

# 基于光学相干和微弱信号检测的干涉探测技术

董 磊<sup>\*</sup>, 王 斌, 刘欣悦

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电探测部, 吉林 长春 130033

**摘要** 在前人工作的基础上,分析了干涉探测的基本工作原理;采用波动光学理论、平面波近似和非相干叠加等方法对干涉探测技术进行了理论分析和数学建模,并通过计算机仿真实验验证了该技术的可行性。通过与传统光电探测技术的比较发现,干涉探测技术更适用于在强天光背景下对暗弱目标的搜索。

**关键词** 测量;相干光学;干涉探测;白光干涉;微弱信号检测;信噪比

**中图分类号** O436.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0212001

## Interferometric Detection Technique Based on Optical Coherence and Weak Signal Detection

Dong Lei, Wang Bin, Liu Xinyue

*Department of Electro-Optical Detection, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** On the basis of prior works, the basic principles of interferometric detection are analyzed. The theoretical analysis and mathematical modeling of interferometric detection technique are performed by means of the wave optics theory, plane wave approximation, incoherent superimposition, etc., and the computer simulation is used to confirm the feasibility of this technique. By comparison with the traditional photoelectric detection technique, it is found that the interferometric technique is more suitable to the search of dark and weak objects in the context of strong sky background.

**Key words** measurement; coherence optics; interferometric detection; white light interference; weak signal detection; signal to noise ratio

**OCIS codes** 120.3180; 030.6610; 260.3160

## 1 引 言

随着科技进步和航空航天事业的发展,大气层附近各种飞行器数目飞速增加。为了发现、跟踪国外间谍飞行器,以及规划、调度本国卫星和飞行器以实时监控突发危险,需要对空中目标进行 24 h 不间断监视。

在对空间目标的测量上,传统光学测量方法受太阳和天光背景的影响,其探测时段、探测能力和测量精度受到严重制约。基于光学相干原理和微弱信号检测原理的干涉探测技术,则具备全天时、高星等探测和高定位精度等优点。光学相干技术(也称为光学干涉技术)在远距离遥感<sup>[1]</sup>、目标运动特性测量<sup>[2]</sup>、目标轮廓测量<sup>[3]</sup>和活体组织的高分辨成像<sup>[4-5]</sup>等领域均有广泛的应用。将其与微弱信号检测技术<sup>[6-7]</sup>相结合,有望提高强噪声背景下对暗弱目标的探测能力。干涉探测技术的基础来自于 Held<sup>[8]</sup>的专利——干涉测量白天星敏感器。2008 年,美国 Optical Physics 公司(OPC)采用与 Held 的专利不一样的方式实现了干涉探测<sup>[9-11]</sup>。

本文的研究工作主要包括:对干涉探测技术工作原理进行分析和仿真;比较干涉探测与传统探测在信噪比和可探测星等两个指标上的优劣,并给出计算机仿真结果,最后对结果进行解释和讨论。

**收稿日期:** 2016-08-10; **收到修改稿日期:** 2016-10-05

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(2015AAXXX1088X)

**作者简介:** 董 磊(1982—),男,硕士,副研究员,主要从事物理光学和激光技术方面的研究。

E-mail: nodepression@126.com(通信联系人)

## 2 基本原理

干涉探测技术的工作原理包含:1)基于部分相干光理论中的范西特-泽尼克原理<sup>[12]</sup>的内容,其推论为小张角目标的远场相干区域面积远大于大张角目标(天光背景)的远场相干区域面积。若在远场光波覆盖区域适当选择两束光进行分波前干涉,则目标光可形成白光干涉条纹,而天光背景无法形成条纹,干涉原理如图1所示。2)基于微弱信号检测原理<sup>[13]</sup>的内容,即将有用信号进行周期性调制,而噪声仍保持随机性,则通过微弱信号检测技术可提取强噪声中的弱信号。在一路光束中引入周期性相位调制,可实现干涉条纹周期性的往返运动。当运动条纹在探测器靶面形成时,探测器可输出周期性电信号。利用成熟的微弱信号检测技术可提高信号带宽内目标与天光背景的信噪比,进而从强背景噪声中提取微弱的周期性目标信号,工作原理如图2所示。

