求降低或消除大气湍流对成像质量影响的方法,提高空基光学系统的成像分辨率和成像效果,同时将进一步开展空基光学成像系统的参数优化设计研究。

参 考 文 献

- [1] Strohbehn J W. Laser beam propagation in the atmosphere[M]. Heidelberg: Springer, 1978: 129-170.
- [2] Roggemann M C, Welsh B. Image through turbulence [M]. Tokyo: CRC Press, 1996: 57-120.
- [3] 张逸新. 随机介质中光的传播与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
Zhang Y X. Optical transmission and imaging in random media[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [4] Lutomirski R F. Atmospheric degradation of electrooptical system performance[J]. Applied Optics, 1978, 17(24): 3915-3921.
- [5] 张洪建. 大气湍流对光学成像系统分辨率的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 19-31.
Zhang H J. The effects on resolution of optical imaging system in atmospheric turbulence[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015: 19-31.
- [6] 阎吉祥, 俞信. 大气湍流对遥感系统分辨力的影响[J]. 光学技术, 2004, 30(1): 68-69.
Yan J X, Yu X. Effect of the turbulence on the image resolution of the remote sensing system[J]. Optical Technique, 2004, 30(1): 68-69.
- [7] 张晓芳, 俞信, 阎吉祥. 大气湍流对光学系统图像分辨力的影响[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 263-265.
Zhang X F, Yu X, Yan J X. Influence of atmospheric turbulence on image resolution of optical sensing system [J]. Optical Technique, 2005, 31(2): 263-265.
- [8] 孙晶, 黄普明, 玄周石. 大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0301003.
- [9] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Performance of satellite-to-ground laser communications under the influence of atmospheric turbulence and platform micro-vibration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0301003.
- [10] Fried D L. Propagation of a spherical wave in a turbulent medium[J]. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(2): 175-180.
- [11] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(10): 1372-1379.
- [12] 张逸新, 孙寅. 湍流尺度对大气成像系统分辨率的影响[J]. 中国激光, 2000, 27(7): 655-659.
Zhang Y X, Sun Y. Effects of the scale of turbulence on optical resolution of imaging system in turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(7): 655-659.
- [13] 张逸新, 朱拓, 陶纯堪. 湍流大气成像系统分辨率的研究[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(4): 1-4.
Zhang Y X, Zhu T, Tao C K. Study of the optical resolution of imaging system in turbulence[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2004, 2(4): 1-4.
- [14] 邹皓, 李清瑶, 赵群, 等. 大气湍流参数对图像退化效果影响的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(4): 95-99.
Zou H, Li Q Y, Zhao Q, et al. Research on influence of atmospheric turbulence parameters on image degradation [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(4): 95-99.
- [15] 韦宏艳, 闫玢霖, 贾鹏, 等. 聚焦贝塞尔光束在大气湍流中的螺旋相位谱[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2401001.
Wei H Y, Yan J L, Jia P, et al. Spiral phase spectrum of focused Bessel beams in atmospheric turbulence channel [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2401001.
- [16] 王英俭, 时东锋. 大气对光学成像的影响及校正技术[J]. 量子电子学报, 2020, 37(4): 409-417.
Wang Y J, Shi D F. Atmospheric effects on optical imaging and correction techniques[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(4): 409-417.
- [17] 王英俭, 吴毅, 龚知本. 自适应光学系统的数值模型[J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(1): 59-64.
Wang Y J, Wu Y, Gong Z B. A numerical model for adaptive optics system[J]. High Power Laser & Particle Beams, 1994, 6(1): 59-64.
- [18] 赵延庚, 董冰, 刘明, 等. 可抑制大气湍流影响的深度学习计算鬼成像[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1111001.
Zhao Y G, Dong B, Liu M, et al. Deep learning based computational ghost imaging alleviating the effects of atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1111001.
- [19] 李庆菲, 朱志超, 方帅. 大气湍流退化图像的复原研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(1): 80-82, 127.
Li Q F, Zhu Z C, Fang S. Research on atmospheric

- turbulence degraded image restoration[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2011, 34(1): 80-82, 127.
- [19] 王英俭, 范承玉, 魏合理. 激光在大气和海水中的传输及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 25-30.
Wang Y J, Fan C Y, Wei H L. Laser beam propagation and applications through the atmosphere and sea water [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 25-30.
- [20] 王仁礼, 郝振纯, 陈波, 等. 大气湍流对天基遥感系统地面分辨率的影响[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(2): 114-117.
Wang R L, Hao Z C, Chen B, et al. Effect of atmospheric turbulence on image ground-resolution of space-based remote sensing system[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009, 26(2): 114-117.
- [21] Hufnagel R E, Stanley N R. Modulation transfer function associated with image transmission through turbulent media[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(1): 52.
- [22] 孙刚, 翁宁泉, 肖黎明. 合肥地区大气折射率结构常数高度分布模式[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(2): 183-188.
Sun G, Weng N Q, Xiao L M. Vertical distribution models of atmospheric structure constant of refractive index[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2): 183-188.
- [23] 代雅茹. 青藏高原气溶胶和水汽的多波长激光雷达探测研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2019: 21-23.
Dai Y R. Study on aerosol and water vapor in Tibet plateau by multi-wavelength lidar[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2019: 21-23.
- [24] 王涛. 亚米级空间分辨率光学卫星影像大气辐射校正研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 12-14.
Wang T. Research on atmospheric radiation correction of optical satellite imagery with sub-meter spatial resolution [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 12-14.
- [25] 魏合理, 陈秀红, 饶瑞中. 通用大气辐射传输软件 CART 介绍[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 446-450.
Wei H L, Chen X H, Rao R Z. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(6): 446-450.
- [26] 王英俭, 吴毅. 扩展物体漫反射光传输及成像的数值模拟研究[J]. 光学学报, 1998, 18(10): 1470-1472.
Wang Y J, Wu Y. Numerical simulation of propagation of diffuse reflection light of extended object[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(10): 1470-1472.
- [27] 王彩玉, 苑克娥, 时东锋, 等. 差分波前激光雷达探测大气湍流廓线仿真[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1001002.
Wang C Y, Yuan K E, Shi D F, et al. Simulation of atmospheric turbulence profile measured by differential wavefront lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1001002.
- [28] 钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中. 非均匀湍流路径上光传播数值模拟的相位屏分布[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6633-6639.
Qian X M, Zhu W Y, Rao R Z. Phase screen distribution for simulating laser propagation along an inhomogeneous atmospheric path[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6633-6639.
- [29] 黄印博. 高能激光近地面稠密大气传输及其相位校正的若干分析[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005.
Huang Y B. Study on HEL propagation and its phase compensation in the dense atmosphere near the ground [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [30] 黄印博, 王英俭. 激光大气传输数值模拟中对计算参量的选取[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 23-27.
Huang Y B, Wang Y J. Choosing computing parameters in the numerical simulation of laser propagation effects[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1): 23-27.
- [31] Martin J M, Flatté S M. Intensity images and statistics from numerical simulation of wave propagation in 3-D random media[J]. Applied Optics, 1988, 27(11): 2111-2126.
- [32] 赵凯华, 钟锡华. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008: 228-230.
Zhao K H, Zhong X H. Optics[M]. Beijing: Peking University Press, 2008: 228-230.