

四分束风成像偏振干涉仪信噪比的研究*

张宣妮¹⁾²⁾ 张淳民^{1)†} 艾晶晶¹⁾

1) (西安交通大学理学院, 非平衡物质结构及量子调控教育部重点实验室, 西安 710049)

2) (咸阳师范学院物理与电子工程学院, 咸阳 712000)

(2012年7月7日收到; 2012年9月7日收到修改稿)

新型静态偏振风成像干涉仪采用四面角锥棱镜与偏振阵列的组合结构, 在 CCD 的四个分区上一次得到四个不同相位的干涉图, 可以实现对目标的实时探测, 克服了动镜扫描探测模式不能对快速变化目标进行精确探测的缺陷. 由于光束被四等分, 强度大幅度下降, 微弱的气辉信号能否被探测到成为研究的关键. 本文从目标气辉光谱的特性出发, 分析了静态偏振风成像干涉仪系统的光学传输特性和响应特性, CCD 的噪声水平及系统信噪比, 得出弱信号夜气辉在常规的探测模式下探测不到的结论. 采用延长光积分时间, 像素合并技术和选用探测灵敏度高的电子倍增 CCD 等措施, 均可以有效改善信噪比, 并计算出几种措施综合运用后系统的信噪比和响应度. 考虑到成本和目标的快速变化, 仅采用像素合并技术, 模拟了信噪比和数字化输出随辐射强度的变化曲线, 结果表明可实现对夜气辉等微弱信号的探测.

关键词: 微弱信号, 噪声, 信噪比, 响应度

PACS: 07.05.Rm, 07.07.Df, 07.60.Ly, 95.55.Qf

DOI: 10.7498/aps.62.030701

1 引言

风是大气能量和动量的主要表现形式, 风场速度和大气温度是大气行为的重要参数对高层大气 (80—300 Km) 风场温度、速度、压力等参数的探测, 为大气物理和地球物理的研究、中长期天气预报以及航空航天等领域提供大量的数据资料^[1-3]. 风场探测的研究由来已久, 其中被动式大气遥感风场探测始于 20 世纪 50 年代, 因不需要信号发射设备, 探测系统的体积、重量和功耗都大为减小而备受青睐^[3-12]. 基于迈克耳孙干涉仪的风场被动探测模式的发展经历了动镜扫描模式、四分区镀膜模式和偏振模式. 本课题组在偏振模式 (polarizing atmospheric michelson interferometer, PAMI)^[8] 的基础上提出新型静态偏振风成像干涉

仪 (the novel static polarization wind imaging interferometer, NSPWII)^[13]. 它采用四面角锥棱镜与偏振阵列的组合结构, 可同时在 CCD 的四个分区上得到四个不同相位的干涉图, 替代了 PAMI 中通过旋转四次偏振片来依次获取四个干涉强度的方法. 因此, NSPWII 系统可以实现对目标的实时探测, 克服了动镜扫描探测模式不能对快速变化目标进行精确探测的缺陷^[13]. 这些独特优点使得 NSPWII 探测系统将有望成为一种重要的获取精确高层大气信息的探测方式. 四面角锥棱镜的作用是对干涉光束四分束, 从而可同时得到四幅干涉图, 然而每一幅干涉图的强度最多为 PAMI 的四分之一, 信号能否被探测到成为问题的关键. 基于此, 本文从目标光谱特性出发, 研究光谱在 NSPWII 系统中的传输特性以及其在探测器上的响应, 分析影响信噪比 (signal noise ratio, SNR) 的相关因素, 并提出相应的

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA121101, 2006AA12Z152)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 40537031)、国家自然科学基金 (批准号: 61275184, 40875013)、国家重大科技专项 (批准号: E03101112JC02) 和 2010 苏州大学省重点实验室专题项目 (批准号: KJS1001) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

改进措施, 为完善 NSPWII 系统的性能奠定基础.

