

## 暗电流对短波红外偏振测量精度的影响

胡亚东, 胡巧云, 孙 斌, 王 羿, 洪 津

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 探测器暗电流及其测量不确定度是影响短波红外偏振测量仪器测量精度的最重要因素。首先, 结合红外探测器的工作原理, 分析并建立了暗电流影响下的红外探测系统噪声模型。根据分析结果设计实验获得短波红外探测器 G5853-21 暗电流与温度和反向偏压关系。然后, 以分孔径偏振探测系统为例, 推导了斯托克斯参数误差模型和偏振度误差模型。最后, 重点分析空间环境应用背景下, 针对暗电流影响的改进措施, 提出了探测器精确温控的暗电流影响改进方案, 并给出了短波红外探测器工作温度指标要求。结果表明: 通过对探测器进行精确的温度控制以降低暗电流数值, 可以将包含暗电流测量不确定度和其他噪声引起的偏振度测量误差控制在  $0.42\%$  ( $p=0.3$  时) 以内。

**关键词:** 遥感; 红外探测器; 暗电流; 偏振精度; 误差分析

**中图分类号:** V474.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2375-07

## Impact of dark current on SWIR polarimetry accuracy

Hu Yadong, Hu Qiaoyun, Sun Bin, Wang Yi, Hong Jin

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The variation of dark current is the key factor influencing the accuracy of the signals of detectors in the short-wave infrared (SWIR) band. Firstly, based on the analysis of the working principle of infrared detector G5853-21, an experiment was designed aiming to find the relation between dark current, temperature and reverse bias of the detector. Also, an error model was given for the infrared polarimeter by considering the influences of dark currents. Error models for Stokes parameters and the degree of polarization have been built for the polarimeter. Allowing for the specific conditions in the space environment, an optimization was designed to reduce the impacts of dark currents and temperature requirement was also given for the infrared polarimeter. The results indicated that, with accurate control of the temperature, the error of the degree of polarization, involving the measurement uncertainty and other noises, could be below  $0.42\%$  (with  $p=0.3$ ).

**Key words:** remote sensing; infrared detectors; dark current; polarimetric accuracy; error analysis

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-10

基金项目: 中国科学院科技创新重点项目 (KGFZD-125-13-006)

作者简介: 胡亚东 (1984-), 男, 博士生, 主要研究方向为光电信息获取技术研究。Email: huyadong@aiofm.ac.cn

导师简介: 洪津 (1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱偏振遥感技术和航空航天遥感工程技术等方面的研究。

Email: hongjin@aiofm.ac.cn

## 0 引言

偏振遥感以其获取信息量大、探测精度高等优势,成为大气气溶胶遥感领域的重要技术<sup>[1-2]</sup>。近年来又发展了多种成像式和非成像式偏振探测仪器,用于获取被测目标的偏振信息,其光谱探测范围覆盖紫外到长波红外波段<sup>[3]</sup>。

由于光谱和空间信息随着地表状况而剧烈变化,基于传统的陆地气溶胶含量和微物理特性反演方法受到地表特性的影响。短波红外波段具有受气溶胶影响小、地表偏振反射率光谱独立的特点,使得短波红外偏振探测可以用于气溶胶反演中地表特性的准确校正<sup>[4]</sup>。2.25  $\mu\text{m}$  短波红外波段已经成为地表偏振探测的经典波段,被 NASA 的 Research Scanning Polarimeter(RSP)和 Aerosol Polarimetry Sensor(APS)<sup>[5]</sup>、中国科学院安徽光学精密机械研究所的航空多角度偏振辐射计<sup>[6]</sup>和大气校正仪所采用。

目前航天载荷主要使用 InGaAs 光伏探测器和 HgCdTe 光导探测器两种类型的短波红外探测器<sup>[7]</sup>。InGaAs 光伏探测器与 HgCdTe 光导探测器相比,在量子效率、等效并联电阻、工作温度和  $D^*$  等参数性能方面都有优势<sup>[8]</sup>。因此 InGaAs 光伏探测器通常被用于探测波长大于 1.7  $\mu\text{m}$  的红外探测仪器。暗电流作为红外探测器的重要性能指标,是红外探测系统性能的最重要影响因素。

偏振是一种有效的遥感探测技术,但通过对被测目标进行辐射测量从而获取目标高精度偏振信息依然存在诸多困难<sup>[9]</sup>。对于可见到短波红外波段(0.4~2.5  $\mu\text{m}$ )光学参数相近的偏振遥感器,其短波红外波段探测光强与可见波段相近,但是探测波段大于 1.7  $\mu\text{m}$  的红外探测器暗电流是可见波段探测器暗电流的百倍以上,使得暗电流成为短波红外探测器系统测量误差的主要影响因素,造成红外波段偏振探测精度降低。

