

文章编号:1002-2082(2016)05-0730-08

高精度线偏振辐射计数据采集系统设计

高翔华^{1,2},胡亚东²,孙斌²,洪津²

(1. 安徽大学 物理与材料科学学院,安徽 合肥 230039;
2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031)

摘要:根据高精度线偏振辐射计应用需求,设计了基于电容积分法的可见光至短波红外波段偏振辐射计信号采集系统。简要介绍了高精度线偏振辐射计的工作原理,分析其采集系统具有的探测信号动态范围大、采样频率低和探测精度高的特点;建立了基于跨阻放大法和电容积分法的2种放大电路噪声模型,并推导出信噪比公式,采用DDC112的电容积分法放大电路的数据采集系统能够有效减小系统噪声、简化电路设计、提高系统灵活性和系统信噪比;实验测试了系统的动态范围、等效噪声辐亮度、信噪比、稳定性和线偏振度,并进行了外场试验。实验结果表明:该数据采集系统具有较高的响应动态范围,等效噪声辐亮度比较理想,常规气溶胶探测波段信噪比 ≥ 127 ,典型地表探测波段信噪比 ≥ 147 ,仪器稳定性优越,线偏振度测量精度优于0.5%,达到仪器设计指标。

关键词:高精度数据采集;高精度线偏振辐射计;噪声分析;电容积分法;等效噪声辐亮度;信噪比

中图分类号:TP73

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0503004

Data acquisition system design of high-precision linear-polarimeter

Gao Xianghua^{1,2}, Hu Yadong², Sun Bin², Hong Jin²

(1. School of Physical and Materials Science, Anhui University, Hefei 230039, China;
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract: According to the application requirements of high-precision linear-polarimeter, a signal acquisition system based on capacitive integration method was designed. Firstly, the working principle of the high-precision linear-polarimeter was introduced briefly, as well as its main characteristics, such as large dynamic range of the signal, low sampling frequency and high detection precision. Based on the transimpedance amplification method and the capacitor integral method, two amplification noise models were established and its SNR formula was derived. This signal acquisition system, rooting in a DDC112 capacitive integration detector, is capable of reducing the system noise, simplifying the circuit design and improving the system's flexibility and signal-to-noise ratio(SNR). A noise model was also established for the signal acquisition system. At last, laboratory tests were designed to test the dynamic range of the system, equivalent noise radiance, SNR, stability and linear polarization. Field experiments were also carried on. The tests and experiments show that this signal acquisition system has large dynamic range and good equivalent noise radiance. For conventional spectral band of aerosol, the

收稿日期:2016-01-29; 修回日期:2016-04-20

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:高翔华(1992—),男,安徽合肥人,在读硕士研究生,主要从事检测技术与自动化装置技术研究工作.

E-mail: xhgao@mail.ustc.edu.cn

SNR is above 127, for typical spectral band of earth's surface, the SNR is above 147, the linear polarization measurement accuracy is better than 0.5 % which proves to be a good performance of the signal system.

Key words: high-precision data acquisition; high-precision linear-polarimeter; noise analysis; capacitance integration method; equivalent noise radiance; SNR

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^[1-2]。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^[3]。为了实现高精度偏振探测,国内外研制了多种遥感偏振探测仪器,如CE318^[4]、MODIS^[5]、POLDER^[6]、APS^[7]、中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的航空多角度偏振辐射计(AMPR)^[8]、双角度偏振大气校正仪^[9]等。

遥感偏振探测仪器的主要误差有仪器自身偏振效应引起的系统误差和电子学系统噪声引起的随机误差。系统误差需要偏振定标修正,但目前各类偏振光源和偏振定标器都具有一定不确定度。传统偏振辐射计的偏振测量系统误差尤其是多偏振通道的视场重合误差是影响仪器探测精度的主要因素^[10]。高精度线偏振辐射计是一种系统误差可忽略不计的新型遥感偏振探测仪器,用于抑制偏振测量的系统误差和随机误差,实现高精度测量同时,可以对现有的其他偏振仪器和偏振光源的精确度进行检测和评估,测量波段覆盖可见至短波红外波段。

目前国内外的偏振辐射计均采用跨阻放大法实现光电二极管的微弱信号放大,然而设计一个优秀的电流-电压转换器需要综合考虑探测器参数、运放参数、系统增益和带宽等因素的影响,跨阻放大法的噪声来源于电路的反馈电阻,放大器的输入电流噪声和噪声电压,电阻和电流噪声源