2 NSPWII 系统的光学传输特性

2.1 目标光谱特性

中高层大气风场 (80—300 km) 的被动式探测主要是利用干涉成像光谱技术和电磁波的多普勒效应^[2-6], 通过探测中高层大气中的气辉辐射的干涉图来反演出高层大气视线方向上的速度和温度^[5-12]. 气辉是地球高层大气吸收太阳辐射所产生的微弱光辐射现象, 亮度较低, 分布均匀, 适合星

载探测^[2,12]. 气辉分为夜气辉、昼气辉和曙暮气辉, 昼气辉最强, 夜气辉最弱. 气辉总是存在, 它覆盖了所有纬度, 没有固定形式, 其强度比极光小很多. 气辉有日变化、季节和年变化, 但随太阳活动的变化没有极光那样明显. 极光仅出现在高磁纬度区上空, 在一定条件下才能产生^[14-18]. 为了探测 80—300 Km 高层大气的行为, Shepherd 等^[12] 综合多种因素, 选取如表 1 所示 $O(^1S)$ 557.7 nm, $O(^1D)$ 630.0 nm, OH(8-3) 730.0 nm, O_2 分子(0-0) 762.0 nm 和 O^+ 732.0 nm 气辉谱线作为被动式高层大气探测的目标谱线, 以实现大气风场不同高度区域的探测.

表 1 高层大气探测目标谱线的发射特征^[12]

| 谱线 | 寿命/s | 波长/nm | 高度范围/km | 峰值高度/km | 辐射强度/kR |
|-----------------|------|-------|-------------|---------|-----------|
| $O(^1S)$ 绿线 | 0.8 | 557.7 | 较低的 80—90 | 97 | 0.25—1.5 |
| | | | 较高的 150—300 | 200 | 0.025—1.5 |
| $O(^1D)$ 红线 | 110 | 630.0 | 150—300 | ~ 250 | 0.01—20 |
| OH(8-3) 带 | 4.2 | 730.0 | 80—110 | 87 | 1—1.5 |
| O_2 分子(0-0) 带 | 14 | 762.0 | 80—110 | 94 | 0.015—20 |
| O^+ 线 | 5 | 732.0 | 200—300 | ~ 150 | 0.012—0.8 |

在这些气辉谱线中, 平均强度较强, 能被连续探测的要数氧原子发射的两条谱线: $O(^1S)$ 绿线 557.7 nm 和 $O(^1D)$ 红线 630.0 nm^[19], 覆盖了高度范围 80—300 km 的中高层区域, 而 $O(^1D)$ 红线 630.0 nm 的辐射强度变化范围最大: 0.01—20 kR.

2.2 NSPWII 系统的光学传输特性

NSPWII 的基本结构如图 1 所示, 主要由滤波器、前置望远系统、宽场偏振迈克耳孙干涉仪系

统、分光与成像系统等部分构成. 滤波器的作用是对入射光波进行波长选择, 得到仪器需要的探测目标波长. 前置望远系统可让尽量多的光线进入干涉仪系统以提高系统的光通量. 四面角锥棱镜使一束光等分为传输方向不同的四束光, 之后四束光分别经过聚焦透镜和偏振阵列在 CCD 上汇聚. 偏振阵列四个分区的偏振化方向依次相差 $\pi/4$, 则 CCD 上一次可得到四幅相位差依次为 $\pi/2$ 的干涉图^[5].

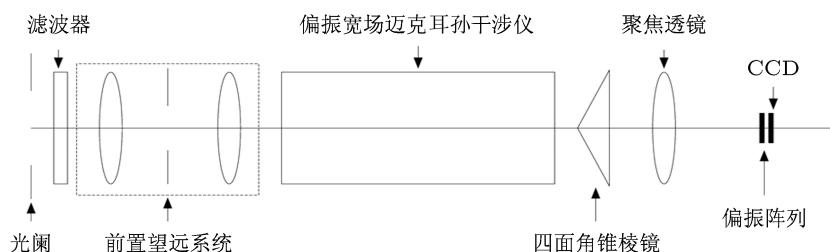


图 1 NSPWII 系统结构示意图

在 NSPWII 系统中, 进入光阑的光束, 经过滤波器后为 49.3%^[2], 再经过透射率为 90% 的高端天文望远镜后为 45%^[3]; 在偏振宽场迈克耳孙干涉仪中, 首先被起偏, 光束强度损失一半后为 22.5%, 迈克耳孙干涉仪的主体部分的透射率为 30%^[12], 则此时透射率为 6.75%; 然后经透射率为 90% 的四面角锥棱镜四分束^[20], 透射率为 6.075% 左右, 各束的光通量减为整体的 1/4; 偏振阵列相当于检偏器, 光强又衰减一半, 最终的透射率为 3.038% 左右.

