

上行链路大气波前畸变对剪切光束成像技术的影响

兰富洋 罗秀娟 樊学武 张羽 陈明徕 刘辉 贾辉

Effect of uplink atmospheric wavefront distortion on image quality of sheared-beam imaging

Lan Fu-Yang Luo Xiu-Juan Fan Xue-Wu Zhang Yu Chen Ming-Lai Liu Hui Jia Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 204201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181144

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181144>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[用于大景深单分子定位显微的多功能全息相位片的设计及数值模拟](#)

Design and numerical simulation demonstration of multi-functional holographic phase plate for large depth of field single molecular localization microscopy

物理学报.2018, 67(17): 174202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180569>

[采用衍射掩模产生白光横向平顶光束](#)

Horizontal white light flat-topped beams produced by the diffraction mask

物理学报.2018, 67(14): 144202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180030>

[基于最优化线性波数光谱仪的谱域光学相干层析成像系统](#)

Optimized linear wavenumber spectrometer based spectral-domain optical coherence tomography system

物理学报.2018, 67(10): 104208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172606>

[基于位相变更的非相干数字全息自适应成像](#)

Adaptive imaging by incoherent digital holography based on phase change

物理学报.2018, 67(4): 044202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172202>

[对称照明在傅里叶叠层成像中的应用](#)

Symmetric illumination in Fourier ptychography

物理学报.2017, 66(22): 224201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.224201>

上行链路大气波前畸变对剪切光束成像技术的影响

兰富洋¹⁾²⁾ 罗秀娟^{1)†} 樊学武¹⁾ 张羽¹⁾ 陈明徕¹⁾ 刘辉¹⁾ 贾辉¹⁾²⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2018年6月11日收到; 2018年7月12日收到修改稿)

剪切光束成像 (sheared-beam imaging, SBI) 技术是一种利用三束剪切相干激光照明的非传统成像技术, 该技术通过探测器阵列接收目标反射回波的散斑图进行计算成像, 在对远距离暗弱目标高分辨率成像方面有着独特的优势. 大气湍流引起的光束波前畸变是影响 SBI 成像质量的一个关键因素, 因此本文从湍流引起的激光波前畸变对目标频谱信息提取的影响入手, 建立了光束波前畸变对成像影响的理论模型. 利用多层相位屏模型模拟了近地 25 km 大气对 SBI 光束传输的影响. 通过计算机仿真, 得到了不同激光发射孔径和不同成像距离时 SBI 的成像结果. 仿真结果表明, 选取合适的发射孔径尺寸可以有效缓解湍流对光束波前质量的影响, 从而提升成像质量. 在 Hutchin 的研究基础上, 对孔径选择范围的已有研究成果进行了扩展与深化. 给出了 SBI 系统发射孔径尺寸选取的建议, 为 SBI 对不同高度目标成像的像质差异分析提供了参考.

关键词: 剪切光束成像, 波前畸变, 大气湍流, 相位起伏

PACS: 42.30.-d, 42.68.Bz, 42.30.Kq, 42.25.-p

DOI: 10.7498/aps.67.20181144

1 引言

大气的湍流效应严重制约了地基光学成像系统的成像能力, 为了实现对空间目标的高分辨率成像, 需要同时突破光学系统口径和大气湍流影响这两方面的限制. 近几十年来, 在研究人员不断增大望远镜口径并结合自适应光学技术试图解决这一问题的同时, 采用激光主动照明的非传统成像技术以其独有的优势^[1]受到了人们的关注. 剪切光束成像 (sheared-beam imaging, SBI) 技术^[2,3]便是其中的一种. 该技术不需要精密的光学成像器件, 通过发射微小频移的剪切光束和接收散斑拍频信号进行计算成像, 不仅能通过主动成像方式对空间暗弱目标进行观测, 而且继承了激光干涉成像技术分辨率高的优势. 同时, 其相位差测量方法能有效补偿下行链路大气湍流对成像的影响. 随着当前激光器技术的发展, SBI 成为最具前景的远程激光干涉

成像技术之一. 目前, SBI 还有很多技术和工程问题待解决, 尚处于探索研究阶段.

通过对 SBI 成像机理的研究, 发现 SBI 成像质量与照射到目标面上光波的波前质量密切相关. 在 SBI 成像过程中, 光束波面受到大气湍流相位起伏效应的影响而产生畸变, 最终导致到达目标面上的波前质量下降, 这将对目标信息的准确获取产生不利影响. 本文首先从成像原理入手, 分析了上行链路大气湍流引起的波前相位畸变对 SBI 成像性能的影响, 然后通过计算机仿真研究了湍流环境下, 激光发射孔径尺寸和目标高度对成像结果的综合影响, 并给出了相应结论.

2 成像原理

SBI 成像原理如图 1 所示^[4], 三束具有微小频差的激光从不同孔径发射同时照射到目标上, 发射孔径以“L”形式分布, 间距分别为 s_x, s_y . 每一束光

† 通信作者. E-mail: xj_luo@opt.ac.cn

的反射回波中都包含目标信息^[5], 最终三束光的反射回波在接收面上叠加干涉. 对探测器阵列接收到的回波信号进行解调^[6], 即可得到目标的傅里叶频谱信息, 最后利用傅里叶逆变换重构目标图像^[7].

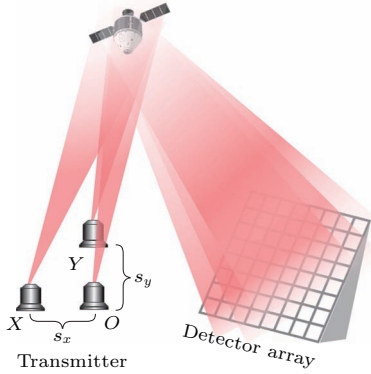


图1 SBI成像原理示意图^[4]

Fig. 1. Schematic of SBI principle^[4].

三束光在目标表面叠加的光场可表示为^[8]

$$E = E_o \exp[j(\mathbf{k}_o \cdot \mathbf{r}_o - \omega_o t)] + E_x \exp[j(\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{r}_x - \omega_x t)] + E_y \exp[j(\mathbf{k}_y \cdot \mathbf{r}_y - \omega_y t)], \quad (1)$$

式中 E_o 和 ω_o 为 O 光的振幅及角频率; E_x, E_y 和 ω_x, ω_y 分别为 X 光和 Y 光的振幅与角频率; \mathbf{k}_i ($i = o, x, y$) 分别为三束光的波矢; \mathbf{r}_i 表示从发射孔到目标表面的位移矢量; t 为时间. 经目标反射后, 反射回波到达接收平面时的光场为

$$U(x, y) = E_o \exp(-j\omega_o t) F_o + E_x \exp(-j\omega_x t) F_x + E_y \exp(-j\omega_y t) F_y. \quad (2)$$

式中 (x, y) 为接收平面坐标; F_o, F_x 和 F_y 为每束光携带的目标傅里叶频谱, 表达式分别为

$$F_o = \iint O(x', y') \exp\left[-j2\pi \frac{(xx' + yy')}{\lambda R}\right] dx' dy',$$

$$F_x = \iint O(x', y') \times \exp\left[-j2\pi \frac{(x + s_x)x' + yy'}{\lambda R}\right] dx' dy',$$

$$F_y = \iint O(x', y') \times \exp\left[-j2\pi \frac{xx' + (y + s_y)y'}{\lambda R}\right] dx' dy', \quad (3)$$

其中 (x', y') 为目标面坐标; $O(x', y')$ 为目标表面反射率分布; R 为成像距离; λ 为波长. 将(3)式改写

成复振幅的形式

$$F_o = A_o \exp(j\phi),$$

$$F_x = A_x \exp(j\phi_x),$$

$$F_y = A_y \exp(j\phi_y). \quad (4)$$

则在探测器阵列平面上可以接收到随时间变化的光强为

$$I(x, y, t) = UU^* = E_o^2 A_o^2 + E_x^2 A_x^2 + E_y^2 A_y^2 + E_o E_x A_o A_x [\exp(j\Delta\Phi_1) \exp(j\delta\omega_1 t) + \exp(-j\Delta\Phi_1) \exp(-j\delta\omega_1 t)] + E_o E_y A_o A_y [\exp(j\Delta\Phi_2) \exp(j\delta\omega_2 t) + \exp(-j\Delta\Phi_2) \exp(-j\delta\omega_2 t)] + E_x E_y A_x A_y [\exp(j\Delta\Phi_3) \exp(j\delta\omega_3 t) + \exp(-j\Delta\Phi_3) \exp(-j\delta\omega_3 t)] = E_o^2 A_o^2 + E_x^2 A_x^2 + E_y^2 A_y^2 + 2E_o E_x A_o A_x \cos(\Delta\Phi_1 + \delta\omega_1 t) + 2E_o E_y A_o A_y \cos(\Delta\Phi_2 + \delta\omega_2 t) + 2E_x E_y A_x A_y \cos(\Delta\Phi_3 + \delta\omega_3 t), \quad (5)$$

其中 $\delta\omega_1 = \omega_x - \omega_o$, $\delta\omega_2 = \omega_y - \omega_o$, $\delta\omega_3 = \omega_y - \omega_x$, 且有

$$\Delta\Phi_1 = \phi - \phi_x = \phi(x, y) - \phi(x + s_x, y),$$

$$\Delta\Phi_2 = \phi - \phi_y = \phi(x, y) - \phi(x, y + s_y),$$

$$\Delta\Phi_3 = \phi_x - \phi_y = \phi(x + s_x, y) - \phi(x, y + s_y). \quad (6)$$

对光强信号 $I(x, y, t)$ 进行解调, 根据光束间的已知频差可提取出 $\Delta\Phi_1$ 和 $\Delta\Phi_2$, 此即为目标频谱面上每一点与相邻点间的相位差, 其关系如图2所示. 根据频谱面各点间相位差关系, 通过多次循环迭代即可得到目标频谱的相位分布. 最后结合解调出的振幅信息还原完整的目标频谱, 通过傅里叶逆变换重构出目标图像.