产生的输出噪声部分是很直观的;放大器的输入噪声电压由于电路中的高阻抗反馈电阻和放大器输入端的二极管电容会引入额外的高频增益^[11]。根据高精度线偏振辐射计的工作原理和探测目标的一系列特点,本文提出使用电容积分法作为仪器的信号获取方式,有效地降低了系统的噪声,提高了系统抗干扰能力和系统信噪比,选用TI公司推出的基于电容积分法的直接电流数字化集成芯片DDC112^[12]实现了偏振辐射计微弱光电信号探测,消除了采集系统的高频噪声,有效地简化了硬件电路,缩小了电路规模,消除了大电阻对电路性能的影响,由于DDC112内部集成电荷积分电路和20bit高精度ADC且积分增益和积分时间可调,故其非常适用于高精度线偏振辐射计的数据采集系统。

1 高精度线偏振辐射计工作原理

高精度线偏振辐射计系统方案原理如图1所示。仪器放置在整个光学系统最前端的格兰-泰勒棱镜作为偏振解析器,后续所有光学器件以及探测器与棱镜保持相对固定,使用检偏头整体旋转探测各个偏振方向,消除了仪器在各个偏振检偏方向的不一致性,因此实现了系统偏振误差可忽略不计的理想化目标探测。检偏角度在检偏头360°旋转的情况下不再局限于传统线偏振辐射计的三方向和四方向检偏,能够最大限度抑制由于电子学随机噪声引起的随机偏振误差^[10],达到高精度大气偏振信息获取。

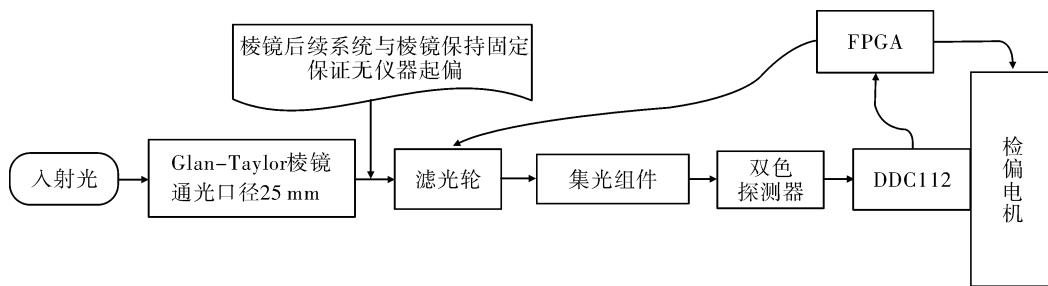


图1 高精度线偏振辐射计原理图

Fig. 1 Principle layout of high-precision linear-polarimeter

高精度线偏振辐射计探测目标包括太阳、气溶胶和地表,因此数据采集系统需具备动态范围广来适应不同目标下有效数据的获取。为了适应大气散射光的测量需求,根据仪器的系统设计,单光谱通道的有效驻留时间为 15 ms,故该数据采集系统无需过高的采样频率。而 DDC112 的最大转换速率为 2 kHz,因此可用其作为该仪器数据采集系统的模数转换器获取光电二极管的输出信号,从而得到精确的偏振信息。

2 数据采集系统设计

2.1 微弱光信号检测方法

微弱光信号检测的一般办法是通过光电转换器件将微弱的光信号转换为微弱电信号,然后再通过电路放大,将这个微弱电信号转变为可处理的电信号。^[13]由于光信号经光电二极管转换的电信号为微弱电流。微电流测量电路的性能在很大程度上决定仪器的灵敏度和分辨率^[14],常用的微电流测量基本方法有跨阻放大法和电容积分法。下面针对跨阻放大法和电容积分法进行比较,并分析各自的噪声模型。

跨阻放大法测微电流时一般采用电流负反馈直流放大器完成电流到电压的转换,该运算放大器处于系统的第一级,故其自身噪声对测量的结果影响很大。因此,降低该级放大器的噪声是实现获取高精度微电流信号的关键^[15]。图 2 是跨阻放大电路的噪声模型。