2.3 NSPWII 系统的输出信号和响应特性

气辉辐射强度可用瑞利 (R) 计量, $1 \text{ R} = 10^6$ 光子/s·cm⁻². 对于光谱强度为 $B(\lambda)$ 入射气辉, 输出信号可表示为^[12]

$$S_{\text{out}} = \frac{10^6 B(\lambda)}{4\pi} A \Omega \tau \eta t, \quad (1)$$

A 为系统孔径面积, Ω 表示一个像素对应的立体角, τ 为系统透射率, η 为 CCD 的量子效率, t 为积分曝光时间. NSPWII 系统中, 设 $A = 2.3 \times 2.3/4 = 1.32 \text{ cm}^2$, $\Omega = 1.76 \times 10^{-4} \text{ sr}$, $\tau = 3.038\%$, $\eta = 0.8$, 沿用 WINDII 中的光积分时间 $t = 2 \text{ s}$ ^[12]. 如表 1 所示, $O(^1D)$ 红线 630.0 nm 夜气辉强度最低为 0.01 kR. 代入 (1) 式, 得 $S_{\text{out}} = 8.99$, 即可在 CCD 上得到 8.99 个光电子.

响应度 R_S 指输出信号与输入信号的比值. 在 CCD 探测系统中, 输出信号经过数字化表示为模数单位 ADU (analog to digital unit). 设量化中 1 ADU 等于单位瑞利辐射时每秒存储在 CCD bin (像素合并) 中的 73 个电子, 在探测器上产生的响应可表示为^[4,12]

$$R_S = \frac{S_{\text{out}}}{S_{\text{in}}} = \frac{1}{73} \times \frac{10^6}{4\pi} A \Omega \tau \eta, \quad (2)$$

代入 $A = 2.3 \times 2.3/4 = 1.32 \text{ cm}^2$, $\Omega = 1.76 \times 10^{-4} \text{ sr}$, $\tau = 3.038\%$, $\eta = 0.8$, $B(\lambda) = 0.01 \text{ kR}$, 则数字化输出 $R_S = 0.0616 \text{ ADU}$. 当 CCD 单位像素每秒产生的光电子数目少于 73 时, 在以数字化输出信号的系统里是读不出的^[4,12]. 如上分析, NSPWII 系统中在 CCD 上得到 8.99 个光电子, 不足以形成 1 个 ADU 的计量.

3 探测系统的 SNR

在气辉这样的微弱信号探测中, SNR 是系统的关键参数之一, 用来描述测量的品质, 定义为在某一像素上的测量信号与全部测量的噪声的比值.

$$\text{SNR} = \frac{i_s \eta t}{\sqrt{(i_s + i_b) \eta t + i_d t + N_r^2}}, \quad (3)$$

式中 i_s 为 CCD 上的光子流, i_b 为 CCD 上的背景光电流, i_d 是暗电流, N_r 为读出噪声. 对于天文 CCD, 在有效降低背景噪声的情况下, 主要的噪声源有光子噪声、暗电流噪声和复位噪声.

光子噪声是由光的量子属性决定的, 与频率无关, 属于白噪声. 它不会限制器件的动态范围, 但却决定了微光探测应用中的噪声极限. 即在低照度、低反差条件下, 当其他噪声被有效抑制后, 光子噪声将成为 CCD 的主要噪声源, 并决定着器件的噪声水平. CCD 上产生的光子噪声与入射到 CCD 上的光通量的平方根成正比^[10], 即

$$N_{\text{photon}}(\Phi) = [i_s \eta t + i_d t]^{1/2}, \quad (4)$$

当入射光子引起的噪声 (如散粒噪声) 远大于暗电流噪声时, (4) 式中的暗电流项可以忽略.

由 (4) 式可以看出, 光子噪声除受积分时间影响外, 主要受到光子流影响, 光子流越大, 光子噪声也越大.

暗电流产生的原因是由于半导体的热激发, 它主要受温度影响, 并与光积分时间平方根成正比^[10]:

$$N_d = \sqrt{i_d t}, \quad (5)$$

N_d 为暗电流噪声. 暗电流噪声的存在限制了器件的灵敏度和动态范围. 暗电流噪声随积分时间增大而增大. 在弱信号条件下, 一般采用增加积分时间的方法进行观测, 则暗电流噪声将是主要的影响因素. 虽然在图像校正过程中可以通过减去相同曝光时间下的暗场图像来消除暗电流, 但是这样会把该暗场图中的泊松噪声引入到图像中^[8]. 为了减少读出噪声和泊松噪声所引入的不确定度, 要采集多幅暗场图像, 得到暗电流信号平均计数和曝光时间的关系曲线, 并进行线性拟合得到其斜率就是暗电流的大小^[10]. 温度对暗电流噪声的影响非常大, 温度每升高 7 °C, 其暗电流增加约一倍^[21], 因此, 许多 CCD 在工作时都有内置或外接的制冷设备.

