

引用格式: ZHANG Yu, LI Zhiguo, LIU Hui, et al. Experimental Research on Laser Active Coherent Array Imaging through Horizontal Transimission in Real Atmosphere[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1201004

张羽,李治国,刘辉,等.真实大气环境下水平方向激光主动相干阵列成像实验研究[J].光子学报,2021,50(12):1201004

真实大气环境下水平方向激光主动相干阵列 成像实验研究

张羽^{1,2,3,4},李治国^{1,2,3,4},刘辉^{1,2,3},陈明徕^{1,2,3},罗秀娟^{1,2,3},马彩文^{1,2,3},张怀利⁵

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

(2 中国科学院空间精密测量技术重点实验室,西安 710119)

(3 中国科学院大学,北京 100084)

(4 青岛海洋科学与技术试点国家实验室,山东 青岛 266200)

(5 航天工程大学,北京 101499)

摘 要:为了研究激光相干阵列在全大气层湍流中的成像能力,在全相位闭合等方法的基础上,利用 HV57 模型中的大气折射率结构常数来标定大气相干长度,通过当地风速和光路高度等参数计算了实验所在地等效整层大气湍流的水平传输距离,研制了 $\Phi 1.5$ m 等效孔径的激光相干发射阵列,对 1.2 km 远处物体进行了成像实验,成像分辨率达到了亚角秒级。验证了激光相干阵列成像系统对大气湍流影响的抑制作用和成像能力,可为未来研制实体激光相干阵列成像系统提供理论与技术支持。

关键词:激光相干阵列;傅里叶望远;主动照明成像;大气湍流;图像重构

中图分类号:TH743;O438.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215012.1201004

Experimental Research on Laser Active Coherent Array Imaging through Horizontal Transimission in Real Atmosphere

ZHANG Yu^{1,2,3,4}, LI Zhiguo^{1,2,3,4}, LIU Hui^{1,2,3}, CHEN Minglai^{1,2,3}, LUO Xiujuan^{1,2,3},
MA Caiwen^{1,2,3}, ZHANG Huaili⁵

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

(2 Key Lab of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100084, China)

(4 Pilot National Laboratory for marine science and technology, Qingdao, Shandong 266200, China)

(5 Space Engineering University, Beijing 101499, China)

Abstract: In order to study laser array in the whole atmosphere turbulence coherent imaging ability, on the basis of all phase method such as closure, the atmospheric refractive index structure constant of HV57 model is used to calibrate the atmospheric coherence length, through the local wind speed and light road height to calculate the experimental parameters, such as local equivalent whole layer of the atmospheric turbulence level transmission distance. A laser coherent emission array with a diameter of 1.5 m equivalent aperture is developed, and the imaging experiment of a 1.2 km distant object is carried out. The imaging resolution reaches sub-arcsecond level. It is verified that the laser coherent array imaging system can suppress the influence of atmospheric turbulence and provide theoretical and technical support for the

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 61505248)

第一作者:张羽(1985—),男,副研究员,博士,主要研究方向为激光相干场计算成像。Email: yuzhang16@opt.ac.cn

通讯作者:张怀利(1974—),男,副教授,博士,主要研究方向为光电探测与成像。Email: 18786698@qq.com

收稿日期:2021-05-11;录用日期:2021-08-03

<http://www.photon.ac.cn>

development of solid laser coherent array imaging system in the future.

Key words: Laser coherent array; Fourier telescope; Active illumination imaging; Atmospheric turbulence; Image reconstruction

OCIS Codes: 010.1290; 010.0280; 030.1670; 030.7060; 040.1240

0 引言

我国空间资源应用的拓展,对探测识别空间物体的需求日渐增长。目前常规的高分辨率成像手段主要包括地基系统成像和天基系统成像等。地基系统成像技术成熟、维护成本较低,是较为普遍的实现方式。其中最常用的单口径望远镜,其光学集光能力由集光孔径尺寸或入瞳尺寸决定。较大的口径可以采集更多的光,但巨大的镜面会在风力、本身重力以及周围温度变化的作用下产生变形,导致来自遥远物体的光线发生偏斜,产生畸变的图像。且由于造价、材料、工艺和机械结构等原因,进一步增大单口径望远镜的直径极为困难^[1-4]。

在干涉阵列望远镜中,每个望远镜孔径采集到的干涉信号代表傅里叶平面上一个分量,采集这些傅里叶分量可以重建目标图像。同时,使用小口径望远镜阵列降低成本。缺点是必须达到所需的稳定性和路径匹配,才能在“孔径对”间形成干涉信息^[5-8]。

基于激光相干阵列主动照明的成像方式作为一种新型远距离目标主动成像探测技术,可解决分辨率受光学接收口径制约的瓶颈问题,从而获取远距离空间目标的超高分辨率图像^[9-11]。

激光相干阵列采用逆向长基线干涉测量术,用稀疏小口径望远镜阵列进行基线扩展,形成大等效孔径成像系统,用激光照明提升信噪比,并利用相位闭合等技术抑制大气湍流对成像性能的影响,极大地提高了望远镜的分辨率^[12-14]。系统接收的目标反射信号是与时间对应的光强信息,属于非相干接收。因目标距离远大于激光照明时间相干长度,理论上非相干测量可不考虑大气湍流对下行链路激光传输的影响。美国Trex公司根据白沙基地的大气参数,用1.5 km激光水平传输路径中的大气湍流来等效垂直30 km的大气湍流效应。实验中,发射激光照射一个近距离目标,反射光穿过1.5 km的水平路径到达探测器,处理后产生目标图像,验证了傅里叶望远镜成像过程及下行链路湍流对成像的影响。结果表明:下行链路的湍流基本不会影响傅里叶望远镜的成像性能,与理论相符^[15]。而在激光束传输的上行链路中,尽管利用相位闭合算法及频率调制技术抑制大气湍流的影响,有效消除了激光束间的随机大气相位误差及光强闪烁,但大气湍流还会导致激光束质量及传输光束相干性的退化,从而影响目标图像重建过程中频谱的精确采集,影响重建图像质量。

为验证上行链路大气湍流对傅里叶望远镜的影响并研究相关关键技术,本文研制了等效孔径 $\Phi 1500$ mm的傅里叶望远镜系统,用外场实验验证傅里叶望远镜对上行链路大气湍流的抑制能力。并在水平传输距离为1.2 km的真实大气环境中,对上行干涉链路成像进行系统设计与验证。

1 激光主动相干阵列成像基本原理

激光相干阵列对目标空间频谱采样通过阵列上发射光束形成的干涉条纹来完成。不同空间频率的条纹采集目标不同细节的信息。粗条纹提取目标轮廓频谱,而细条纹提取目标细节。

在图1中,目标被移动的干涉条纹扫过,这些移动的干涉条纹通过给每一束相干光加载一个微小的频率差来实现。返回的时域信号经一系列算法迭代可表示为目标反射率的傅里叶分量,为了保证探测信噪比,反射回来的时域信号需要一个较大的接收器来收集其能量。

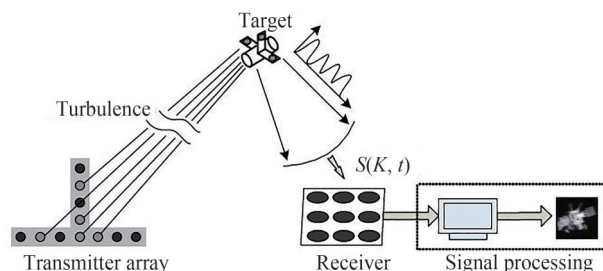


图1 激光相干阵列扫描目标与成像示意图

Fig. 1 Target and imaging concept of laser coherent scan array imaging

当发射阵列中的三束光分布于水平轴时,产生垂直方向的干涉条纹,用以对目标水平分布的细节进行空间采样;三束光分布于竖直轴时,产生水平方向干涉条纹,用以对目标竖直分布的细节进行空间采样;以这两方向为基准,当其中两束光分别位于两轴,第三束光位于阵列中心时,产生网状条纹,用以对目标其他方向的细节进行采样,如图2所示。

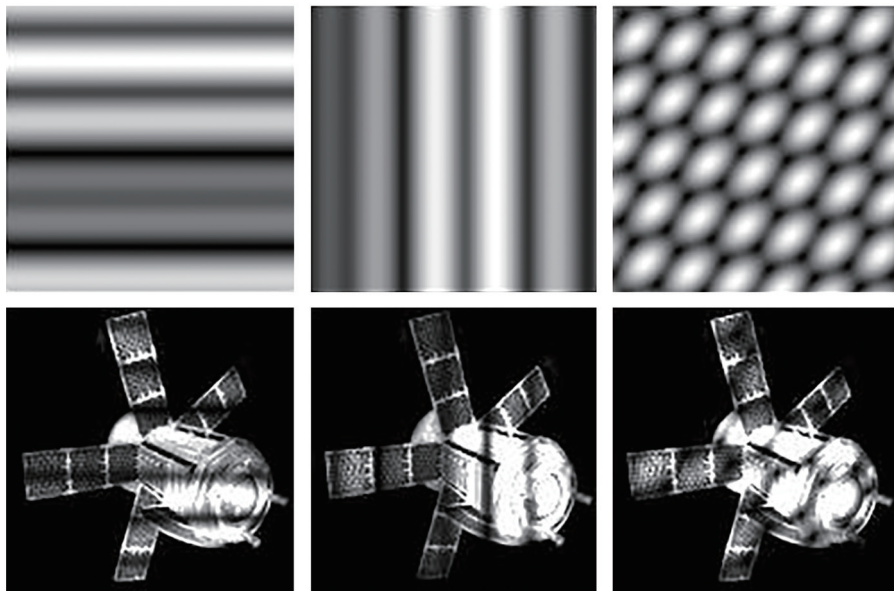


图2 条纹方向与目标空间信息采集方向示意

Fig. 2 Concept of relationship between fringe direction and object spatial information

空间频谱面中采样点的位置由阵列发射器的相对位置决定。发射器阵列获取频谱,相当于在目标连续频率域抽样。假设 x, y 表示空间域连续变量, U, V 表示频率域连续变量,原始目标及其傅里叶变换可分别表示为 $o(x, y)$ 、 $O(U, V)$,其中

$$O(U, V) = \iint o(x, y) \exp[-j2\pi(Ux + Vy)] dx dy \quad (1)$$

所获取频域离散点相当于在频率域利用函数 $\sum_p \sum_q \delta(U - p\mu, V - q\nu)$ 采样,其中采样周期为 (μ, ν) , p 和 q 分别为水平和数值两个方向的空间采样间隔。采样后的频域信号可表示为

$$O_1(U, V) = \sum_p \sum_q O(p\mu, q\nu) \delta(U - p\mu, V - q\nu) \quad (2)$$

根据采样定理,空间域周期延拓信号为

$$o_1(x, y) = o(x, y) * F^{-1} \left\{ \sum_p \sum_q \delta(U - p\mu, V - q\nu) \right\} = \mu\nu \sum_m \sum_n o(x - m/\mu, y - q\nu) \quad (3)$$

式中,*表示两个信号的卷积。空间域信号 $o_1(x, y)$ 此时为周期性的,可以利用傅里叶级数来表示

$$o_1(x, y) = a \exp[j2\pi(kx/\mu + ly/\nu)] \quad (4)$$

式中, k, l 表示傅里叶级数中的空间频率。在此可做简单分析,周期信号用傅里叶级数表示,傅里叶级数是离散变量,若取其中有限个数来逼近信号,那么傅里叶级数系数的个数越多,所得近似信号越接近原信号。可通过获取延拓后目标的傅里叶系数,来逼近目标的延拓图像,然后取其中一个周期获得目标图像。直接求采样后频域信号的傅里叶反变换,即

$$F^{-1}\{O(U, V)\} = \sum_k \sum_l O(k\mu, l\nu) \exp[j2\pi(kx/\mu + ly/\nu)] \quad (5)$$

与空间域周期信号的傅里叶级数表达式对比可知,采样频率点的值 $O(k\mu, l\nu)$ 即为 $o_1(x, y)$ 的傅里叶系数 $\alpha_{k, l}$,其对应的频率分量成分为 $\exp[j2\pi(kx/\mu + ly/\nu)]$ 。

获取的傅里叶系数越多,所恢复图像越接近原图像。频域采样点的坐标值,由发射器阵列的排列决定,

因此发射器阵列越大,获取的采样点越多,得到的傅里叶系数的数目越多,获得的图像越接近原图像。

2 全大气层等效作用距离分析与标定

整个大气层由地面向上依次分为对流层、平流层、中间层、热层和散逸层。由于地心引力作用,几乎全部气体集中在离地面 100 km 的高度范围内,其中 75% 的大气又集中在地面至 10 km 高度的对流层范围内。在大气光学领域,湍流主要是指大气中局部温度、压强的随机变化而引起折射率随空间位置 and 时间的随机变化。大气湍流最常发生在三个区域:大气底层的边界层(厚度为 300~1 000 m)、对流云的云体内部和大气对流层上部的西风急流区内。即大气湍流主要发生在离地面垂直高度 20 km 以下的范围内。大气湍流随着高度的增加而减弱,用大气折射率结构参数 C_n^2 评价湍流强度, C_n^2 越小,则湍流越弱。在海拔高度 30 km 之上的大气层基本不存在湍流^[16],其 $C_n^2=0$ 。因此,可用 30 km 高度内的大气湍流代表整个大气层的湍流。

C_n^2 随地理位置、高度、气象条件、季节和昼夜等条件的不同变化很大。根据 C_n^2 值,大气湍流强度分类由表 1 所示。

表 1 大气湍流强度随 C_n^2 值的分类
Table 1 Atmospheric turbulence classification with different C_n^2

Turbulence intensity	C_n^2
Very weak	$C_n^2 < 6 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$
Weak	$6 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$
Medium	$6 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$
Strong	$6 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$
Very strong	$C_n^2 > 6 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$

当光束沿垂直或者倾斜路径传播时, C_n^2 是高度 h 的函数,采用目前受到普遍认可的 Hufnagle-Valley (HV) 大气湍流模型,即

$$C_n^2(H) = 5.94 \times 10^{-53} (\omega/27)^2 \times H^{10} e^{-H/1000} + 2.7 \times 10^{-16} \times e^{-H/1500} + A e^{-H/100} \quad (6)$$

式中, H 为海拔高度(单位:m), ω 为 5~20 km 范围内高空风速的均方根, $A = C_n^2(0)$ 为名义地平面上的 C_n^2 值。在给定波长 λ (单位: μm)、大气相干长度 r_0 (单位:cm) 以及等晕角 θ_0 (单位: μrad) 时,可求出相应的 ω 和 A 的值,即

$$\omega = 27(75\theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 0.14)^{1/2} \quad (7)$$

$$A = 1.29 \times 10^{-12} r_0^{-5/3} \lambda^2 - 1.61 \times 10^{13} \theta_0^{-5/3} \lambda^2 - 3.89 \times 10^{-15} \quad (8)$$

当 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ 时,取值 $r_0 = 5 \text{ cm}$, $\theta_0 = 7 \mu\text{rad}$,式(6)即为典型的 Hufnagle-Valley 5/7 模型。在大气窗口选择激光波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$,把参数代入式(7)和(8)中计算得出 $\omega = 48 \text{ m/s}$, $A = 8.9 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。将 ω 和 A 代入式(6),用以计算垂直路径大气湍流强度。

实验场地位于西安市长安区,离地面的距离为 11.5 m,处于湍流强度最强的大气边界层内。当光束沿水平路径传播时,可以把折射率结构参数 C_n^2 近似为一个常数。

此时令边界层 C_n^2 数学模型为

$$C_n^2(h) = 1.24 \times 10^{-12} \times h^{-1.48} \quad (9)$$

式中, h 为距地面的高度。

将实验场地高度 $h=11.5 \text{ m}$ 代入式(9),得出相应的大气折射率结构常数 $C_n^2 = C_n^2(11.5) = 3.34 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,为中等湍流强度^[17]。

激光束通过湍流大气传输时,其强度、相位和传输方向均会受到扰动而出现相应的随机变化,引起光束强度起伏(大气闪烁)、相位起伏、光束漂移和扩展等大气湍流效应。其中,强度起伏通常用对数强度起伏方差表示;相位起伏的影响则反映在相干长度 r_0 和等晕角 θ_0 参数上;光束漂移影响光束的指向精度,光束扩展影响到达目标的激光能量。水平传输距离 L 与相干长度 r_0 和等晕角 θ_0 、大气闪烁 σ_R^2 的制约关系如表 2 所示。其中波数 $k = 2\pi/\lambda$, L 为激光水平传输路径。 A 为常数,对于球面波而言, $A=0.496$,对于平面波而言, A

=1.23。在此三种等量模拟的方式中,用闪烁指数 σ_R^2 对相同湍流强度的等量模拟所需水平路径最长,等效的湍流效应可涵盖其它两种情况。因此,本实验采用大气闪烁的方法进行等效。

表2 湍流参数与水平传输距离的制约关系

Table 2 Relationship between turbulence parameter and horizontal transmission range

Different equivalent method	Relationship between transmission range L and turbulence parameter
Equivalent with coherent length r_0	$r_0 = (0.423k^2 C_n^2 L)^{-3/5}$
Equivalent with coherent length isoplanatic angle θ_0	$\theta_0 = (1.09k^2 C_n^2 L^{3/3})^{-3/5}$
Equivalent with scintillation index σ_R^2	$\sigma_R^2(L) = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$

大气的吸收、热散(thermal emission)和视宁度等大气条件对光学成像观测影响较大。一般光学观测站都建在地势较高的地方,要求晴夜多,水汽含量少且大气宁静度高,天候变化非常稳定,远离城市,观测不易受光和工业尘埃污染影响。根据我国现有天文观测站的大气湍流标准,可见光平均 r_0 约为12 cm, θ_0 约为5.5 μ rad。因此,计算垂直路径 $H=30\ 000$ m时的对数强度起伏方差为 $\sigma_R^2(30\ 000)$ 。

$$\sigma_R^2(L) = 1.23C_n^2 (11.5)k^{7/6} L^{11/6} = \sigma_R^2(30\ 000) \quad (10)$$

式中,取 $r_0=12$ cm, $\theta_0=5.5$ μ rad,计算得出与30 km垂直路径大气湍流等量的水平路径长度为1 094 m。实验中激光的水平传输距离为1.2 km,能够满足等量模拟垂直路径30 km大气湍流的要求。实验中激光源的波长为1 064 nm,其大气相干长度比可见光大,即 $r_0>12$ cm。

实验采用双孔径的差分像运动法测量大气相干长度 r_0 。其基本原理是通过测量不同波前倾斜的相对起伏得到大气相干长度。在小口径(350 mm左右)望远镜的入瞳处放上一块开有两个子瞳(50~100 mm)的掩膜,并在其中一个子瞳上放置光楔,使到达这个子瞳的波前产生倾斜,当同一目标经过两子瞳后会产生完全不重叠的双像,最后用探测器记录下一系列双像的瞬时状态,并统计出双像质心相对位置的方差,即可计算出大气相干长度。大气相干长度公式为

$$r_0 = \left[2\lambda^2 (0.358D^{-1/3} - 0.242d^{-1/3}) / (\sigma_i^2 + \sigma_j^2) \right]^{3/5} \quad (11)$$

式中, D 为子瞳直径, d 为两子瞳间距离, σ_i^2 为像相对位置的纵向方差(子瞳连线方向), σ_j^2 为横向方差(垂直子瞳连线方向)。为了确保经过两子瞳的光波前倾斜相互独立,要求 $d \geq 2D$ 。

差分像运动测量法是将目标通过光学系统在接收平面上形成两个像点,两像点中心位置之差 $\Delta\rho_c$ 与 r_0 的另一关系表达式为

$$r_0 = \left\{ \frac{2f^2 [0.36(\lambda/D)^{1/3} - 0.242(\lambda/d)^{1/3}] \lambda^{5/3}}{\langle \Delta\rho_c^2 \rangle - \langle \Delta\rho_c \rangle^2} \right\}^{3/5} \quad (12)$$

式中, f 为望远镜焦距; d 为两光学接收镜的中心间距,即两个子瞳间距。这种方法对测量仪器本身的抖动、接收系统的光学质量、望远镜焦距的温度效应以及像点亮度的起伏等因素都不敏感,因而可望获得良好的测量精度。利用计算机自动控制和CCD成像技术实地测量 $\Delta\rho_c$ 并进行处理后计算得出 $r_0=14$ cm,等效水平路径长度需要950 m。实验距离1.2 km相对该长度要求而言,有充分余量。本实验目前仍在进行其他大气参数的测量,如背景辐射、能见度等。

3 $\Phi 1\ 500$ mm多光束激光相干成像系统外场实验

3.1 激光发射系统

发射系统由窄线宽光纤激光系统、频率调制器、精密调整装置和发射器(准直器)阵列组成,各部分通过光纤连接。发射架的设计参数为:T型阵列的单位孔径间距为3 cm,孔径数量为86个。长轴孔径数为51个,T阵列短轴上孔径数(中心孔径除外)为35个。采用移动式T型发射器阵列方案,通过减少发射器数目,降低对激光器总功率的要求。移动式发射器设计为3个,其余2个发射器位置固定,被用作相位闭合的参考光束,如图3所示。

图中0、1、2、3和4点代表五个光纤激光发射器,光束沿OX轴正向传播。T型发射架通过高精度电动平

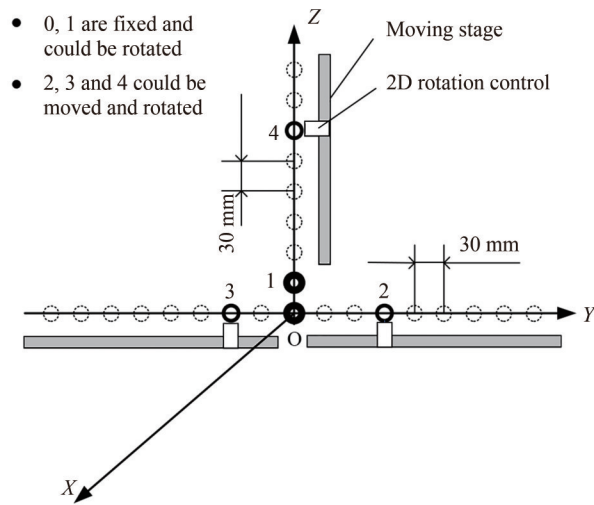


图3 移动式T型发射架示意图
Fig. 3 T shape transmitter array with moving aperture

移台和角位移台的组合运动,实现多点高精度瞄准同一目标点的功能。目标位于OX轴正前上方1.5 km远处;发射器0固定在坐标系原点,被用作相位闭合的参考光束。发射器1固定在Z方向距O点30 mm处,并且瞄准目标;移动式发射器2、3、4可通过程序控制其在轴上往返平动和停止,并实现方位俯仰调节,保证在停止位置处光束稳定瞄准目标。发射器2在OY正半轴上运动,发射器3在OY负半轴上运动,发射器4在OZ正半轴上运动;激光发射器2、3的运动行程为750 mm,激光发射器4的运动行程为1 000 mm,双向重复定位精度优于 ± 0.05 mm(包括由重力、温度引起的误差)。各发射孔径在目标表面形成的干涉条纹用CCD相机来接收和标定,如图4,发射架实物如图5所示。

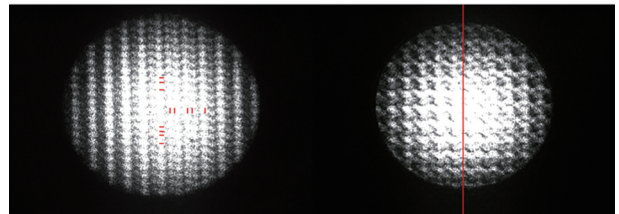


图4 五光束产生的干涉条纹
Fig. 4 Interfering fringes generated by 5 beams



图5 移动式T型发射架
Fig. 5 Picture of T shape transmitter array with moving aperture

为了提高孔径定位精度和光束瞄准精度,发射系统采用光栅尺和绝对零位的闭环控制系统。T型激光发射系统可使激光发射器0、1、2、3、4出射的光束高精度瞄准目标,各发射器在其行程范围内运动至任意位置均可瞄准OX轴上正前上方1.2 km远处的目标靶点,瞄准精度达到8"。

3.2 接收系统

接收系统的主要功能是会聚接收目标回波能量信号。实验中接收系统主要由聚光镜组和探测器组成。主要采取图4中的三种方案进行比较。

利用 $\Phi 500$ mm镀银主反射镜,结合中继镜、滤光片以及雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)光电探测器的汇聚接收系统,利用 $1.01\text{ m} \times 1.01\text{ m}$ 菲涅尔透镜汇聚光能量,模拟探测器阵列融合数据,镀银主反射镜和菲涅尔镜接收光能量,如图6。实验对回波信号主要采用能量接收,不受相位、相差等参数的影响。采用菲涅尔镜主要是考虑到该镜面采用折衍结合的二元光学方式对主镜进行加工,起到能量汇聚作用,对光学相差要求较低,且在同等口径时其重量远远小于镀银光学主镜。本次实验采用菲涅尔镜意在初步探测其在未来真实系统中的成像可行性。图7展示了利用单一菲涅尔镜和菲涅尔-镀银反射镜组合阵列对模拟目标成像的结果。

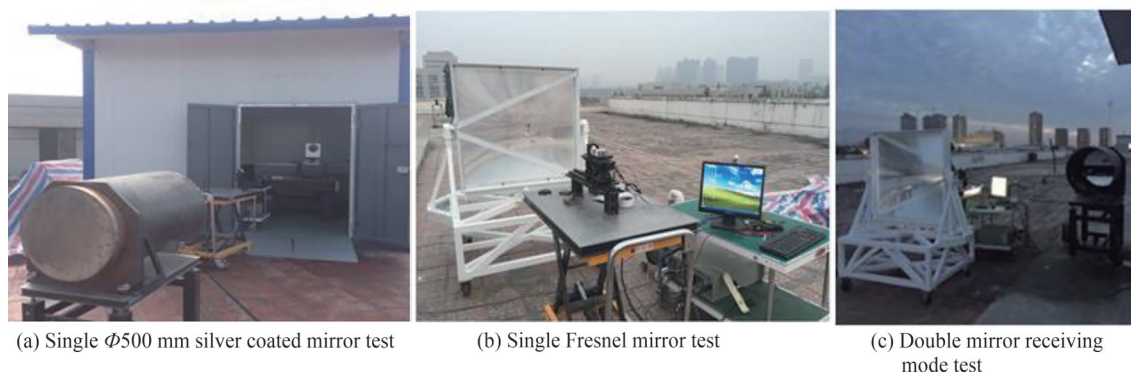


图6 接收系统示意图

Fig. 6 Illustration of energy receiving test

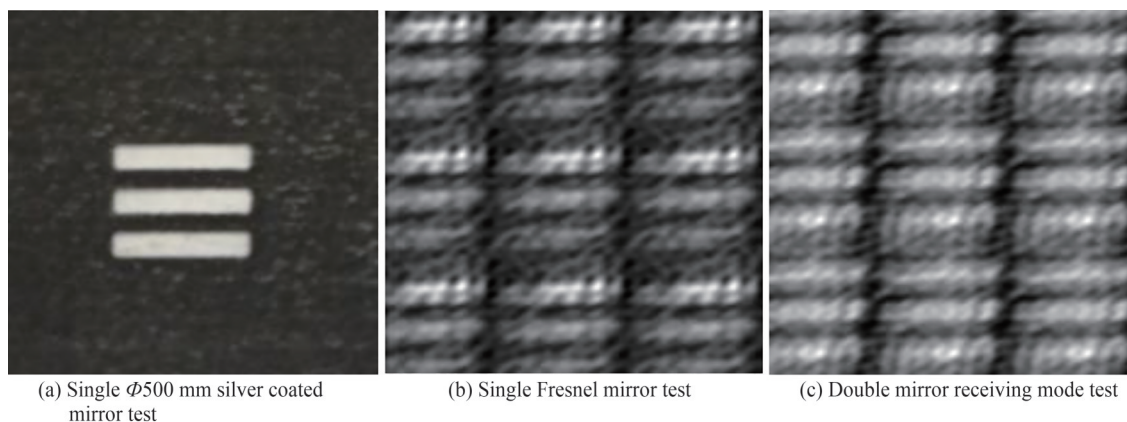


图7 单一菲涅尔镜和菲涅尔-镀银反射镜组合阵列对模拟目标成像的结果

Fig. 7 Simulated object imaging results by single Fresnel mirror and Fresnel-silver reflected mirror array

利用 $1.01\text{ m} \times 1.01\text{ m}$ 的菲涅尔接收镜与 $\Phi 500$ mm反射主镜同时接收由目标返回的信号时(图8),每个接收镜后对应一个APD探测器。随后APD接收到的信号独立输入至NI:BNC-2110的AI0和AI1端口,再由计算机内的PCI6115卡进行AD转换后分别存储。在算法中引入两个数据通道的增益调节与合并运算。数据接收界面如图9所示。设定采样频率为8 MHz,采样点数为24 000。由测量界面可知两个探测器为独立接收。图9中两个原始时域波形直流量高者其交流量的峰峰值却相对较低。说明两路信道的信噪比存在差异。实验中通过调节两探测器各自的增益与调节APD前的通光光阑大小来补偿。同时,在后期数据融合过程中,根据各路信号的特点引入相应的增益使得信号信噪比趋于一致。

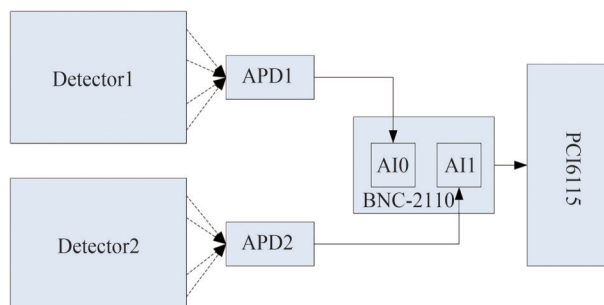


图8 双接收镜数据处理示意图

Fig. 8 Illustration of energy receiving using double mirror

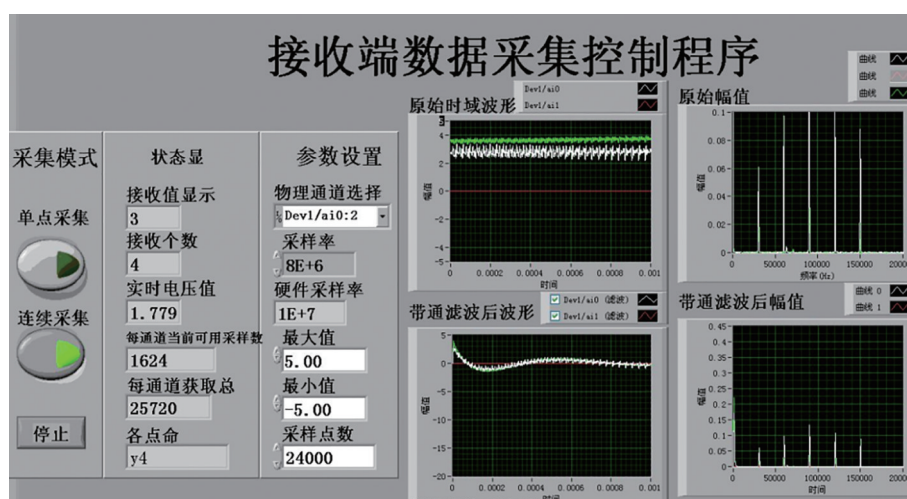


图9 双接收镜数据处理控制界面

Fig. 9 Control interface of data processing from double receiving mirror

由于菲涅尔镜与反射主镜的汇聚能力存在差异,需要在后期复原图像时对两路信号进行增益补偿,本阶段主要通过改变信道的增益系数比例来完成。比例系数中 R 代表反射主镜支路的增益系数, F 代表菲涅尔镜支路的增益系数,不同系数融合后结果如图10所示。通过大量实验得知如果支路的增益选取适当,可以提高融合图像的信噪比。此外实验中也发现在变换相等的增益时,菲涅尔镜支路对信号的响应更加敏感,原因是由于菲涅尔镜的刻线分辨率不足,聚光效果较弱。因此在后期为了节约成本采用菲涅尔镜接收阵列时,应对其设计指标提出更高的要求。

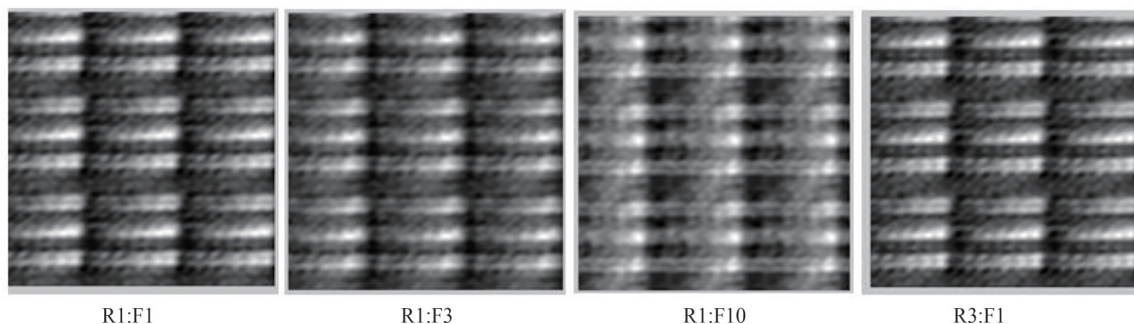


图10 两路信号不同增益时的融合效果

Fig. 10 Reconstruction effect of different gain ratio from two channel

4 讨论

该系统重构算法对采集信号进行解调,利用相位闭合算法消除随机相位,得到目标的振幅和相位信

息,经傅里叶逆变换重构出目标图像。从重构过程可知,重构算法本身就是对采集信号的一种处理。信号解调实质上是频域滤波,在数据解调时,对采集数据进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT),将信号从时域变换到频谱域,从频谱中提取已知频率的频差信号,作为重构图像的信号。信号解调和带通、低通滤波的过程相同,而且比带通和低通更加精确,不会损失有用信号的幅度,而带通和低通滤波反而会因为滤波器的不理想,损失一定有用信号的幅度,滤波后重构图像直接重构不会有太大变化,甚至图像质量下降。

为了定量描述重构图像的质量,采用Strehl Ratio (SR)来评估重构结果,该评价指标是将重构图像与原始图像进行相关度比对的归一化数值,且 $0 < SR < 1$,当 $SR = 1$ 时说明两幅图像完全相同^[18]。

对采集信号进行典型频域滤波中带通滤波处理,将处理结果进行图像重构,重构结果进行对比。图11和12显示了原始信号时域波形、带通滤波后波形及其振幅频谱。可以看出,带通滤波后信号更加干净,消除了部分噪声的影响。

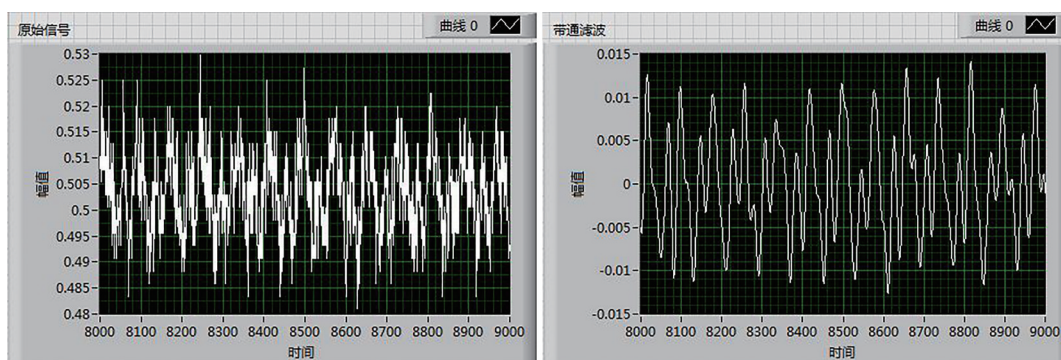


图11 原始信号时域波形和带通滤波后时域波形对比

Fig. 11 Waveform comparison between original signal and band-filter signal

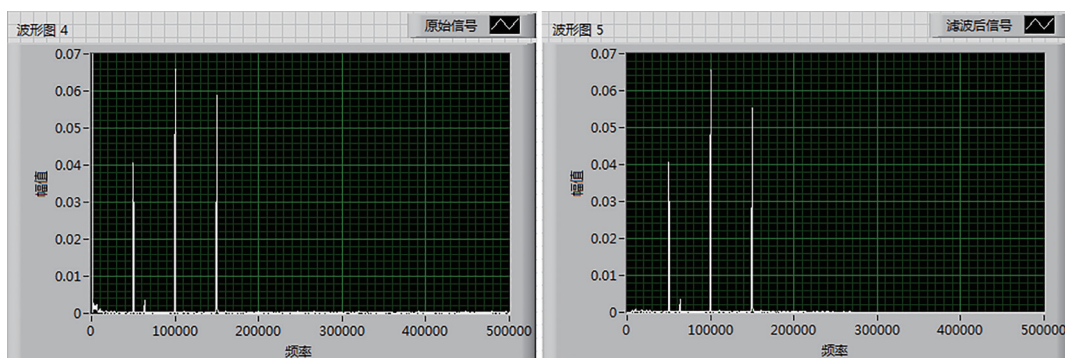


图12 原始信号振幅频谱和带通滤波后振幅频谱对比

Fig. 12 Spectrum comparison between original signal and band-filter signal

由图13和14可知,直接重构图像和带通滤波后图像相比(图中 7×5 分别指阵列上水平和垂直方向各参与干涉的孔径数),目标图像质量没有提高,反而变差,其它频域滤波如低通等,重构图像质量也没有提高,可见频域滤波信号处理并不能对该成像方式提高复原图像的质量。实验结果验证了分析的正确性。

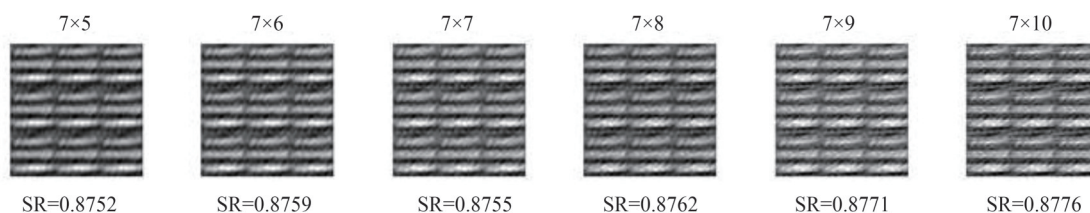


图13 原始信号直接重构图像

Fig. 13 Image reconstruction from original signal

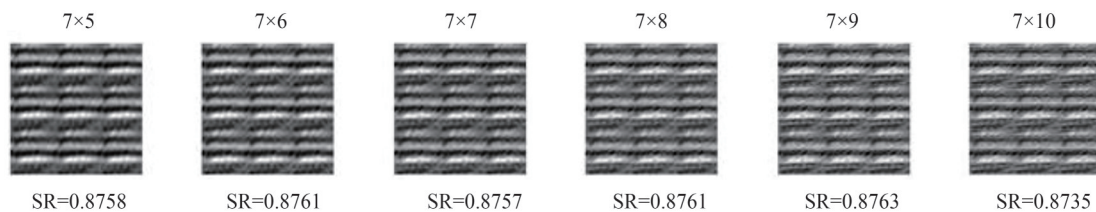


图 14 带通滤波信号重构图像
Fig. 14 Image reconstruction from band-filter signal

基于傅里叶变换的信号去噪等价于信号通过一个低通或高通滤波器,在去除信号噪声的同时,也模糊了信号的位置信息,即不能刻画信号的局部化特点。该成像方式属于计算成像,图像背景噪声是由散斑、湍流环境、频谱提取的准确度等多方面原因引起的,单一图像处理方法不能完全去除噪声。因此,在实验中尝试结合了多种图像处理方法综合处理重构图像。首先,对图像灰度进行乘方处理,增强图像对比度,使得图像与背景像素差异更大。然后,使用二维图像维纳滤波方法对每个图像像素与周围临近像素点的统计估计进行自适应滤波,进一步弱化背景噪声。最后,对背景像素进行统一赋值处理。图 15(a)是室外实验得到的目标重构图像,图 15(b)是用多种方法融合去噪方法对图 15(a)图像进行处理后的结果。

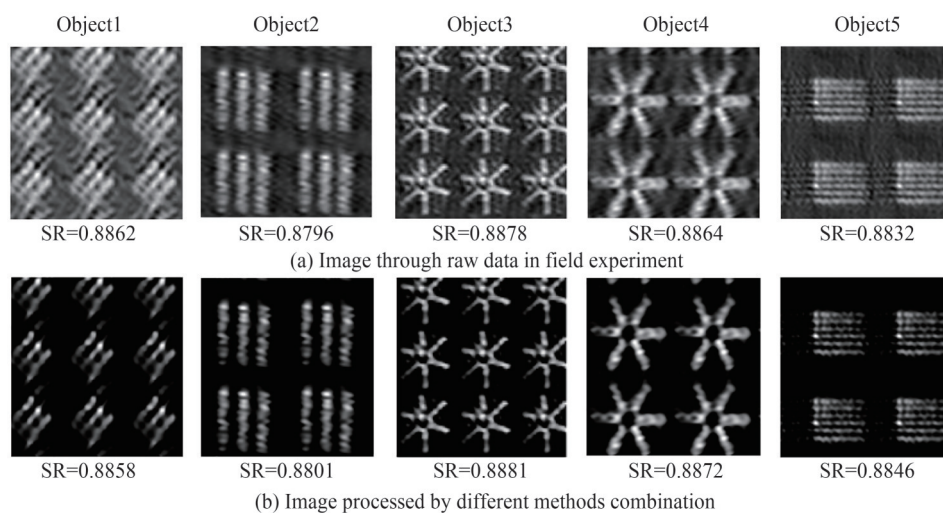


图 15 多种方法融合的图像处理结果
Fig. 15 Image reconstruction combining different methods

可见,用多种方法融合去噪,在去除上述图像背景噪声的同时,也损失了一些图像细节信息,即斜方向分布的目标图像细节损失较多。下一步将研究阵列空间谱采样与目标形态分布优化匹配,以及处理时阈值的合理选择范围,来降低图像信息的损失。

在水平传输路径 1.2 km 自然湍流条件下,分辨目标细节 5 mm,对目标的成像分辨率达到了 0.86" @ 1.2 km,实现了亚角秒级精细成像,如图 16。

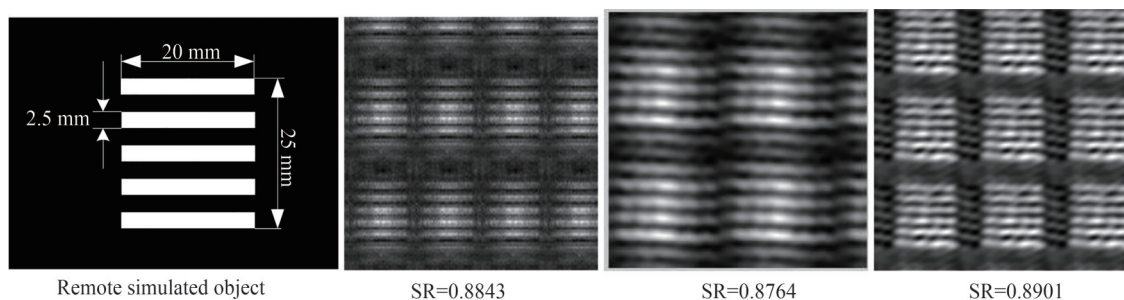


图 16 5 mm 细节目标在 1.2 km 的成像结果
Fig. 16 Image reconstruction of object with 5 mm detail in 1.2 km range

5 结论

本文构建了激光多光束相干阵列在真实湍流环境下的成像系统。成像距离由大气闪烁指数与激光传输距离的制约关系得出,等效于垂直方向整层大气层的湍流强度。利用 $\Phi 1\ 500\ \text{mm}$ 等效孔径的激光发射阵列提取目标空间信息,从而使回波信号中含有目标的傅里叶频谱分量。用光强探测器接收回波信号,通过解调回波强度时序信号,提取目标的傅里叶频谱,并利用相位闭合技术消除光程差和大气湍流造成的相位畸变,最终恢复出目标图像,达到亚角秒级的分辨率。在未来系统中,强背景光对系统信噪比的影响,强湍流下闪烁、指向飘移以及调制信号的畸变等对干涉信息的影响是需要进一步深入研究和的地方。

参考文献

- [1] BENDER N, YILMAZ H, BROMBERG Y, et al. Introducing non-local correlations into laser speckles [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6057-6067.
- [2] MA D. Recommended conceptual optical system design for China's large optical-infrared telescope (LOT) [J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 108-119.
- [3] ZHANG H, LIU H, LIZANA A, et al. Methods for the performance enhancement and the error characterization of large diameter ground-based diffractive telescopes [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26662-26667.
- [4] NIEMACK M D. Design for a large-aperture telescope to map the CMB 10x faster [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1688-1696.
- [5] PIRNAY O, GLOESENER P. Design of the unit telescopes of the MROI [C]. *SPIE*, 2008, 7013: 70130N.
- [6] BAKKER E J, PARAMESWARIAH C, RAJAGOPAL J. Cost estimate for the Likometric Optical Interferometer (KOI) [C]. *SPIE*, 2008, 7013: 70134F.
- [7] LABADIE L, HERBST T M, RIX H W. Interferometry at the LBT [C]. *Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, 2008, SF2A.
- [8] CAMPBELL R D, MIGNANT D L. AO operations at the W.M. Keck observatory [C]. *SPIE*, 2008, 7016: 701604.
- [9] PELLIZZARI C, HOLMES R, KNOX K. Intensity interferometry experiments and simulations [C]. *SPIE*, 2012, 8520: 8520J.
- [10] DRAVINS D, LEBOHEC S, JENSEN H. Optical intensity interferometry with the Cherenkov telescope array [J]. *Astroparticle Physics*, 2013, 43: 331-347.
- [11] STREKALOV D V, YU N. Intensity interferometry for observation of dark objects [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(5): 053807-053846.
- [12] ZHANG Yu, LUO Xiujuan, CAO Bei, et al. Analysis of the redundancy of Fourier telescope transmitter array and its redundancy-strehl ratio-target texture distribution characteristic [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 114201.
张羽, 罗秀娟, 曹蓓, 等. 傅里叶望远镜发射阵列的冗余度及冗余度-斯特列尔比-目标信息特性分析 [J]. *物理学报*, 2016, 65(11): 114201.
- [13] CAO Bei, LUO Liuan, CHEN Minglai, et al. All-phase target reconstruction method for coherent field imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 124205.
曹蓓, 罗秀娟, 陈明徕, 等. 相干场成像全相位目标直接重构法 [J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 124205.
- [14] ZHANG Yu, LUO Xiujuan, LIU Hui, et al. Beat frequency error rectifying in multi-beam laser coherent remote imaging [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(4): 044201.
张羽, 罗秀娟, 刘辉, 等. 远程多光束激光相干场成像拍品误差校正研究 [J]. *物理学报*, 2018, 67(4): 044201.
- [15] MATHIS J, STAPP J, CUELLAR E. Field experiment performance of the receiver elements for a Fourier telescope imaging system [C]. *SPIE*, 2005, 5896: 58960F.
- [16] WINDSOM B W. Assessment of optical turbulence profiles derived from probabilistic climatology [D]. *The Air Force Air University, USA*, 2007.
- [17] ABAHAMID A, JABIRI A. Optical turbulence modeling in the boundary layer and free atmosphere using instrumented meteorological balloons [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 416: 1193-1200.
- [18] ZHANG Yu, LUO Xiujuan, XIA Aili, et al. Image quality evaluation and analysis in Fourier telescope for laboratory demonstration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 0311001.
张羽, 罗秀娟, 夏爱利, 等. 傅里叶望远镜成像质量分析与评价 [J]. *光子学报*, 2014, 43(3): 0311001.