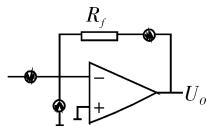


图 2 跨阻放大法电路噪声模型

Fig. 2 Noise model of transimpedance amplification circuit

对于光电二极管放大电路,其噪声来源于电路的反馈电阻,放大器的输入噪声电流和噪声电压。总输入噪声表达式:

$$V_{no} = \sqrt{E_{nv}^2 + E_{ni}^2 + E_{nr}^2} \quad (1)$$

$$E_{nv} = \sqrt{E_{1/f}^2 + E_{BB}^2} \quad (2)$$

$$E_{ni} = i_{BB} R_f \sqrt{BW_n} \quad (3)$$

$$E_{nr} = \sqrt{4KTR_f \Delta f} \quad (4)$$

式中: E_{nv} 为放大器的噪声电压; E_{ni} 为运算放大器

输入电流噪声转换的相关电压噪声; E_{nr} 为电阻热噪声; $E_{1/f}$ 为 $1/f$ 噪声; E_{BB} 为宽带噪声; i_{BB} 为电流噪声密度; R_f 为反馈电阻; BW_n 为噪声带宽; K 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度; Δf 为噪声带宽。

总输入噪声乘以运放的增益后得到总的输出噪声,再乘以 6 就可以估算出其峰值噪声。

电容积分法是用电容 C 代替方向放大器中的 R_f ,消除了反馈电阻的热噪声,图 3 是电容积分型微电流测量^[16] 原理图。

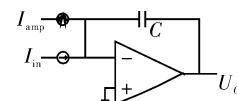


图 3 电容积分型电路噪声模型

Fig. 3 Noise model of capacitor integral circuit

总的输出表达式:

$$V_o = \frac{1}{C} \int (I_{in} + I_{amp}) dt \quad (5)$$

式中: I_{in} 为待测电流; I_{amp} 为运放输入等效总噪声; C 为积分电容; t 为积分时间; T 为时间常数。

由于噪声符合高斯分布规律,所以噪声电压平均值为零^[17],由(1)式知:如果对噪声进行积分,随着积分时间的增长,相应的电子学带宽越小,则输出的噪声就越小,表达式为

$$\overline{V_{no}} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} V_{no} dt = 0 \quad (6)$$

但长时间的积分使得电容在充放电切换过程中会丢失部分电荷信息^[18]。

虽然电容积分法相对于跨阻放大法对高频随机噪声抑制更明显,适合远距离传输,但电荷积累过程需要时间,不适合测量快速变化的微电流。跨阻放大法的大电阻噪声会影响其测量精度和线性度。

2.2 数据采集系统方案

根据高精度线偏振辐射计工作原理、功能需求及电容积分法放大电路的优点,设计数据采集系统原理框图,如图 4 所示,主要分为 AD、码盘、霍尔、电机驱动以及工控机等。

高精度线偏振辐射计数据采集系统的工作原理是:光信号经光电探测器转换为电信号,基于电容积分的直接电流数字化集成芯片 DDC112 直接将电信号转换成 20 bit 数字量被 FPGA 读取,码盘信号通过编码器为检偏电机提供当前的检偏角度,滤光轮上装的霍尔传感器与控制系统相连用

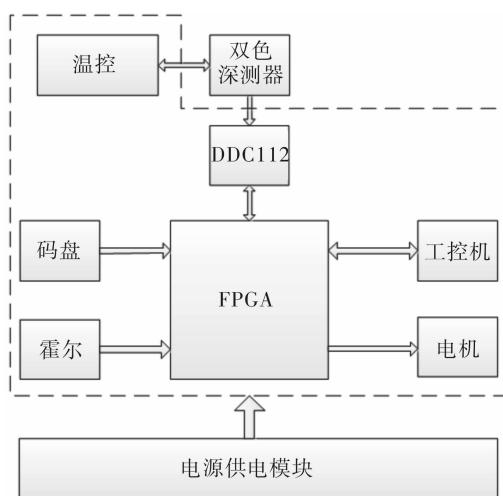


图 4 仪器电子学系统框图

Fig. 4 Block diagram of device electronics system

于 AD 触发和光谱通道确定, FPGA 通过 PWM 方式改变输出方波的占空比, 使负载上的平均电流功率变化, 从而改变滤光轮电机的转动速度。最后 FPGA 将采集到的数据通过 RS-232 串口上传至工控机进行分析处理。温控系统通过制冷和精确温度控制降低了短波红外波段探测器的暗电流及测量不确定度, 保证了短波红外波段偏振和辐射测量精度^[19], 有效地提高了短波红外波段的信噪比。

DDC112 的工作原理是:首先, 积分电容器预先充电, 随着 DDC112 和电容器积分, 输入信号将释放电容器的电荷, 从而使运算放大器输出端的电压降低。当积分结束时, 输入信号将切换至另一侧, 此时, 电压输入型 ADC 测量 V_{REF} 的保持值。上述循环将持续不断、有效地进行, 可连续对输入信号积分^[12]。

2.3 系统信噪比分析

高精度线偏振辐射计数据采集系统采用的是电容积分法测量光电二极管的输出信号, 其采集系统信噪比参考 AMPR 仪器的信噪比的计算过程。数据采集系统输出信噪比公式如(7)式所示。

$$\text{SNR} = \frac{V_{\text{in}}}{V_N} = \frac{\frac{1}{C} \int_0^T I_{\text{in}} dt}{\sqrt{\left(\frac{1}{C} \int_0^T I_n dt \right)^2 + \left(\frac{S_{\text{fs}}}{2^N \sqrt{12}} \right)^2}} \quad (7)$$

式中: V_{in} 为探测器光电流转换后的电压; V_N 为探测器和运放的总输出噪声; t 为积分时间; T 为时

间常数; C 为积分电容; S_{fs} 为 AD 转换器满量程对应的输入信号; N 为 AD 转换器的位数。

理想情况下, 探测器输出的光电流不含任何噪声, 故其在时间上的积分为电流值和积分时间之积。假设各噪声不相关, (7)式的分母即为系统噪声的最大估算。 I_n 为入射光信号的散粒噪声 (I_{shot})、探测器的噪声电流 (I_{det}) 和运放的输入噪声 (I_{amp}) 平方和开根号。如下式表示:

$$I_n = \sqrt{I_{\text{shot}}^2 + I_{\text{det}}^2 + I_{\text{amp}}^2} \quad (8)$$

仪器的散粒噪声分为光电流和暗电流的散粒噪声:

$$I_{\text{shot}} = \sqrt{\text{shot}(I_{\text{scene}})^2 + \text{shot}(I_{\text{dark}})^2} = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{I_{\text{scene}} 2q}{t}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{I_{\text{dark}} 2q}{t}} \right)^2} \quad (9)$$

式中: t 为积分时间; q 为电子电荷; I_{scene} 为探测器光电流; I_{dark} 为探测器暗电流。

探测器的散粒噪声可用其等效并联电阻的热噪声表示, 可表示为:

$$I_{\text{det}} = \sqrt{\frac{4KT}{tR_{\text{sh}}}} \quad (10)$$

式中: K 为波尔兹曼常数; $(1.38 \times 10^{-23} (\text{W} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}))$; T 为绝对温度 (K); R_{sh} 为探测器等效并联电阻 (Ω); t 为积分时间 (s)。

电容积分法的运放输入噪声 I_{amp} 包括运放的输入电压噪声和输入电流噪声。

$$\frac{S_{\text{fs}}}{2^N \sqrt{12}}$$

对比跨阻放大法的信噪比公式^[18], 显然, 在采样频率要求不高的情况下, 采用电容积分法的微电流测量方法的噪声较低, 而且凭借 DDC112 芯片可通过调整积分时间在有效光信号带宽内更改探测系统带宽, 不仅电路灵活, 还提高了系统的信噪比, 从而使仪器性能更加优越。

3 性能测试

在高精度线偏振辐射计光机系统和电子学系统装调结束后, 对仪器的数据采集系统进行以下几个方面的性能测试和验证。

3.1 等效噪声辐亮度和信噪比测试

本文在实验室采用了高稳定性、高均匀性的漫射光源积分球^[20]模拟典型天空辐亮度和地表辐亮度, 对高精度线偏振辐射计进行信噪比测试,

得到各波段在以下各辐亮度下的信噪比,并计算出探测器的等效噪声辐亮度如表 1 所示。

表 1 各波段在典型辐亮度值下的信噪比和等效噪声辐亮度

Table 1 SNR and equivalent noise radiance in each band with typical radiance value