读出噪声是信号电荷包被转换为电压并在读出和放大的过程中产生的随机噪声,服从高斯分布^[10]. 读出噪声主要包括复位噪声(KTC)和输出放大电路噪声(1/f 和白噪声),是由输出浮置扩散放大器和后续相应的信号处理电路产生的. 主要的复位噪声来源于片上的预放大器,伪电荷在复位噪声也占很大的比例. 在天文 CCD 相机系统,一般通过电路良好的设计来减小复位噪声. 另外,读出噪声随 CCD 的读出速率的增大而增大,可采用慢扫描技术降低,应用双斜率积分器或相关双采样的方法也可滤除读出噪声中的特定的成分,如 KTC 噪声和 1/f 噪声^[10].

噪声是客观存在的,只能尽可能的减少它,但不能完全消除. 噪声的存在限制了探测器探测微弱信号的能力,当 SNR ≥ 1 时,信号才能被探测到. 采用普林斯顿公司制造的噪声较低的 CCD/PI1300B0,其主要性能指标如表 2 所示.

表 2 PI1300B CCD 的主要技术指标

| 参数 | 指标 |
|----------------------|----------------------------------|
| 分辨率 | 1340 pixel × 1300 pixel |
| 像素大小 | 20 μm × 20 μm |
| 成像区域 | 26.8 mm × 26 mm |
| 满阱电子数 | 2 × 10 ⁵ e |
| 动态范围 | 16bit |
| 读出噪声 N_r | 3 e-rms (慢读出模式)/10 e-rms (快读出模式) |
| 暗电流噪声 i_d (-40 °C) | 0.1 e/pixel·s ⁻¹ |

当 $i_b = 0.3 \text{ e/pixel} \cdot \text{s}^{-1}$, $N_r = 10 \text{ e. rms}$ (为了精确探测快速变化的目标信号,选用快读出模式), $i_d = 0.1 \text{ e/pixel} \cdot \text{s}$, 如前所述,对于夜气辉辐射为 0.01 kR 时, $I_s \eta t \cong 8.99$, 代入 (3) 式得 $\text{SNR} \cong 0.858$, 即信号被噪声淹没,探测不到. 依据上述分析,给出辐射强度在 0—200 R 范围内 SNR 和数字化输出 R_s (单位为 ADU) 随辐射强度 B^{-1} (单位为 R) 的变化曲线,如图 2 所示,积分时间为 2 s. 其中 Q 点对应的 $\text{SNR} = 1$, 辐射强度约为 13.5 R; P 点对应的辐射强度约为 163.5 R. 由此可见,即使 $\text{SNR} \geq 1$ 的信号,在 CCD 上也不一定数字化读出. 对于强度小于 163.5 R 的信号,应采取措施改善系统探测

灵敏度.

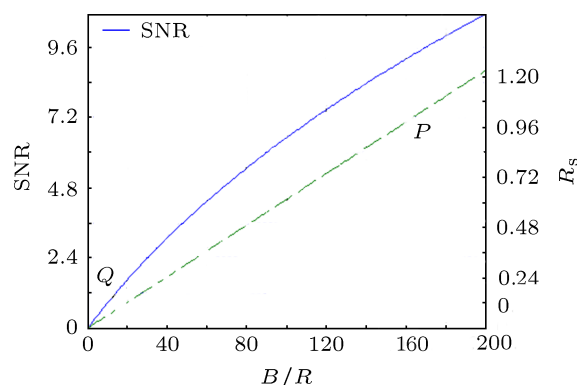


图 2 SNR 和数字化输出 R_s 随辐射强度 B 的变化曲线

4 NSPWII 系统 SNR 的改善

由于风场探测是对 80—300 km 的区域进行全方位全天候的探测^[1,2,21-23],因此必须通过改善 SNR 实现对夜气辉的探测,如强度为 0.01 kR 的 O(¹D) 红线夜气辉. 改善 SNR 可通过增大信号或减小噪声两方面着手: 延长积分时间、像素合并技术及选择合适的 CCD 探测系统都是改善 SNR 的有效措施.

4.1 延长积分时间

当光积分时间很短时, (3) 式分母根式中的第一、二项均可忽略不计, 读出噪声占主导地位, 则信噪比可简化为^[10]

$$\text{SNR} = \frac{i_s \eta}{N_r} t. \quad (6)$$

光积分时间较长时, 读出噪声可忽略, 光子噪声占主导地位, 信噪比可表示为

$$\text{SNR} = \frac{i_s \eta}{\sqrt{(i_s + i_b) \eta + i_d}} \sqrt{t}. \quad (7)$$

图 3 中, 红色曲线与 (6) 式对应, 蓝色曲线与 (7) 式对应, 它们交于 Q 点. $t < t_Q$ 时, 读出噪声较大; $t > t_Q$ 时, 光子噪声较大^[10]. 无论哪种情况, 信噪比都是随积分时间的延长而增大. 但时间的延长是有上限的, 因为 NSPWII 系统优点之一就是可以对快速变化的目标实时探测, 积分时间太长, 目标已发生变化. WINDII 中的光积分时间 $t = 2 \text{ s}$, 完成一次测量需要 8 s. 对于分区模式, 如果光积分时间

多于 8 s, 则该优点就不存在了. 另外依据卫星的飞行速度, 探测目标在 CCD 上每秒移动 9.3 个像素 [3,22,24,25], 积分时间延长到一定程度, 探测目标有可能移出探测区. 因此, 对于变化较慢的目标光谱, 光积分时间可尽量延长, 但应使探测目标在 CCD 上移动小于 1 个 CCD bin.

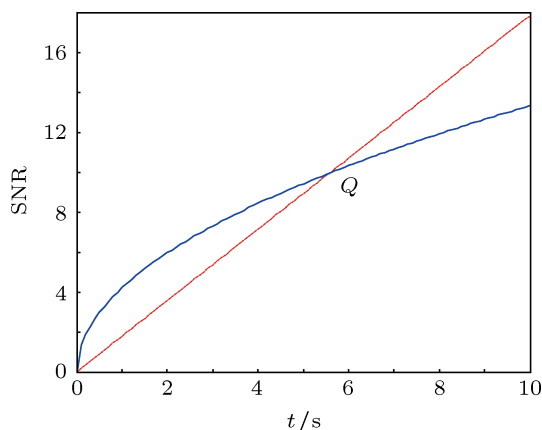


图3 噪声模型与积分时间曲线

4.2 像素合并技术

像素合并技术是把 CCD 上相邻行列上的像素合并为一个“超像素 (bin)”[22,26]. 例如像元 2×50 bin 就是 2 行 (垂直方向) 相邻像素和 50 列 (沿卫星轨道方向) 相邻像素组成的感光区域. 在信号读出时, 整个像元区域包含的像素信号叠加在一起输出. 该技术以牺牲空间分辨率为代价提高 SNR, 却不影响光谱分辨率 [22,27,28]. 由于风场探测对图像的空间分辨率要求不是很高, 只要干涉图像的强度对比明显, 调制度足够大, “超像素”可以划分得尽可能大. 如 WINDII 的临边观察中垂直空间分辨率为 2 km, 对应 CCD 上 2 个像素 [12], 而水平向为卫星飞行方向, “超像素”在水平方向的尺寸满足在光积分时间内, 卫星未超出对应的水平距离. 这里选取 2×50 bin, 则垂直空间分辨率为 2 km; 水平空间分辨率为 50 km, 卫星的飞行速度约为 7.6 km/s, 则光积分时间上限为 $t = 50/7.6 = 6.578$ s. 设一个“超像素”的中像素为 M , 则 SNR 可表示为

$$SNR = \frac{I_s M \eta t}{\sqrt{(I_s + I_b) M \eta t + I_d M t + N_r^2}}, \quad (8)$$

SNR 随着 M 值增大而大幅度提高. 随着“超像素”区域的增大, 积分时间上限也可适当增大, 具体数

值由“超像素”在卫星飞行方向的像素数与卫星单位时间飞过的像素决定.

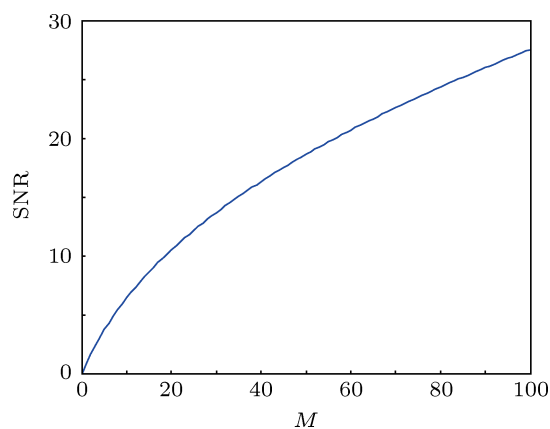


图4 信噪比随像素数 M 的变化曲线

4.3 选择合适的探测器件 CCD

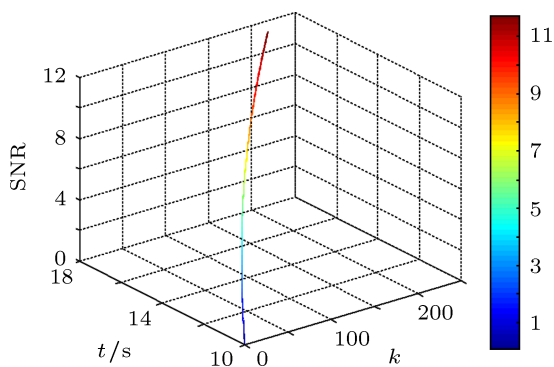
在光电探测器件中, 光电倍增管 PMT, 电子倍增 CCD (electron multiplication CCD, EMCCD), 背照式 CCD (back illuminated CCD, BCCD), 背照式电子轰击 CCD (electron bombarded CCD, EBCCD) 都具有良好的灵敏度, 适合微弱信号探测 [22,24]. 在 NSPWII 系统中, 探测器光敏面需要被四分区, 因而光电倍增管不适合; BCCD 和 EBCCD 由于需要高难度的“减薄”工艺, 价格昂贵 [22,24]. EMCCD 是具有二维矩阵的光电传感器, 在转移寄存器和输出放大器之间增加了电荷载流子倍增寄存器, 该寄存器可使信号在放大器噪声加入之前被倍增, 减小了放大器噪声对信号的影响, 具有灵敏度高, 噪声低, 读出速度快等优点, 特别适合微光快速成像技术 [2,7,24,27], 价格比普通天文 CCD 要高. 片上增益 G 是它重要的性能指标, 其计算公式为 [24]

$$G = (1 + p)^k, \quad (9)$$

式中 k 为倍增寄存器单元个数, p 为单个倍增单元中发生碰撞电离的概率, 经过多次倍增之后, 总增益可达 1000. 信噪比可表示为

$$SNR = \frac{I_s G \eta t}{\sqrt{(I_s + I_b) G \eta t + I_d G t + N_r^2}}. \quad (10)$$

信噪比与积分时间 t 及倍增寄存器单元个数 k 的变化关系由图 5 给出.

图5 信噪比与积分时间 t 及倍增寄存器单元个数 k 的变化关系

由图 5 可知, 在改善信噪比时, t 与 k 的大小深刻影响信噪比, 二者之中一个很大、另一个太小对改善信噪比不利, 如图中 $k=0-10$ 范围内, 虽然积分时间较长, 信噪比仍然较低.

影响信噪比的因素较多, 这些因素很多相互影响, 相互制约, 在系统设计时应综合考虑.

4.4 信噪比改善效果

若几种改善信噪比的技术综合运用, 则信噪比可表示为

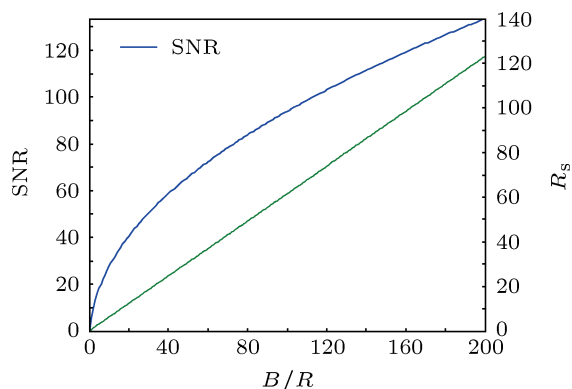
$$\text{SNR} = \frac{I_s M G \eta t}{\sqrt{(I_s + I_b) M G \eta t + I_d M G t + N_r^2}}. \quad (11)$$

由于考虑快速变化的探测目标, 选取积分时间为 2 s, 2×50 bin 的“超像素”, (11) 式中 $M = 100$, EMCCD 片上增益取 $G = 100$. 依据表 2 的技术参数, 则当 $i_b = 0.3 \text{ e/pixel} \cdot \text{s}^{-1}$, $N_r = 10 \text{ e-rms}$, $i_d = 0.1 \text{ e/pixel} \cdot \text{s}^{-1}$, 对于夜气辉辐射为 0.01 kR 时, 则有 $I_s \eta t \cong 8.99$, 代入 (11) 式得 $\text{SNR} \cong 288.95$. 再把相关参数代入 (2) 式得数字化输出 $R_S = 616 \text{ ADU}$, 即能读出 616 个模拟数字单位, 信号能够被数字化读出.

在能达到探测要求的情况下, 基于节约成本的考虑, 选用现有的普通天文 CCD, 即 $G = 1$; 仅采用像素合并技术, 选取 2×50 bin, $M = 100$, 积分时间依然取 2 s. 同样给出辐射强度在 0—200 R 范围内信噪比和数字化输出 R_S 随辐射强度 B 的变化曲线, 如图 6 所示.

由图 6 可知, 对于 0.01 kR 的微弱辐射, 仅采用像素合并技术后, 信噪比为 28 左右, 数字化输出为

5 ADU, 说明通过像素合并, NSPWII 系统可以实现对微弱夜气辉的快速探测.

图6 像素合并后信噪比 SNR 和数字化输出 R_S 随辐射强度 B 的变化曲线

5 结论

微弱信号探测在科学研究中的地位和作用日益凸显, 改善信噪比是微弱信号探测的主要课题之一 [29–33]. 本文就 NSPWII 系统的信噪比进行了分析研究, 得出以下结论:

1) 分析了 NSPWII 系统的探测目标的光谱特性, 光学传输特性和响应特性, 得出以常规的积分时间 $t = 2 \text{ s}$, 普通的 CCD 工作模式, 难以探测到夜气辉这种微弱信号;

2) 分析了微弱信号探测中几种主要的噪声, 各类噪声的性质和不同条件下对信噪比的影响, 并提出相应的降噪措施;

3) 针对 NSPWII 系统提出几种改善信噪比的措施: 延长积分时间可提高信噪比, 但不适合空基和快速变化的目标信号的探测; 像素合并技术可有效地改善信噪比, 却以牺牲空间分辨率为代价, 而 NSPWII 系统中主要提取四分区信号的干涉强度, 对空间分辨率要求不高; 选用 EMCCD 可以大大提高信噪比, 但成本有所提高;

4) 考虑到成本和目标快速变化, 仅采用像素合并技术, 对于 0.01 kR 的微弱辐射, 通过模拟曲线知信噪比为 28 左右, 数字化输出为 5 ADU, 说明像素合并后 NSPWII 系统可以对微弱信号的快速探测.

以上结论对微弱信号探测有一定的借鉴作用, 也为 NSPWII 系统的研制提供理论依据和实践指导.