文中根据短波红外波段探测器暗电流特性及实验结果,建立了引入暗电流影响的系统噪声模型;推导了分孔径短波红外偏振探测系统斯托克斯参数、偏振度误差模型。将研究结果应用于某航天载荷短波红外偏振探测系统,提出了探测器精确温控的暗电流影响改进方案,提高了短波红外波段偏振测量

精度。

## 1 红外探测系统噪声分析

分孔径短波红外偏振探测系统由不同检偏方向的单通道检偏系统组成;每通道包含光学系统和电子学系统两部分,如图 1 所示。光学系统主要由短波红外滤光片、偏振解析元件(偏振片、棱镜等)和透镜组成,用于获取探测目标的线偏振光强。包含短波红外单元探测器的电子学系统主要由探测器前放、用于电子制冷器控制的制冷控制单元、模数转换器(ADC)和控制器组成,用于高精度线偏振光强信息的量化采集。

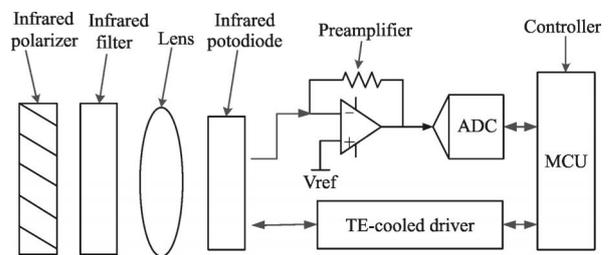


图 1 单通道短波红外偏振探测系统组成图

Fig.1 Schematic of signal channel SWIR polarimeter

某航天偏振载荷 2.25  $\mu\text{m}$  波段偏振探测系统参数如下表 1 所示。

表 1 2.250 nm 波段偏振探测系统参数

Tab.1 2.250 nm polarimeter performance

Items	Parameters
Scene spectral radiance/ $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$	2.3
Wavelength of center/ $\mu\text{m}$	2.25
FWHM/nm	80
IFOV/mrad	13
Receiving aperture/mm	20
SWIR detectors	G5853-21
Bandwidth of preamplifiers/Hz	500
Number of quantization bits	16
Radiating accuracy	5%(calibration)
Polarimetric accuracy	0.6% for $P=0.3$ (calibration)

### 1.1 短波红外探测器暗电流特性试验

InGaAs 光伏探测器作为一种典型的光电二极管,其暗电流是指在没有输入光信号的情况下输出的电流信号。InGaAs 光伏探测器暗电流有多种组成部分:扩散电流、产生复合电流、表面暗电流、欧姆电流和隧道电流<sup>[10]</sup>。根据暗电流生成原理,不同类型

InGaAs 探测器暗电流受到材料特性和探测器光敏面尺寸的影响。相同工作条件下,截止波长  $2.6 \mu\text{m}$  的 InGaAs 探测器暗电流比截止波长  $1.7 \mu\text{m}$  的 InGaAs 探测器暗电流约高出两个量级;探测器暗电流与探测器光敏面积成正比。相同型号的 InGaAs 探测器暗电流还受到工作温度和反相偏压的影响,工作温度越低暗电流越小,反向偏压越大暗电流越大。

根据表 1 所示的短波红外偏振探测系统工作参数,综合考虑光学设计需求和探测器性能,选择探测器光敏面直径  $\Phi 1 \text{ mm}$ , 具有两级电子制冷器的滨松短波红外探测 G5853-21。为满足系统高精度偏振探测要求,分析探测器暗电流对系统探测性能的影响,设计实验获得 G5853-21 暗电流与工作温度和反向偏压的准确数据,根据实验结果和红外偏振探测系统技术指标,优化探测器工作温度参数及其前放电路设计参数,以满足短波红外波段偏振探测精度要求。

使用 Keithley 数字源表 2601 对探测器进行偏压控制;将探测器放入高低温试验箱中,测量探测器暗电流及热敏电阻值;进行探测器暗电流与反向偏压和工作温度关系试验。实验结果如图 2、3 和 4 所示。

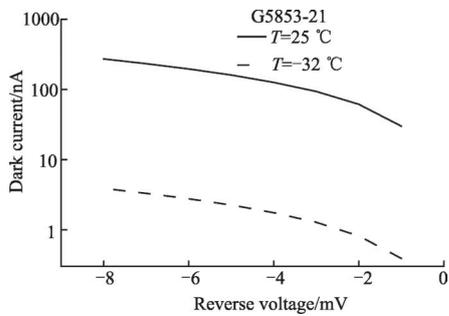


图 2 暗电流与反向偏压关系图

Fig.2 Dark current as a function of reverse bias

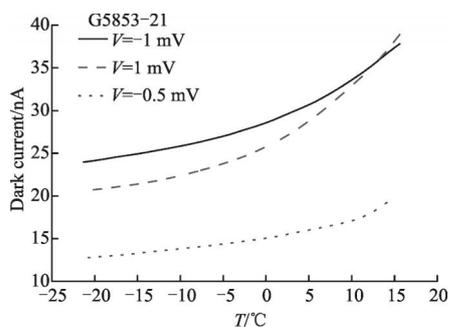


图 3 暗电流与工作温度关系

Fig.3 Dark current as a function of temperature

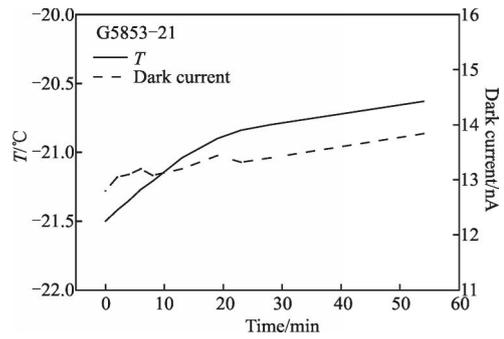


图 4 暗电流稳定性测试图

Fig.4 Stability of dark current

图 2 是在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-32 \text{ }^\circ\text{C}$  时, G5853-21 暗电流随反向偏压变化曲线图。图 3 是不同反向偏压下,暗电流与温度关系曲线图。由图可知,探测器暗电流在温度确定时,随反向偏压减小而降低;并且反向偏压时暗电流温度速率高于正向偏压时的情况。在反向偏压确定时,暗电流随温度降低而减小。由图 3 知:  $-0.5 \text{ mV}$  反向偏压、 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  工作温度时的暗电流温变速率  $RT_{\text{dark}}$  约为  $2 \text{ nA}/^\circ\text{C}$ 。图 4 是 1 h 内暗电流稳定性测试,可见暗电流主要由受工作温度影响,符合探测器温度变化趋势。针对工作周期小于  $40 \text{ min}$  的航天应用,可以忽略探测器 G5853-21 暗电流随时间漂移的影响。

### 1.2 引入暗电流影响的系统噪声分析

图 1 所示的短波红外探测系统,使用一个与暗电流相关的参考电压用于暗电流的消减,以提高测量电路的动态范围。为减小暗电流温漂和时漂对系统探测精度的影响,需要准确的获取探测光信号时的暗电流值。RSP 和 APS 采用暗电流和光信号快速切换测量的工作方式,以最大程度的降低暗电流温漂和时漂的影响。但是对于没有暗电流快速切换测量功能的简单系统,暗电流的温漂和时漂将造成较大的系统误差。对于采用同时测量的多通道偏振探测系统,各通道探测器及其工作条件的必然存在差异,将造成各通道暗电流特性的不同。这种各通道性能的不匹配同样影响探测系统的性能。

为定量分析短波红外探测器暗电流对系统瞬时测量精度的影响,将暗电流对系统测量误差的影响分成两部分:(1)暗电流的散粒噪声;(2)由于温度控制不确定性造成的暗电流测量不确定度。温度控制不确定性造成的暗电流测量不确定度同样影响探测

信号测量精度,因此将其作为系统测量误差的一部分,引入对系统噪声的分析。

系统测量的光电流信号由下式(1)决定:

$$I_{\text{scene}}=A_0*\Omega_0*T_0(\lambda)*L(\lambda)*\Delta\lambda*\eta(\lambda) \quad (1)$$

式中: $A_0$ 为有效通光孔径面积,单位: $\text{m}^2$ ; $\Omega_0$ 为瞬时视场立体角,单位: $\text{sr}$ ; $T_0(\lambda)$ 为光学系统在中心波长 $\lambda$ 处的透过率; $L(\lambda)$ 为入射光信号在中心波长 $\lambda$ 处的光谱辐亮度,单位: $\mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm})$ ; $\Delta\lambda$ 为光谱带宽,单位: $\text{nm}$ ; $\eta(\lambda)$ 为探测器在 $\lambda$ 处响应率,单位: $\text{A/W}$ 。

图 1 所示的短波红外探测系统,引入暗电流影响的系统噪声主要包括测量信号散粒噪声( $I_{\text{shot}}$ )、探测器噪声( $I_{\text{det}}$ )、前放噪声( $I_{\text{amp}}$ )、量化噪声( $I_{\text{quant}}$ ),测量通道的 1/f 噪声( $I_{1/f}$ )、温度控制不确定性造成的暗电流测量误差( $I_{\text{dark}_\Delta T}$ )。由图 4 稳定性测试结果分析可知,在短时测量中 1/f 噪声对系统探测的影响可以忽略。

散粒噪声分为光电流和暗电流的散粒噪声:

$$I_{\text{shot}}=\sqrt{\text{Shot}(I_{\text{scene}})^2+\text{Shot}(I_{\text{dark}})^2}=\sqrt{(\sqrt{I_{\text{scene}}2fq})^2+(\sqrt{I_{\text{dark}}2fq})^2} \quad (2)$$

式中: $f$ 为测量系统带宽; $q$ 为电子电荷( $1.60\times 10^{-19}\text{C}$ ); $I_{\text{dark}}$ 为探测器暗电流。光信号的散粒噪声 $\text{Shot}(I_{\text{scene}})=\sqrt{I_{\text{scene}}2fq}$ ,暗电流的散粒噪声是 $\text{Shot}(I_{\text{dark}})=\sqrt{I_{\text{dark}}2fq}$ 。

探测器噪声主要是由 InGaAs 光伏探测器并联电阻的热噪声产生。探测器前置放大电路的噪声可以由其反馈电阻 $R_f$ 代替。系统量化噪声由 ADC 和饱和输入信号决定。此三种噪声的计算式如下:

$$\begin{cases} I_{\text{det}}=\sqrt{\frac{4K Tf}{R_{\text{sh}}}} \\ I_{\text{amp}}=\sqrt{\frac{4K Tf}{R_f}} \\ I_{\text{quant}}=S_{\text{fs}}/2^N\sqrt{12} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K$ 为玻耳兹曼常数( $1.38\times 10^{-23}\text{W}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ); $T$ 为工作温度; $R_{\text{sh}}$ 为探测器等效并联电阻; $R_f$ 为前放反馈电阻; $S_{\text{fs}}$ 为 ADC 饱和输入信号; $N$ 为 ADC 量化位数 16。

暗电流测量不确定度可以认为由工作温度点的暗电流温变速率与温度控制误差确定:

$$I_{\text{dark}_\Delta T}=\sqrt{RT_{\text{dark}}*\Delta T} \quad (4)$$

式中: $RT_{\text{dark}}$ 为探测器暗电流温变速率; $\Delta T$ 为探测器

控温误差。

探测系统的总噪声由仪器各噪声平方和开根号表示<sup>[7]</sup>。对于输入信号光电流等于 $I_i$ 的探测通道,探测信号测量的标准差可以用公式(5)表示:

$$\sigma_i=\sqrt{\text{Shot}(I_i)^2+R^2} \quad (5)$$

式中: $\text{Shot}(I_i)$ 是第 $i$ 通道光信号的散粒噪声; $\sigma_i$ 是第 $i$ 通道光信号测量标准差。

其中 $R$ 表示为:

$$R=\sqrt{\text{Shot}(I_{\text{dark}})^2+I_{\text{det}}^2+I_{\text{amp}}^2+I_{\text{quant}}^2+I_{\text{dark}_\Delta T}^2} \quad (6)$$

对应的光信号测量信噪比可以表示为:

$$\text{SNR}(I_{\text{scene}})=\frac{I_{\text{scene}}}{\sqrt{I_{\text{shot}}^2+I_{\text{det}}^2+I_{\text{amp}}^2+I_{\text{quant}}^2+I_{\text{dark}_\Delta T}^2}} \quad (7)$$

由于 4 检偏方向和 3 检偏方向两种探测类型计算的斯托克斯参数和偏振度不同。下面分别分析两种探测方式的偏振测量参数误差模型。

## 2 偏振度误差模型

根据线偏振检偏器的使用方式不同,RSP、APS 和航空多角度偏振辐射计等发展了检偏器透光轴以 $45^\circ$ 等间隔分布的 4 检偏方向高精度线偏振探测系统。同时,一种偏振检偏器透光轴以 $60^\circ$ 等间隔分布的 3 检偏方向高精度线偏振探测系统也是偏振探测基本方式之一。

4 检偏方向偏振探测系统各通道接收的线偏振光强与输入光斯托克斯矢量前 3 个参数的关系为:

$$\begin{cases} S_0=I_0+I_{90} \\ S_1=I_0-I_{90} \\ S_2=I_{45}+I_{135} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $I_0$ 、 $I_{45}$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{135}$ 分别是 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 检偏方向探测的线偏振光强。

3 检偏方向偏振探测系统各通道探测到的线偏振光强与输入光斯托克斯矢量前 3 个参数的关系为:

$$\begin{cases} S_0=\frac{2}{3}(I_0+I_{60}+I_{120}) \\ S_1=\frac{2}{3}(2I_0-I_{60}-I_{120}) \\ S_2=\frac{2}{\sqrt{3}}(I_{60}-I_{120}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $I_0$ 、 $I_{60}$ 、 $I_{120}$ 分别是 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 检偏方向探测的线偏振光强。

$$p = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (10)$$

$$\tan(2\theta) = \frac{S_2}{S_1} \quad (11)$$

公式(10)、(11)中,  $p$  为入射光线偏振度(Degree of Linear Polarization, DOLP);  $\theta$  为入射光偏振方位角。

影响偏振探测器测量精度的因素复杂, 检偏器安装角度误差<sup>[11]</sup>、探测目标视场重合度、检偏器消光能力和测量系统性能等诸多因素都对其产生影响<sup>[12]</sup>。为分析探测器及电子学系统性能对偏振探测系统的影响, 文中推导了简化的系统探测噪声及信噪比与斯托克斯参数和偏振度测量误差模型。

### 2.1 4 检偏方向偏振参数误差模型

根据斯托克斯参数计算公式(8), 4 检偏方向偏振探测系统的斯托克斯参数标准差为:

$$\begin{cases} \sigma_{S_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_0}{\partial I_0}\right)^2 \sigma_{I_0}^2 + \left(\frac{\partial S_0}{\partial I_{90}}\right)^2 \sigma_{I_{90}}^2} \\ \sigma_{S_1} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_1}{\partial I_0}\right)^2 \sigma_{I_0}^2 + \left(\frac{\partial S_1}{\partial I_{90}}\right)^2 \sigma_{I_{90}}^2} \\ \sigma_{S_2} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_2}{\partial I_{45}}\right)^2 \sigma_{I_{45}}^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial I_{135}}\right)^2 \sigma_{I_{135}}^2} \end{cases} \quad (12)$$

将公式(5)代入公式(12), 得到:

$$\begin{cases} \sigma_{S_0} = \sqrt{\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{I_{90}}^2} = \sqrt{\text{Shot}(I_0)^2 + \text{Shot}(I_{90})^2 + 2R^2} \\ \sigma_{S_1} = \sqrt{\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{I_{90}}^2} = \sqrt{\text{Shot}(I_0)^2 + \text{Shot}(I_{90})^2 + 2R^2} \\ \sigma_{S_2} = \sqrt{\sigma_{I_{45}}^2 + \sigma_{I_{135}}^2} = \sqrt{\text{Shot}(I_{45})^2 + \text{Shot}(I_{135})^2 + 2R^2} \end{cases} \quad (13)$$

公式(13)是入射光斯托克斯参数标准差的准确表达式, 可以用于推导偏振度误差。

各斯托克斯参数的标准差与各通道入射光强和系统噪声直接相关。对于 4 检偏方向偏振探测系统有  $I_0 + I_{90} = I_{45} + I_{135}$ , 则:

$$\text{Shot}(I_0)^2 + \text{Shot}(I_{90})^2 = \text{Shot}(I_{45})^2 + \text{Shot}(I_{135})^2 = 2fq(I_0 + I_{90}) \quad (14)$$

则根据 4 检偏方向偏振探测原理, 计算的斯托克斯参数标准差可以表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_{S_0} = \sigma_{S_1} = \sigma_{S_2} &= \sqrt{2fq(I_0 + I_{90}) + 2R^2} = \\ &= \sqrt{2fqS_0 + 2R^2} \end{aligned} \quad (15)$$

偏振度标准差同样可以表示为:

$$\sigma_p = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial S_0}\right)^2 \sigma_{S_0}^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial S_1}\right)^2 \sigma_{S_1}^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial S_2}\right)^2 \sigma_{S_2}^2} \quad (16)$$

根据偏振度计算公式(10)和偏振方位角计算公式(11), 偏振度标准差  $\sigma_p$  可以化简为:

$$\sigma_p = \sqrt{\left(\frac{-p}{S_0}\right)^2 \sigma_{S_0}^2 + \left(\frac{1}{S_0 \sqrt{1 + \tan^2(2\theta)}}\right)^2 \sigma_{S_1}^2 + \left(\frac{\tan(2\theta)}{S_0 \sqrt{1 + \tan^2(2\theta)}}\right)^2 \sigma_{S_2}^2} \quad (17)$$

将公式(15)代入(17)得到:

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \sqrt{\left[\left(\frac{-p}{S_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_0 \sqrt{1 + \tan^2(2\theta)}}\right)^2 + \left(\frac{\tan(2\theta)}{S_0 \sqrt{1 + \tan^2(2\theta)}}\right)^2\right] \sigma_{S_0}^2} = \\ &= \sqrt{(1+p^2) \frac{\sigma_{S_0}^2}{S_0^2}} = \sqrt{(1+p^2) \frac{1}{\text{SNR}^2(S_0)}} \end{aligned} \quad (18)$$

为便于分析各通道测量信噪比与偏振测量误差的关系, 对公式(18)进行简单变换:

$$\frac{\sigma_{S_0}}{S_0} = \frac{\sqrt{\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{I_{90}}^2}}{I_0 + I_{90}} \approx \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{2} \tilde{I}} = \frac{1}{\sqrt{2} \widetilde{\text{SNR}}(I)} \quad (19)$$

式中:  $\tilde{\sigma}$  为各通道测量标准差均值;  $\tilde{I}$  为各通道测量光强均值;  $\widetilde{\text{SNR}}(I)$  为光强测量均值。

由此得到偏振度误差与系统信噪比均值  $\widetilde{\text{SNR}}(I)$  的关系如下所示:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{2} (1+p^2) \frac{1}{\widetilde{\text{SNR}}(I)}} \quad (20)$$

公式中: 偏振度标准差表达式, 4 检偏方向测量系统偏振度误差与入射光偏振度和系统信噪比均值  $\widetilde{\text{SNR}}(I)$  相关。由于  $p \leq 1$ , 在相同  $\widetilde{\text{SNR}}(I)$  条件下, 偏振度测量误差的随偏振度增加而变大, 并且误差最大值是误差最小值的两倍。当偏振度  $p$  确定时, 偏振度测量误差随着  $\widetilde{\text{SNR}}(I)$  增加而减小。

### 2.2 3 检偏方向偏振参数误差模型

运用相同的分析方法可以得到 3 检偏方向偏振探测系统斯托克斯参数及偏振度测量误差模型。根据公式(9)三通道偏振探测系统斯托克斯参数计算方法, 和公式(12)标准差的计算公式, 可以得到三通道偏振探测系统斯托克斯参数标准差如公式(21)所示:

$$\begin{cases} \sigma_{S_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_0}{\partial I_0}\right)^2 \sigma_{I_0}^2 + \left(\frac{\partial S_0}{\partial I_{60}}\right)^2 \sigma_{I_{60}}^2 + \left(\frac{\partial S_0}{\partial I_{120}}\right)^2 \sigma_{I_{120}}^2} \\ \sigma_{S_1} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_1}{\partial I_0}\right)^2 \sigma_{I_0}^2 + \left(\frac{\partial S_1}{\partial I_{60}}\right)^2 \sigma_{I_{60}}^2 + \left(\frac{\partial S_1}{\partial I_{120}}\right)^2 \sigma_{I_{120}}^2} \\ \sigma_{S_2} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_2}{\partial I_{60}}\right)^2 \sigma_{I_{60}}^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial I_{120}}\right)^2 \sigma_{I_{120}}^2} \end{cases} \quad (21)$$

根据公式(9)求解公式(21)得 3 检偏方向偏振探测系统  $\sigma_{S_0}$ 、 $\sigma_{S_1}$ 、 $\sigma_{S_2}$  为:

$$\begin{cases} \sigma_{S_0} = \frac{2}{3} \sqrt{\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{I_{60}}^2 + \sigma_{I_{120}}^2} \approx \frac{2}{3} \sqrt{3\tilde{\sigma}} \\ \sigma_{S_1} = \frac{2}{3} \sqrt{4\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{I_{60}}^2 + \sigma_{I_{120}}^2} \approx \frac{2}{3} \sqrt{6\tilde{\sigma}} \\ \sigma_{S_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_{I_{60}}^2 + \sigma_{I_{120}}^2} \approx \frac{2}{3} \sqrt{2\tilde{\sigma}} \end{cases} \quad (22)$$

根据公式(17)、公式(22), 偏振度标准差  $\sigma_p$  可以化简为:

$$\sigma_p = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial S_0}\right)^2 \sigma_{S_0}^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial S_1}\right)^2 \sigma_{S_1}^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial S_2}\right)^2 \sigma_{S_2}^2 = \sqrt{\left(\frac{-p}{S_0}\right)^2 \left(\frac{2}{3} \sqrt{3\tilde{\sigma}}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_0 \sqrt{1+\tan^2(2\theta)}}\right)^2 \left(\frac{2}{3} \sqrt{6\tilde{\sigma}}\right)^2 + \left(\frac{\tan(2\theta)}{S_0 \sqrt{1+\tan^2(2\theta)}}\right)^2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{2\tilde{\sigma}}\right)^2} \quad (23)$$

化简公式(23)得到:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{4}{3}(2+p^2) \frac{\tilde{\sigma}^2}{S_0^2}} \quad (24)$$

引入信噪比均值  $\overline{SNR(I)}$  可以得到:

$$\sigma_p \approx \sqrt{\frac{4}{27}(2+p^2) \frac{\tilde{\sigma}}{\bar{I}}} = \sqrt{\frac{4}{27}(2+p^2) \frac{1}{\overline{SNR(I)}}} \quad (25)$$

### 2.3 偏振度误差模型仿真

根据偏振度误差公式(20)和(25), 对偏振度误差与信噪比、偏振度的关系进行了仿真分析。

图 5 是探测目标典型偏振度为 0.3 时偏振度误差与系统信噪比的关系图, 信噪比越高偏振度误差越小。图 6 是系统信噪比 500 时偏振度误差与偏振度的关系, 偏振度越大偏振度误差越大。同样信噪比和探测目标偏振度条件下, 3 检偏方向相对于 4 检偏方向偏振探测方式具有更高的探测精度。

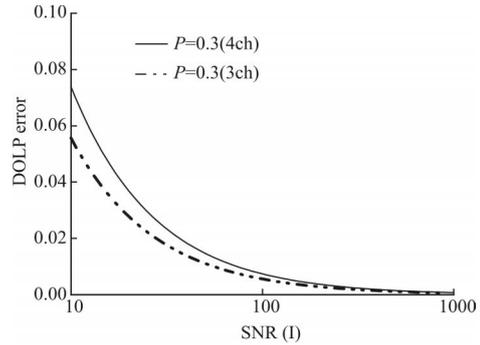


图 5  $p=0.3$  时偏振度测量误差与 SNR 关系图

Fig.5 DOLP measurement error due to the signal-noise ratio with  $p=0.3$

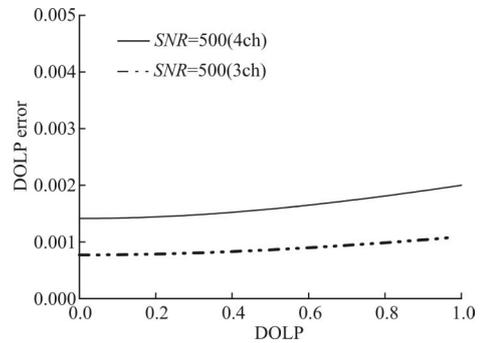


图 6  $SNR=500$  时偏振度测量误差与偏振度关系图

Fig.6 Dolp measurement error due to the DOLP with  $SNR=500$

### 3 暗电流影响的改进方案

由上文分析得到, 为提高短波红外波段偏振测量精度, 需要提高系统信噪比和减小暗电流的影响。因此采取的主要措施有:(1) 提高光学系统集光能力;(2) 降低暗电流及其测量不确定度。提高光学系统集光能力的最有效方法是增大光学系统相对孔径和视场角。然而视场角受系统空间分辨率的影响难以增大。增加光学系统的相对孔径会增加仪器的体积、重量; 针对空间环境应用要求的航天载荷, 其体积、重量受到卫星平台严格限制。因此, 减小暗电流对偏振精度影响的有效方案是选择低偏压前放电路、降低探测器工作温度用以减小暗电流的绝对值; 对探测器进行高精度的温度控制, 减小暗电流测量不确定度。

应用于航天环境的电子元器件有着严格的质量等级要求, 符合航天应用条件的低偏压 JFET 输入型运放的输入偏压典型值为 0.5 mV。确定探测器反向偏压后, 通过实验得到此偏压下暗电流与温度关系如图 4 所示。根据仪器热工作环境, 综合分析探测器

的工作温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 计算暗电流温变速率 $RT_{\text{dark}}$ 约 $2n\text{ A}/^{\circ}\text{C}$ 。

表1所示的仪器偏振度测量精度 $0.6\%(p=0.3)$ 是对仪器探测精度的系统性要求。假设电子学系统噪声造成的误差为系统精度的一半,即测量噪声造成的偏振度误差为 $0.42\%(p=0.3)$ 。根据偏振度误差公式(20)和(25)可以得到:4检偏方向偏振系统信噪比需求为 $SNR\approx 175$ ,3检偏方向偏振系统信噪比需求为 $SNR\approx 132$ 。

根据文中系统噪声组成和表1参数得到系统信号及噪声如表2所示。

表2 探测信号与噪声列表

Tab.2 Signal and noise

$I_{\text{scene}}/\text{A}$	$I_{\text{short}}/\text{A}$	$I_{\text{det}}/\text{A}$	$I_{\text{amp}}/\text{A}$	$I_{\text{quant}}/\text{A}$	$I_{\text{dark},\Delta t}/\text{A}$
$2.1\text{E}-7$	$5.9\text{E}-12$	$7.79\text{E}-13$	$8.02\text{E}-13$	$1.41\text{E}-12$	$2\text{E}-9*\Delta t$

如表2所示,温度控制不确定性造成的暗电流测量不确定度是系统误差的主要成分。将表2数据代入信噪比计算公式(9),分别计算 $SNR=175$ 和 $SNR=132$ 时的温控精度约为 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 4 结论

文中根据InGaAs光伏探测器工作原理,提出了引入暗电流影响的系统噪声计算公式,并设计实验得到探测器暗电流与工作温度和反向偏压的关系;分别推导出4检偏方向和3检偏方向偏振探测系统的斯托克斯参数误差模型及偏振度误差模型并仿真。同时,针对航天载荷特殊的应用背景,选择低偏压探测器前放减小方向偏压的影响;降低探测工作温度减小暗电流数值;通过对探测器进行高精度的温度控制降低暗电流测量不确定度。分析结果表明,采用改进方案的短波红外偏振探测系统,可以达到包含暗电流测量不确定度和电子学其他噪声引起的偏振度误差小于 $0.42\%(p=0.3)$ 的系统性能。下一步工作是设计实验验证短波红外偏振探测系统偏振度测量精度。

## 参考文献:

[1] Talmage D A, Curran P J. Review article: remote sensing using partially polarized light [J]. *Remote Sensing*, 1986, 7

(1): 47-64.

- [2] Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Theory analysis of polarization characteristic of the light scattered by the aerosol [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 862-865. (in Chinese)  
赵一鸣, 江月松, 路小梅. 气溶胶散射光偏振度特性的理论研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 862-865.
- [3] Scott Tyo J. Considerations in polarimeter design [C]//SPIE, 2000, 4133: 65-74.
- [4] Brian Cairns, Edgar E Russellb, Joseph D, et al. Tennant research scanning polarimeter and airborne usage for remote sensing of aerosols [C]//SPIE, 2003, 5158: 33-44.
- [5] Richard J, Peralta, Carl Nardell, et al. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [C]//SPIE, 2007, 67865L: 1-17.
- [6] Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weiming, et al. System design and implementation of multi-angle polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003-5. (in Chinese)  
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计及实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828003-5.
- [7] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 19-24. (in Chinese)  
龚海梅, 刘大福. 航天红外探测器的发展现状与进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 19-24.
- [8] Kozlowski L J, Terinant W E, Zandian M, et al. SWIR Staring FPA performance at room temperature [C]//SPIE, 2746: 93-100.
- [9] Scott T J. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error [J]. *Optical Society of America*, 2002, 42(4): 619-630.
- [10] He Guoqiang. Study on physics and devices of InGaAs infrared detectors [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystems and Information Technolog, 2006: 24-25. (in Chinese)  
贺国强. InGaAs 红外探测器期间与物理研究 [D]. 上海: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 2006: 24-25.
- [11] Feng Weiwei, Chen Ligang. The impact of the orientation angles uncertainty of instrument polarizers on polarization measurement accuracy [J]. *Optik*, 2010, 121: 2276-2279.
- [12] Song Maoxin, Sun Bin, Sun Xiaobing, et al. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 387-394. (in Chinese)  
宋茂新, 孙斌, 孙晓兵, 等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 387-394.