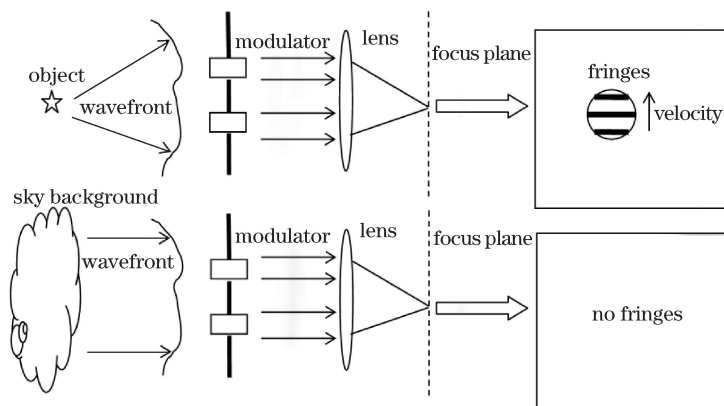


图1 目标和天光背景的干涉图

Fig. 1 Interference pattern of object and sky background

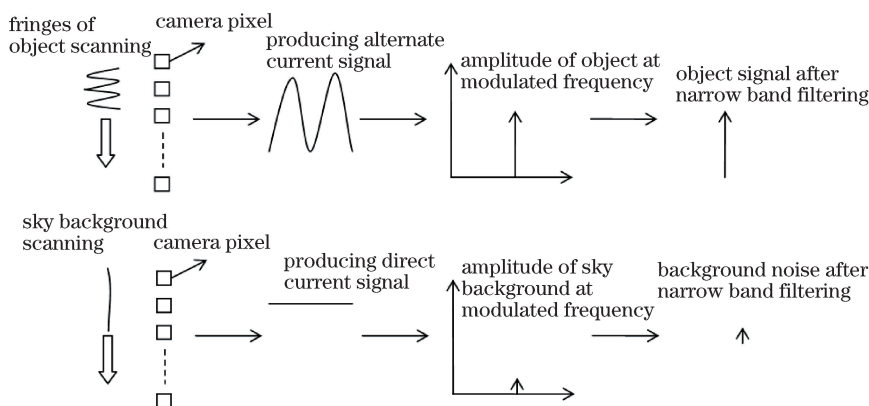


图2 对目标和天空背景的调制与解调

Fig. 2 Modulation and demodulation of object and sky background

通过对工作原理的分析,可以看出干涉探测技术具有两大核心:1)通过分波面的方式产生白光干涉条纹;2)按照某种既定规则调制干涉条纹,使其运动,然后利用同样的规则解调。这两大核心决定了探测能力,如果能产生对比度更高的干涉条纹,同时采用信噪比更高的微弱信号检测技术,则可极大地提高探测信噪比和可探测星等。

## 3 工作原理的计算机仿真

### 3.1 数学建模

标量单色平面波光场可表示为

$$A \exp[i(kz - \omega t)] = A \exp\left[i \frac{2\pi(z - ct)}{\lambda}\right], \quad (1)$$

式中  $A$  为振幅,这里取相对振幅; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数, $z$  为沿系统光轴方向的坐标, $t$  为时间, $\lambda$  为单色光波长, $c$  为光速。

对于不加电压的电光晶体,沿光轴传播的所有偏振方向的折射率均为  $n_1 = n_o$ 。对于加周期性调制电压的晶体,入射波的偏振方向为  $\beta$ ,对应折射率为  $n_2 = n_\beta = n_o + n_o^3 \gamma E_z / 2^{[14]}$ ,其中  $n_o$  为晶体的寻常折射率, $\gamma$  为电光系数, $E_z$  为所加的电场强度。

当偏振方向为  $\beta$  的平面波同时入射两块晶体(一块加电压,另一块不加电压)时,引起的光场相位差为

$$2\pi(n_2 - n_1)l/\lambda = \pi n_o^3 \gamma E_z l/\lambda = \pi n_o^3 \gamma U/\lambda, \quad (2)$$

式中  $l$  为晶体长度, $U = E_z l$  为所加电压。

将  $2\pi n_1 l/\lambda$  和  $2\pi n_2 l/\lambda$  分别代入(1)式,推导出未调制和受调制晶体后表面单色光场的表达式分别(取  $z=0$ )为

$$E_o = A \exp\left[i \frac{2\pi(n_1 l - ct)}{\lambda}\right], \quad (3)$$

$$E_m = A \exp\left[i \frac{2\pi(n_2 l - ct)}{\lambda}\right]。 \quad (4)$$

由于两块晶体的输出光场经过透镜的傅里叶变换作用后,在焦面处形成的光场等于两块晶体的夫琅禾费远场衍射图样,因此可认为(3)、(4)式所示的两个光场等于双孔内的光场分布。双孔的形状、尺寸和间隔分别与两块晶体通光孔径的形状、尺寸和间隔相等,如图3所示,其中  $d$  为双孔中心距, $L$  为方形孔的边长, $f$  为透镜焦距。

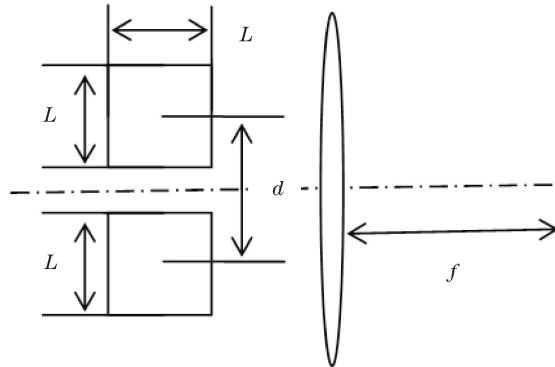


图3 与两块晶体等效的双孔的尺寸与分布

Fig. 3 Size and distribution of double holes equivalent to two crystals

双孔的振幅透射率函数可表示为

$$T = \text{rect}\left(\frac{\xi - d/2}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{L}\right) + \text{rect}\left(\frac{\xi + d/2}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{L}\right), \quad (5)$$

式中  $\xi$  和  $\eta$  分别为衍射孔径所在平面的位置坐标。

上孔的透射率可表示为

$$T_1 = \text{rect}\left(\frac{\xi - d/2}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{L}\right)。 \quad (6)$$

下孔的透射率可表示为

$$T_2 = \text{rect}\left(\frac{\xi + d/2}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{\eta}{L}\right)。 \quad (7)$$

双孔输出光场可表示为

$$E_{\text{holes}} = E_o T_1 + E_m T_2。 \quad (8)$$

双孔在透镜焦面处的夫琅禾费衍射场分布为

$$E_{\text{diff}} = \frac{\exp(ikz) \exp\left[i \frac{k}{2z}(x^2 + y^2)\right]}{i\lambda z} \mathcal{F}(E_{\text{holes}})_{f_x = \frac{x}{\lambda z}, f_y = \frac{y}{\lambda z}}, \quad (9)$$

式中  $z=f$ ,  $x$  和  $y$  分别为焦面所在平面的位置坐标,  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换。

把(3)、(4)、(6)、(7)、(8)式代入(9)式,得到单色光的衍射光场为

$$E_{\text{diff}} = L^2 A \frac{\exp(ikz) \exp\left[i \frac{k}{2z}(x^2 + y^2)\right] \exp\left(-i \frac{2\pi ct}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{Lx}{\lambda z}\right) \text{sinc}\left(\frac{Ly}{\lambda z}\right) \cdot \left[ \exp\left(i \frac{2\pi n_1 l}{\lambda}\right) \exp\left(-j \frac{2\pi dx}{2\lambda z}\right) + \exp\left(i \frac{2\pi n_2 l}{\lambda}\right) \exp\left(i \frac{2\pi dx}{2\lambda z}\right) \right]}{i\lambda z}. \quad (10)$$

单色光干涉条纹的光强分布可表示为

$$I_{\text{diff}} = E_{\text{diff}} E_{\text{diff}}^* = 2 \left(\frac{L^2 A}{\lambda z}\right)^2 \text{sinc}^2\left(\frac{Lx}{\lambda z}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{Ly}{\lambda z}\right) \left\{ 1 + \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda} \left[ (n_2 - n_1)l + \frac{dx}{2z} \right] \right\} \right\}. \quad (11)$$

由于不同波长的光不发生干涉,因此白光干涉条纹光强等于不同波长对应的干涉条纹光强之和,即白光干涉条纹的光强可表示为

$$I_{\text{diff}} = \sum_{i=1}^n I_{\text{diff},i}, \quad (12)$$

式中  $n$  为白光中所包含的离散单色光的个数,  $I_{\text{diff},i}$  为单色光的光强。

### 3.2 仿真参数

初始条件和基本参数为:

- 1) 接收镜由两个中心距  $d=30$  mm 的方形孔径组成,孔径边长  $L=10$  mm;
- 2) 系统焦距  $f$  为 150 mm;
- 3) 目标和天光背景的光谱能量分布相同,近似用高斯函数描述,即  $y_e = \exp[-14.39(x_e - 0.8)^2]$ ,其中  $y_e$  表示某波长对应的接收光能,  $x_e$  表示光波的波长。
- 4) 目标和天光背景的偏振态均为非偏振;
- 5) 工作光谱范围为  $0.4 \sim 1.2 \mu\text{m}$ ;
- 6) 离散单色光的波长间隔为  $0.025 \mu\text{m}$ 。

### 3.3 仿真结果

采用上述仿真方法和参数,经过计算机仿真,获得如下结果。

采样时间序列为一个调制周期  $T_M$ , 获得一系列运动白光干涉条纹的采样图(共 10 幅),如图 4 所示。

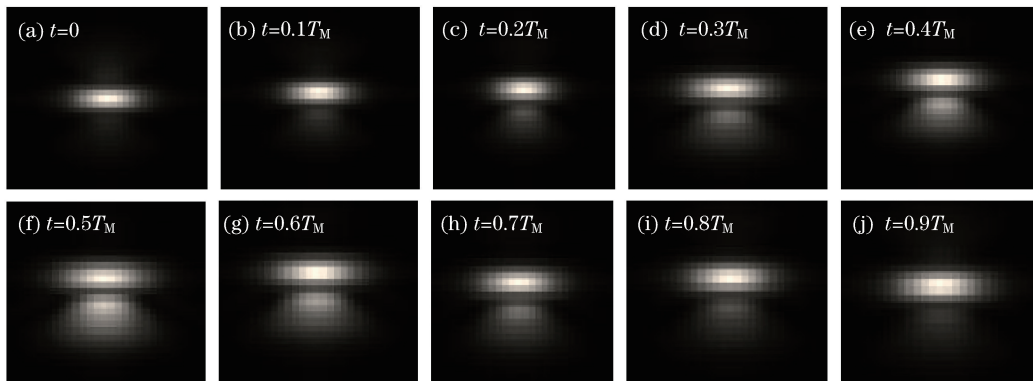


图 4 一个调制周期内白光干涉条纹的往复扫描

Fig. 4 Reciprocating scanning of white light interference fringe during one modulation period

从图 4 可以看出,在  $t=0$  时刻,白光条纹的零级条纹位于视场中心;在  $t=0.5T_M$  时刻,零级条纹上移到最远端,同时  $-1$  级条纹强度达到峰值;在  $t=0.9T_M$  时刻,零级条纹下移回到初始位置。

### 3.4 分析与讨论

通过计算机仿真发现,在  $0.4\sim 1.2\ \mu\text{m}$  工作光谱范围内,白光干涉条纹可以形成;通过电光调制可引起白光干涉条纹沿探测器靶面方向作周期性往复运动。上述结论验证了利用干涉探测技术可以在可见光至近红外范围内产生周期性运动干涉条纹,这正是干涉探测的核心。

## 4 探测能力的仿真

### 4.1 信噪比模型

根据传统光学望远镜探测能力分析方案,传统探测和干涉探测的信噪比<sup>[15-16]</sup>均可描述为

$$f_{\text{SNR}} = \frac{S_{\text{M}}}{\sqrt{S_{\text{M}} + S_{\text{B}} + \sigma_{\text{R}}^2 + t_{\text{int}} D_{\text{e}}}}, \quad (13)$$

式中  $S_{\text{M}}$  和  $S_{\text{B}}$  分别为目标与天光背景的探测器输出电子数,  $\sigma_{\text{R}}$  为探测器读出噪声,  $t_{\text{int}}$  为初始时间,  $D_{\text{e}}$  为暗电流。为了简化分析,设  $\sigma_{\text{R}}=0, D_{\text{e}}=0$ , 则信噪比可简化为

$$f_{\text{SNR}} = \frac{S_{\text{M}}}{\sqrt{S_{\text{M}} + S_{\text{B}}}}, \quad (14)$$

式中  $S_{\text{M}}$  和  $S_{\text{B}}$  可分别表示为

$$S_{\text{M}} = \frac{\varphi_{\text{s}} \eta_{\text{D}} t_{\text{int}} \pi D^2 \tau_{\text{a}} \tau_0 (1 - \epsilon^2)}{4K}, \quad (15)$$

$$S_{\text{B}} = \frac{\eta_{\text{D}} t_{\text{int}} \pi A_{\text{d}} L_{\text{B}} \tau_{\text{a}} \tau_0 (1 - \epsilon^2)}{h\nu 4F^2}, \quad (16)$$

式中  $\varphi_{\text{s}}$  为光子流量密度,  $\eta_{\text{D}}$  为探测器量子效率,  $D$  为望远镜主镜直径,  $\tau_{\text{a}}$  为大气平均透射率,  $\tau_0$  为光学系统平均透射率,  $\epsilon$  为主镜遮拦比,  $K$  为观测目标所占像元个数,  $h$  为普朗克常数;  $\nu=c/\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\lambda}$  为平均波长;  $L_{\text{B}}$  为背景辐射亮度;  $A_{\text{d}}$  为探测器单个像元面积;  $F$  为光学系统相对孔径的倒数。

根据(15)、(16)式可知,干涉探测的  $S_{\text{M}}$  和  $S_{\text{B}}$  与传统探测的  $S_{\text{M}}$  和  $S_{\text{B}}$  的主要差别在于  $\varphi_{\text{s}}$  和  $\tau_0$ 。  $\varphi_{\text{s}}$  与可探测星等直接相关,而  $\tau_0$  与光学系统透射率以及工作波段宽度有关。所以在已知干涉探测和传统探测的信噪比、光学系统透射率以及工作波段宽度的条件下,可以计算出干涉探测与传统探测的探测能力的差别,即可探测星等的差别。

### 4.2 可探测星等模型

可探测星等<sup>[17]</sup>的定义式为

$$\varphi_{\text{s}} = \varphi_0 (2.512)^{-M_{\text{v}}}, \quad (17)$$

式中  $M_{\text{v}}$  为目标星等,  $\varphi_{\text{s}}$  为  $M_{\text{v}}$  星等目标所对应的光子流量密度,  $\varphi_0$  为零等星目标的光子流量密度。

根据(14)~(17)式,可整合推导出可探测星等与信噪比之间的关系式。由于  $S_{\text{M}}$  表达式中含  $\varphi_{\text{s}}$  项,而  $S_{\text{B}}$  中不含  $\varphi_{\text{s}}$  项,故可以将  $S_{\text{M}}$  和  $S_{\text{B}}$  的表达式简写为

$$S_{\text{M}} = a\tau_0 \varphi_{\text{s}}, \quad (18)$$

$$S_{\text{B}} = b\tau_0, \quad (19)$$

式中的  $a$ 、 $\tau_0$  和  $b$  均为与  $\varphi_{\text{s}}$  无关的常数项。

干涉探测技术的优势在于能从强天光背景中发现暗弱目标,比传统探测技术的探测能力高几个星等,故一般  $S_{\text{M}}$  远小于  $S_{\text{B}}$ 。在这种情况下,信噪比与可视星等之间的关系可表示为

$$f_{\text{SNR}} = \frac{S_{\text{M}}}{\sqrt{S_{\text{B}}}} = \frac{a\tau_0 \varphi_{\text{s}}}{\sqrt{b\tau_0}} = \frac{a\sqrt{\tau_0} \varphi_0 (2.512)^{-M_{\text{v}}}}{\sqrt{b}}. \quad (20)$$

为了显示星等对信噪比的依赖关系,将(20)式进行变换,得到

$$M_{\text{v}} = \frac{\ln \frac{a\sqrt{\tau_0} \varphi_0}{\sqrt{b}}}{\ln 2.512} - \frac{\ln f_{\text{SNR}}}{\ln 2.512}. \quad (21)$$

一般在比较探测能力(可探测星等)的时候,选择相同的信噪比,这时待比较者之间可探测目标光子流量密度  $\varphi_s$  的差别就体现了可探测星等的差别。

### 4.3 仿真参数

仿真的初始条件和基本参数为:

- 1) 接收镜由两个中心距  $d=30$  mm 的方形孔径组成,孔径边长  $L=10$  mm;
- 2) 系统焦距  $f=150$  mm;
- 3) 传统探测信噪比为 0.1 (目标光被天光背景淹没);
- 4) 目标和天光背景的光谱能量分布相同,近似用高斯函数描述,即  $y_e = \exp[-14.39(x_e - 0.8)^2]$ ;
- 5) 目标和天光背景的偏振态均为非偏振;
- 6) 干涉探测与传统探测的系统透射率之比为 59.6%;
- 7) 干涉探测与传统探测的工作光谱宽度之比为 1、1/2、1/4 和 1/8。

### 4.4 仿真结果

根据上述数学模型和仿真参数,通过计算机仿真,得到干涉探测信噪比的数值和可探测星等的提高程度,结果见表 1。

表 1 传统探测与干涉探测的信噪比和可探测星方面比较

Table 1 Comparison between traditional and interferometric detections on signal to noise ratio and observable star magnitude

Wave band / $\mu\text{m}$	$f_{\text{SNR}}$ of traditional detection	$f_{\text{SNR}}$ of interferometric detection	Improvement factor of observable star magnitude by interferometric detection
0.40-1.20	0.1	6.5608	4.2612
0.60-1.00	0.1	13.5294	4.6869
0.70-0.90	0.1	18.5644	4.6852
0.75-0.85	0.1	22.6927	4.4630

### 4.5 分析与讨论

通过表 1 可以看出,在所选的 4 个波段内,干涉探测的信噪比均远大于传统探测的,干涉探测的可探测星等相比传统探测的均有明显提高。随着工作光谱宽度的压缩,干涉探测信噪比不断提高,逐渐趋于饱和,而其可探测星等先提高后降低。这种趋势表明,存在一个能使可探测星等最高的最佳工作光谱宽度,即存在探测能力的最佳值。根据表 1 给出的结果可知,最佳工作光谱范围为 0.6~1.0  $\mu\text{m}$ 。当然该结论和初始条件及结构参数有关,即在不同条件下,最佳的工作光谱范围也不同。

该仿真结论的直观解释为:当工作光谱宽度较大时,白光干涉条纹对比度较低,扫描探测器像元后产生的信号起伏较小,故目标信号在调制频率处的贡献也较小,信噪比较低;反之,信噪比较高。当工作光谱宽度窄到一定程度后,白光干涉条纹的对比度提高趋于饱和,导致信噪比提高趋于饱和;然而随着工作光谱变窄,接收的光能量急剧下降。信噪比的提高和接收光能的下降共同决定了可探测星等的变化,从而使可探测星等出现先提高后降低的变化趋势。

## 5 结 论

通过对干涉探测工作原理的理论分析和计算机仿真,验证了干涉探测技术。通过与传统探测技术的比较,可以看出干涉探测技术在信噪比和可探测星等方面具有巨大优势,干涉探测具有更高的探测能力。干涉探测技术具有更强的抑制强天光背景的能力,更适用于白天对暗弱目标的探测和跟踪。

## 6 致 谢

感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王建立研究员和赵金宇研究员对本研究的大力支持。感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所探测部的各位同事对本研究的帮助,其中王昊京提供了第一手的研究资料,张振铎对研究中遇到的问题给出了巧妙的解决思路。感谢韩昌元和于前洋对该研究的大力支持。

## 参 考 文 献

- [1] Yu S H, Dong L, Liu X Y, *et al.* Field experiment and image reconstruction using a Fourier telescope imaging system over a 600-m-long horizontal path[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(24): 6694-6705.
- [2] Zhang Yanyan, Gong Ke, He Shufang, *et al.* Progress in laser Doppler velocity measurement techniques[J]. *Laser and Infrared*, 2010, 40(11): 1157-1162.  
张艳艳, 巩 轲, 何淑芳, 等. 激光多普勒测速技术进展[J]. *激光与红外*, 2010, 40(11): 1157-1162.
- [3] Zhao Keqiang, Xie Fang, Ma Sen, *et al.* Research on a wavenumber resolved low coherence interferometry for step height measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1112006.  
赵可强, 谢 芳, 马 森, 等. 基于波数分辨的低相干干涉台阶高度测量系统的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1112006.
- [4] Guo Xin, Wang Xiangzhao, Nan Nan, *et al.* A depth resolution enhancement technique in Fourier domain optical coherence tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0311002.  
郭 昕, 王向朝, 南 楠, 等. 一种频域光学相干层析成像深度分辨率增强技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0311002.
- [5] Chen Xiaojie, Bai Baoping, Chen Xiaodong, *et al.* An automatic delay correction algorithm for improving imaging resolution of swept source optical coherence tomography system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1204001.  
陈效杰, 白宝平, 陈晓冬, 等. 一种提高扫频光学相干层析成像分辨率的延时自动校正算法[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1204001.
- [6] Xing Hongyan, Zhang Qiang, Xu Wei. Hybrid algorithm for weak signal detection in chaotic sea clutter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(4): 040506.  
行鸿彦, 张 强, 徐 伟. 混沌海杂波背景下的微弱信号检测混合算法[J]. *物理学报*, 2015, 64(4): 040506.
- [7] Lu Siliang. Models and applications of stochastic resonance-based weak signal detection[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 1-16.  
陆思良. 基于随机共振的微弱信号检测模型及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 1-16.
- [8] Held D N. Interferometric daylight star tracker: US3626192[P]. 1971-12-07.
- [9] Hutchin R A. Interferometric tracking device: US8045178B2[P]. 2011-10-25.
- [10] Decou A B. Interferometric star tracking[J]. *Applied Optics*, 1974, 13(2): 414-424.
- [11] Hutchin R A. Operating principles of a new interferometric star tracker and test results [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2008.
- [12] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. Yang Jiasun, Transl. Beijing: Science Press, 1978: 474-478.  
玻 恩, 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 北京: 科学出版社, 1978: 474-478.
- [13] Zeng Qingyong. Weak signal detection[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2004: 1-6.  
曾庆勇. 微弱信号检测[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004: 1-6.
- [14] Ji Jiarong. Higher optical tutorial: Basic electromagnetic theory of optics[M]. Beijing: Science Press, 2007: 410-412.  
季家蓉. 高等光学教程: 光学的基本电磁理论[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 410-412.
- [15] Hu Jingjing, Liu Jing, Cui Shuangxing, *et al.* Evaluation model of detected ability for ground-based electro-optic telescope to space debris[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 42(1): 1-6.  
胡静静, 刘 静, 崔双星, 等. 地基光电望远镜对空间碎片探测能力的评估模型[J]. *光子学报*, 2017, 42(1): 1-6.
- [16] Men Tao, Xu Rong, Liu Changhai, *et al.* Dark target identification algorithm and detecting ability of optoelectronic telescope[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(3): 587-592.  
门 涛, 徐 蓉, 刘长海, 等. 光电望远镜暗弱目标识别算法及探测能力[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(3): 587-592.
- [17] Wei Heli, Chen Xiuhong, Yu Kai, *et al.* Analysis of the detectable stellar magnitude limit using CCD camera in daytime sky background[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 187-192.  
魏合理, 陈秀红, 余 凯, 等. 白天 CCD 观星可探测极限星等值分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(2): 187-192.