光束通过大气传播时其相位受到显著影响而强度基本保持不变. SBI根据回波幅值与相位恢复目标信息成像的原理, 决定了成像结果会受到光波相位畸变的影响. 对于下行链路, 每个探测器单元所接收到的反射回波均经历了相同的大气环境, 回波散斑之间的相位差不变, 因此下行链路大气湍流

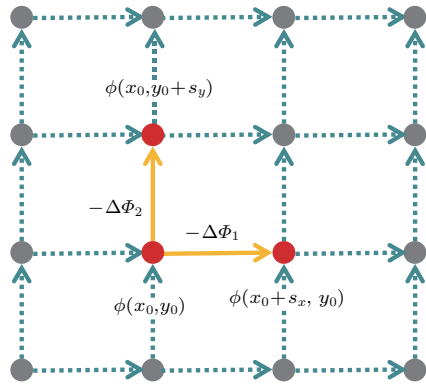


图2 相位复原方法示意图

Fig. 2. Schematic of phase reconstruction method.

并不影响反射回波间相位差的准确提取^[9]. 而对于上行链路, 每束光经历了不同的大气路径, 这给每束光所携带的目标信息引入了相位畸变, 得到的目标频谱相位也将与真实相位产生偏离, 势必导致重构图像质量的下降, 因此本文着重考虑上行链路大气引起的波前畸变. 这里采用目标图像与重构图像的Strehl比来衡量湍流对SBI成像质量的影响. Strehl比的定义为

$$S(A, B) = \frac{\left[\iint A(m, n) \cdot B(m, n) dm dn \right]^2}{\iint A(m, n)^2 dm dn \times \iint B(m, n)^2 dm dn}, \quad (7)$$

其值在0—1之间. 对于目标图像 $A(m, n)$ 和重构图像 $B(m, n)$, 二者强度分布越相似, 其Strehl比值越趋近于1^[10], 表明成像质量越好.

3 波前畸变影响分析

激光在湍流大气中传播时, 受大气折射率分布随机起伏的影响, 光束截面内不同部分所经历的光程存在差异, 最终导致光波前相位分布的随机起伏. 本节基于上行链路大气湍流的影响, 建立波前畸变对目标频谱影响的理论模型, 为便于分析, 将模型简化, 仅考虑湍流最终对目标面上波前造成的影响.

首先考虑大气低阶扰动的影响(图3), 即湍流仅导致SBI各路光束的波前随机地整体提前、滞后或倾斜, 这种低阶扰动使不同光束间的波前相位差为常数, 此时目标面上光场可表示为

$$E = E_o \exp[-j(\mathbf{k}_o \cdot \mathbf{r}_o + \omega_o t)] + E_x \exp[-j(\mathbf{k}_x \cdot \mathbf{r}_x + \omega_x t + \beta_1)]$$

$$+ E_y \exp[-j(\mathbf{k}_y \cdot \mathbf{r}_y + \omega_y t + \beta_2)], \quad (8)$$

式中 β_1, β_2 代表后两束光的波前相对于第一束光波前的活塞相位差^[11](gross-piston phase difference), 根据(5)式可得最终接收到的光强信号为

$$I(x, y, t) = 2E_o E_x A_o A_x \cos(\Delta\Phi_1 + \delta\omega_1 t + \beta_1) + 2E_o E_y A_o A_y \cos(\Delta\Phi_2 + \delta\omega_2 t + \beta_2) + 2E_x E_y A_x A_y \cos(\Delta\Phi_3 + \delta\omega_3 t + \Delta\beta_{12}), \quad (9)$$

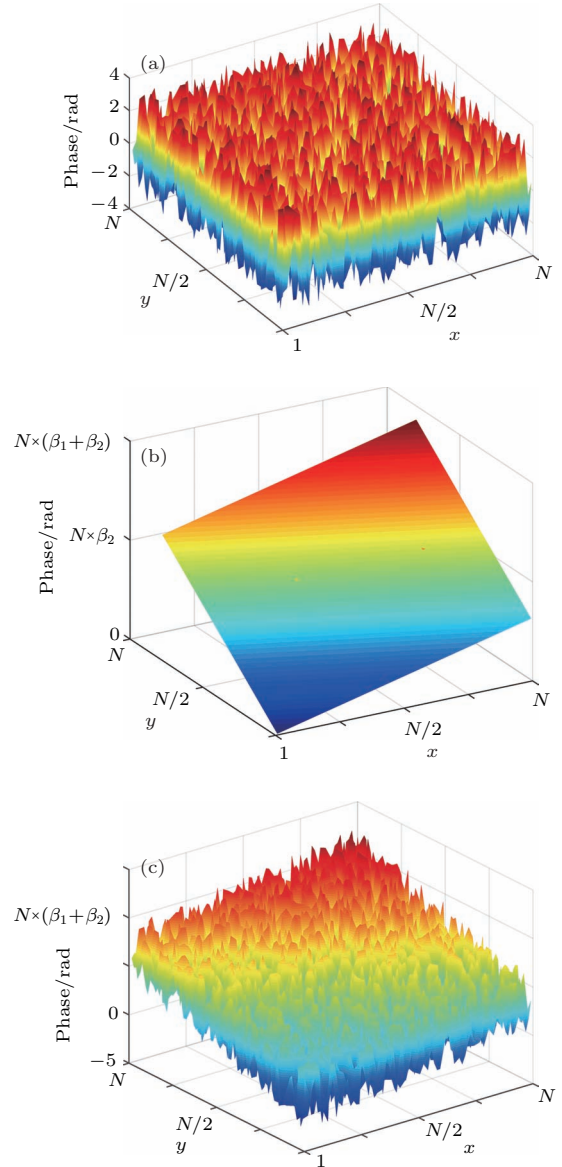


图3 大气低阶扰动对目标频谱相位的影响 (a) 理想目标频谱相位; (b) 大气低阶扰动引入的误差相位; (c) 实际得到的目标频谱相位

Fig. 3. Influence of low-order atmospheric turbulence on spectrum phase: (a) Distribution of target ideal spectrum phase; (b) distribution of phase error induced by low-order atmospheric turbulence; (c) actual target spectrum phase distribution with phase error.

其中 $\Delta\beta_{12} = \beta_2 - \beta_1$. 这样根据光束间的已知频差从时序光强信号 $I(x, y, t)$ 中提取到的相位不再是目标频谱面上相邻点间的相位差 $\Delta\Phi_1$ 和 $\Delta\Phi_2$, 而是包含波前相位偏移的复合相位差 $\Delta\Phi_1 + \beta_1$ 和 $\Delta\Phi_2 + \beta_2$. 此时所得频谱相位分布为原始相位与所引入的误差相位的叠加(图 3(c)), 尺寸为 $N \times N$, 误差相位的分布如图 3(b) 所示, 其为一斜面, 斜率由 β_1, β_2 决定.

若理想情况下目标频谱相位为 $\phi(x, y)$, 则受误差相位影响后的目标频谱相位表达式为 $\phi(x, y) + \beta_1 x + \beta_2 y$, 将该畸变相位代入目标重构公式可得

$$O' = F^{-1}\{A_o \exp[j\phi(x, y)] \times \exp[j(\beta_1 x + \beta_2 y)]\}, \quad (10)$$

式中 $F^{-1}\{\dots\}$ 为傅里叶逆变换; 根据傅里叶变换的相移定理^[12], O' 实际上是真实目标图像在 x, y 方向上的平移, 如图 4 所示, 偏移量分别由 β_1 和 β_2 决定.

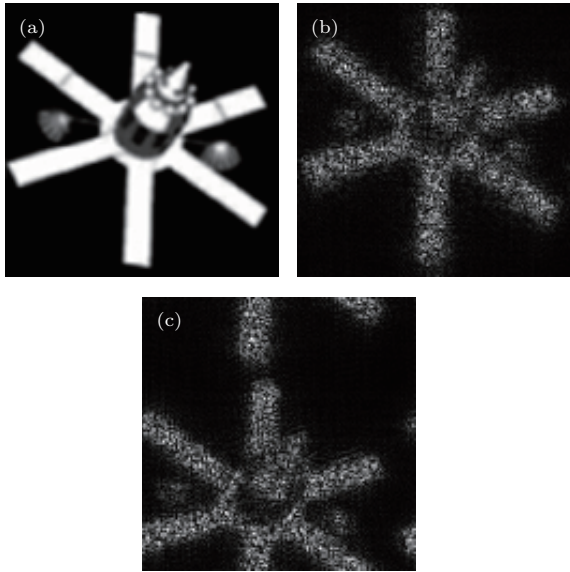


图 4 大气低阶扰动对成像的影响 (a) 目标图像; (b) 无湍流情况下单次成像结果; (c) 大气低阶扰动下单次成像结果

Fig. 4. Influence of low-order atmospheric turbulence on imaging: (a) Target image; (b) reconstructed image from a single shot without turbulence; (c) reconstructed image from a single shot with the influence of low-order atmospheric turbulence.

由此可知, 大气低阶扰动引起的光束波前相位整体偏移并不影响成像质量, 仅使重构图像中目标位置发生平移. 由于 SBI 需要通过叠加平均多幅重构图像来消除散斑效应^[13], 而这种相位随机抖动

使每幅重构图像中目标的位置都不同, 不可直接进行叠加. 可利用图像配准技术使每幅图像中目标位置得以匹配, 然后对叠加后的图像周期延拓, 截取完整目标.

对于大气高阶扰动的影响, 当三束光经历不同的湍流路径到达目标面时, 光束波前不同位置的相位受高阶扰动影响产生随机抖动, 不同光束间的波前相位差不再是常数. 此时接收面上的光场为

$$U(x, y) = E_o \exp(-j\omega_o t) \iint O(x', y') \exp[j\beta_o(x', y')] \times \exp\left[-j2\pi \frac{(xx' + yy')}{\lambda R}\right] dx' dy' + E_x \exp(-j\omega_x t) \iint O(x', y') \exp[j\beta_x(x', y')] \times \exp\left[-j2\pi \frac{(x + s_x)x' + yy'}{\lambda R}\right] dx' dy' + E_y \exp(-j\omega_y t) \iint O(x', y') \exp[j\beta_y(x', y')] \times \exp\left[-j2\pi \frac{xx' + (y + s_y)y'}{\lambda R}\right] dx' dy', \quad (11)$$

式中 β_i ($i = o, x, y$) 为由不同路径湍流引起的高阶波前相位畸变分布. 式中每一项频谱的复振幅分量都引入了与 β_i ($i = o, x, y$) 有关的随机相移, 这样探测器阵列所接收到的频谱是由存在不同程度误差的复振幅分量叠加而成的, 与真实目标频谱存在偏差, 且这种偏差会随着波前相位畸变的加剧而变得更为严重. 湍流引起的波前相位畸变程度用波前畸变均方根值 (root mean square, RMS)^[14] 来衡量, 对三种目标进行仿真, 不同程度波前畸变对成像质量的影响如图 5 所示.

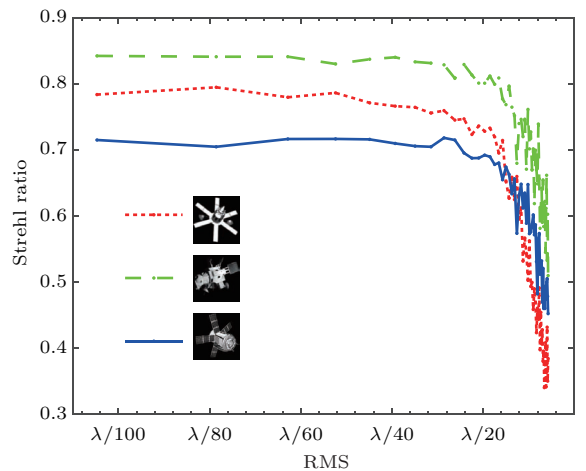


图 5 目标面波前质量对成像的影响

Fig. 5. Dependence of image Strehl ratio on wavefront RMS.

从图5可以看出,对于不同目标,当波前RMS小于 $\lambda/20$ 时,随着RMS的增大,重构图像Strehl比值整体变化不明显,仅在接近 $\lambda/20$ 时出现轻微下降的趋势,此时波前畸变引起的目标频谱误差较小,对成像质量无明显影响;而当波前RMS大于 $\lambda/20$ 时,重构图像Strehl比值迅速下降,此时波前相位畸变引起的目标频谱误差较大,对成像影响显著.

目标面上的光波前是由透过大气后的波前在真空中衍射传播形成的.因此,目标面上波前质量也是由透过大气后光束波前质量和衍射传播距离共同决定的.对于透过大气后光束的波前质量,其除受大气湍流强度影响外,还与激光发射孔径尺寸有关,当发射孔径尺寸在大气相干长度之内时,光束波前主要受大气低阶扰动的影响;而当发射孔径尺寸超出大气相干长度后,光束波前受大气高阶扰动的影响显著,且随着孔径尺寸的增大波前相位畸变程度加剧.然而,即使透过大气后光束波前质量较差,经过远距离的衍射传播到达目标面时仍可能衍射出较好的波前[15].

综上所述,目标面波前质量实际上是由湍流强度,发射孔径尺寸和成像距离共同决定的.因此在实际应用中,除了将SBI系统建设在湍流较小的地区,还应根据成像距离选择合适的激光发射孔径,进一步缓解湍流对波前的影响,Hutchin在经典文献[15]中指出,只要将SBI发射孔径直径控制在0.2—2.0倍的大气相干长度 r_0 内,经过衍射传播后,光束中心区域就能够形成近乎完美的波前.本文在Hutchin研究的基础上,对不同轨道高度的目标进行成像仿真,以研究湍流环境下发射孔径尺寸对不同高度目标成像质量的影响.

4 仿真研究

4.1 大气湍流的多层相位屏模拟

大气湍流主要发生在离地面垂直高度20 km以下,且随着高度的增加而减弱.通常用大气折射率结构常数 C_n^2 评价湍流强度,若 C_n^2 越小,则湍流越弱.本文大气折射率结构常数 C_n^2 采用经典的Hufnagel-Valley模型[16]

$$C_n^2(h) = 0.00594(w/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100), \quad (12)$$

式中 h 为高度; w 为与高空风速有关的参数; A 为地平面上的 C_n^2 值.

这里利用多层相位屏模拟垂直高度25 km内的大气湍流,相位屏的个数和位置通过等Rytov指数间隔[17]的方法设置,Rytov指数的定义为[18]

$$\sigma_R^2(\Delta h_i) = 1.23C_n^2(h_i)k^{7/6}(\Delta h_i)^{11/6}, \quad (13)$$

式中 Δh_i 为第 i 层大气的高度; $C_n^2(h_i)$ 为第 i 层大气折射率结构常数的路径平均值; k 为波数.等Rytov指数是指选取合适的 Δh_i 使每一层Rytov指数 $\sigma_R^2(\Delta h_i)$ 的值相等,通常 $\sigma_R^2(\Delta h_i)$ 应小于0.1,且不超过全路径上光强起伏的10%,即[19]

$$\begin{cases} \sigma_R^2(\Delta h) < 0.1, \\ \sigma_R^2(\Delta h) < 0.1\sigma_R^2(L), \end{cases} \quad (14)$$

其中 L 为光束在大气中的传播距离.这里每层大气的Rytov指数取为0.001,将大气分为25层,每层高度分布如图6所示,可见该方法不仅充分考虑了全路径上不同高度的大气区域,而且根据区域内湍流的强弱设置不同数目的相位屏以实现充分采样.由Hufnagel-Valley模型和所模拟的大气总高度决定的总的大气相干长度 r_0 为11.6 cm,属于一般情况的大气条件.选用Kolmogorov谱作为大气湍流功率谱模型,通过快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)谱反演法生成每一层的相位屏,光束在相位屏间按菲涅耳衍射进行传播[20].

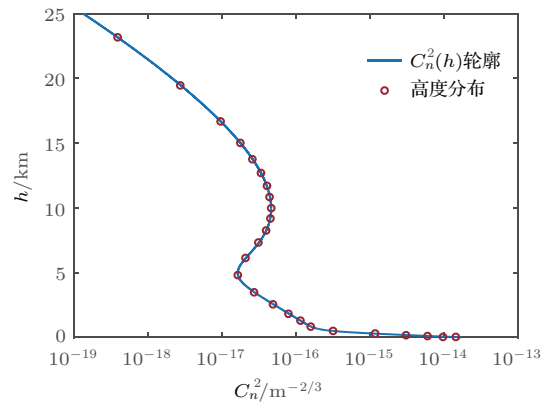


图6 C_n^2 高度廓线与分层高度

Fig. 6. Phase screen heights with a plot of C_n^2 profile overlaid.

4.2 仿真结果与分析

利用4.1节的湍流模型生成不同高度目标面上的波前,目标高度范围为300—1000 km,目标尺寸2 m,激光波长1064 nm,SBI系统探测器阵列维数为 80×80 ,根据本文模拟的 $r_0 = 11.6$ cm与

Hutchin^[15]给出的孔径选择范围,发射孔径直径在3—23 cm选取.不同高度和发射孔径尺寸下目标面上波前RMS如图7所示,每组结果为50次仿真的均值.

从图7可以看出,随着发射孔径的增大,对于不同高度的目标,目标面波前质量均存在下降趋势.然而随着轨道高度的增加,波前质量受孔径尺寸影响程度逐渐减小.这是因为对于更高轨道的目标,光波透过大气层后传播了更远的距离,此时到达目标面上的波前主要包含初始波前的低频成分,更趋近于平面波,所以具有更好的波前质量.根据第3节中的结论,这里以波前RMS小于 $\lambda/20$ 作为能够高质量成像的条件.发现对于不同高度的目标,孔径尺寸在 r_0 以内时均能获得RMS小于 $\lambda/20$ 的波前.当轨道高度大于800 km,发射孔径直径在 $0.2r_0$ — $2r_0$ 内取值时其波前RMS均小于 $\lambda/20$;而对于高度低于800 km的目标,目标面波前质量受发射孔径影响较为明显,发射孔径直径在 $2r_0$ 附近

时波前RMS均大于 $\lambda/20$,且高度越低,RMS值越大.下面分别给出目标高度为300 km和1000 km时,采用不同发射孔径得到的成像结果,每张图像均由30次重构图像叠加平均得到.如图8、图9所示,图片上的数字为Strehl比值.

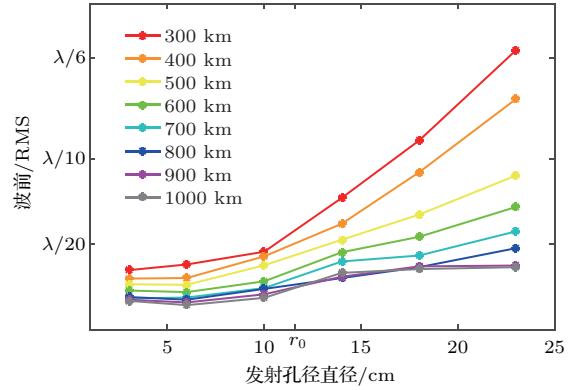


图7 不同发射孔径和目标高度下目标面波前RMS
Fig. 7. Wavefront RMS for different values of transmitting aperture diameter and target height.

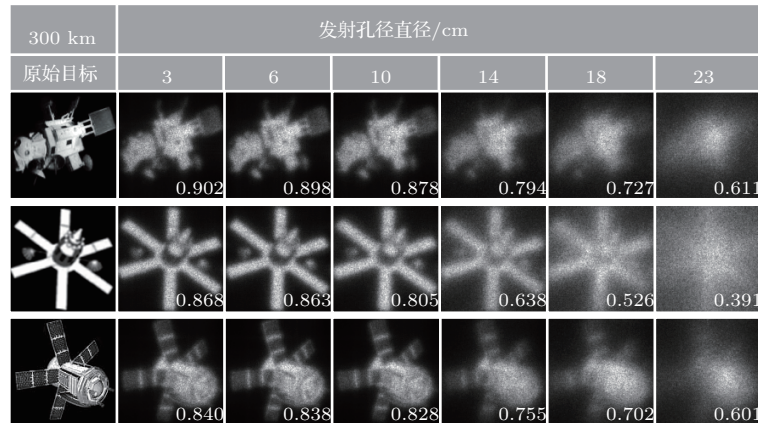


图8 300 km 高度目标在不同发射孔径下的成像结果及其 Strehl 比值

Fig. 8. Imaging results and Strehl ratio values for varying transmitting aperture diameter with target height of 300 km.

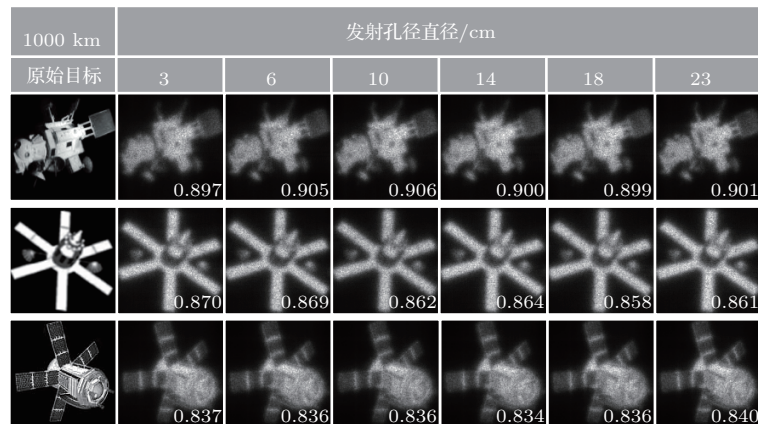


图9 1000 km 高度目标在不同孔径下的成像结果及其 Strehl 比值

Fig. 9. Imaging results and Strehl ratio values for varying transmitting aperture diameter with target height of 1000 km.

可见对于300 km高度目标,发射孔径直径超过大气相干长度后,成像质量明显下降;发射孔径直径达到 $2r_0$ 时无法识别目标;而对于1000 km高度目标,其成像质量随孔径增大无明显变化,均能重构出清晰的目标图像.因此,在根据文献[15]给出的范围选择孔径尺寸时,还需充分考虑目标高度这一因素以保证成像质量.当发射孔径直径选在 r_0 — $2r_0$ 时,对于较低高度的目标,可能会获得较差的成像质量甚至无法成像.

5 结 论

本文研究了上行链路大气湍流导致的光束波前畸变对SBI质量的影响,对成像过程进行了理论建模分析,并在不同成像条件下进行了多组仿真实验.

1) 研究表明,大气湍流引起的目标面波前畸变决定着SBI系统的成像能力.但在湍流强度一定时,通过合理选择发射孔径尺寸可以有效改善SBI成像质量.

2) 仿真结果显示,从波前质量的角度来看,为保证成像质量,发射孔径尺寸选取的上限受目标高度的制约.因此,在以Hutchin给出的范围为指导的前提下,还需结合不同高度成像需求确定孔径尺寸上限,确保将目标面波前RMS控制在 $\lambda/20$ 内.而从能量角度来看,较小的孔径尺寸会导致更严重的光束发散,降低到达目标面的光束能量,不利于回波信号的接收与信噪比的提升,或对成像带来不利影响,这对发射孔径尺寸的下限提出了要求.因此在SBI系统孔径的实际选择中,应从波前质量、能量等多方面入手,进一步缩小取值范围,寻求最优孔径尺寸.

3) 本文为SBI系统发射孔径尺寸的选取提供了理论指导和参考,为SBI对不同高度目标成像时潜在的像质差异提供了新的分析思路.

参考文献

- [1] Fienup J R 2010 *Imaging Systems* Tucson, Arizona, USA, June 7–8, 2010 IMD2
- [2] Hutchin R A 2012 *US Patent* 20120162631 [2012-6-28]
- [3] Hutchin R A 2012 *US Patent* 20120292481 [2012-11-22]
- [4] Lan F Y, Luo X J, Chen M L, Zhang Y, Liu H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 204202 (in Chinese) [兰富洋, 罗秀娟, 陈明徕, 张羽, 刘辉 2017 物理学报 **66** 204202]
- [5] Fairchild P, Payne I 2013 *IEEE Aerospace Conference Big Sky* Montana, USA, March 2–9, 2013 p1
- [6] Idell P S, Gonglewski J D 1990 *Opt. Lett.* **15** 1309
- [7] Chen M L, Luo X J, Zhang Y, Lan F Y, Liu H, Cao B, Xia A L 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 024203 (in Chinese) [陈明徕, 罗秀娟, 张羽, 兰富洋, 刘辉, 曹蓓, 夏爱利 2017 物理学报 **66** 024203]
- [8] Crawford T M <http://www.ostigov/scitech/biblio/666155> [2018-5-21]
- [9] Bush K A, Barnard C C, Voelz D G 1996 *Proc. SPIE* **2828** 362
- [10] Si Q D, Luo X J, Zeng Z H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104203 (in Chinese) [司庆丹, 罗秀娟, 曾志红 2014 物理学报 **63** 104203]
- [11] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 351
- [12] Goodman J W (translated by Qin K C, Liu P S, Chen J B, Cao Q Z) 2013 *Introduction to Fourier Optics* (3rd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p6 (in Chinese) [古德曼 J W 著(秦克诚, 刘培森, 陈家碧, 曹其智 译) 2013 傅里叶光学导论 (3 版) (北京: 电子工业出版社) 第 6 页]
- [13] Corser B A 1996 *M. S. Thesis* (Lubbock: Texas Tech University)
- [14] Yang Y Q 2009 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [杨玉强 2009 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [15] Hutchin R A 1993 *Proc. SPIE* **2029** 161
- [16] Tyson R K 1996 *Appl. Opt.* **35** 3640
- [17] Qian X M, Zhu W Y, Rao R Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6639 (in Chinese) [钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中 2009 物理学报 **58** 6639]
- [18] Wang B F 2014 *M. S. Thesis* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王保峰 2014 硕士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [19] Nelson D H, Walters D L, MacKerrow E P, Schmitt M J 2000 *Appl. Opt.* **39** 1857
- [20] Schmidt J D 2010 *Numerical Simulation of Optical Wave Propagation with Examples in Matlab* (Washington: SPIE) p149

Effect of uplink atmospheric wavefront distortion on image quality of sheared-beam imaging

Lan Fu-Yang¹⁾²⁾ Luo Xiu-Juan^{1)†} Fan Xue-Wu¹⁾ Zhang Yu¹⁾ Chen Ming-Lai¹⁾
Liu Hui¹⁾ Jia Hui¹⁾²⁾

1) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 11 June 2018; revised manuscript received 12 July 2018)

Abstract

Sheared-beam imaging (SBI) is a non-traditional imaging technique in which utilized are three sheared coherent lasers for illumination, and detector array to receive the intensity of speckle pattern reflected from the target. Finally the image of target can be reconstructed by computer algorithm from the data collected before. The SBI has some advantages in high resolution imaging for long-distance space targets. However, the wavefront distortion caused by atmospheric turbulence is a key factor affecting the imaging quality of SBI. Therefore, this paper focuses on the influence of wavefront distortion caused by atmospheric turbulence on the extraction of target spectral information. Theoretical model of the influence of wavefront distortion on imaging is established. The effects of low-order and high-order atmosphere turbulence on SBI imaging quality are analysed respectively. It turns out that low-order atmosphere turbulence does not result in poor image quality nor low-resolution, and just change the position of target on the image plane. But the image quality can be degraded when the wavefront root mean square (RMS) value at the target plane, caused by high-order atmosphere turbulence, exceeds $\lambda/20$. Beam emitted from larger aperture becomes more susceptible to perturbing effect, thus forming lower-quality wavefront. Considering that after passing through the atmosphere, beam also travels a long distance to reach the target surface. Targets at different heights will obtain different wavefront quality due to the diffraction of light. Thus the final wavefront quality is determined by turbulence intensity, aperture size and target height. Multi-layer phase-screen model and Hufnagel-Valley model are used to simulate the influences of near-earth (25 km) atmosphere on wavefront distortion at target plane with different imaging distances. Simulation results show that the wavefront RMS value rises with the increase of transmitting aperture diameter, and decreases with the increase of imaging distance. Transmitting aperture sizes in a range from 0.2 times r_0 to twice r_0 have been recommended for effective imaging by Hutchin [Hutchin R A 1993 *Proc. SPIE* 2029 161]. However, we find in our simulations that beams on the order of $2r_0$ may cause significant wavefront error at short range target, and under some circumstances the clear image of target cannot be reconstructed. The imaging results of SBI at different laser transmitting apertures and different imaging distances are obtained, and evaluated by Strehl ratio. Imaging results show that choosing appropriate transmitting aperture size can effectively improve the imaging quality. But for the short-range targets, aperture size selection range presented by Hutchin can be too broad to be practicable. This paper suggests some approaches to choosing suitable aperture size for SBI system, and also providing a reference for the difference analysis of imaging quality for targets in different heights.

Keywords: sheared-beam imaging, wavefront distortion, atmospheric turbulence, phase fluctuation

PACS: 42.30.-d, 42.68.Bz, 42.30.Kq, 42.25.-p

DOI: 10.7498/aps.67.20181144

† Corresponding author. E-mail: xj_luo@opt.ac.cn