

doi:10.3788/gzxb20154404.0407002

相干场成像探测器噪声定量化占比模型

程志远^{1,2}, 罗秀娟¹, 马彩文¹, 张羽^{1,2}, 刘辉¹, 朱香平¹

(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)

摘 要:为解决激光相干场成像系统探测器噪声相对总噪声的定量化占比估计问题,分析探测器噪声是否为主要噪声源,提出一种探测器噪声占比权重定量化分析计算方法.基于光电子统计方法得到系统信噪比方程,并引入信噪比中间参数估计方程,建立了探测器噪声相对总噪声的占比权重定量化计算模型.结合理论分析与实验测量进行验证,结果表明:针对构建的相干场成像实验系统,探测器噪声占比权重达 52%,进一步分析可知实验在大气相对宁静的夜晚进行,系统受背景光噪声和湍流噪声影响小,探测器噪声是主要噪声源.所提方法可有效估算探测器噪声占比权重,具有便捷、高效的特点,可用于实际相干场成像系统探测器噪声定量化评估测量分析.

关键词: 激光束相干; 噪声分析; 实验和分析研究; 探测器; 噪声计算; 信噪比

中图分类号: TH743; O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)04-0407002-5

Detector Noise Quantitative Ratio Modelling in Coherent Field Imaging

CHENG Zhi-yuan^{1,2}, LUO Xiu-juan¹, MA Cai-wen¹, ZHANG Yu^{1,2}, LIU Hui¹, ZHU Xiang-ping¹

(1 *Xi'an institute of optics and precision mechanics of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

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

Abstract: In order to settle the problem of quantitatively estimating ratio of detector noise and analyse whether detector noise is the main noise in laser coherent field imaging system, a novel method of quantitative analysis detector noise ratio was proposed. The Signal-to-Noise (SNR) of the system was given by photoelectron statistics method, and estimating equation of SNR intermediate parameter was derived. A quantitative ratio model of detector noise to total noise was established by SNR equation and estimating equation of SNR intermediate parameter. The ratio model was tested and verified by theory analysis and experiment. The results show that in the specific experiment table, detector noise is about 52% of the total noise. Because the experiment was accomplished at night, turbulence noise and background noise had the least influence on the system, detector noise was the main noise source. The conclusion was acquired that the proposed method can accurately and effectively estimate detector noise ratio to total noise and has the advantage of simplicity and effectiveness. It can be widely applied in quantitative analysing and measuring of detector noise in laser coherent imaging system.

Key words: Laser beams-coherent; Noise analysis; Experimental and analytical studies; Detector; Noise calculations; SNR

OCIS Codes: 070.1060; 030.4280; 230.0040; 110.1650; 140.3290

0 引言

激光相干场成像技术(又称傅里叶望远术)作为一种新型高分辨成像技术,在遥感成像、天文观测等多个

领域具有重要的应用价值和意义.起源于 20 世纪 90 年代的激光相干场成像技术,通过发射多束激光,在目标域形成相干场,再通过接收系统会聚回波能量信号,信号经解调和相位闭合处理后,重构高分辨图像.与常

基金项目:国家自然科学基金(No. 11173053)资助

第一作者:程志远(1975-),男,副研究员,博士研究生,主要研究方向为微弱光电信号探测处理. Email: czy@opt. ac. cn

通讯作者:罗秀娟(1964-),女,研究员,主要研究方向为高分辨激光成像. Email: xj_luo@opt. ac. cn

导 师:马彩文(1965-),男,研究员,博士,主要研究方向为光电测控技术. Email: cwma@opt. ac. cn

收稿日期:2014-08-21;录用日期:2014-11-28

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

规光学成像相比具有分辨率高、主动性强等特点,适合于对远距离微弱目标高分辨成像.美国于1999年启动了傅里叶望远镜 GEO Light Imaging National Testbed (GLINT)项目,主要针对地球同步轨道目标高分辨成像^[1];随后又启动了针对低轨运动目标成像的 Satellite Active Imaging National Testbed (SAINT)项目^[2],并开展了实验研究^[3].国内关于激光相干场成像技术的研究整体处于原理验证阶段:中科院光电研究院开展了不同发射阵列分辨率^[4]、湍流指向误差对成像质量影响^[5]、信号采样理论等研究^[6];电子科技大学研究了激光发射阵列天线个数与成像质量之间的关系^[7];中科院西安光学精密机械研究所进行了激光大气传输能量^[8]和湍流数值仿真研究^[9];中科院长春光学精密机械研究所验证了成像不受大气下行链路影响^[10];国防科大验证了相位闭合技术^[11]和系统成像实验方案^[12].

激光回波信噪比是决定系统成像质量的关键因素,影响系统信噪比的噪声源主要有背景光噪声、探测器噪声、湍流扰动噪声、激光散斑噪声等^[13].美国 HOLMES 等对系统噪声来源和影响因素进行了定性分析研究^[13];2005年美国构建了演示验证系统,采用光电子统计方法得到系统信噪比^[1].量化分析研究相干场成像系统各噪声源占比权重,可为占比权重大的主要噪声源,采取针对性信噪比提升措施提供理论依据,而现有研究并没有针对各噪声源占比权重进行量化计算分析^[1,13].为此本文建立了探测器噪声相对总噪声的量化占比计算模型,基于理论计算与实验相结合的方法解决了探测器噪声相对系统总噪声的占比权重估计问题.

1 相干场成像系统原理

激光相干场成像原理如图1.系统主要由发射和接收两部分组成,发射系统发射频率调制后的多束干涉激光主动照射目标,在目标处形成移动的干涉条纹场,经目标反射的回波信号中包含了目标傅里叶频谱分量信息,再用大面积低光学质量要求的接收阵列系统接收目标回波能量信号,并利用相位闭合技术抑制

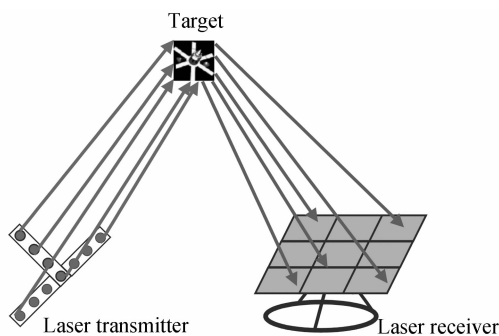


图1 激光相干场成像原理示意

Fig. 1 Laser coherent field imaging

大气湍流对相位扰动的影响,最后通过逆傅里叶变换重建目标高分辨图像^[1].

2 探测器噪声占比建模

2.1 相干场成像探测器噪声输出模型

激光相干场成像系统主要受探测器本底噪声、背景光噪声、激光散斑噪声和大气湍流引起的光强闪烁、光束漂移噪声等影响,一般认为这些噪声相互独立.方便起见,对于湍流引起的光强闪烁和光束漂移噪声本文统称为湍流扰动噪声.探测器本底噪声功率用 N_t 表示,是指由探测器暗电流、电阻等器件引起的噪声功率^[14-15];背景光噪声、激光散斑噪声、湍流扰动噪声功率之和统称为其它噪声且用 N_p 表示;系统总噪声功率用 N 表示,一般认为探测器噪声 N_t 和其它噪声 N_p 相互独立,则相干场成像系统噪声功率模型可简化表示为

$$N = N_p + N_t \quad (1)$$

不受噪声干扰的激光相干场信号功率用 S 表示;探测器总输出功率用 T_s 表示.一般情况下相干场信号 S 、探测器噪声 N_t 、其它噪声 N_p , 两两之间相互独立,则探测器输出(包括信号和噪声)功率模型可表示为

$$T_s = S + N_t + N_p \quad (2)$$

2.2 相干场成像信噪比计算模型

为得到探测器噪声占比模型,需先求解系统信噪比(Signal-to-noise, SNR),本文所采用的信噪比计算方法,可由成像频谱采样点数据 F_{ij} 直接计算得到,具有实现简单快捷的特点.

对于激光相干场成像系统,两束激光拍频信号信噪比计算公式为^[1]

$$\text{SNR}_{ij} = \langle |F_{ij}| \rangle / \sigma_{ij} \quad ij=12, 23, 13 \quad (3)$$

设 SNR_{ij} 为一组拍频光束 i 和 j 的信噪比, F_{ij} 为拍频时间段内解调出的拍频信号的光强幅值, σ_{ij} 为光强幅值的均方差, $\langle \rangle$ 表示统计均值.

在解调时间段内的光电子数估算值为

$$N_{ij} = \text{SNR}_{ij}^2 = N_i + N_j \quad (4)$$

式中: N_i 、 N_j 分别为光束 i 和 j 贡献的光电子数.则三光束相干场成像系统的总信噪比为

$$\text{SNR} = \sqrt{(\text{SNR}_{12}^2 + \text{SNR}_{13}^2 + \text{SNR}_{23}^2)/2} \quad (5)$$

由三光束相干场成像信噪比定义拓展到 n 光束相干场成像系统信噪比计算模型,可表示为

$$\text{SNR} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{SNR}_{ij}^2) / (n-1)} \quad (6)$$

2.3 信噪比中间参数估计方程

由信噪比定义得

$$\text{SNR} = S / (N_t + N_p) \quad (7)$$

定义信噪比中间参数 K

$$K = (S + N_p) / N_t \quad (8)$$

对信噪比定义式(7)逐级放大,可得信噪比中间参数 K

$$\begin{cases} S/(N_t+N_p) < S/N_t \\ S/N_t < (S+N_p)/N_t \end{cases} \quad (9)$$

由探测器输出模型式(2)可知,信噪比中间参数 K 又可表示为

$$K = (T_s - N_t) / N_t \quad (10)$$

式中,探测器输出信号 T_s 和探测器本底噪声 N_t 可由实验法测量得到,并由此测量值可得到信噪比中间参数 K 。

2.4 探测器噪声占比计算模型

定义探测器噪声占比权重 R_{N_t} ,计算公式为

$$R_{N_t} = N_t / (N_t + N_p) \quad (11)$$

一般情况下探测器本底噪声功率 N_t 不为零,式(11)变形后可得

$$R_{N_t} = 1 / (1 + N_p / N_t) \quad (12)$$

设中间变量 $a = S / N_t$, $b = N_p / N_t$,将中间变量 a 和 b 分别代入式(7)、(8)并联立,可得探测器本底噪声占比计算方程组模型为

$$\begin{cases} a + b = K \\ a / (1 + b) = \text{SNR} \end{cases} \quad (13)$$

将 b 代入式(12),则探测器噪声占比权重计算公式可表示为

$$R_{N_t} = 1 / (1 + b) \quad (14)$$

由式(6)计算得到的信噪比 SNR 和实测探测器噪声输出电压得到信噪比中间参数 K ,并作为已知量代入式(13)中,可解得 a 和 b ,并将 b 代入式(14),则可计算得到探测器本底噪声与系统总噪声量化占比权重 R_{N_t} 。

3 探测器噪声量化占比分析方法

Step 1:测量目标在无激光照射状态下,探测器本底噪声电压 V_{N_t} ,激光发射阵列运行到第 1 频谱采样点位置,发射多束激光照射目标,测量探测器接收多束激光回波信号状态下,探测器总输出电压 V_{T_s} ,取统计均值 $\langle V_{T_s} \rangle$;同时存储记录该采样点频谱数据,该频谱采样数据可用于后续计算系统信噪比 SNR。

Step 2:激光发射阵列运行到第 2 频谱采样点位置,重复 Step 1 和 Step 2,直至采集记录完所有频谱采样点无激光照射时探测器噪声电压 V_{N_t} 及频谱数据 F_{ij} 和探测器输出电压 V_{T_s} ,并分别取统计均值得到探测器噪声电压 V_{N_t} 和探测器总输出电压 V_{T_s} 。

Step 3:将探测器噪声功率 N_t 和探测器总输出功率 T_s ,分别代入式(10),可求解得到信噪比中间参数 $K = (V_{T_s}^2 - V_{N_t}^2) / V_{N_t}^2$ 。

Step 4:由频谱采样点数据 F_{ij} ,依据相干场成像信噪比模型式(6)计算得到系统信噪比 SNR。

Step 5:分别将信噪比 SNR 和信噪比中间参数 K 代入探测器噪声占比计算模型式(13)和(14),解方程

后,则可得到探测器噪声相对系统总噪声的占比值 R_{N_t} 。由 R_{N_t} 的大小,可量化分析探测器噪声对系统信噪比的影响权重,占比值越大,该噪声对系统信噪比影响权重越大,反之相反。

4 实验验证和结果分析

为验证所建立探测器噪声占比模型的正确性,结合具体相干场成像系统,进行实验验证和分析。为此构建了 3 光束激光相干场成像系统,基于统计实验的方法测量探测器本底噪声和探测器总输出信号,由探测器噪声占比计算模型,分析计算探测器噪声与总噪声的占比权重,定量评价探测器噪声是否该实验系统的主要噪声源。

4.1 相干场成像实验系统

相干场成像实验系统如图 2,主要由激光发射系统、信号接收探测系统两大部分组成。实验所用光电探测器如图 3,主要测量仪器为示波器。

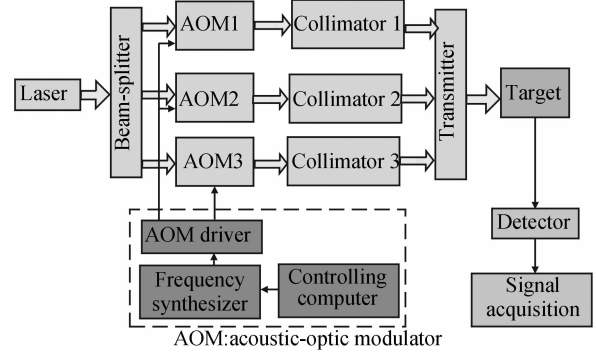


图 2 激光相干场成像实验系统示意

Fig. 2 Laser coherent field imaging experiment system

实验原理为光纤激光器输出激光经分束器分成 3 束,3 束激光分别经声光调制器频率调制后,其中 x 和 y 两束光,在发射控制计算机控制下,依托激光束搭载平台运行到 T 型发射阵列 X 轴和 Y 轴频谱采样点位置,中心光束 o 固定不动, o 、 x 、 y 三光束同时发射照射目标后,在目标域形成激光相干场,3 光束遍历 T 型发射阵列所有空间频谱采样点,每个频谱采样点相干场回波信号经探测器采集接收后,进行信号解调和相位闭合处理,最后重构目标高分辨图像。



图 3 实验所用探测器

Fig. 3 Experimental detector

4.2 实验条件

由于激光相干场回波信号通常很微弱,极易淹没在噪声信号中,而白天背景杂光太强,为最大限度减小背景光噪声的影响,未来的激光相干场成像望远镜主要在夜晚工作成像,故本实验也选择在大气相对宁静的夜晚进行. 温度范围:12~18 ℃;观测成像距离 60 m,激光波长 1 064 nm,激光发射总功率 30 mW.

4.3 实验设计

1)探测器信号输出端接示波器,在实验暗箱环境中,测量记录激光发射阵列所有频谱采样点无激光照射状态下探测器本底噪声电压测量值,并取统计均值,用于后续计算探测器噪声功率 N_t .

2)测量记录发射阵列所有频谱采样点激光照射状态下,探测器输出电压值并取统计均值,用于后续计算探测器功率输出值 T_s ,同时记录频谱采样数据 F_{ij} .

3)由探测器噪声功率测量值 N_t 和探测器信号功率总输出值 T_s ,计算信噪比中间参数 K ,由频谱采样数据 F_{ij} 计算信噪比 SNR,分别把信噪比中间参数 K 和系统信噪比 SNR 计算值代入探测器噪声占比模型式(13)和(14),计算本实验系统探测器噪声相对总噪声占比权重.

4.4 实验数据理论计算分析

采用理论分析和实验测量相结合的方法,分析探测器本底噪声对系统的影响权重. 理论分析部分主要用于分析计算系统信噪比 SNR;实验测量主要用于测量信噪比中间参数 K . 对本文构建的 3 光束激光相干场成像实验系统信噪比进行理论分析计算.

1)采样信号解调处理

设采样周期为 T ,采样点数为 N ,采集的回波信号 S 是周期离散的,采样信号中混叠 3 组不同频率的拍频信号,当采样周期 T 和采样点数 N 和频差 $\Delta\omega$ 满足 $NT\Delta\omega=2n\pi$ 时,通过式(15)可得到 3 组拍频解调信号分量 M_{12}, M_{13}, M_{23} .

$$M_{ij} = \sum S \cdot e^{jT \cdot i\Delta\omega_e} \quad (15)$$

2)相位闭合处理和拍频频谱分量求解

由 3 组解调信号分量 M_{12}, M_{13}, M_{23} 计算可得相位闭合系数

$$R(t) = M_{12} M_{23} / M_{13} \quad (16)$$

再由相位闭合系数 $R(t)$,可得到 3 光束系统两两干涉的 3 个拍频频谱分量 F_{12}, F_{13}, F_{23} .

3)求采样数据频谱均值

各采样点拍频分量经统计处理后得到频谱信号光强幅值统计均值 $\langle F_{12} \rangle, \langle F_{13} \rangle, \langle F_{23} \rangle$.

4)求采样频谱均方差

求解 3 个频谱分量统计均方差 $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$.

5)求解两两拍频光束信噪比 SNR_{ij}

分别计算 3 组拍频分量信噪比

$$SNR_{ij} = \langle F_{ij} \rangle / \sigma_{ij} \quad (17)$$

理论计算结果见表 1.

表 1 理论计算结果

Signal	F_{12}	F_{13}	F_{23}
$\langle F_{ij} \rangle$	1161.9	1105.4	728.4
σ_{ij}	50.3	62.1	55.6
SNR_{ij}	23.1	17.8	13.1

6)求解相干场成像系统信噪比 SNR

由式(6)计算实验系统总信噪比. 可得该实验系统信噪比为 $SNR=22.6$,理论计算结果见表 1.

4.5 实验结果分析

探测器本底噪声电压测量统计均值为 $N_t = 9.98$ mV,图 4 为探测器本底噪声实测电压曲线,噪声电压在 9.4~10.5 mV 之间变化. 探测器信号总输出电压测量统计均值: $T_s=67$ mV;由实测值估计信噪比中间参数为 $K=44.1$.

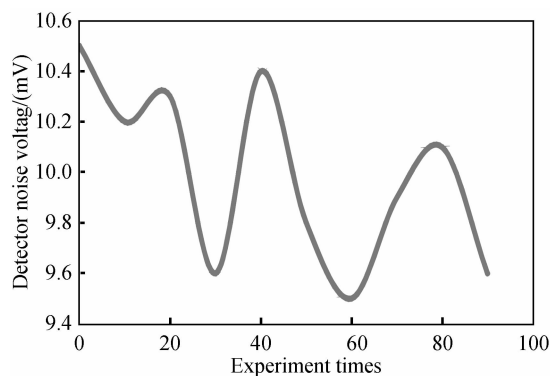


图 4 探测器本底噪声实测曲线图

Fig. 4 Experiment result of detector noise

由 4.4 节理论计算分析得到系统信噪比统计均值为: $SNR=22.6$,信噪比变化范围 10~39 之间,系统信噪比统计曲线如图 5.

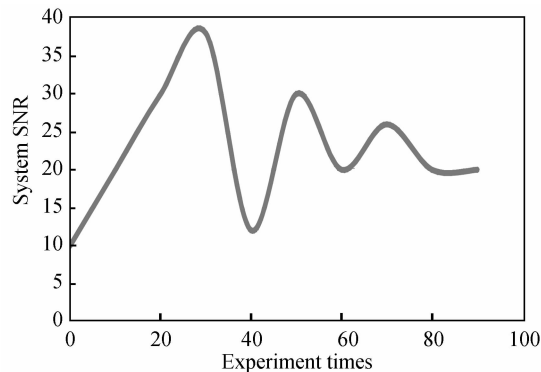


图 5 相干场成像系统信噪比

Fig. 5 SNR of laser coherent field imaging

由本文方法计算得到探测器噪声相对系统总噪声占比统计均值约为 52%,探测器噪声相对系统总噪声占比权重重大,可见在该实验平台和实验条件下,探测器

噪声是系统的主要噪声源. 探测器噪声占比值在 35%~58%之间波动,如图 6.

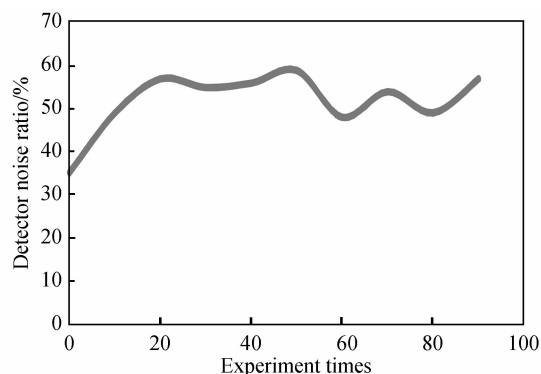


图 6 探测器噪声与系统总噪声占比图

Fig. 6 Ratio of detector noise to system noise

该实验系统实际噪声影响分析:1)由于本实验系统激光上行传输链路距离只有 60 m,大气湍流对光束影响小;实验在夜晚环境进行,大气相对宁静光束受湍流扰动噪声影响小;2)噪声测量实验在夜晚条件下和暗箱内完成,背景光得到了有效抑制,背景光噪声对系统影响小.

综上所述,湍流扰动噪声和背景光噪声对系统影响都较小,因此探测器噪声成为主要噪声源,探测器噪声占比权重较大.本文方法计算结果与实验系统实际噪声影响分析结果相一致并相互助证.

5 结论

本文提出了一种探测器本底噪声对系统总噪声占比权重量化分析方法.建立了激光相干场成像系统探测器本底噪声与系统总噪声占比计算模型,结合具体的相干场成像实验系统对所提方法进行了实验验证;针对所构建的相干场成像系统,探测器噪声是一重要噪声源,后续应从降低探测器噪声角度,提升该系统信噪比.研究表明所提方法可有效估计探测器噪声对总噪声的占比权重;该方法具有实现便捷、高效的特点,对相干场成像系统探测器噪声量化分析研究具有借鉴参考意义.

参考文献

- [1] CUELLAR E, STAPP J, COOPER J. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system [C]. SPIE, 2005, **5896**:58960D.
- [2] STAPP J, SPIVEY B, CHEN L, *et al.* Simulation of a Fourier telescope imaging system for objects in low earth orbit [C]. SPIE, 2006, **6307**:630701.
- [3] CUELLAR E, COOPER J, MATHIS J, *et al.* Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system [C]. SPIE, 2008, **7094**:70940G.
- [4] ZHANG Wen-xi, XIANG Li-bin, KONG Xin-xin, *et al.* Resolution of coherent field imaging technique [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(16):164203.
- [5] 张文喜, 相里斌, 孔新新, 等. 相干场成像技术分辨率研究 [J]. *物理学报*, 2013, **62**(16):164203.
- [5] LI Yang, XIANG Li-bin, ZHANG Wen-xi. Effects of laser propagation through atmospheric turbulence on imaging quality in Fourier telescope [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(2):292-296.
- [6] 李扬, 相里斌, 张文喜. 湍流大气中激光传输对傅立叶望远镜成像质量的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(2):292-296.
- [6] ZHOU Zhi-sheng, XIANG Li-Bin, ZHANG Wen-xi, *et al.* Fourier telescope extrapolation based on the sampling theorem [J]. *Optik*, 2013, **124**:5542 - 5547.
- [7] YE Su, LIU Yi, WU Jian. Effects of antenna array configurations on imaging quality in Fourier telescope [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(3):611-616.
- [7] 叶溯, 刘艺, 吴健. 傅里叶望远镜中天线阵列配置对成像质量的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(3):611-616.
- [8] LUO Xiu-juan, ZHANG Yu, SUN Xin, *et al.* Energy Design of fourier telescope system in the atmospheric environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(8):0801004.
- [8] 罗秀娟, 张羽, 孙鑫, 等. 大气环境中傅里叶望远镜系统能量设计 [J]. *光学学报*, 2013, **33**(8):0801004.
- [9] ZENG Zhi-hong, LUO Xiu-juan, WANG Bao-feng, *et al.* Laboratory simulation of atmosphere turbulence for fourier telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6):0601002.
- [9] 曾志红, 罗秀娟, 王宝峰, 等. 傅里叶望远镜大气湍流模拟实验 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(6):0601002.
- [10] DONG Lei, LIU Xin-yue, CHEN Bao-gang, *et al.* Field experiment and result analysis of fourier telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9):1317-1321.
- [10] 董磊, 刘欣悦, 陈宝刚, 等. 傅里叶望远镜外场实验与结果分析 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(9):1317-1321.
- [11] WANG Xiao-wei, LI Quan, WANG Yan-gui, *et al.* Analysis and simulation on phase closure of Fourier telescope [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2009, **31**(1):38-42.
- [11] 王小伟, 黎全, 王雁桂, 等. 傅里叶望远镜中相位闭合分析及其仿真 [J]. *国防科技大学学报*, 2009, **31**(1):38-42.
- [12] CHEN Wei, LI Quan, WANG Yan-gui, *et al.* Experimental research of Fourier telescope imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3):03110011-03110015.
- [12] 陈卫, 黎全, 王雁桂, 等. 傅里叶望远镜成像系统的实验研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(3):03110011-03110015.
- [13] HOLMES R B, MA S, BHOWMIK A, *et al.* Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, **13**(2):351-364.
- [14] LIU Hong-mei, YANG Chun-hua, LIU Xin, *et al.* Noise characterization of quantum dot infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(21):218501.
- [14] 刘红梅, 杨春花, 刘鑫, 等. 量子点红外探测器的噪声表征 [J]. *物理学报*, 2013, **62**(21):218501.
- [15] ZHANG Wen-wen, QIAN Yue-hong, CHEN Qian, *et al.* Noise factors model of electron multiplying CCD and test method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(11):1345-1349.
- [15] 张闻文, 钱月红, 陈钱, 等. 电子倍增 CCD 噪声因子模型及测试方法 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(11):1345-1349.