波段/nm	典型辐亮度/ ($\text{uw}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$)	信噪比	等效噪声辐亮度/ ($\text{uw}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$)
490	8.17	405	0.016
550	6.27	230	0.0245
670	3.84	184	0.015
870	1.91	252	0.00746
910	1.62	127	0.0127
1 610	1.6365	294	0.000553
2 250	0.4733	147	0.00036

1 610 波段和 2 250 波段测量值用于地表偏振反射模型的建立,因此采用的是天顶角 40°和典型反射率为 0.3 时的典型辐亮度值。如表 1 所示。对于常规气溶胶探测波段信噪比均 ≥ 127 ,典型地表探测波段信噪比 ≥ 147 ,满足仪器的设计指标。

3.2 系统稳定性测试

在室温条件下设置可见和短波红外波段积分时间均为 900 μs ,积分增益均为 4,使用积分球对仪器稳定性进行测试,连续工作 1 个小时,并用 SVC 进行实时光谱检测,仪器各部件均正常工作,性能稳定。对 1 个小时内各波段 DN 值的最大值与最小值之差进行统计,结果如表 2 所示。

表 2 各波段在 1 个小时内 DN 值的最大值与最小值差

Table 2 Difference between maximum DN value and minimum DN value of each band in an hour

band	MAX(DN)-MIN(DN)
490	10
550	23
670	25
870	35
910	22
1 610	54
2 250	49
darkVI	9
darkIR	41

由表 2 可知:可见光波段本底 darkVI 变化很小,短波红外波段本底 darkIR 变化较大,是因为背

景辐射效应所引起的,可见光波段和短波红外波段数据均不同幅度跳变,由 SVC 实时测量值推测是因为光源的不稳定所引起的,表 2 可见波段的本底数据即可表明仪器的稳定性优越。

3.3 探测器本底测试

探测器的本底大小和稳定性直接影响数据采集系统的性能指标。根据光电探测器电噪声的产生机理,可分为热噪声、散粒噪声、产生-复合噪声和 $1/f$ 噪声等^[21]。在室温条件下,设置可见光和短波红外波段积分时间均为 900 μs ,积分增益均为 4,在黑暗的环境下对探测器的本底数据进行 1 个小时的测量,结果如图 5、图 6 所示。

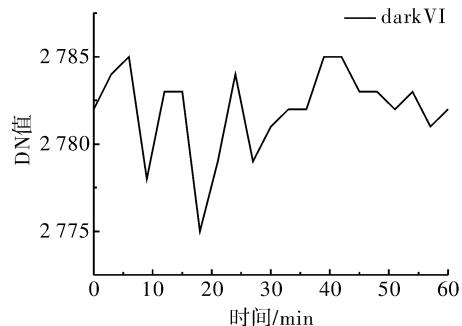


图 5 可见波段本底稳定性测试

Fig. 5 Visible band background stability test

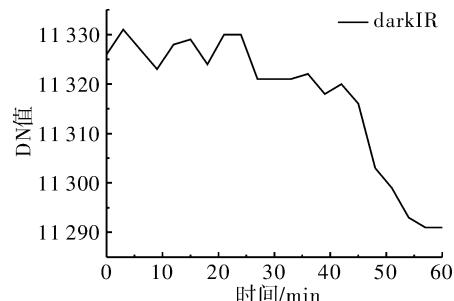


图 6 短波红外波段本底稳定性测试

Fig. 6 Short wave infrared band background stability test

由图 5 可知:可见光波段的本底在 1 个小时内只在 9 个 DN 值跳动,表现出优越的稳定性;而由图 6 可知:短波红外波段的本底跳动幅度较大,在 41 个 DN 值跳动,其跳动的原因主要是背景辐射效应引起的。因为可见光波段和短波红外波段采用的是同一个数据采集系统。由于仪器设计了每圈都测量一次本底,因此短时间内本底小范围漂移对采集结果可忽略不计。

3.4 仪器的动态范围

高精度线偏振辐射计不仅要具备测天空散射光的功能,还需要测量太阳直射光,因此仪器需具

备大的动态范围。仪器的动态范围设计需要考虑多种因素,主要是考虑大气层顶的太阳辐射模型和信噪比需求,同时也要参考相关仪器AMPR和APS的设计,以保证充分发挥20位ADC测量动态范围^[9]。对2015年6月19日在合肥市中科院安徽光机所光学遥感中心后面场地测试的数据进行统计,分别得出了测天空散射光和太阳直射光时各波段对应的DN值,结果分别如图7和图8所示,测天空时选用的积分时间为900 μs,积分增益是4,测太阳直射光用的是外部电容,积分增益选为0,积分时间可见波段设为60 μs,短波红外波段设为90 μs。

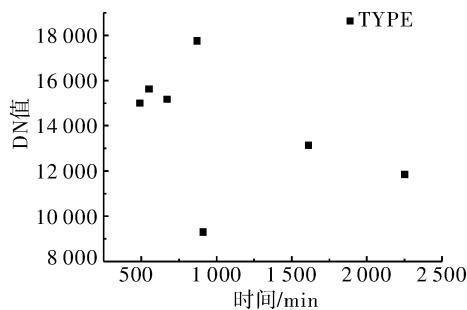


图7 高精度线偏振辐射计外场试验测量的典型值

Fig. 7 Typical value of high-precision linear-polarimeter in field test

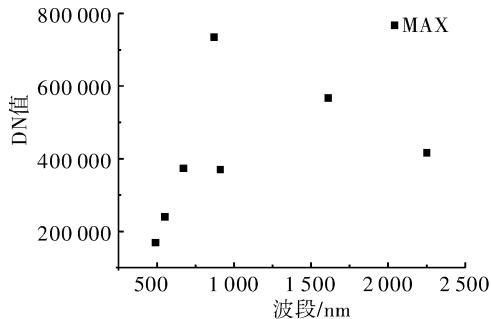


图8 高精度线偏振辐射计外场试验测量的最大值和典型值

Fig. 8 Maximum typical values of high-precision linear-polarimeter in field test

如图7和图8所示:仪器充分利用了20 bit-AD的优势,显示该数据采集系统具有良好的动态范围,由表1可知其探测典型辐亮度时,常规气溶胶探测波段信噪比 ≥ 127 ,典型地表探测波段信噪比 ≥ 147 ,满足仪器的指标要求。

3.5 数据采集系统电路性能测试

利用DDC112芯片的自检测功能来测试数据采集系统的性能。将芯片TEST管脚置为高电平,选用50 pC档测试理论值为13 pC电荷对应的

DN值,实际测量的2个通道DN值为276 116和276 120,由公式(11)可计算2个通道对应的电荷量均为

$$\frac{DN-h01000}{hFFFFF-h01000} \times 50 = 13.02 \text{ pC} \quad (11)$$

相对误差小于0.2%,实际测量时积分时间为700 μs,故通过计算可精确测量28 pA的电流,而探测器光电流是nA级的电流,既能保证精度,又能保证响应时间,故采用电容积分法的数据采集系统可以获取高精度的微电流值,实现高精度偏振信息获取。

3.6 仪器偏振测量结果验证

目前,偏振遥感探测主要是通过辐射测量求取目标的斯托克斯矢量^[8],斯托克斯矢量除了包含目标的辐亮度信息,还可以计算目标偏振度与偏振角等,从而为遥感信息解译提供更多维的数据源^[22]。在实验室采用积分球对仪器偏振度进行验证:用32盏灯的积分球作为待测光源。首先,让积分球的光束充满整个仪器的视场,因积分球的光近似为自然光,故测得每个波段的偏振度值近似为0。然后在仪器视场前加个偏振度为99.8%的偏振片作为起偏器,测得各通道的偏振度如表3所示。

表3 线偏振光测量结果

Table 3 Result of linear polarization light

λ/nm	偏振度
490	1.003 977
550	1.000 411
670	0.999 652
870	0.998 408
910	0.997 45
1 610	0.999 561
2 250	1.000 618

表3表明:各个波段测量结果优于0.5%,基本达到了仪器的设计要求。

4 结论

根据高精度线偏振辐射计采集系统探测信号动态范围大、采样频率低、探测精度高等特点,通过对比跨阻放大法和电容积分法2种探测器光电流探测方法,分析了各自电路的噪声模型,提出并实现了基于电容积分法的探测器光电流数据采集

系统,推导出该采集系统的信噪比公式,实现了偏振光谱信息的高精度获取。实验结果表明:该数据采集系统等效噪声辐亮度比较理想,常规气溶胶探测波段信噪比 ≥ 127 ,典型地表探测波段信噪比 ≥ 147 ,具有较高的响应动态范围,仪器稳定性优越,线偏振测量精度优于0.5%,达到仪器设计指标,为高精度线偏振辐射计工程应用奠定技术基础。

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 characteristics of the light scattered by the aerosol [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 862-865.
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] Han W, Stamnes K, Lubin D. Remote sensing of surface and cloud properties in the arctic from AVHRR measurements [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(7): 989-1011.
- [4] Cairns B, Russell E E, Travis L D. Research scanning polarimeter: calibration and ground-based measurements [J]. *SPIE*, 1999, 3374: 186-196.
- [5] Tanre D, Kaufman Y J, Hermans M, et al. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances [J]. *Geophys. Res.*, 1997, 102, 16971-16998.
- [6] Andr Y, Laherr R J M, Bret Dibat T, et al. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [J]. *SPIE*, 1995, 2572: 7090-7101.
- [7] Peralta R J, Nardell C, Cairns B, et al. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [J]. *SPIE*, 2007, 6786: L7865-L7865
- [8] Song Maoxin, Sun Bin, Sun Xiaobin, et al. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 06:1153-1158.
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,2012,06:1153-1158.
- [9] Hu Yadong, Hu Qiaoyun, Sun Bin, et al. Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 03:652-659.
胡亚东,胡巧云,孙斌,等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪[J]. 光学精密工程,2015,03:652-659.
- [10] Sun Bin. Study on simulation system of polarimetric aerosol remote sensing [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science Chinese Academy of Sciences, 2014, 4: 73-84.
- [11] Jerald Graeme. Design of photodiode and amplifier circuit [M]. Beijing: Science Press, 2012.
Jerald Graeme. 光电二极管及其放大电路设计[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [12] T1. Dual current input 20-bit analog-to-digital converter [C]. USA : Texas Instruments Inc., 2005.
- [13] Li Changqing, Mei Xinli, Ming Qi. Implementation of weak optical signal detection circuit [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5):724-727.
李常青,梅欣丽,明奇. 微弱光信号检测电路的实现[J]. 应用光学,2010,31(5):724-727.
- [14] Hao Shuli, Tuo Xianguo, Wang Honghui, et al. Design of chamber current measuring instrument based on DDC112 [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2012, 11:1309-1313+1335.
蒿书利,庹先国,王洪辉,等. 基于 DDC112 的电离室电流测量仪设计[J]. 核电子学与探测技术,2012, 11:1309-1313+1335.
- [15] Li Qingquan, Huang Changning. Principle and application of integrated operational amplifier [M]. Beijing: Science Press, 1980.
李清泉,黄昌宁. 集成运算放大器原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 1980.
- [16] Chen Wenxiang, Chen Xin. Microcurrent measurement based on integrating circuit [J]. *Analytical Instrumentation*, 1998, 03:22-24.
陈文彦,陈新. 采用积分型电路的微电流测量[J]. 分析仪器,1998,03:22-24.
- [17] Okamura O. OP amplifier circuit design [M]. Beijing: Science Press, 2004.
冈村道夫. OP 放大电路设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [18] Zhang Guiyu, Tuo Xianguo, Wang Honghui, et al. Comparison and improvement with the capacity of C/R measurement method of fA level current [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2011 (12): 8-12.
张贵宇,庹先国,王洪辉,等. 飞安级微弱电流 C/R

- 测量法性能对比及改进[J]. 电测与仪表,2011(12): 8-12.
- [19] Hu Yadong, Hu Qiaoyun, Sun Bin, et al. Impact of dark current on SWIR polarimetry accuracy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44 (8): 2375-2381.
胡亚东,胡巧云,孙斌,等. 暗电流对短波红外偏振测量精度的影响[J]. 红外与激光工程,2015,44(8): 2375-2381.
- [20] Zhang Fang, Gao Jiaobo, Wang Jun, et al. Model and analysis of spectral irradiance of integration sphere [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31 (5): 709-713.
张芳,高教波,王军,等. 积分球光谱辐射度建模与实验分析[J]. 应用光学,2010,31(5):709-713.
- [21] Gong Haimei, Liu Dafu. Developments and trends in spaceborne infrared detectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008,37(1):18-24.
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):18-24.
- [22] DavidB ChenaultJ, LarryPezzanitiRussellA, chipman. Muellermatrixalgorithms[J]. SPIE, 1992, 1746: 231-24.