

doi: 10.3788/gzxb20164504.0410003

大气湍流对空间目标偏振成像探测的影响

王国聪^{1,2}, 王建立¹, 张振铎¹, 于树海¹, 曾蔚³

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 山东大学 信息科学与工程学院, 济南 250001)

摘要:为研究大气湍流对空间目标偏振成像探测准确度的影响, 构建了大气湍流影响下的偏振成像探测模型, 并对大气湍流导致的空间目标偏振度探测偏差进行仿真分析. 通过对分时和同时偏振成像方式进行仿真, 发现大气湍流会对空间目标偏振成像探测准确度造成明显影响, 且对分时偏振成像探测准确度的影响明显大于同时偏振成像方式. 通过自适应系统校正部分低阶像差, 能明显减小大气湍流对偏振成像探测准确度的影响. 为了兼顾图像信噪比和大气湍流影响下的偏振成像探测准确度, 给出了一种结合分时和同时成像方式的改进偏振成像探测方式, 大气湍流对其的影响略大于同时偏振成像方式, 但该方法图像信噪比明显优于同时偏振成像方法. 另外仿真分析发现, 采用多帧图像叠加能效减小大气湍流带来的空间目标偏振成像探测偏差, 在使用分时偏振成像方式时效果尤为明显.

关键词:偏振; 大气湍流; 空间目标; 望远镜; 探测与识别

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)04-0410003-7

Influence on Space Target Polarization Imaging Detection Resulting from Atmospheric Turbulence

WANG Guo-cong^{1,2}, WANG Jian-li¹, ZHANG Zhen-duo¹, ZENG Wei³

(1 *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

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

(3 *The School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250001, China*)

Abstract: In order to study the impact of atmospheric turbulence on the imaging polarization detection of space targets, this paper constructed a simulation analysis model and focused on analyzing detection deviations of degree of linear polarization caused by the atmospheric turbulence. By simulating the time-sharing and simultaneous polarization imaging method, it is found that atmospheric turbulence has obvious influence on the imaging polarimetric measurement accuracy, which impacts the time-sharing imaging polarization method more obviously. And the impact resulting from atmospheric turbulence can be significantly reduced by using the adaptive system to correct partial low order aberrations. For balancing the imaging signal-to-noise ratio and the measurement accuracy of the imaging polarimetry, an improved polarization imaging method which combining with time-sharing and simultaneous imaging method was proposed. The influence of atmospheric turbulence on this method is larger than the simultaneous method slightly. But the proposed method can achieve a better imaging signal-to-noise ratio. Then from simulating and analyzing, it is found that multi-frame images combination method can reduce the deviations of polarimetric measurements under influence of atmospheric turbulence effectively, especially for time-sharing polarization imaging method.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No. 2014AAXXX072D)资助

第一作者: 王国聪(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为地基偏振成像探测及图像处理等. Email: wangguocong0215@163.com

导师(通讯作者): 王建立(1971-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等. Email: wangjianli@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2015-10-22; 录用日期: 2016-01-04

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

Key words: Polarization; Turbulence; Space target; Telescope; Detection and identification

OCIS Codes: 100.4999; 260.5430; 010.7060; 110.6770

0 引言

研究表明人造空间目标散射光具有明显的偏振特性^[1-2],且偏振特性会随着目标表面材料、形态以及太阳、目标与观测者间的几何关系变化而改变.获取空间目标散射光的偏振特性,能为空间目标的识别与姿态分析提供更多的依据,有望提升空间目标识别和姿态分析的准确性.

国内外针对人造空间目标的偏振探测已有部分实验研究,Sancheza等利用美国星火靶场3.5m望远镜对多个同步轨道卫星进行了偏振观测,并研究其偏振特性的时变规律^[2].李雅男等基于中科院国家天文台1m口径望远镜对地球同步轨道卫星进行偏振观测实验,并与实验室内模拟结果进行比对分析^[3].但目前国内外开展的人造空间目标偏振观测采用的均是非成像点目标偏振探测,对于空间目标成像偏振探测的研究仅有部分仿真成果,Bush等基于转型卫星通信系统(TAST)模型仿真得到了几个典型的低轨空间目标的偏振图像^[4].姚大雷等人对具有简单外形的人造空间目标散射光偏振特性开展了相关仿真研究^[5].

地基大口径自适应望远镜可以获取空间目标的图像,基于其构建偏振成像探测系统,是开展人造空间目标偏振成像探测的有效技术途径.但大气湍流会对空间目标的成像探测效果造成影响^[6],其带来的目标图像模糊会影响空间目标偏振成像探测准确度.目前对这一影响的相关研究鲜有报道.

为此本文构建了大气湍流影响下的空间目标偏振成像探测仿真模型,分析了大气湍流对空间目标偏振成像探测的影响.同时针对现有分时和同时偏振成像方式的不足,给出了一种改进的空间目标偏振成像方式,可以同时兼顾图像信噪比和大气湍流影响下的偏振成像探测准确度.另外通过仿真分析发现,采用多帧图像叠加是一种降低大气湍流对偏振成像探测准确度影响的有效方法.

1 理论基础及仿真方法

1.1 大气湍流影响下偏振图像获取

当人造目标被自然光照明时,目标反射的部分偏振光可以被分解为非偏振分量和完全偏振分量叠加的形式^[7],即

$$I = I_U + I_P \quad (1)$$

式中 $I_U = I(1-P)$ 为非偏振分量, $I_P = IP$ 为完全偏振分量, P 为线偏振度(Degree of Linear Polarization, DoLP).在不考虑大气湍流扰动时,通过线偏振片后的图像表示为

$$I_c(x) = \frac{1}{2} \cdot I(x) \cdot (1 - P(x)) + I(x) \cdot P(x) \cdot \cos^2[\alpha(x) - \theta_c] \quad (2)$$

式中 $\alpha(x)$ 为线偏振角, θ_c 为线偏振角透偏振方向.

考虑大气湍流带来的图像退化,通过线偏振片后的图像表示为

$$I'_c(y) = \sum_x I(x) h_c(y-x) = \frac{1}{2} \cdot \sum_x I_U(x) h_c(y-x) + \left[\sum_x I_P(x) h_c(y-x) \right] \cos^2[\alpha'(y) - \theta_c] \quad (3)$$

式中 h_c 为点扩散函数.

相关研究表明大气湍流对远距离传输光偏振态的影响可以忽略^[8],因此大气湍流导致目标散射偏振光在探测器上的成像分布变化,是影响空间目标偏振成像探测准确度的主要因素^[9],因此式(3)可以表示为

$$I'_c(y) = \frac{1}{2} \sum_x I_U(x) h_c(y-x) + \sum_x I_P(x) h_c(y-x) \cdot \cos^2[\alpha(x) - \theta_c] = \sum_x \left\{ \frac{1}{2} I_U(x) + I_P(x) \cdot \cos^2[\alpha(x) - \theta_c] \right\} h_c(y-x) \quad (4)$$

式(4)为经大气湍流扰动后,单个偏振成像通道获取的 θ_c 透偏振方向上的图像.

三通道同时线偏振成像方式通常采用分振幅、分孔径或分焦面等手段同时获取 0° 、 60° 和 120° 三个透偏振方向的图像,进而提取出目标的线偏振信息^[10].基于地基大口径望远镜开展空间目标偏振成像探测时,同时偏振成像方式图像采集同步性好,但使用同一个光学系统进行偏振成像时,同时偏振成像方式会将收集到的目标能量分配到每个偏振成像通道中,从而导致图像信噪比降低^[11-13].受大气湍流影响后的同时偏振成像可以用式(5)表示,即

$$I'_c(y) = \sum_x \left\{ \frac{1}{2} I_U(x) + I_P(x) \cdot \cos^2[\alpha(x) - \theta_c] \right\} h_c(y-x) \quad (5)$$

式中 $c=1,2,3$, $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=60^\circ$, $\theta_3=120^\circ$,三个通道传递函数相同.

分时线偏振成像方式需分三次获取 0° 、 60° 和 120° 三个透偏振方向的图像,该方式相对于同时偏振成像具有更好的信噪比,但图像采集同步性差.探测过程表示为

$$I'_c(y) = \sum_x \left\{ \frac{1}{2} I_U(x) + I_P(x) \cdot \cos^2[\alpha(x) - \theta_c] \right\} h_c(y-x) \quad (6)$$

式中 $c=1,2,3$, $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=60^\circ$, $\theta_3=120^\circ$,三个通道传

递函数不相同.

1.2 仿真流程

大气湍流影响下偏振图像获取方法的流程如图

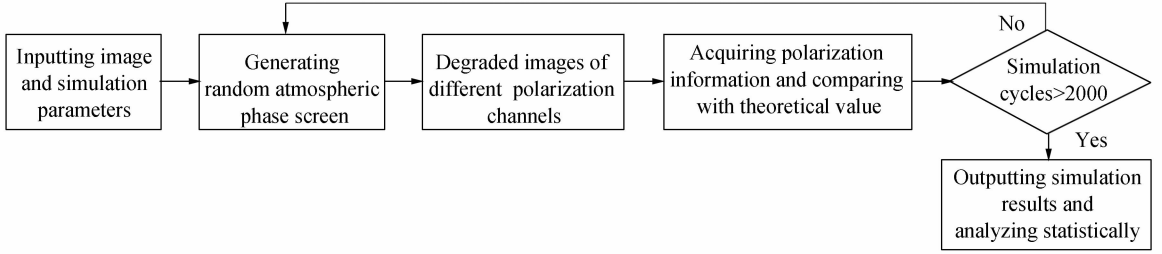


图 1 仿真流程图

Fig. 1 Simulation flow diagram

首先输入目标图像及仿真参量,采用 Zernike 多项式法^[14-15]随机生成大气相位屏,按照 1.1 节中给出的方法获取经大气湍流影响后的不同偏振通道图像,经图像配准后获取目标的偏振度和偏振角图像^[16],与理论图像进行对比,得出偏振探测偏差均值和均方根偏差(Root Mean Square Error, RMSE)均值,进行 2000 次重复仿真后输出仿真结果进行统计分析. 其中 RMSE 计算方法为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - \hat{f}(i,j)]^2}{M \times N}} \quad (7)$$

式中 $f(i,j)$ 和 $\hat{f}(i,j)$ 分别为理想图像和被评价图像在点 (i,j) 处的值.

2 数值仿真及分析

2.1 仿真条件

仿真中使用的相关参量如表 1,目标图像采用具有偏振特性的条状靶标和仿真天宫图像,如图 2,衍射极限下的偏振度图像如图 3.

表 1 仿真中的相关参量

Table 1 Simulation parameters

Aperture	Atmospheric coherence length	Focus length	Grid	Wavelength
1.2 m	0.05~0.25 m	48 m	256×256	800 nm

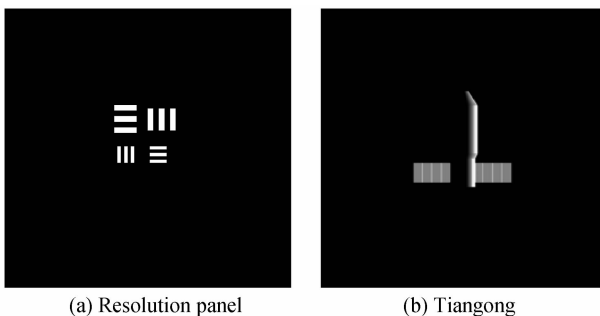


图 2 仿真目标图像

Fig. 2 Simulation images of target

1. 由于大气湍流是随机量,需对多次仿真结果进行统计分析,因此在各种情况进行 2000 次重复模拟.

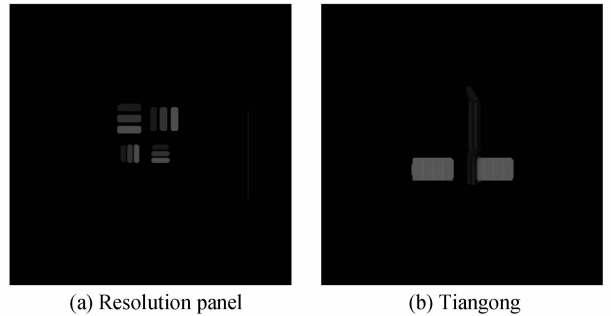


图 3 衍射极限偏振度图像

Fig. 3 Diffraction-limited DoLP images

2.2 仿真图像

在大气相干长度 $r_0 = 0.1m$ 的条件下仿真分时偏振成像探测过程,选取其中一组图像进行分析,三次成像对应的大气相位屏的均方根值(Root Mean Square, RMS)分别为 1.6534λ 、 1.8876λ 和 0.8698λ ,配准后的三通道仿真图像如图 4,图 4(d)为偏振度图像.对比图

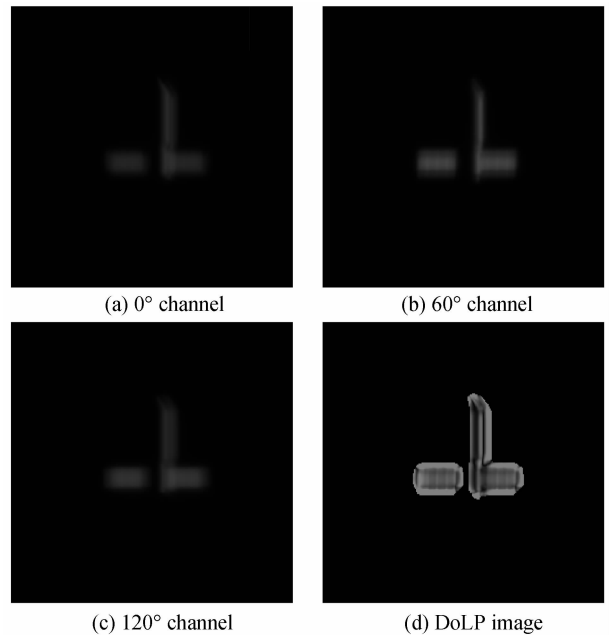


图 4 大气湍流影响下各通道图像及偏振度图像

Fig. 4 DoLP images under influence of atmospheric turbulence

4(d)与衍射极限下的理论偏振度图像,可见明显看出强大气湍流对目标偏振信息获取的准确性造成了影响.

2.3 大气湍流对偏振成像探测影响仿真

仿真中使用的大气相位屏采用 Zernike 多项式法生成,基于极坐标下的归一化圆域 Zernike 多项式,其低阶模式可以与低阶像差相对应,各 Zernike 项的系数表示对应像差的 RMS 值.在生成大气相位屏时,各 Zernike 项系数生成基本流程为:首先在 Kolmogorov 湍流功率谱模型条件下,得到各项 Zernike 多项式系数间的协方差,不同系数间的协方差组合成矩阵 \mathbf{A} ,通过对 \mathbf{A} 进行奇异值分解

$$[\mathbf{U}, \mathbf{S}, \mathbf{V}] = \text{svd}(\mathbf{A}) \quad (8)$$

得到对角矩阵 \mathbf{S} . 随后采用蒙特卡洛法随机生成 N 个均值为 0、方差为 \mathbf{S} 的高斯分布随机数,构成列向量 \mathbf{B} ,则各 Zernike 项系数通过式(9)计算得到

$$a_i = \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(:, i) \quad (9)$$

取大气相干长度 $r_0 = 0.1 \text{ m}$,采用前 231 项 Zernike 多项式拟合大气相位屏,然后分别截取前 1~50 项 Zernike 多项式构成部分大气湍流导致的波前相位畸变,分析大气湍流导致的不同像差对偏振度探测准确度的影响.

以仿真天宫图像为目标,对 2000 次重复仿真获得的偏振度 RMSE 取均值,结果如图 5. 对偏振探测准确度造成影响的大气湍流主要集中在前 30 项,可见大气湍流产生的低阶像差是空间目标偏振成像探测准确度产生的主要原因.

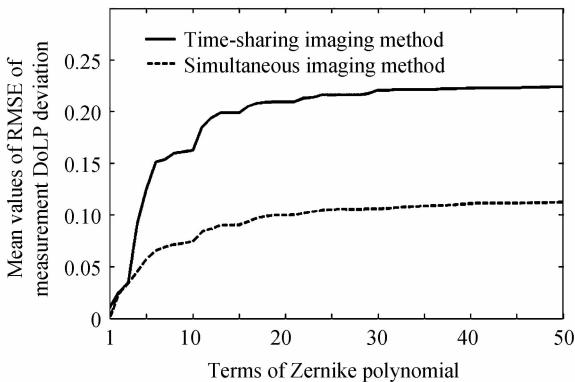


图 5 偏振度 RMSE 均值随 Zernike 多项式项数增加的变化
Fig. 5 The mean values of DoLPRMSE versus increasing of the terms of Zernike polynomial

在不同大气相干长度条件下,仿真分析大气湍流对偏振成像探测准确度的影响,对 2000 次仿真的统计分析结果如图 6,其中图 6(a)表示对分辨率靶标和天宫分别采用同时和分时偏振成像方式时,大气湍流导致的偏振度探测偏差均值,图 6(b)表示相应的偏振度探测偏差 RMSE 均值.可见大气湍流对空间目标偏振探测准确性造成明显影响,随着大气湍流剧烈程度的

减弱,偏振探测偏差逐渐减小,且大气湍流对同时偏振成像探测方式偏振度探测准确度的影响明显小于分时成像方式.

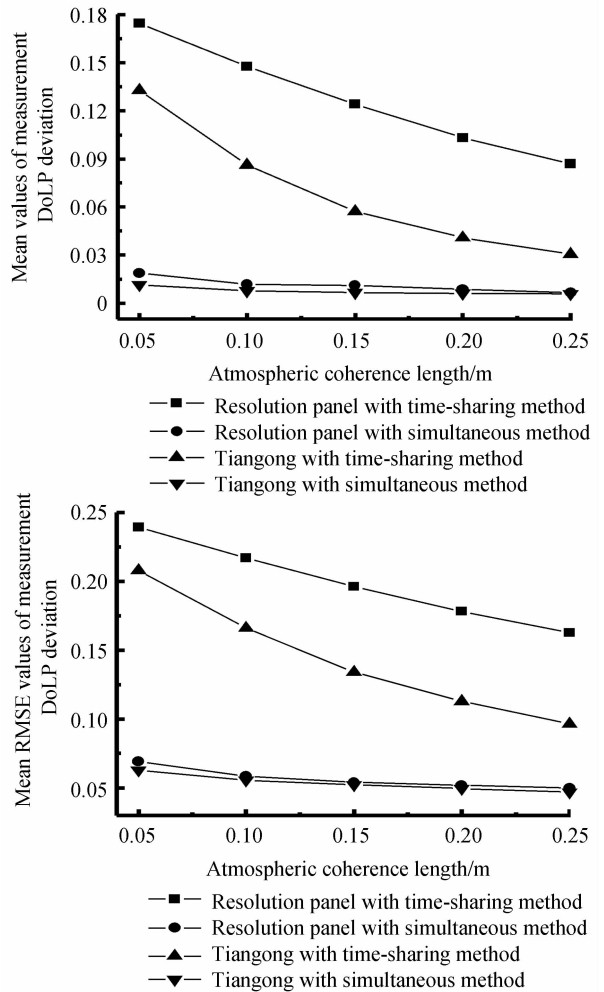
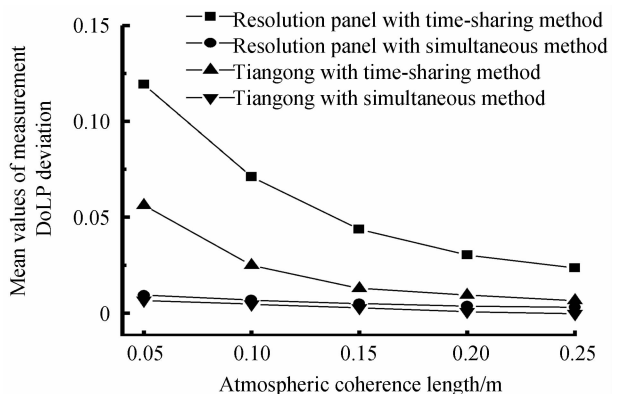
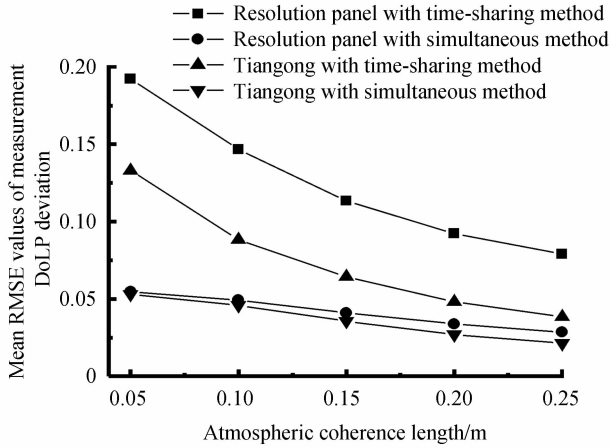


图 6 偏振度探测偏差随大气相干长度变化
Fig. 6 The measurement DoLP deviation versus the changing of atmospheric coherence length

由此可知,影响偏振成像探测准确度的主要因素为大气湍流引起的低阶像差,自适应(Adaptive Optics, AO)系统可以对大气湍流导致的低阶像差进行有效校正^[17-18],从而提升偏振成像探测准确度.为简单分析经



(a) The mean values of measurement DoLP deviation



(b) The mean values of RMSE of measurement DoLP deviation

图7 仿真自适应系统校正后偏振度 RMSE 均值

Fig. 7 The measurement DoLP deviation after corrected by adaptive optics system

自适应系统校正后的偏振探测偏差,假设自适应系统可以矫正 90% 的倾斜、70% 的像散和慧差以及 50% 的其余低阶像差^[19]. 在不同大气相干长度条件下,仿真分析校正后残余大气扰动对偏振成像探测准确度的影响. 2000 次仿真的统计分析结果如图 7. 对比图 7 和图 6 可知,经自适应系统校正后,偏振探测偏差明显减小.

3 提升偏振探测准确度的方法

3.1 偏振成像方案改进

由前文的仿真分析可知,同时偏振成像方式的偏振信息获取准确度受大气湍流影响相对较小,但其图像信噪比较低;分时成像方式获取图像信噪比较好,但偏振信息获取准确度受大气湍流影响大. 因此为了在保证图像信噪比的同时,兼顾大气湍流对空间目标偏振成像探测准确度的影响,提出了一种结合同时成像和分时成像的偏振成像探测方案,其示意图如图 8. 该方案(后文中称简称为改进成像方式)采用偏振分光棱

镜(Polarization Beam Splitting, PBS)进行分光,使用两个相机进行同时成像,图像采集过程分两步完成. 首先同时获取 0° 和 90° 透偏振方向的图像,下一步通过调整半波片的方向,再同时获取 45° 和 135° 透偏振方向的图像,探测过程可表示为式(10). 该方案获得的图像信噪比与分时成像方式相同,图像采集同步性介于同时采集和分时采集之间.

$$I'_c(y) = \begin{cases} \sum_x \left[\frac{1}{2} I_U(x) + I_P(x) \cos^2(\alpha(x) - \theta_c) \right] \cdot h_1(y-x), c = 1, 2; \theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 90^\circ \\ \sum_x \left[\frac{1}{2} I_U(x) + I_P(x) \cos^2(\alpha(x) - \theta_c) \right] \cdot h_2(y-x), c = 3, 4; \theta_3 = 45^\circ, \theta_4 = 135^\circ \end{cases} \quad (10)$$

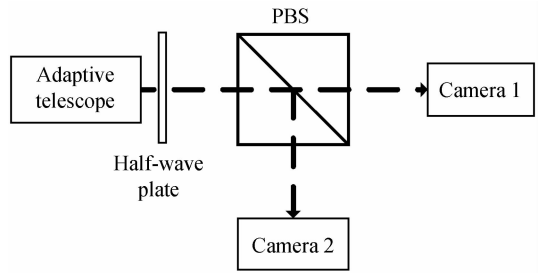
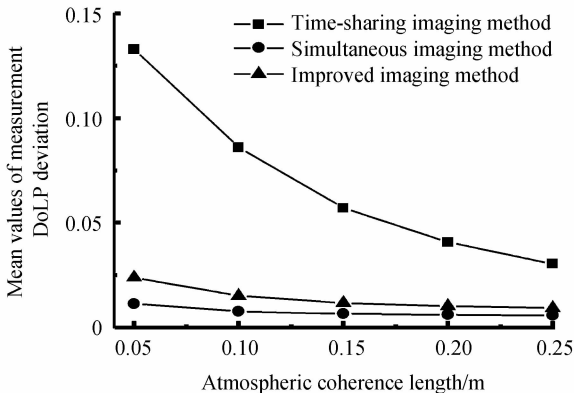


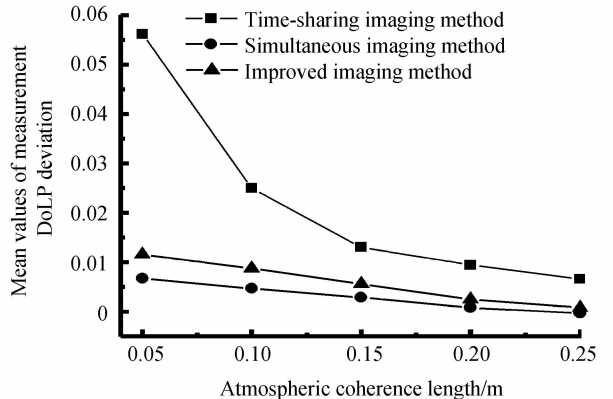
图8 改进偏振成像方案示意图

Fig. 8 Schematic of the improved polarization imaging method

以仿真天宫图像为目标,采用前文中的仿真方法对大气湍流影响下的改进成像方式偏振成像探测偏差进行分析,并和分时成像方式与同时成像方式进行对比,结果如图 9. 在大气湍流影响较强的情况下,改进成像方式的偏振探测偏差影响明显小于分时偏振成像方式;在大气湍流强度较弱,并且使用自适应系统进行校正的情况下,改进成像方式也可减小大气湍流引起的偏振探测偏差. 可见改进偏振成像探测方式可以有效减小大气湍流对偏振探测准确度的影响,更适用于空间目标偏振成像探测.



(a) The mean values of measurement DoLP deviation without AO system correction



(b) The mean values of measurement DoLP deviation with AO system correction

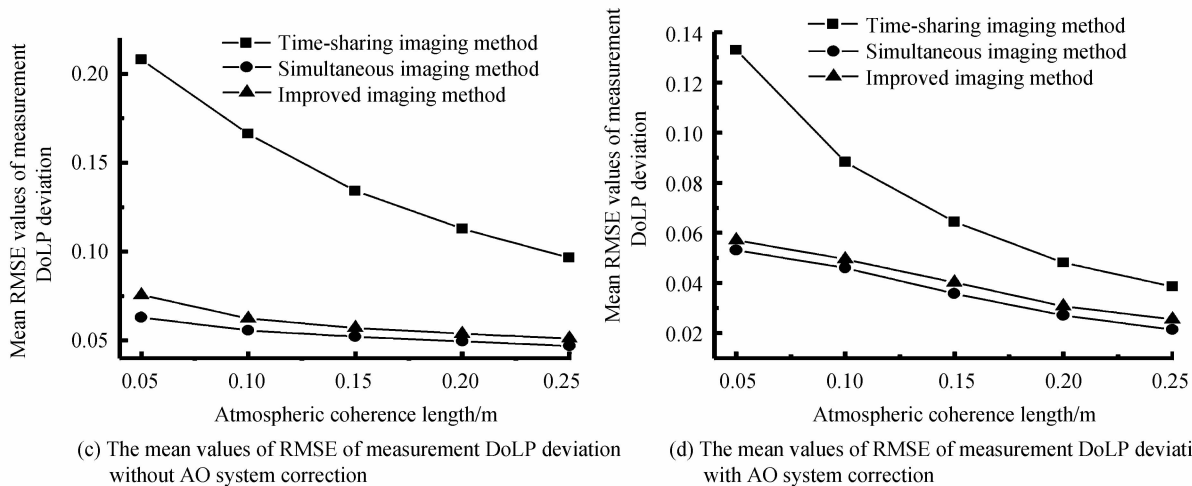


图 9 三种偏振成像探测方式在大气湍流影响下偏差度探测偏差分析

Fig. 9 The measurement DoLP deviation of the three polarization imaging methods under influence of atmospheric turbulence

3.2 多帧图像叠加

采用多帧图像叠加,可以减小大气湍流对偏振探测准确度的影响,具体方法为:在每个偏振通道采集目标图像时先进行多帧图像叠加,再使用叠加后的各偏振通道图像提取目标偏振信息.为验证其有效性,以天宫图像为目标,在大气相干长度为 0.1m 的条件下进行仿真,结果如图 10,其中图 10(a)为采用分时偏振成像方式时偏振度 RMSE 均值随图像叠加帧数的变化曲线,图 10(b)对应同时偏振成像和改进成像方式时的结果.可见对于分时偏振成像方式,多帧图像叠加能明显减小大气湍流带来的偏振成像探测偏差,在图像叠加帧数多于 5 帧后,偏振成像探测偏差减小速度放缓.对于改进成像方式和同时成像方式,多帧图像叠加也可消除部分偏振探测偏差.因此在对实际目标进行观测时,根据目标的运动及姿态变化速度选取合适的叠加帧数可以减小大气湍流对偏振信息获取准确度的影响.

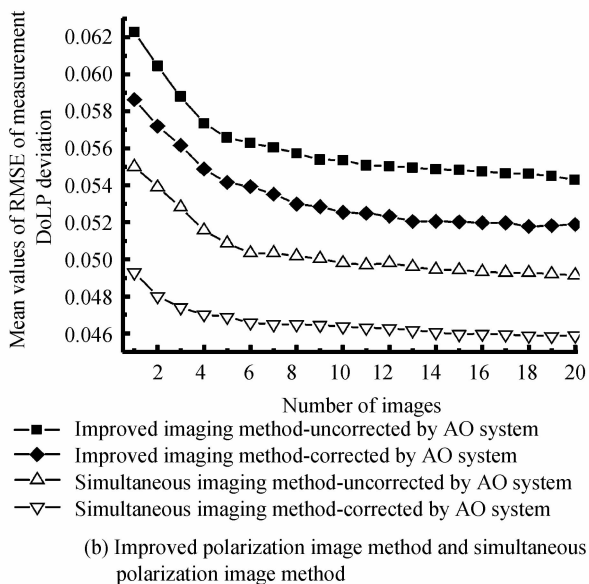
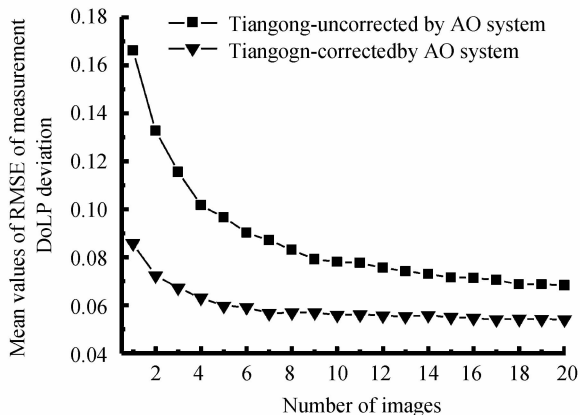


图 10 偏振度偏差 RMSE 均值随图像叠加帧数变化

Fig. 10 The mean RMSE values of measurement DoLP deviation versus increasing of the number of images



(a) Time-sharing polarization image method

4 结论

对大气湍流对偏振成像探测的影响进行了模拟仿真,重点分析了大气湍流对分时和同时两种偏振成像方式偏振信息获取准确度的影响.结果表明,大气湍流对两种偏振成像方式的偏振信息获取准确度均有影响,尤其对分时成像方式影响更加明显.造成这些影响的主要因素是大气湍流引起的低阶像差,通过自适应系统对部分低阶像差进行校正,能明显减小偏振探测偏差.

为了在不降低图像信噪比的前提下减小大气湍流对空间目标偏振成像探测准确度的影响,对分时偏振成像方式进行了改进,有效降低了大气湍流对其偏振成像探测准确度的影响.通过仿真分析发现,采用多帧图像叠加可以进一步提升大气湍流影响下的偏振成像探测准确度.该研究可为现有空间目标偏振成像探测系统改进提供理论指导.

参考文献

[1] SANCHEZA J, GREGORYB A, STORM S, *et al.* Photopolarimetric measurements of geosynchronous satellites [C]. SPIE (S0277-786X), 2001, **4490**: 221-236.

[2] DEBOO J, SASIAN M, CHIPMAN A. Depolarization of diffusely reflecting man-made objects [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(26): 5434-5445.

[3] LI Ya-nan, SUN Xiao-bing, MAO Yong-na, *et al.* Spectral polarization characteristic of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(1): 205-210.
李雅男,孙晓兵,毛永娜,等.空间目标光谱偏振特性[J].红外与激光工程,2012,**41**(1):205-210.

[4] BUSH K, CROCKETT G, BARNARD C, *et al.* Satellite discrimination from active and passive polarization signatures : Simulation predictions using the TASAT satellite model [C]. SPIE(S0277-786X) ,2002,**4481**:46-57.

[5] YAO D, XUE J, WEN D, *et al.* The degree of polarization modeling with different shapes of the satellite [J]. *Optik*, 2016, **127**: 1860-1866.

[6] MA Xue-lian. Effect of atmospheric turbulence on resolution and spot radius of long-term exposure and short-term exposure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(6): 0601003.
马雪莲.大气湍流对长曝光和短曝光条件下分辨率与像斑半径的影响[J].光子学报,2015,**44**(6):0601003.

[7] WOLF E. Can a light beam be considered to be the sum of a completely polarized and a completely unpolarized beam [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(7): 642-644.

[8] KOROTKOVA O. Polarization changes in light beams trespassing anisotropic turbulence [J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(13): 3077-3080

[9] LEMASTER A, CAIN C. Multichannel blind deconvolution of polarimetric imagery [J]. *Journal of the Optical Society of America A-optics Image Science and Vision*, 2008, **25**(9): 2170-2176.

[10] SCOTT J, GOLDSTEIN L, CHENAULT B, *et al.* Review

of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(22): 5453-5469.

[11] PERKINS R, GRUEV V. Signal-to-noise analysis of Stokes parameters in division of focal plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 25815-25824.

[12] XIE Zheng-mao, GAO Li-min, HE jun-hua. Optical sysem design of near infrared spectroscopy based on polarized interference [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **43** (12): 1222003.
谢正茂,高立民,何俊华.近红外偏振干涉光谱仪的光学系统设计[J].光子学报,2014,**43**(12):1222003.

[13] WANG Fang-bin, HONG Jin, SUN Xiao-bing, *et al.* Estimation and measurement of signal-to-noise ratio for aviation multi-angular polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 387-394.
汪方斌,洪津,孙晓兵,等.航空多角度偏振辐射计信噪比估算与测量[J].光学精密工程,2015,**23**(2):387-394.

[14] ZHANG Jian-zhu, ZHANG Fei-zhou, WU Yi. Methods for simulation phase screen [J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2012, **24**(10): 2138-2324.
张建柱,张飞舟,吴毅.大气湍流随机相屏模拟方法研究[J].强激光与粒子束,2012,**24**(10):2138-2324

[15] ZHANG Y, TANG Q, WANG J, *et al.* Numerical simulator of atmospherically distorted phase screen for multibeam time-dependent scenario [J]. *Applied Optics*, 2014, **53** (22): 5008-5015.

[16] GUIZAR-SICAÏROS M, THURMAN T, FIENUP R. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(2): 156-158.

[17] ZHAO Xin, MA Cai-wen. Research on non-smooth H_∞ control for the adaptive optics system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0901003.
赵欣,马彩文.自适应光学系统的非光滑 H_∞ 控制研究[J].光子学报,2014,**43**(9):0901003.

[18] WEI Pei-feng, LU Zhen-wu, LIU Xin-yue, *et al.* Performance analysis of adaptive optical system for spatial objectives [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44** (7): 0701001.
卫沛锋,卢振武,刘欣悦,等.自适应光学系统对空间运动目标校正性能分析[J].光子学报,2015,**44**(7):0701001.

[19] STRONGM. Polarimeter blind deconvolution using image diversity [D]. Air Force Institute of Technology, 2007: 61-69.