- [1] Babcock D D 2006 *Ph. D. Dissertation* (Canada: York University)
- [2] Shepherd G G, Gault W A, Miller D W, Pasturczyk Z, Johnston S F, Kosteniuk P, RHaslett J W, Kendall D J W, Wimperis J R 1985 *Appl. Opt.* **24** 1571
- [3] Hilliard R L, Shepherd G G 1966 *J. Opt. Soc. Am.* **56** 362
- [4] Shepherd G G, Gault W A, Miller D W, Pasturczyk Z, Johnston S F, Kosteniuk P R, Haslett J W, Kendall D J W, Wimperis J R 1985 *Appl. Opt.* **24** 1571
- [5] Zhang X N, Zhang C M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 1042101 (in Chinese) [张宣妮, 张淳民 2012 物理学报 **61** 1042101]
- [6] Zhang C M, He J 2006 *Opt. Express* **14** 12561
- [7] Rochon Y J 2000 *Ph. D. Dissertation* (Canada: York University)
- [8] Bird J C, Liang F C, Solheim B H, Shepherd G G 1995 *Meas. Sci. Technol.* **6** 1368
- [9] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 67 (in Chinese) [叶健勇, 张淳民, 赵葆常 2008 物理学报 **57** 67]
- [10] Wang S H, Hu M F, Chen Z P 2007 *Semicond. Optoelectr.* **28** 731 (in Chinese) [王书宏, 胡谋法, 陈曾平 2007 半导体光电 **28** 731]
- [11] Zhang C M, Zhu L Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 989 (in Chinese) [张淳民, 朱兰艳 2010 物理学报 **59** 989]
- [12] Shepherd G G, Thullier G, Gault W A, Solheim B H, Hersom C, Alunni J M, Brun J F, Brune S, Charlot P, Cogger L L, Desaulniers D L, Evans W F J, Gattinger R L, Girod F, Harvie D, Hum R H, Kendall D J W, Llewellyn E J, Lowe R P, Ohrt J, Pasternak F, Peillet O, Powell T, Rochon Y, Ward W E, Wiens R H, Wimperis J 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 10725
- [13] Liu N 2010 *M. S. Dissertation* (Xi'an: Xi'an JiaoTong University) (in Chinese) [刘宁 2010 硕士学位论文 (西安: 西安交通大学)]
- [14] Bu Z C, Zhang C M, Zhao B C, Zhu H C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2415 (in Chinese) [步志超, 张淳民, 赵葆常, 朱化春 2009 物理学报 **58** 2415]
- [15] Zhang C M, Zhu H C, Zhao B C 2011 *Opt. Express* **19** 9626
- [16] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **43** 6090
- [17] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B, Li Y C 2006 *Optik* **117** 265
- [18] Zhao T Y, Liu Q X, Yu F H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 64203
- [19] Zhang C M, Wu Q M, Mu T K 2011 *Appl. Opt.* **50** 6134
- [20] Wang J C, Zhang C M, Zhao B C, Liu N 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1625 (in Chinese) [王金婊, 张淳民, 赵葆常, 刘宁 2010 物理学报 **59** 1625]
- [21] Zhang C M, Zhao J K, Sun Y 2011 *Appl. Opt.* **50** 3497
- [22] Janesick J R 2001 *Scientific Charge-Coupled Devices* (1st Edn.) (Washington: Bellingham) p121
- [23] Zhang C M, Mu T K 2011 *Opt. Eng.* **50** 049701
- [24] Zhou B B 2010 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [周蓓蓓 2010 博士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [25] Luo Q, Huang L H, Gu N Ting, Rao C H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094201
- [26] Goiffon V, Girard S, Chabane A, Paillet P, Magnan P, Cervantes P, Martin-Gonthier P, Baggio J, Estriebeau M, Bourgade J L, Darbon S, Rousseau A, Glebov V Y, Pien G, Sangster T C 2012 *Opt. Express* **20** 20030
- [27] Dai Y, Zhang J X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 104203
- [28] Ren W Y, Zhang C M, Mu T K, Dai H S 2012 *Opt. Lett.* **37** 2580
- [29] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Opt. Commun.* **10** 1984
- [30] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Appl. Opt.* **12** 2333
- [31] Zhang C M, Mu T K, Ron W Y, Zhang L, Liu N 2010 *Opt. Eng.* **4** 043002
- [32] Mu T K, Zhang C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 060702
- [33] Mu t K, Zhang C M, Zhao B C *Opt. Commun.* **9** 1699

The signal-to-noise ratio of the quarter beam of wind imaging polarization interferometer*

Zhang Xuan-Ni¹⁾²⁾ Zhang Chun-Min^{1)†} Ai Jing-Jing¹⁾

1) (*Non-equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering Laboratory, the Key Laboratory of Ministry of Education School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xian 710049, China*)

2) (*Institute of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China*)

(Received 7 July 2012; revised manuscript received 7 September 2012)

Abstract

The novel static polarization wind imaging interferometer adopts four-face pyramid prism and polarization array to obtain four different phase interferograms on four sections of CCD once. It can detect the target in real time and overcome the moving mirror scan detection mode defect that leads to be unable to accurately detect the rapidly changing target. For the signal beam that is split into four equal parts, their intensities drop significantly, so whether the signal can be detected is a key problem. In this paper, the target spectral characteristic of the airglow is taken as the starting point of analysis, then the optical transmission properties and response of the NSPWII system and CCD signal-to-noise ratio are analyzed. Finally the conclusion is obtained that weak signal (such as night airglow) cannot be detected in the conventional detecting mode. Some improving measure is presented which extends light integration time, adopts pixel merger technology and select high sensitivity CCD (as electron multiplication CCD), they all can improve the signal-to-noise ratio effectively. After integrated using the these measures, the signal-to-noise ratio and responsiveness of NSPWII system are calculated. In view of the rapid changes of cost and objectives, only pixel binning is adopted, and the simulated curve of signal-to-noise ratio versus digital output is obtained. The result shows that the weak signal as night airglow can be detected.

Keywords: weak signal, noise, signal-to-noise ratio, responsiveness

PACS: 07.05Rm, 07.07.Df, 07.60.Ly, 95.55.Qf

DOI: 10.7498/aps.62.030701

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2012AA121101, 2006AA12Z152), the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031), National Major Project of China (Grant No. E03101112JC02), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275184, 40875013) and the Topics of 2010 Provincial Key Laboratory of Suzhou University, China (Grant No. KJS1001).

† Corresponding author. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn