

新型偏振干涉成像光谱仪噪声分析与评价*

张淳民[†] 黄伟健 赵葆常

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

(2009 年 5 月 15 日收到; 2009 年 11 月 13 日收到修改稿)

简要论述了自行设计、研制的新型偏振干涉成像光谱仪的基本原理; 对该新型偏振干涉成像光谱仪的噪声进行了全面分析; 给出了与系统通量相关的总噪声理论表达式; 提出了结合成像光谱仪系统、CCD 图像传感器与光谱图像提取噪声的分析方法; 辅以信噪比的评价, 得知成像光谱仪系统通量虽然对噪声具有巨大贡献, 但不会影响系统信噪比; 为成像光谱仪信噪比的准确计算与降噪方法的有效采用提供了新的理论指导.

关键词: 偏振干涉成像光谱仪, CCD 图像传感器, 噪声, 信噪比

PACC: 4230, 0760, 4280Q, 7270

1. 引 言

上世纪 90 年代以来, 随着偏振干涉成像光谱技术的出现, 成像光谱仪朝着小型化、高通量、多通道、高分辨率的方向发展. 从美国于 1996 年研制的数字阵列扫描干涉成像光谱仪 (digital array scanned interferometers, DASI) 至今, 多个国家均对新型偏振干涉成像光谱仪进行了研究. 如中分辨率成像光谱仪 (moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS^[1]), 中等分辨率成像光谱仪 (medium resolution imaging spectrometer, MERIS^[2]), 小型高分辨率成像光谱仪 (compact high-resolution imaging spectrometer, CHRIS^[3]) 等, 而我国由张淳民等人^[4-19]提出的基于 Savart 偏光镜的稳态偏振成像光谱仪 (SPIIS) 以及稳态大视场偏振干涉成像光谱仪 (SLPIIS) 具有大视场、高通量、高稳态的特点^[20-30]. 成像光谱仪是基于探测目标的一维光谱信息和二维空间信息来工作的. 当今绝大多数的成像光谱仪均采用二维探测器阵列来进行光谱成像, 对于推扫型的成像光谱仪而言, 若以二维面阵探测器的列代表光谱, 则行代表推扫距离, 这样可使成像

光谱仪每帧图像都能同时获得光谱信息和空间信息. 二维面阵探测器阵列现在最常用的是电荷耦合器件 (charge coupled devices, CCD) 出于对更高分辨率图像输出的追求, 人们对 CCD 的成像质量提出了更高的要求. 为了使成像光谱仪达到高分辨率、高信噪比的要求, 对成像光谱仪系统噪声包括 CCD 噪声的抑制是一个很重要的工作. 关于 CCD 噪声的分析与评价国内外已有众多的研究, 而对于偏振干涉成像光谱仪在 CCD 上成像所具有的一系列噪声, 特别是光子噪声和偏振噪声问题, 目前尚未见报道. 本文就以 SPIIS 为例, 分析和评价偏振干涉成像光谱仪的噪声问题, 为抑制噪声、进行信噪比研究提供新方法和理论指导.

2. 新型偏振干涉成像光谱仪系统原理分析

图 1 (a) 为 SPIIS 的系统总图^[7], 它由前置光学系统 L_0, L_1 , 起偏器 P_1 , Savart 偏光镜, 检偏器 P_2 , 成像镜 L_2 , 面阵探测器 CCD 及数据图像处理系统组成. P_1, P_2 的偏振化方向相同, 且均与 x, y 轴正向成 $\pi/4$ 角, 如图 1 (b) 所示, 这样可使剪切量最大^[31].

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 40537031), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA12Z152), 国防基础科学研究基金 (批准号: A1420080187), 国家自然科学基金 (批准号: 40875013, 40375010, 60278019), 陕西省科技攻关项目 (批准号: 2001K06-G12, 2005K04-G18) 资助的课题.

[†] E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

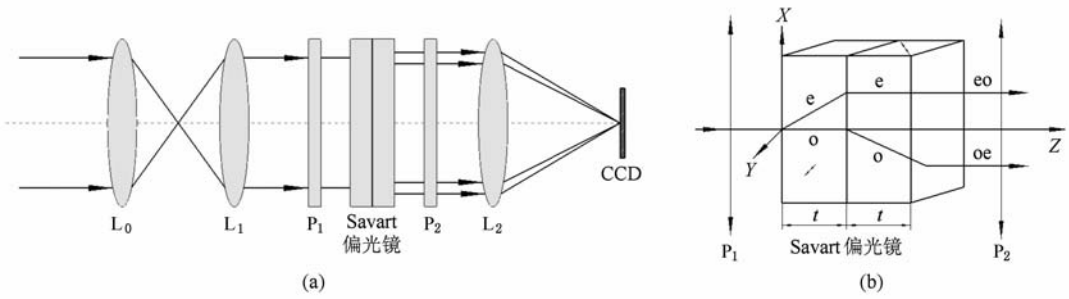


图 1 SPIIS 系统图 (a) 总图; (b) Savart 偏光镜及偏振器部件

SPIIS 的核心部件是 Savart 偏光镜,其原理如图 1(b) 所示. 它是由两块厚度相等的单轴负晶体(方解石)粘接而成的. 参照图 1 和图 2 所示,该成像光谱仪的成像原理是,目标光源经过前置光学系统 L_0, L_1 射入起偏器 P_1 , 变为沿 P_1 偏振化方向偏振的线偏振光;经 P_1 后的出射光经过 Savart 偏光镜左板,分成寻常光(o 光),非常光(e 光)两束折射光, o 光电矢量振动方向垂直于左板主截面, e 光电矢量振动方向在左板主截面内, 折射 o 光经过半波片后出射光为椭圆 e 光,其电矢量长轴振动方向与折射 e 光相同, 折射 e 光经过半波片后出射光为椭圆 o 光,其电矢量长轴振动方向与折射 o 光相同. 两束光通过偏光镜右板,共得到四束折射光(oo 光, oe 光, eo 光和 ee 光,图中只画出能量较集中的 oe 光和 eo 光),这四束折射光通过检偏器 P_2 后,变为沿 P_2 偏振化方向偏振的线偏振光,经过成像镜 L_2 ,干涉图成像于面阵探测器 CCD 上,最后经过数据图像处理系统,便得到了所需目标的空间信息和光谱信息^[31-35].

3. 面阵 CCD 图像传感器工作原理与噪声来源

CCD 是进行光电转换的半导体器件,它由一个个的像素(pixel)组成,当光子落到每个像素上后,光信号就转化成为电子信号. 通过驱动脉冲的控制,可以使入射光子在成像区和存储区之间不停的进行光电转换,如图 2 所示^[36],这样的光电转换是由移位寄存器控制完成的,而移位寄存器则由时序驱动电路来控制. CCD 以时间积分方式工作,光积分时间可以在很宽的范围内进行调节. CCD 的水平像素和垂直像素决定了成像光谱的光谱分辨率和空间分辨率,因此,为了使成像光谱仪达到高分辨

率的要求,必须首先保证 CCD 的像素达到最低的分辨率要求.

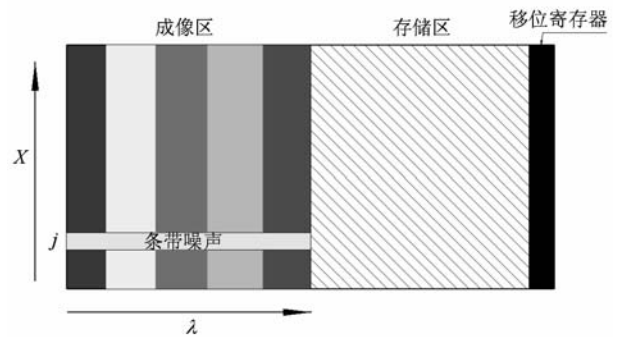


图 2 CCD 面阵探测器简图

CCD 作为图像传感器得到广泛应用于成像光谱仪的原因在于,它具有动态范围大,量子效率高,电荷转移效率高,光谱响应范围宽,几何稳定性好等优点. 但 CCD 也并非十全十美,在电荷转移发生时, CCD 芯片成像区还在不断的接收光子,由此保证电荷源源不断的产生并被转移. 通过成像光谱仪系统入射 CCD 的光子的随机性会产生光子噪声,它对应于光子到达探测器时统计意义上的变化量,它由光子本身的性质所决定^[37]. 虽然当今的 CCD 量子效率(QE)在某些谱段上几乎能到达 100%,但芯片上有限数量的放大器必须工作在极高的速度,才能保证图像的稳定输出,因此会带来读出噪声^[38]. 这种噪声在弱光探测的条件下,会更明显的影响成像光谱仪的成像质量. 另外,当入射到 CCD 芯片上的干涉图在成像区时,经过光电效应形成的电荷包会以极高的速度转移到存储区,由此可能给干涉图带来条带噪声(smear noise, 图 2).

除了上面提到的光谱在 CCD 上成像后引起的噪声外,CCD 进行光电转换过程中还会存在着各种噪声. 比较主要的有暗电流噪声、复位噪声、散粒噪

声、固定图像噪声 (fixed-pattern noise, FPN). 暗电流噪声^[39]是在 CCD 不接收任何外来信号 (光信号或电信号) 的情况下输出的噪声. 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, 并与光积分时间成正比. 降低暗电流一般采用制冷方法, 因此, 许多 CCD 在工作时都有内置或外接的制冷设备. 复位噪声^[40]是 CCD 输出电路复位过程中产生的热噪声即 KTC 噪声, 表现为同一像素周期内近似为常数, 它是由电路结构和电路工作方式引入的. 抑制复位噪声主要是采用信号处理电路, 如相关双采样 (CDS) 电路进行处理. FPN 噪声^[41]则是由于制造 CCD 传感器时存在各像素的几何不均匀性, 并伴随着暗电流的变化而产生的, 它也是随着温度的升高而增大, 在暗环境下可以测量到. FPN 噪声一般采用平场^[42] (field flat) 技术来消除.

以上噪声都会影响到整个偏振干涉成像光谱仪的信噪比, 由于单个 CCD 的噪声分析已有多方面的研究^[39-42], 下面着重探讨自主研发的新型偏振干涉成像光谱仪的噪声, 其中也包括了受光谱仪系统影响的 CCD 噪声, 并作出分析与评价.

4. 新型偏振干涉成像光谱仪的噪声分析

4.1. 光子噪声

成像光谱仪的噪声除了受成像器件 CCD 噪声的影响外, 还受成像光谱仪系统噪声的影响, 主要是由于光谱信号激发而产生的噪声, 下面主要分析与光谱仪成像有关而产生的噪声.

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^[43], 即

$$N_{\text{photon}}(\Phi) = \left[\Phi(\lambda) \eta \tau + \frac{i_{\text{dark}}}{e} \tau \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 Φ 是偏振干涉成像光谱仪到达 CCD 的光通量, η 是 CCD 的量子效率, τ 是积分时间, i_{dark} 是暗电流, e 是基本电荷. 当入射光子引起的噪声 (如散粒噪声) 远大于暗电流噪声时, (1) 式中的暗电流项可以忽略.

由 (1) 式可以看出, 光子噪声除受积分时间影响外, 主要受到光通量影响. 对于新型偏振干涉成像光谱仪, 由于干涉成像光谱仪原理, 其光通量为^[44]

$$\Phi(\lambda) = T(\lambda) B(\lambda) \Omega A, \quad (2)$$

式中 $B(\lambda)$ 为入射光源的光谱强度, $T(\lambda)$ 为光谱

仪系统的透过率, Ω 为光源对孔径中心所张的立体角, A 为系统孔径, 且 $A\Omega \leq 1$.

在实际设计中, 立体角要受到光谱分辨率 R 的限制, 其中 $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{v}{\Delta v}$, $\Delta\lambda$ 为入射光谱线宽, v 为波数, $\Delta v = (\Delta\lambda)^{-1}$, 并满足

$$R\Omega = 2\pi, \quad (3)$$

则由 (2) 式和 (3) 式, 有

$$\Phi(\lambda) = \frac{T(\lambda) B(\lambda) 2\pi A}{R} = \frac{I(\lambda) 2\pi A}{R}, \quad (4)$$

上式中 $I(\lambda) = T(\lambda) B(\lambda)$ 为入射光经过光谱仪后所得到的光强.

设图 1(b) 中 P_1 的偏振化方向与理想方向 (X, Y 轴正向夹角平分线方向) 成 θ 角, P_2 的偏振化方向与理想方向成 ϕ 角, 见图 3, 通过新型偏振干涉成像光谱仪系统后, CCD 接收到的光通量为^[45]

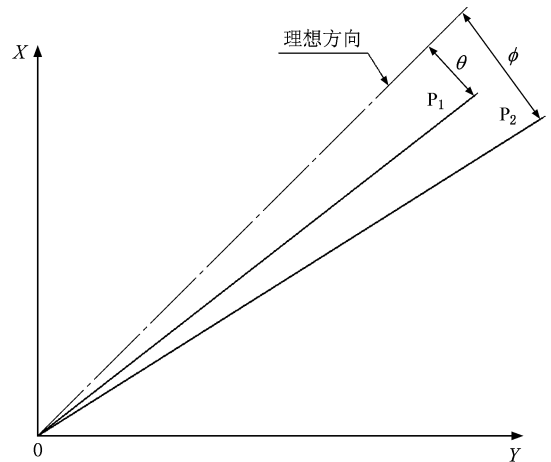


图 3 偏振化方向偏离理想方向

$$\begin{aligned} \Phi(\lambda) &= \frac{I(\lambda) 2\pi A}{R} \\ &= I_0 \left\{ T_1 \left[\cos^2(\phi - \theta) - \frac{1}{2} \cos 2\theta \cos 2\phi \right] \right. \\ &\quad + T_2 \left[\cos^2(\phi + \theta) - \frac{1}{2} \cos 2\theta \cos 2\phi \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} \cos 2\theta \left[(T_1^2 + T_2^2) \cos^2 2\phi \right. \\ &\quad \left. + 4T_1 T_2 \left(1 - \frac{1}{2} \cos^2 2\phi \right)^{1/2} \right. \\ &\quad \left. \times \cos \left[\frac{2\pi t (n_0^2 - n_c^2) \sin i_0}{\lambda (n_0^2 + n_c^2)} \right] \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

式中 $I_0 = \frac{\pi A I_{00}}{R} = 0.5 I_{00} A \Omega$, I_{00} 为探测信号的强度. T_1, T_2 为偏振器 P_1 和 P_2 主透射比的最大值和最小值, t 为单个 Savart 偏光镜的厚度, n_o, n_e 分别为 Savart 偏光镜中寻常光和非常光的折射率, i_0 为光谱仪视场角(入射角). 将(5)式代入(1)式即可得到光谱仪系统光子噪声大小.

4.2. 偏振噪声

我们可以用 4 个 Stokes 参数 I, Q, U, V 来描述一束光的偏振态, I 表示总的光强, Q 表示沿 X 轴方向线偏振光分量, U 表示 45° 方向线偏振光分量, V 表示右旋圆偏振光分量, 它们都是光强度的量纲.

所研究的新型偏振干涉成像光谱仪, P_1 的偏振化方向与理想方向(X, Y 轴正向夹角平分线方向)成 θ 角, 根据图 4 所示, 其出射线偏振光强度可表示为^[46]

$$I' = \frac{1}{2} \left\{ I + Q \cos \left[4 \times \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right) \right] + U \sin \left[4 \times \left(\frac{\pi}{4} - \theta \right) \right] \right\}, \quad (6)$$

而在偏振片与理想情况无偏角的情况下, 即 $\theta = \pi/4$ 时, 有

$$I'_0 = \frac{1}{2} (I - Q), \quad (7)$$

它们之间的差为

$$I_p = I' - I'_0 = \frac{1}{2} \left\{ Q [1 + \cos(\pi - 4\theta)] + U \sin(\pi - 4\theta) \right\}, \quad (8)$$

等效光子噪声则为

$$N_p = \frac{\pi A}{R} \eta \tau \left\{ Q [1 + \cos(\pi - 4\theta)] + U \sin(\pi - 4\theta) \right\}. \quad (9)$$

4.3. 光谱图噪声

前述噪声可以认为是光通过新型偏振干涉成像光谱仪光学系统时产生的, 然而, 在形成图像后, 总有一些噪声是无法预测的, 由此还需从光谱图上来分析噪声, 主要有条带噪声和随机点噪声.

条带噪声可以用 N_{smear} 表示, 并且有^[27]

$$N_{\text{smear}}(\Phi) = \frac{t_{\text{trans}}}{t_{\text{read}}} \left(\sum_{k=j+1}^n S_k + \sum_{k=1}^{j-1} S_k \right), \quad (10)$$

式中 t_{trans} 为 CCD 中电荷转移时间, t_{read} 为电荷读出

时间, j 为条带噪声出现的列数, k 为出现条带噪声前或后的行数, S_k 为第 k 行的光谱信号强度, 且有 $S_k = \left[\frac{\eta \tau}{n} \Phi(\lambda) \right]^{1/2}$, 其中 n 为 CCD 成像区 X 方向上的行数.

由于偏振干涉成像光谱具有高的空间分辨率和光谱分辨率, 并且探测物的连续性, 使成像光谱数据在空间和光谱维上具有很高程度的相关性. 如果再从图像上把这种相干信号提取后, 余下部分则为图像的随机噪声. 提取相关光谱图像留下噪声, 可以采用去相关方法^[47], 该方法采用多元线性回归来表示, 即有

$$\widehat{D}_{i,j,k} = a D_{i,j,k-1} + b D_{i,j,k+1} + c D_{p,k} + d, \quad (11)$$

式中 \widehat{D} 为图像灰度线性拟合值, D 为原始图像灰度值, a, b, c, d 为线性回归系数, i, j 分别为图像上行和列的坐标值, k 为波段序号, 且有

$$D_{p,k} = \begin{cases} D_{i-1,j,k}, & i > 1, \\ D_{i,j-1,k}, & i = 1, j > 1, \\ \text{无意义}, & i = 1, j = 1. \end{cases} \quad (12)$$

去相关后, 得到的残差图像为

$$R_{i,j,k} = D_{i,j,k} - \widehat{D}_{i,j,k}, \quad (13)$$

式中 R 为残差值. 因此, 得到图像噪声方差为

$$D_n^2 = \frac{S^2}{M - 4}. \quad (14)$$

其中, $S^2 = \sum_1^w \sum_1^h R_{i,j,k}^2$, $M = w \times h - 1$. w, h 分别为图像的宽和高.

另外, 灰度和光强之间具有关系 $D = C \lg(I_0)$, 即 $I_0 = 10^{\frac{D}{C}}$, 其中 C 为转换系数. 则等价光子噪声为

$$\begin{aligned} N_D^2 &= \frac{2\pi A I_D}{R} \eta \tau \\ &= \frac{2\pi A}{R} \eta \tau 10^{\frac{S^2}{C(M-4)}} \\ &= \frac{2\pi A}{R} \eta \tau 10^{\frac{S^2}{C(M-4)}}. \end{aligned} \quad (15)$$

4.4. 系统总噪声

对于 CCD 成像过程中器件本身产生的噪声, 诸多文献均有报道, 此处不再详述. 但在新型偏振干

涉成像光谱仪成像过程中,这部分噪声同样存在.如暗电流噪声用 N_{dark} 表示,读出噪声用 N_{read} 表示,复位噪声用 N_{reset} 表示,FPN 噪声用 N_{FPN} 表示,基于噪声源的独立无关性,则新型偏振成像光谱仪总的噪声为以上噪声的均方根值,表示为

$$N_{\text{SPIIS}} = [N_{\text{photon}}^2(\Phi) + N_{\text{p}}^2 + N_{\text{smear}}^2(\Phi) + N_{\text{D}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{read}}^2 + N_{\text{reset}}^2 + N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{FPN}}^2]^{1/2}, \quad (16)$$

将(1),(5),(9),(10)式和(15)式代入(16)式,即可求出 N_{SPIIS} 的大小.

在此全面分析新型偏振干涉成像光谱仪的原因是为了更准确的求出信噪比,虽然关于信噪比的计算已有文献记载^[15],但其中并没有对噪声特别光子噪声和偏振噪声进行深入分析,本文正是在这一研究基础上,力求更全面的给出自主研发的新型偏振干涉成像光谱仪的噪声,为研究更高信噪比、高灵敏度的成像光谱仪奠定基础.

5. 新型偏振干涉成像光谱仪的噪声评价

由于光谱信号是光通量的函数,则由以上分析可知,偏振干涉成像光谱仪信噪比 $\text{SNR} \propto \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi^{1/2}(\lambda)} = \Phi^{1/2}(\lambda)$. 从该式可以看出,除去 CCD 传感器工作过程中带来的噪声外,影响 SPIIS 的主要噪声源是光子噪声,而光子噪声与入射 CCD 的光子数即系统通量有关,但这并不影响系统的信噪比变化的趋势.当系统具有大的通量时,系统信噪比也会提高.

下面就以加拿大 DALSA 公司的 1M60 CCD 相机(见表 1)为例,对 SPIIS 的噪声进行数值模拟,并在原有研究基础上给出信噪比的变化情况.

表 1 加拿大 DALSA 公司 CCD 相机参数

| | |
|--------------------------------|-------------|
| 分辨率像素/pixel | 1024 × 1024 |
| 像元尺寸/ μm | 12 × 12 |
| 量子效率(无量纲) | 0.65@589/nm |
| $t_{\text{trans}}/\mu\text{s}$ | 1.6 |
| $t_{\text{read}}/\text{ms}$ | 29.978 |
| i_{dark}/e | 0.4@-30℃/p |

对实验测得的干涉图(图 4(a)),波长 $\lambda = 589 \text{ nm}$, $t = 6 \text{ mm}$, $n_o = 1.65835$, $n_e = 1.48640$, $A\Omega = 1$, 在调制度 $V = 1$, $T_1 = 1$, $T_2 = 0$, 入射角 $i_0 = \pm 3^\circ$ 时,由(1),(5)和(9)式可计算得 $N(\Phi) \approx 32.5e^-$, $N_{\text{p}} = 0.42e^-$;根据其灰度计算的 $N_{\text{D}} \approx 8.3e^-$, $N_{\text{smear}} \approx 10.6e^-$,且根据 CCD 相机实际工作情况,同时有 $N_{\text{read}} = 5.6e^-$, $N_{\text{reset}} = 5.2e^-$, $N_{\text{FPN}} = 3.8e^-$.

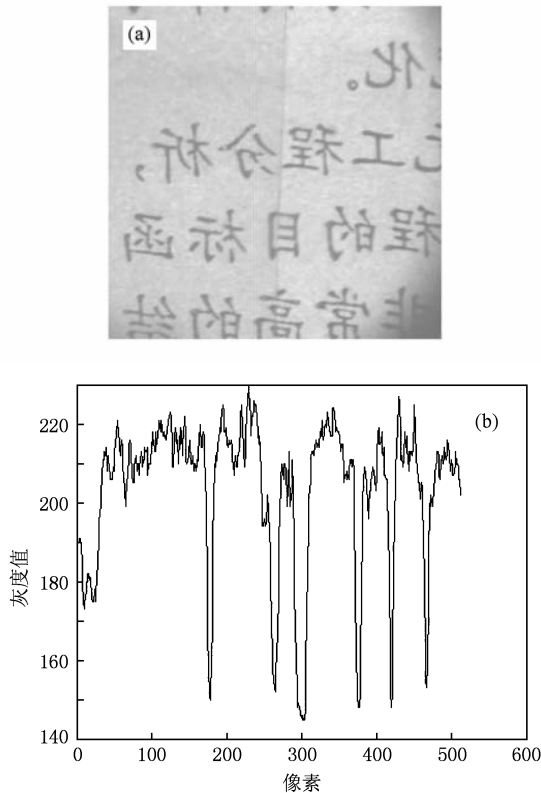


图 4 (a) 实验测得的干涉图;(b) 灰度值曲线图

在使用偏振干涉成像光谱仪时,尽可能要求它具有高的调制度.偏振干涉成像光谱仪的调制度为^[8]

$$V = \left| \frac{\cos 2\theta \cos 2\phi}{1 + \sin 2\theta \sin 2\phi} \right| \quad (17)$$

由此,经过前述的噪声分析与计算后,在调制度最大值 $V = 1$ 和 $V = 0.6$ 时,经过数值模拟,得到新型偏振干涉成像光谱仪的信噪比随 θ, ϕ 的变化情况,见图 5.

从图中可以看出,当光谱仪具有高的调制度时,其信噪比也较大.并且在调制度为最大值 1 时,信噪比也在此时获得最大值.但是,在相同的辐射通量情况下,由于系统总噪声 N_{SPIIS} 的作用,限制了信噪比能达到的最大值.图 5 比文献^[15]中对应的

信噪比有着不小的降低,这是因为考虑的噪声量更全面、更接近于实际情况的缘故. 如想获得更高的信噪比,可采取优化系统设计,采用低噪声图像传感器及提高图像处理水平等方法实现.

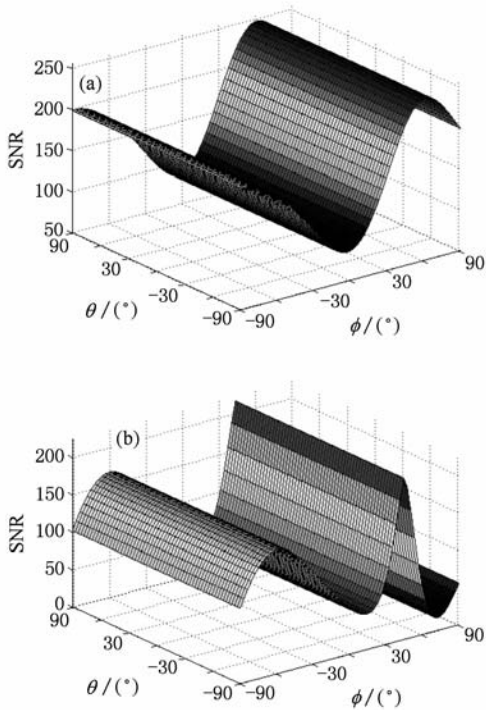


图5 新型偏振干涉成像光谱仪信噪比随偏振器偏振化偏角 θ 和 ϕ 变化图 (a) $V=1$; (b) $V=0.6$

6. 结 论

本文对自行研制的新型偏振干涉成像光谱仪的噪声水平进行了研究,在原有通量及信噪比研究基础上,提出了全面考虑 CCD 图像传感器噪声、成像光谱仪系统噪声及光谱图像噪声对成像光谱仪噪声水平的影响,并得出以下几点结论:

1. 给出了新型偏振干涉成像光谱仪的总噪声表达式,除考虑 CCD 对成像光谱仪噪声的影响外,还着重分析了与成像光谱仪系统相关的光子噪声对该光谱仪的影响,并针对偏振成像光谱仪首次计算了偏振噪声,这为信噪比的精确分析和计算提供了新的理论支持.

2. 虽然随着光通量的增大,系统总噪声会增大,但信噪比也会增大,并不会影响新型偏振干涉成像光谱仪的高信噪比特征,体现了新型偏振干涉成像光谱仪高通量、高分辨率、高信噪比的优势.

3. 虽然光子噪声对光谱仪的影响很大,但它限制了光谱仪噪声能达到的最低水平. 因此,要提高光谱仪的信噪比,应该着重于减少 CCD 器件及环境噪声对光谱成像的影响.

感谢研究生刘宁对本论文做的文字校正工作.

- [1] Justice, C O, Vermote, E, Townshenel J R G, Defries R, Roy D P, Hall D K 1998 *Geoscience and Remote Sensing* **36** 1228
- [2] Rast M, Bezy J L 1999 *Inter. J. Remote Sens.* **20** 1681
- [3] Cutter, Mike A, Johns, Lisa S, Lobb, Dan R, Williams T L, Settle J J 2004 *Imaging Spec. IX., Proc. SPIE* **5159** 392
- [4] Zhang C M, He J 2006 *Optics Express* **14** 12561
- [5] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2006 *OPTIK* **117** 265
- [6] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2000 *Proc. SPIE* **4087** 957
- [7] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C, Yuan X J 2002 *Opt. Commun* **203** 21
- [8] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [9] Zhang C M, Xiangli B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **6** 815
- [10] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [11] Zhang C M, Zhao B C, Yuan Yan, He J 2006 *Proc. SPIE* **6032** T320
- [12] Zhang C M, Zhao B C, Xiangli B, Li Y C, Peng Z H 2006 *Proc. SPIE* **6150** 15001
- [13] Wu L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Opt. Commun.* **273** 67
- [14] Zhan C M, Jian X H 2010 *Opt. Lett.* **35** 366
- [15] Zhang C M, Yuan Z L, Sun M Z, Wu J F, Gao P 2010 *Appl. Opt.* **49** 281
- [16] Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Ye J Y 2007 *Proc. SPIE* **6279** D2791
- [17] Zhang C M, Zhao B C, Yuan Z L, Huang W J 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 085401
- [18] Ren W Y, Zhang C M, Mu T K 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 084209
- [19] Zhang C M, Sun M Z, Yuan Z L, Song X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1758 (in Chinese) [张淳民、孙明昭、袁志林、宋晓平 2009 物理学报 **58** 1758]
- [20] Zhang C M, Yan X G, Zhao B C 2008 *Opt. Commun.* **281** 2050
- [21] Zhang C M, Liu N, Wu F Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 949 (in Chinese) [张淳民、刘宁、吴福全 2010 物理学报 **59** 949]
- [22] Zhang C M, Zhu L Y, Zhao B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 989 (in Chinese) [张淳民、朱兰艳、赵葆常 2010 物理学报 **59** 989]

- [23] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C, Zhu B H 2008 *Opt. Commun.* **281** 2424
- [24] Jian X H, Zhang C M, Zhu B H, Zhao B C, Du J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7565 (in Chinese) [简小华、张淳民、祝宝辉 2008 物理学报 **57** 7565]
- [25] Du J, Zhang C M, Zhao B C, Sun Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6311 (in Chinese) [杜娟、张淳民、赵葆常、孙尧 2008 物理学报 **57** 6311]
- [26] Wu H Y, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3499 (in Chinese) [吴海英、张淳民、赵葆常 2008 物理学报 **57** 3499]
- [27] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3877 (in Chinese) [穆廷魁、张淳民、赵葆常 2009 物理学报 **58** 3877]
- [28] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Appl. Opt.* **48** 2333
- [29] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Opt. Commun.* **282** 1984
- [30] Mu T K, Zhang C M, Zhao B C 2009 *Opt. Commun.* **282** 1699
- [31] Rafert J B, Sellar R G, Blatt J H 1995 *Appl. Opt.* **34** 7228
- [32] Li Y Z, Shi Q F, Wang Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1119 (in Chinese) [李运周、史庆藩、王琪 2006 物理学报 **55** 1119]
- [33] Li Z J, Xiong Y S, Liu Z L, Yao K L 1997 *Chin. Phys.* **6** 731
- [34] Xiao J B, Sun X H 2006 *Chin. Phys.* **15** 1824
- [35] Wang Y H, Guo L X, Wu Q 2006 *Chin. Phys.* **15** 1754
- [36] Jens N, Michael S, Andreas N 1999 *Appl. Opt.* **38** 5191
- [37] Wang S H, Hu M F, Chen Z P 2007 *Semi. Opto.* **28** 731 (in Chinese) [王书宏、胡谋法、陈曾平 2007 半导体光电 **28** 731]
- [38] Hilda F, James M 2006 *IEEE Transactions on Image Processing* **15** 2676
- [39] Ma J T, Li Y J, Hao X J 2001 *J. of North China Inst. of Tech.* **22** 83 (in Chinese) [马俊婷、李仰军、郝晓剑 2001 华北工学院学报 **22** 83]
- [40] Tong S F, Ruan J, Hao Z H 2000 *Opt. Prec. Eng.* **8** 140 (in Chinese) [佟首峰、阮锦、郝志航 2000 光学精密工程 **8** 140]
- [41] Irie K, Mckinnon A E, Unsworth K, Woodhead I M 2008 *Meas. Sci. Technol.* **19** 045207
- [42] Janesick J R 2001 *Scientific Charge-Coupled Devices.* (Bellingham, WA; SPIE)
- [43] Kostowski H J 1997 *Reliable Spectroradiometry* p276
- [44] Junttila M L, Kauppinen J, Ikonen E 1991 *J. Opt. Soc. Am. A* **8** 1457
- [45] Zhang C M, Ren W Y, Ting K M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 024202
- [46] Masiero J, Hodapp K, Harrington D, Lin H 2007 *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **119** 1126
- [47] Eklum L R 1995 *Int. Remote Sensing* **15** 2955

Analysis and evaluation on the noise of novel polarization interference imaging spectrometer*

Zhang Chun-Min[†] Huang Wei-Jian Zhao Bao-Chang

(School of Science, Xi'an Jiaotong University, Non-equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering Laboratory, Xi'an 710049, China)

(Received 15 May 2009; revised manuscript received 13 November 2009)

Abstract

The principle of home-designed novel polarization interference imaging spectrometer is discussed. The noise of novel polarization interference imaging spectrometer is analyzed, and the expression of total noise related to system throughput is deduced. The noise induced by imaging spectrometer system and CCD image sensor is extracted from spectrometer image. The signal-to-noise ratio of novel polarization interference imaging spectrometer based on such noise analyses is discussed, which proves that though luminous throughput of imaging spectrometer system has a crucial effect on the total noise, it does not affect the trend of variation in signal-to-noise ratio. A new practical guidance is thereby provided for the accurate calculation of the signal-to-noise ratio of imaging interference and the application of denoising method effectively.

Keywords: polarization interference imaging spectrometer, CCD image sensor, noises, signal-to-noise ratio

PACC: 4230, 0760, 4280Q, 7270

* Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z152), the National Defense Basic Scientific Research Progro of China (Grant No. A1420080187), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40875013, 40375010, 60278019), the Science and Technology Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2001K06-G12, 2005K04-G18).

[†] E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn