

doi:10.3788/gzxb20184710.1011004

改进的相干光照明强度相干成像方法

李冲,高昕,李希宇,陆长明,唐嘉

(北京跟踪与通信技术研究所 空间目标测量重点实验室,北京 100094)

摘要:在主动照明强度相干成像方法中,考虑相干性变化对成像频谱模值的影响.建立上行链路光场空间相干性变化模型;引入相干因子建立基于相干性变化的强度相干成像模型;仿真相干性变化对强度相干成像频谱模值的影响;最后设计实验验证模型的正确性,分析所提模型和原模型恢复频谱模值与真实频谱模值的峰值信噪比.结果表明:在有激光主动照明时引入相干性因子是必要的,不同湍流相干长度下峰值信噪比较原模型提高了 3.6%~6.2%.基于相干性变化建立的强度相干成像模型恢复的频谱模值质量更好.

关键词:强度相干成像;主动照明;相干性变化;频谱模值;峰值信噪比

中图分类号:O438;O438.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)10-1011004-7

Improved Coherent Light Illumination Intensity Correlation Imaging Method

LI Chong, GAO Xin, LI Xi-yu, LU Chang-ming, TANG Jia

(Key-Laboratory of Space Object Measurement, Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In the active illumination intensity imaging method, the effect of coherence changes on the spectral modulus was considered. The model of the spatial coherence of the uplink coherent light field was established which the coherence factor was introduced on this basis. And the intensity correlation imaging model based on coherence change was established. The influence on spectral modulus of the intensity correlation imaging was simulated by coherence changes. The correctness of the model is verified by the design experiment. The peak signal to noise ratio of the spectral modulus of the proposed model and the original model is analyzed. According to the analysis results, it is necessary to introduce the coherence factor in active laser illumination; and the peak signal to noise ratio is improved by 3.6%~6.2% in different turbulence coherence length. The quality of the spectral modulus recovered by the proposed intensity correlation imaging model based on coherence change is better.

Key words: Intensity correlation imaging; Active illuminate; Coherence change; Spectral modulus; Peak signal to noise ratio

OCIS Codes: 110.1650; 110.1758; 110.4980

0 引言

空间目标众多,包含有各国发射的卫星以及太空碎片等.对空间目标成像是实现空间目标监视与识别^[1-2]最直接有效的手段.在远距离目标高分辨力成像领域,传统成像方法需利用大口径高精度光学系统才能获得目标的实像,且受光场相位误差影响极大,光学系统像差和大气湍流均会对成像质量造成较大影响.若在可见光波段获得地球同步轨道卫星的 0.1 m 分辨力图像,需使用 180 m 口径的自适应望远镜,大气湍流自适应矫正单元将超过一百万个^[3].故而在对远距离目标成像时,与传统波前成像方法相比,新兴的强度相

基金项目:国家高技术研究发展计划(No.2015AAxxx5038)和北京跟踪与通信技术研究所科研基金资助

第一作者:李冲(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向为远距离目标高分辨力成像. Email:lichongpku@126.com

导师(通讯作者):高昕(1973-),男,研究员,博士,主要研究方向为飞行器光学测量及成像技术. Email:gaoxin526@sina.com

收稿日期:2018-06-13;录用日期:2018-07-23

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

干成像方法有着明显的优势及应用前景

强度相干成像方法起源于 20 世纪 50 年代,是在强度干涉仪的基础上发展而来的^[3].BROWN 和 TWISS 利用此方法获得了射电源 Cygnus 的角直径^[4],并设计了 Narrabri 干涉仪,实现了对 6 星以上恒星的角直径测量^[5].作为计算成像方法的一种,强度相干成像方法通过光强探测器采集目标表面光强涨落信息,利用电子器件计算光强涨落相关度,根据 Van Citter-Zernike 定理解算目标空间频谱模值^[6],辅之以相位恢复算法,获得完整的目标频谱,进而恢复目标图像.强度相干成像方法不依赖大口径高精度的光学镜面,采用大量低精度光学器件即可达到对目标的高分辨力成像^[7],在远距离目标成像领域有着独特的优势.

由于高轨目标距离地基观测系统大都在万公里量级^[8]且目标亮度普遍偏低,采用地基激光对其进行主动照明可大幅提高其亮度和探测信噪比.利用地基激光对目标主动照明时,受大气湍流影响,目标表面的激光光场将发生退相干且产生激光散斑,此时目标反射光场与原强度相干成像的非相干光照明假设相差较大.本文在考虑空间相干性变化的情况下,对现有强度相干成像模型进行改进,建立新的强度相干模型,仿真分析在有大气湍流和激光主动照明时,大气湍流对激光主动照明强度相干成像中解算的目标频谱模值的影响,并设计实验验证模型的正确性.

1 基本原理

1.1 广义 Van Citter-Zernike 定理

强度相干成像过程中需采集目标光强随机涨落信息,然后利用 Van Citter-Zernike 定理解算获得目标的频谱模值,并结合恰当的相位恢复算法恢复目标图像.Van Citter-Zernike 定理示意图如图 1 所示.

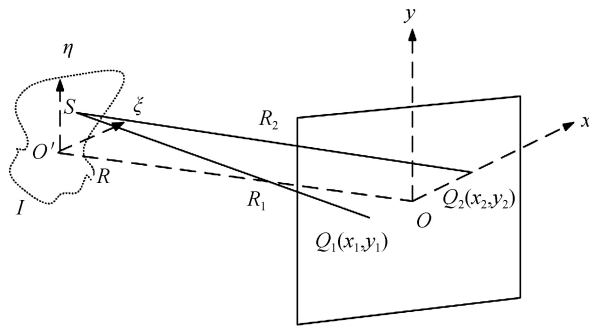


图 1 Van Citter-Zernike 定理示意图

Fig.1 Diagram of Van Citter-Zernike theorem

若将待成像目标视为非相干光源^[9],利用 δ 函数的“筛选”或“抽样”性质,可获得观测平面上两点 Q_1 、 Q_2 的光场相干函数为

$$\Gamma(Q_1, Q_2) = \frac{\kappa}{(\lambda)^2} \iint_{\Sigma_1} \iint_{\Sigma_2} I(S) \times \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \right] \frac{\chi(\theta_1)}{r_1} \frac{\chi(\theta_2)}{r_2} dS_1 dS_2 \quad (1)$$

式中, $\chi(\theta)$ 为倾斜因子, κ 为光场衰减函数.若目标光场具有部分空间相干性,则需考虑定理的更一般形式,即广义 Van Citter-Zernike 定理^[10].强度相干成像过程中,观测平面与成像目标的距离 z 远远大于观测点 Q_1 、 Q_2 间的距离,倾斜因子近似为 1,利用傍轴近似可得

$$\Gamma(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{e^{-j\varphi}}{(\lambda z)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty}^{\infty} I(\bar{\xi}, \bar{\eta}) \times \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda z} (\Delta x \bar{\xi} + \Delta y \bar{\eta}) \right] d\bar{\xi} d\bar{\eta} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mu(\Delta\xi, \Delta\eta) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x \Delta\xi + y \Delta\eta) \right] d\Delta\xi d\Delta\eta \quad (2)$$

定义式(2)中第二个二重积分为

$$\kappa(\bar{x}, \bar{y}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mu(\Delta\xi, \Delta\eta) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (x \Delta\xi + y \Delta\eta) \right] d\Delta\xi d\Delta\eta \quad (3)$$

这时,观测平面上的相干函数表示为

$$\Gamma(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{\kappa(\bar{x}, \bar{y})e^{-i\varphi}}{(\lambda z)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(\bar{\xi}, \bar{\eta}) \times \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda z} (\Delta x \bar{\xi} + \Delta y \bar{\eta}) \right] d\bar{\xi} d\bar{\eta} \quad (4)$$

将式(4)与式(1)进行对比发现,当考虑光源的空间部分相干性时, Van Citter-Zernike 定理中的常数 κ 变成了坐标 (\bar{x}, \bar{y}) 的函数,且与目标光场空间相干性有关,定义为相干因子。

由此可见,目标表面光场的空间相干性将会使 Van Citter-Zernike 定理中部分项发生变化,从而对强度相干成像解算的目标频谱模值产生影响。

1.2 空间相干性变化模型

湍流介质对光波最本质的影响是相干性的破坏^[11]。当地基激光经过大气湍流到达目标表面时,其相干性发生退化。由于完全相干和完全非相干均是理想模型,因此到达目标表面的光必然是部分相干光。

设一束高斯光束在光源 $z=0$ 处的交叉谱密度为

$$W(r_1, r_2, z=0) = I_0 \exp \left(-\frac{r_1^2 + r_2^2}{w_0^2} \right) \quad (5)$$

式中, r_1, r_2 为光束表面坐标矢量, I_0 为一常数, w_0 为高斯光束的束腰宽度。根据广义惠更斯-菲涅尔原理可知,该光束通过大气湍流后的交叉谱密度函数为

$$W(\rho_1, \rho_2, z) = \frac{k^2}{4\pi^2 z^2} \iint d^2 r_1 \iint d^2 r_2 W(r_1, r_2, 0) \times \exp \left[-\frac{ik}{2z}(r_1 - \rho_1)^2 + \frac{ik}{2z}(r_2 - \rho_2)^2 \right] \times \langle \exp [\psi(r_1, \rho_1, z) + \psi^*(r_2, \rho_2, z)] \rangle \quad (6)$$

根据 Rytov 函数二阶近似^[12-13]

$$\langle \exp [\psi(r_1, \rho_1, z) + \psi^*(r_2, \rho_2, z)] \rangle = \exp [-0.5D_\psi(r_1 - r_2)] = \exp \left[-\frac{1}{\rho_0^2}(r_1 - r_2)^2 \right] \quad (7)$$

式中, D_ψ 为相位结构函数, ρ_0 为球面波通过大气湍流的相干长度,其表达式为

$$\rho_0 = (0.545C_n^2 k^2 z)^{-3/5} \quad (8)$$

根据参考文献[13]可推导出关于 z 轴对称的两点 $(-x, z)$ 、 (x, z) 的空间相干度,其表达式为

$$\mu(-x, x, z, w) = \frac{W(-x, x, z, w)}{[W(-x, z, w)W(x, z, w)]^{1/2}} = \exp \left\{ -\left[\frac{4w_0^2}{\rho_0^2} + \frac{w_0^2}{P_1 P_2} \left(\frac{2k^2}{z^2 \rho_0^2} - \frac{2}{w_0^2 \rho_0^4} \right) \right] \frac{x^2}{w_0^2} \right\} \quad (9)$$

式中,

$$P_1 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\rho_0^2} - \frac{ik}{2z}, P_2 = \frac{1}{w_0^2} + \frac{1}{\rho_0^2} + \frac{ik}{2z} - \frac{1}{P_1 \rho_0^4} \quad (10)$$

在直角坐标系下,由于可以分离变量,可直接将上述结果推广到二维情况。二维情况下光经过大气湍流后的光谱相干度函数为

$$\mu(x, y, z, w) = \mu(-x, x, z, w)\mu(-y, y, z, w) = \exp \left\{ -\left[\frac{4w_0^2}{\rho_0^2} + \frac{w_0^2}{P_1 P_2} \left(\frac{2k^2}{z^2 \rho_0^2} - \frac{2}{w_0^2 \rho_0^4} \right) \right] \frac{x^2 + y^2}{w_0^2} \right\} \quad (11)$$

式(11)即是高斯激光经过大气湍流后到达 z 平面的光场相干性表达式。

在获得了光的空间相干性变化的情况下,根据广义的 Van Citter-Zernike 定理解算目标频谱模值,由此建立基于相干性变化的新的强度相干成像模型。其主要参量及恢复频谱模值流程如表 1。

表 1 所提模型的主要参量及恢复频谱模值流程

Table 1 Main parameters of new model and process of recover spectral modulus

| Process | Parameters |
|--|------------|
| Get turbulence intensity | C_n^2 |
| Calculate thespatial coherence of the target | μ |
| Calculate coherence factor | κ |
| Recover spectral modulus | I |

2 数值仿真结果

依据上述光的空间相干性变化模型对原有强度相干成像模型改进,建立新的基于地基激光照明的强度相干成像模型,对同步轨道目标进行频谱模值仿真。

首先使用大气随机相位屏模拟大气湍流^[15].数值模拟大气随机相位屏的常用方法有功率谱反演法^[16]、Zernike 多项式展开法^[17-19]、协方差方法^[20]等.本文根据 Zernike 多项式展开法原理模拟大气随机相位屏.当采用的 Zernike 阶数较低时,模拟的相位屏高频分量不足.为对高频分量进行补偿,Zernike 阶数 N 选择 50,模拟结果如图 2(a)所示,



图 2 模拟目标及真实频谱模值
Fig.2 Target and real modulus spectra

图 2(b)、(c)所示为同步轨道模拟目标及其真实频谱模值.设定高斯光束的束腰宽度为 0.1 m,波长为 532 nm,利用 50 阶大气随机相位屏数值模拟 100 km 的大气湍流.经过 100 km 的大气湍流后,光束在自由空间衍射传播照射模拟目标,探测器接收目标反射光场.

依据上述光的空间相干性变化模型对原有强度相干成像模型改进,建立新的基于相干性变化的强度相干成像模型,并对同步轨道目标进行频谱模值仿真,得到的结果如图 3.

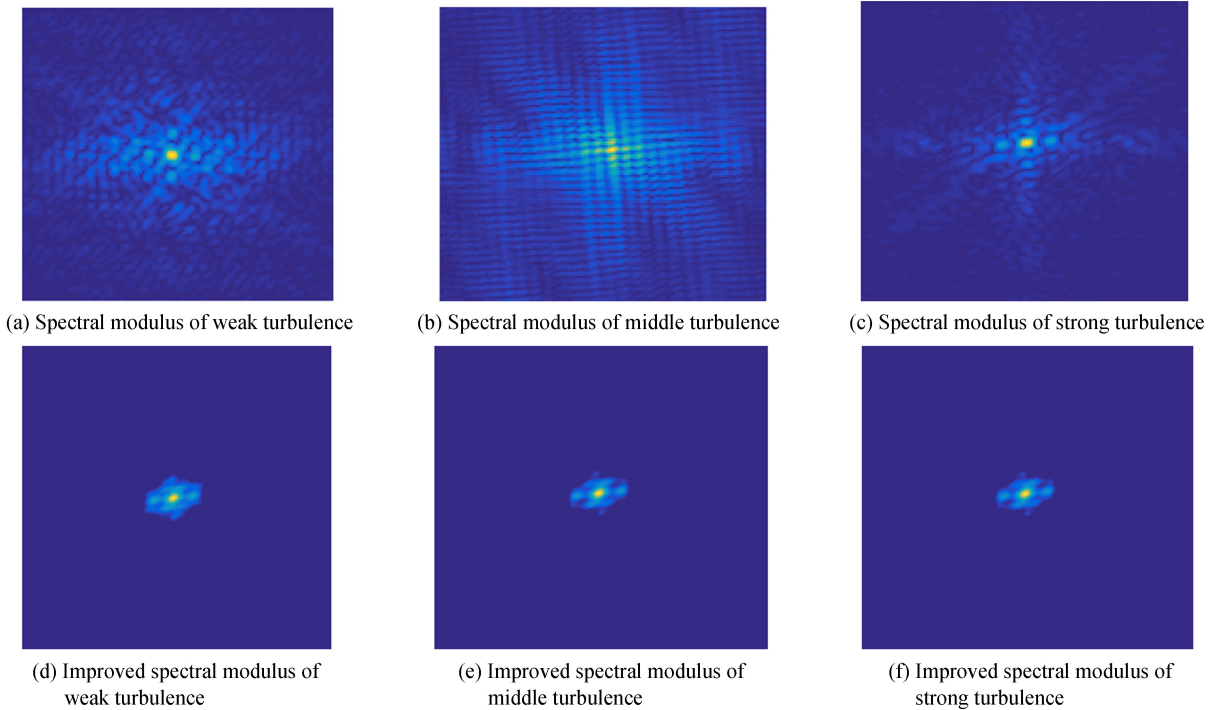


图 3 频谱模值仿真结果
Fig.3 Simulation results of spectral modulus

图 3(a)、(b)、(c)从左至右是随着湍流强度的增强(大气折射率结构常数 C_n^2 分别为 10^{-17} 、 10^{-16} 、 3×10^{-13}),仿真得到的利用原有模型解算的频谱模值和利用改进后的模型恢复的频谱模值.根据仿真结果可看出,不同强度的湍流使得光的空间相干性产生相应的变化,并影响到恢复的频谱模值.将图 2(c)与 3(d)、

(e)、(f)对比,可看出,基于相干性变化的强度相干成像模型能很好地恢复频谱模值,由此在仿真上验证了改进后的强度相干成像模型的正确性.

3 室内实验验证

设计室内实验平台光路图如图 4,利用湍流相位板模拟大气湍流.激光器发出的光经过小孔后得到点光源,经光阑滤除杂光后由湍流相位板调制,调制后的光束经过透镜 1 准直并由透镜 2 汇聚后照射到目标上,而后由 CMOS 相机接收光强涨落信息,CMOS 每个像元均可视为一个独立的光强探测器,像元大小为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$.成像过程中无需移动探测器位置,根据需要可选择合适的像元阵列排布方式,本文选取的探测器阵列间距为 $26 \mu\text{m}$.湍流相位板采用定制的 Lexitek 公司相干长度为 0.6 mm (@ 532 nm) 的随机相位板,其相位分布满足 Kolmogorov 湍流理论.通过改变照射到湍流相位板上的光斑尺寸(改变其与透镜 1 的距离)来模拟不同湍流相干长度 r_0 ,根据 Kolmogorov 湍流理论计算折射率结构常数 C_n^2 ,计算公式为

$$r_0 = (0.423k^2 C_n^2 L)^{-3/5} \quad (12)$$

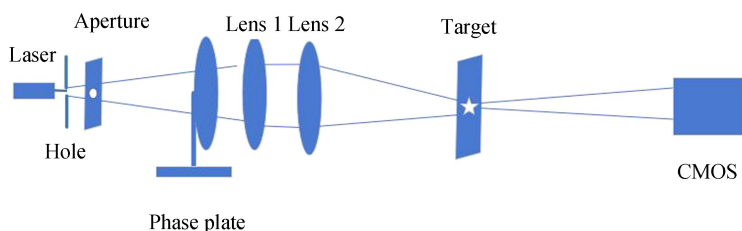


图 4 强度相干成像实验示意图

Fig.4 Diagram of intensity correlation imaging experiment

为便于讨论,湍流强度均用 r_0 表示, C_n^2 越大, r_0 越小,湍流越强.实验设备如图 5(a) 所示,图 5(b) 为采集到的其中一帧散斑图.

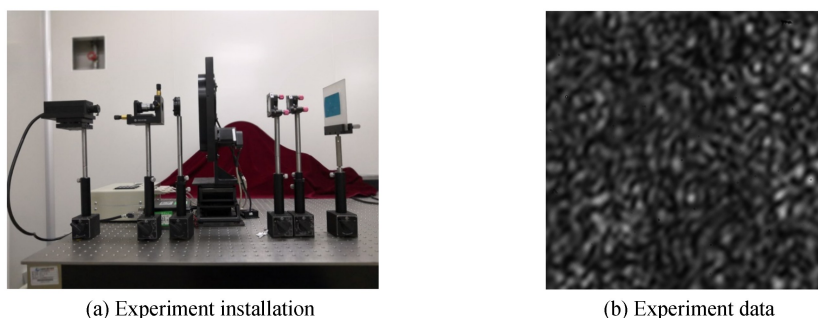
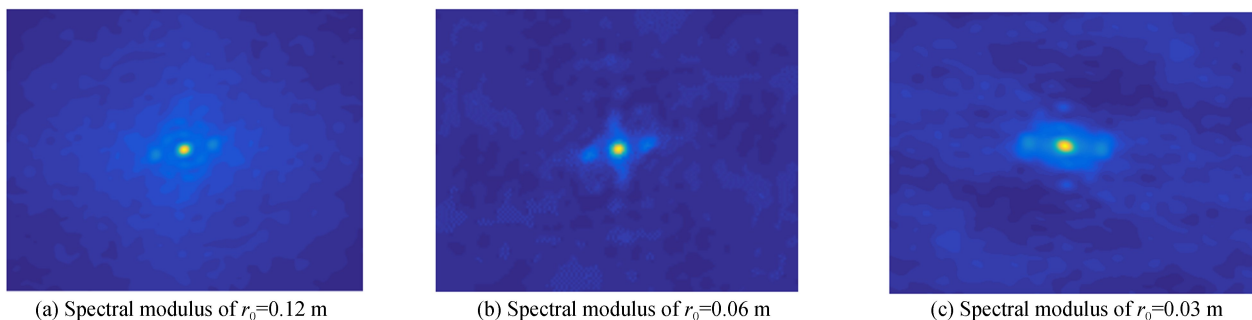


图 5 实验器材图与实验数据

Fig.5 Experiment installation and experiment data

图 5(a) 中实验设备从左至右依次为:激光器,空间滤波器(小孔),光阑,湍流相位板,透镜 1 和透镜 2,观测目标(粘附在毛玻璃片上以模拟反射目标).对相机 CMOS 采集的实验数据进行处理,得到基于实验结果的频谱模值.图 6(a)、(b)、(c) 为随着湍流强度的增强(大气相干长度依次为 $r_0 = 0.12 \text{ m}$ 、 0.06 m 、 0.03 m),利用原有强度相干模型解算的频谱模值.图 6(d)、(e)、(f) 为利用新的强度相干成像模型解算的相应频谱模值,以消除湍流引起的光空间相干性变化影响.



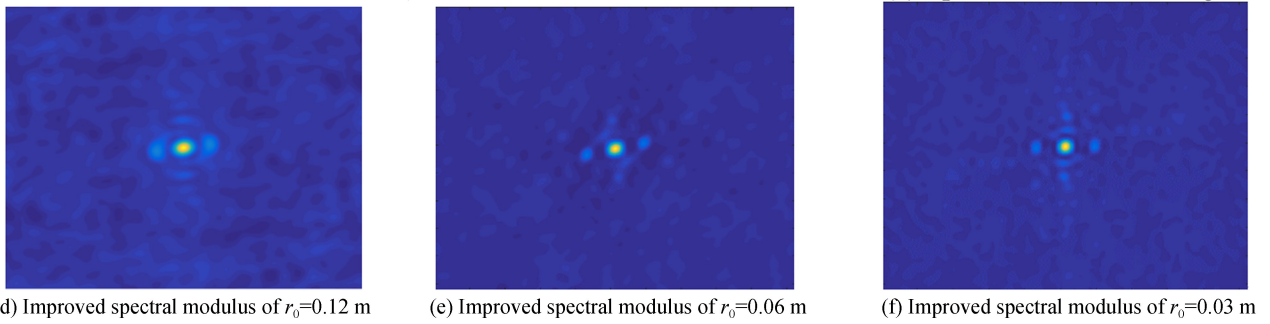


图6 频谱模值实验结果
Fig.6 Experimental results of modulus spectra

根据实验结果可看出,不同强度的湍流使得光的空间相干性产生相应的变化,并影响到恢复的频谱模值.对比发现,考虑相干性变化后的强度相干成像模型能较好地恢复目标频谱模值.

为更好地反映频谱模值恢复质量,计算各实验结果与真实频谱的峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR), PSNR 值越大,说明与真实频谱越接近,结果如表 2.其中非相干模型为利用原有不考虑光空间相干性解算得到的频谱与真实频谱的 PSNR,相干模型为利用改进后的考虑光空间相干性解算得到的频谱与真实频谱的 PSNR.

表 2 两种模型在不同湍流相干长度下的峰值信噪比
Table 2 The PSNR of two models under different turbulence coherence length

| | $r_0 = 0.12 \text{ m}$ | $r_0 = 0.06 \text{ m}$ | $r_0 = 0.03 \text{ m}$ |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Incoherent model PSNR | 24.2 dB | 27.4 dB | 29.0 dB |
| Coherent model PSNR | 25.6 dB | 28.4 dB | 30.8 dB |

横向分析表 2 数据可发现,在使用原有非相干强度相干成像模型的情况下: r_0 为 0.12 m 时 PNSR 为 24.2 dB; r_0 为 0.06 m 时 PNSR 为 27.4 dB,增加了 3.2 dB; r_0 为 0.03 m 时 PNSR 为 29.0 dB,比 r_0 为 0.12 m 时增大了 4.8 dB.在使用改进后的强度相干成像模型的情况下: r_0 为 0.12 m 时 PNSR 为 25.6 dB; r_0 为 0.06 m 时 PNSR 为 28.4 dB,增加了 2.8 dB; r_0 为 0.03 m 时 PNSR 为 30.8 dB,比 r_0 为 0.12 m 时增大了 5.2 dB.分析原因可知:随着湍流相干长度 r_0 的降低,即湍流的增强,湍流引起的光空间相干性逐渐降低,使得目标光场越来越接近于理想的非相干光源,因此得到的 PSNR 越来越大.

纵向分析表 2 数据可发现, $r_0 = 0.12 \text{ m}$ 时,改进后的强度相干成像模型 PSNR 比原有强度相干成像模型 PSNR 高 1.4 dB,提高了 5.8%; $r_0 = 0.06 \text{ m}$ 时,改进后的强度相干成像模型 PSNR 比原有强度相干成像模型 PSNR 高 1.0 dB,提高了 3.6%; $r_0 = 0.03 \text{ m}$ 时,改进后的强度相干成像模型 PSNR 比原有强度相干成像模型 PSNR 高 1.8 dB,提高了 6.2%.分析原因可知:大气湍流使得主动照明激光的相干性进行退化,到达目标表面的光仍然具有部分空间相干性.根据广义 Van Citter-Zernike 定理,相干因子的存在会影响目标频谱质量.因此,在相同湍流强度下,改进后的模型恢复频谱模值的 PSNR 更大,频谱模值恢复质量更优.

因此,在地基激光主动照明时,对原有强度相干成像模型进行改进是必须的.考虑相干性变化后恢复的频谱模值质量要更优,会改善最终图像的恢复质量.

4 结论

本文研究了地基激光经大气湍流到达空间目标后的空间相干性变化.根据 Zernike 多项式展开法对大气随机相位屏进行数值模拟,并仿真了不同湍流条件下的解算目标频谱模值.仿真结果表明:在考虑了湍流引起的主动照明激光相干性变化的影响下,建立新的强度相干成像模型可以很好地消除相干性变化的影响.另外,本文还设计了室内实验平台进行验证,并对实验结果与真实频谱进行 PSNR 计算.实验结果表明:使用地基激光照明的强度相干成像方法对高轨目标成像时,考虑光相干性变化是必要的,基于光相干性变化建立的主动照明强度相干成像模型可以较好地恢复目标频谱,验证了模型及仿真结果的正确性.在强度相干成像过程中,仅能获得目标频谱模值的分布,而丢失了相位信息.为研究基于地基激光照明的强度相干成像方法,课

题组后续将在本文对频谱模值研究的基础上,结合恰当的相位恢复算法,利用强度相干成像方法对远距离目标成像.

参考文献

- [1] ZHOU Yan-ping, TAO Kun-yu, SHU Rui, *et al.* Study of photoelectric detecting and identifying of space target[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 68-73.
周彦平,陶坤宇,舒锐,等.空间目标光电探测与识别技术的研究[J].光学技术,2007,**33**(1):68-73.
- [2] ZHANG Jing-xu. Progress in foreign ground-based optoelectronic detecting system for space target detection[J]. *Chinese Optics*, 2009, **2**(1): 10-16.
张景旭.国外地基光电系统空间目标探测的进展[J].中国光学,2009,**2**(1):10-16.
- [3] ZHANG Jing-xu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, **5**(4): 327-336.
张景旭.地基大口径望远镜系统结构技术综述[J].中国光学,2012,**5**(4):327-336.
- [4] BROWN R H, TWISS R Q. A test of a new type of stellar interferometer on Sirius[J]. *Nature*, 1956, **178**(1046): 19.
- [5] HANBURY BROWN R, DAVIS J, ALLEN L R. The angular diameters of 32 stars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1974, **167**: 121-136.
- [6] 吕乃光.傅里叶光学(第2版)[M].机械工业出版社,2012.
- [7] GAO Xin, LI Xi-yu, TANG Jia, *et al.* Ameliorated method of intensity correlation imaging towards high-orbit satellites [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **36**(6): 0611002.
高昕,李希宇,唐嘉,等.面向高轨目标的强度相干成像方法改进研究[J].光学学报,2015,**36**(6):0611002.
- [8] LU Chang-ming, WANG Jian-jun, GAO Xin, *et al.* A study on the theory of Fourier telescope and its improvement[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2010, **29**(2): 17-20.
陆长明,王建军,高昕,等.傅里叶望远镜原理及改进研究[J].飞行器测控学报,2010,**29**(2):17-20.
- [9] BORN M, WOLF E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light (7th edition) [J]. *Physics Today*, 1999, xxviii (10).
- [10] GOODMAN J W. Statistical optics[M]. Courier Dover Publications, 2004.
- [11] 饶瑞中.现代大气光学[M].科学出版社,2012.
- [12] PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media, second edition[M]. SPIE Press, 2005.
- [13] WANG S C H, PLONUS M A. Optical beam propagation for a partially coherent source in the turbulent atmosphere [C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, 1979; 319-322.
- [14] GAO Xin, LI Xi-yu, WANG Bin, *et al.* Improved experiment method for intensity correlation imaging in laboratory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(1): 83-92.
高昕,李希宇,王斌,等.改进的强度相干成像室内实验方法[J].光学精密工程,2015,**23**(1):83-92.
- [15] 耿泽勋,陈波,王振国,等.自适应光学图像复原理论与方法[M].北京:科学出版社,2010,30-78.
- [16] ZHANG Hui-min, LI Xin-yang. Numerical simulation of wavefront phase screen distorted by atmospheric turbulence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1): 14-19.
张惠敏,李新阳.大气湍流畸变相位屏的数值模拟方法研究[J].光电工程,2006,**33**(1):14-19.
- [17] NOLL R J. Zernike polynomials and atmosphere turbulence[J]. *Optical Society of America*, 1976, **66**(3): 207-211.
- [18] DAI G M. Wavefront simulation for atmospheric turbulence[C]. SPIE, 1994, **2302**: 62-72.
- [19] DAI G. Modal compensation of atmospheric turbulence with the use of Zernike polynomials and Karhunen-Loève functions[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, **12**(12): 2182-2193.
- [20] LU Chang-ming, HUANG Hui-ming, RAO Chang-hui, *et al.* Random phase screen generation by covariance method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(8): 16-18.
陆长明,黄惠明,饶长辉,等.大气相位屏的协方差冲激函数产生法[J].光电工程,2005,**32**(8):16-18.

Foundation item: The National High Technology Research and Development Program of China (No. 2015AAxxx5038) and the Science Foundation of Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology

引用格式: LI Chong, GAO Xin, LI Xi-yu, *et al.* Improved Coherent Light Illumination Intensity Correlation Imaging Method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1011004

李冲,高昕,李希宇,等.改进的相干光照明强度相干成像方法[J].光子学报,2018,**47**(10):1011004