

基于微透镜阵列偏振探测器的噪声性能研究

于 洵¹, 朱 磊¹, 姜 旭², 武继安², 李建强³

(1. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;
3. 中国兵器豫西工业集团公司, 河南 南阳 473000)

摘 要: 偏振探测技术已经成为一种重要的探测手段, 其机理研究对可见及近红外偏振探测的实际应用和结果分析具有重要的理论指导意义。随着微透镜阵列技术飞速的发展, 微透镜阵列偏振探测器成为了新型的探测器。很多文献对微透镜阵列偏振探测器的研究仅限设计及光学性能分析方面, 但并没有给偏振度等效噪声评价的精确理论公式。针对微透镜阵列偏振探测器模型分析了探测器尺寸、偏振片消光比、入射光源的偏振和像素间串扰等因素, 给出了偏振度等效噪声的精确理论公式, 并用计算机进行了模拟分析。该研究对微透镜阵列偏振探测器性能提高具有重要的指导意义。

关键词: 偏振度; 噪声; 微偏振阵列; 焦平面阵列

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0189-07

Noise performance of polarization detection technology based on micro-polarizer array focal plane

Yu Xun¹, Zhu Lei¹, Jiang Xu², Wu Ji'an², Li Jianqiang³

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China; 2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 3. Yuxi Industries Group Co. Ltd., Nanyang 473000, China)

Abstract: Polarization detecting technology has become an important means of detection, the research on its detecting mechanism has important theoretical significance and practical value, it will guide the practical application and results analysis of visible and near-infrared polarization detection. With the rapid development of micro-lens array technology, micro-polarizer array focal plane has become a new type of detector. A lot of literature on the study of the micro-lens array technology, micro-polarizer array focal plane is only involved in design and the optical performance analysis, but the exact theoretical formula for the noise equivalent degree of linear polarization (NeDoLP) was not given. The factors, such as focal plane array size, polarizer extinction ratio (ER), pixel crosstalk, and processing algorithms were analyzed aiming to micro-polarizer array focal plane. The accurate theoretical expression of the noise equivalent degree of linear polarization was given, and simulation analysis was completed with computer. The study has important guiding for improving the performance of the micro-polarizer array focal plane.

Key words: degree of polarization; noise; micro-polarizer array; focal plane array

收稿日期: 2015-10-08; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2015DFA10360); 国防科工局“十二五”技术基础项目(JSJL2014208B013)

作者简介: 于洵(1964-), 男, 教授, 主要从事光电测试技术和光电信息系统与技术的研究与教学。Email: 64906086@qq.com

通讯作者: 朱磊(1990-), 男, 硕士生, 主要从事红外偏振成像及光谱成像相关技术方面的研究。Email: zhulei19900207@vip.qq.com

0 引言

早期偏振探测只是应用于行星表面土壤、大气探测和恒星、行星以及星云状态等的探测,随着偏振信息在光谱波段的细分,随之出现的红外偏振以及多波段偏振等为偏振信息的利用提供了更广阔的空间。近年来,随着二元光学和微小光学的发展,国内外形成微透镜研制热潮,并将微透镜阵列技术与偏振探测技术相结合,应用广泛^[1]。很多文献对微透镜阵列偏振探测器的研究仅限设计及光学性能分析方面,但并没有给出微透镜阵列偏振探测器的偏振度等效噪声评价的精确理论公式。文中针对微透镜阵列偏振探测器模型分析了探测器尺寸、偏振片消光比、信号电流与暗电点的比值、入射光源的偏振和像素间串扰等因素,给出了偏振度等效噪声的精确理论公式,并用计算机进行了模拟分析。该研究的数据与结论对微透镜阵列偏振探测器性能提高具有重要的指导意义。

1 偏振度探测原理

通常,在计算机视觉中,人们所关心的信息是轻度、形状以及颜色,而强度为偏振信息的线性组合,它仅是更完备的偏振的一个子集,所包含的信息量有限。光的偏振特征指的是光的偏振态,对于完全偏振光,可以用琼斯(Jones)向量来表示;对于部分偏振光可以用斯托克斯(Stokes)向量来表示^[2]。物质的偏振特征是指光束被物质透射或者反射时偏振态的改变,常用 Jones 向量、Stokes 向量或 Muller(穆勒)矩阵来表示^[3-4]。Stokes 向量是 G.G.Stokes 在 1852 年研究偏振光时提出的,由于它既可以用来表示完全偏振光,也可以表示部分偏振光乃至自然光,加之 Stokes 向量携带有丰富的信息,因此成像偏振探测多用 Stokes 参数来描述^[5-6]。

基于调制法的成像偏振探测系统原理如图 1 所示^[7]。

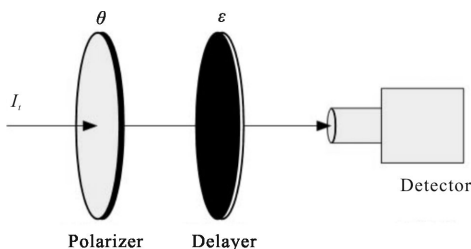


图 1 调制法偏振探测原理图

Fig.1 Polarization detection based on modulation method

假设未经分析的部分偏振光强度为 I_t , 平均频率为 ν , 沿 z 轴方向传播, 将其电场 E 在 x, y 方向上分解为两个正交的平面波 $E_x(t), E_y(t)$, 则 $E_x(t), E_y(t)$ 可以表示为^[5]:

$$E_x(t) = a_x(t) e^{i[\phi_x(t) - \omega t]} \quad (1)$$

$$E_y(t) = a_y(t) e^{i[\phi_y(t) - \omega t]} \quad (2)$$

式中: $a_x(t), a_y(t)$ 分别为 x 方向和 y 方向上的电场分量的幅值; $\phi_x(t), \phi_y(t)$ 分别为 x 方向和 y 方向上电场分量的相位。

$E_x(t)$ 和 $E_y(t)$ 首先经过角度为 ϕ 的延迟器, 然后经过角度为 θ 的起偏器。出射光的电场分量为(以 x 轴为参考方向)

$$E(t; \theta, \phi) = E_x \cos \theta + E_y e_{i\phi} \sin \phi \quad (3)$$

利用 Stokes 矩阵表示出射光强

$$J = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle E_x E_x^* \rangle & \langle E_x E_y^* \rangle \\ \langle E_y E_x^* \rangle & \langle E_y E_y^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle a_1^2 \rangle & \langle a_1 a_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)} \rangle \\ \langle a_1 a_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)} \rangle & \langle a_2^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

从公式(3)~(4)可以看出, 可以用 4 个参数来描述光波, 如 J_{xx}, J_{yy} 和 J_{xy} (或 J_{yx}) 的实部和虚部。Stokes 提出了不同的 4 个参量来描述光波的偏振特性, 根据 Stokes 参数的具体定义并结合公式(4), 有如下 Stokes 参数表达式:

$$S_0 = I = \langle a_1^2 \rangle + \langle a_2^2 \rangle = J_{xx} + J_{yy} = (I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ))$$

$$S_1 = Q = \langle a_1^2 \rangle - \langle a_2^2 \rangle = J_{xx} - J_{yy} = (I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ))$$

$$S_2 = U = 2 \langle a_1 a_2 \cos \delta \rangle = J_{xy} + J_{yx} = (I(45^\circ, 0^\circ) + I(135^\circ, 0^\circ))$$

$$S_3 = V = 2 \langle a_1 a_2 \sin \delta \rangle = i(J_{yx} - J_{xy}) =$$

$$\left(I \left(45^\circ, \frac{2}{\pi} \right) - I \left(135^\circ, \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (5)$$

其中, $\delta = \phi_1 - \phi_2$ 。

部分偏振光可以分解为相互独立的未偏振光和完全偏振光, 而部分偏振光的 Stokes 参数可以用相互独立的未偏振光和完全偏振光的各自 Stokes 参数的累加和来表示, 即部分偏振光的 Stokes 向量表示为

$$S = S^{(1)} + S^{(2)} \quad (6)$$

式中: $S^{(1)}$ 为未偏振光的 Stokes 向量; $S^{(2)}$ 为完全偏振光 Stokes 向量。

绝大多数的圆偏振分量在仪器检测的范围可以忽略, 故在多数成像偏振探测中取 $S_3 = 0$ 。而对于线偏

振光, 通过下列公式可以将 Stokes 向量转换为线偏振度、偏振相位角等参量^[8]。线偏振度、偏振相角的具体定义公式如下。

偏振度为:

$$DoP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (7)$$

线偏振度为:

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (8)$$

圆偏振度为:

$$DoCP = \frac{|S_3|}{S_0} \quad (9)$$

偏振相角为:

$$\phi = \text{Orient} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (10)$$

2 基于阵列微镜焦平面偏振度探测器设计

文中以阵列单元 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 、周期 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ 焦平面阵列与相同周期微透镜阵列集成。图 2(a)为焦平面阵列与圆形孔径球面微透镜阵列布局结构图, 焦平面光敏单元以线性阵列的方式排布, 为了实现微透镜单元与光敏单元的一一对应, 只能采用相同排布的圆形孔径微透镜阵列与其集成。图 2(b)为对布局结构进行剖切的集成应用原理图。从图中可以看出, 微透镜阵列置于焦平面阵列的前端, 由于微透镜对光能的折射作用, 使本应照射到光敏单元间沟槽内的光线会聚于光敏面上, 从而提高光能利用率。

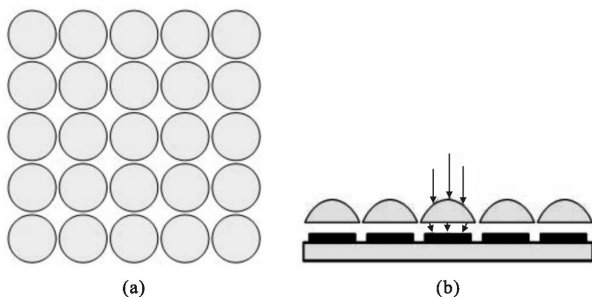


图 2 圆形微透镜阵列示意图

Fig.2 Circular aperture array-micro lens

为了进一步提高光能利用率, 采用矩形孔径球面微透镜阵列, 如图 3 所示。其中图 3(a)为焦平面阵列与矩形球面微透镜阵列布局结构图, 图 3(b)为集

成应用的剖面原理图。采用变剂量曝光和离子刻蚀方法制作的矩形孔径球面微透镜阵列^[9], 透镜单元间隙可做到 $1 \mu\text{m}$ 以下, 通过计算其理论填充系数达到 86% 以上。对比圆形孔径球面微透镜阵列填充系数 78.5%, 光能利用率提高了 7.5%。因此, 矩形球面微透镜阵列对光能的利用效果远远高于圆形孔径球面微透镜阵列。故文中采取矩形球面微透镜阵列制成焦平面偏振度探测器。图 4 为矩形球面微透镜阵列偏振探测器电子显微镜图片。

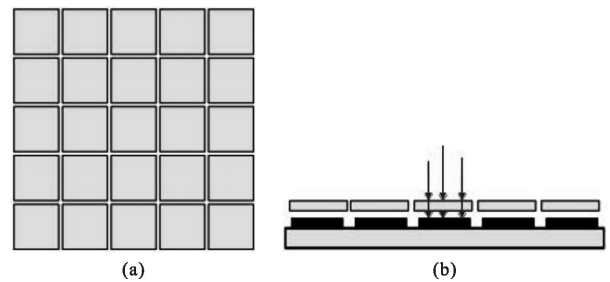


图 3 矩形微透镜阵列示意图

Fig.3 Rectangular aperture array-micro lens

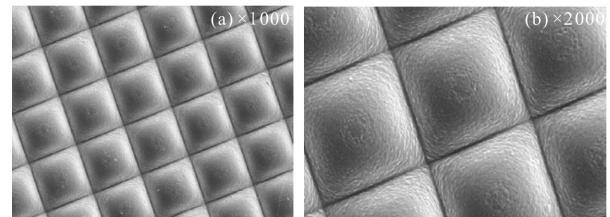


图 4 矩形微透镜电子显微镜图像

Fig.4 Image of rectangle spherical microlenses photographed by EC

区别于传统的通过机械旋转或者电子调节附加与焦平面的偏振片进行起偏, 随着 MOEMS (Micro-Optical Electro Mechanical Systems) 技术的快速发展, 通过将微偏振片、感光单元、处理单元加工到同一基片上, 制成偏振焦平面, 无需运动器件, 可以有效地应用于各种载台。偏振焦平面中各种角度微偏振片的分布不同, 相应的焦平面也有一定差异。借鉴于数字微镜及数字编码孔径形式, 将不同角度的偏振滤波片微加工到焦平面上, 对两个像素的近邻采用空间分布进行采样, 其对每个像素的偏振信息进行处理, 制成焦平面偏振成像传感器, 可以有效地提高偏振信号的探测能力^[10]。

偏振滤波片是微透镜阵列基本的构成模块, 需要具有较好的消光系数。偏振滤波片类型众多, 有聚

合体偏振片、晶体偏振片及毫微金属丝偏振片等。文中方法是结合聚合偏振滤波器和 CCD 主动像元传感器,来计算焦平面上的偏振信息。图 5 给出了该探测器的焦平面偏振阵列的编码方式,其中不同的角度的偏振以类似于 RGB Bayer 模式进行排列。偏振片阵列放置在光子检测器阵列前端,每个像素的偏振片都有不同的偏振轴,4 个不连续的轴安放在 1 个单元内。

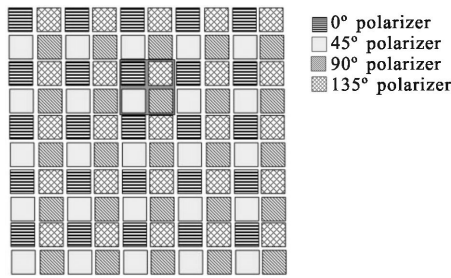


图 5 偏振焦平面编码原理

Fig.5 Encoding principle of focal plane array

在图 5 中,以 2×2 像素邻域作为 1 个单元来处理。在该邻域中,1 个像素记录 0° 方向的强度值 $I(\theta^\circ, 0)$,另一像素记录 45° 方向的强度值 $I(45^\circ, 0)$,而另外的两个像素则是记录无偏振滤波的总强度值 $I(t)$ 。根据基本的光学偏振描述原理,给出了利用 $I(t)$ 、 $I(\theta^\circ, 0)$ 和 $I(45^\circ, 0)$ 来计算 Stokes 参数公式:

$$S_0 = I(t) \quad (11)$$

$$S_1 = I(0^\circ) - I(90^\circ) \quad (12)$$

$$S_2 = I(45^\circ) - I(135^\circ) \quad (13)$$

根据偏振度 DoLP' 和偏振方位角 Orient' 与 S_0 、 S_1 、 S_2 之间关系,如公式(11)~(13)所示,得出偏振度图像及偏振方位角图像。

3 微透镜阵列偏振度探测器线偏振度等效噪声分析

3.1 微透镜阵列偏振度探测器线偏振度等效噪声数学模型推导

为了用模型来描述微透镜阵列性能,首先建立一个广义的探测器偏振响应模型。该模型将探测器作为光子计数装置,光子被转换为电子,并积累在电路中。文中提出了 NeDoLP 模型,该模型考虑了探测器尺寸、偏振片消光比、信号电流与背景电流的比例和入射的辐射的偏振等因素(线偏振度等效噪声

(NeDoLP)的定义是:在视场中对均匀偏振场景进行探测时,得到线偏振度(DoLP)的绝对偏差。这个性能指标类似于噪声等效温差和辐射等效噪声)。

利用 Stokes 向量,给出了通过线偏振器所接收到辐射响应,其探测光强度 L 表达式如下:

$$L(\theta) = \frac{1}{2} [S_0 \cdot (q+r) + S_1 \cdot (q-r) \cdot \cos 2\theta + S_2 \cdot (q-r) \cdot \sin 2\theta] \quad (14)$$

式中: θ 为偏振片的通轴和系统的水平基准轴之间夹角; q 和 r 分别为偏振器通轴与断轴的透射率。

其探测器积分响应 n 的表达式如下:

$$n(\theta) = \tau \left\{ \frac{1}{2} \vartheta [(q+r) + (q-r) \text{DoLP} \cos(2\theta - 2\phi)] + I_{bg} \right\} \quad (15)$$

式中: τ 为探测器积分时间; I_{bg} 为探测器暗电流。 ϑ 为探测器响应如下式:

$$\vartheta = \frac{Q_e A \Omega}{h\nu} \quad (16)$$

式中: Q_e 为探测器量子效率; A 为探测器接收面积; Ω 为单位立体角; h 为普朗克常数; ν 为辐射频率。

利用公式(15)表示非偏振光如下式:

$$n_{un} = \tau \left\{ \frac{1}{2} \vartheta (q+r) + I_{bg} \right\} \quad (17)$$

通常设置传感器积分时间使得探测器操作接近 $1/2$ 容量(N_w),以达到探测器的“最佳点”。将 N_w 带入公式(17)求解得到公式如下:

$$L = \left(\frac{N_w}{2\tau} - I_{bg} \right) \left(\frac{2}{\vartheta(q+r)} \right) \quad (18)$$

将公式(18)代入公式(15)得出下式:

$$n(\theta) = \left(\frac{N_w}{2} - \tau I_{bg} \right) \left[1 + \frac{(q-r)}{(q+r)} \text{DoLP} \cos(2\theta - 2\phi) \right] + \tau I_{bg} \quad (19)$$

为了方便计算,将公式(19)化简为:

$$n(\theta) = \beta \frac{N_w}{2} [1 + \varphi \text{DoLP} \cos(2\theta - 2\phi)] + \tau I_{bg} \quad (20)$$

式中: $\beta = \frac{N_w - \tau I_{bg}}{2}$; $\varphi = \frac{q-r}{q+r}$ 。

公式(20)中信号包含背景信号 I_{bg} ,针对于 Stokes 向量应用,需要剔除背景信号的影响,去除背景信号后,得到以下公式:

$$n_{\text{signal}}(\theta) = \beta \frac{N_w}{2} [1 + \varphi \text{DoLP} \cos(2\theta - 2\phi)] \quad (21)$$

由公式(21)得出 Stokes 参数 n_{signal} 为:

$$n_{S_0}'(\phi) = \frac{n_{\text{signal}}(0^\circ) + n_{\text{signal}}(45^\circ) + n_{\text{signal}}(90^\circ) + n_{\text{signal}}(135^\circ)}{2} =$$

$$\beta N_w$$

$$n_{s1}'(\phi) = n_{\text{signal}}(0^\circ) - n_{\text{signal}}(90^\circ) = \beta N_w \zeta \text{DoLP} \cos(2\phi)$$

$$n_{s2}'(\phi) = n_{\text{signal}}(45^\circ) - n_{\text{signal}}(135^\circ) = \beta N_w \vartheta \text{DoLP} \cos(2\phi) \quad (22)$$

将公式(22)代入公式(7)~(10),得出线偏振度公式如下:

$$\text{DoLP}' = \frac{\sqrt{(n_{\text{signal}}(0^\circ) - n_{\text{signal}}(90^\circ))^2 + (n_{\text{signal}}(45^\circ) - n_{\text{signal}}(135^\circ))^2}}{n_{\text{signal}}(0^\circ) + n_{\text{signal}}(90^\circ) + n_{\text{signal}}(45^\circ) + n_{\text{signal}}(135^\circ)} = \zeta \text{DoLP} \quad (23)$$

将上式简化为: $\text{DoLP} = \frac{2}{\zeta}$

$$\frac{\sqrt{(n_{\text{signal}}(0^\circ) - n_{\text{signal}}(90^\circ))^2 + (n_{\text{signal}}(45^\circ) - n_{\text{signal}}(135^\circ))^2}}{n_{\text{signal}}(0^\circ) + n_{\text{signal}}(90^\circ) + n_{\text{signal}}(45^\circ) + n_{\text{signal}}(135^\circ)} \quad (24)$$

公式(24)是多个高斯随机变量的复变函数,计算多个测量函数($f(x_1, x_2, \dots, x_n)$)中的不确定度为:

$$\sigma = \sum_i \left[\frac{df}{dx} \right]^2 \sigma_i^2 + \sum_{i \neq j} \frac{df}{dx_i} \frac{df}{dx_j} \text{cov}(x_i, x_j) \quad (25)$$

将公式(25)代入公式(24),通过计算得出线偏振度等效噪声为:

$$\text{NeDoLP} = \frac{\sqrt{1 + 2\delta - 2\delta\beta + \zeta^2 \text{DoLP}^2 \left(\frac{1+\delta}{2} - \beta \left(1 - \frac{\delta}{2} \right) \right)}}{\beta \cdot \zeta \cdot \sqrt{N}} \quad (26)$$

3.2 像素间串扰对于偏振度等效噪声的影响

给定瞬时视场时,辐射探测器在电荷累积时相邻像素之间产生串扰,称之为像素间串扰。这是由于现象:(1)光串扰和(2)电串扰。光串扰发生在当辐射通过偏振器照射在探测器上由于衍射(或内反射)在相邻的探测器上产生干扰,如图6(a)所示。电串扰发生在当光在一个像素的探测器区域中产生的光电子迁移到邻近的像素中,并在该像素的检测器中积累的串扰结果,如图6(b)所示。虽然两种机制不同,但这两种串扰都会引起偏振度等效噪声的增加。

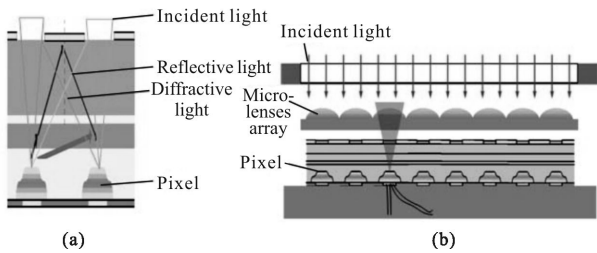


图6 像素间串扰(a)光串扰和(b)电串扰

Fig.10 Pixel-to-pixel crosstalk phenomena (a) optical crosstalk and (b) electrical crosstalk

在下面讨论中,定义 $\mu(0 \leq \mu < 1)$ 为一个像素所受到周围像素串扰的总和占总响应电荷的百分比。单一相邻像素间串扰用 μ_i 表示,则像素受到总串扰

影响为 $\sum_{i=1}^n \mu_i$ 。故像素间总串扰为:

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_i \quad (\mu_i \in \varepsilon, i=1, 2, \dots, n) \quad (27)$$

有两种排列方案。方案 I(图 7(a)),正交偏光片垂直(或水平)相邻无规律相邻,方案 II(图 7(b))正交偏光片垂直(或水平)彼此间隔相邻。不同的排列方式 NeDoLP 造成了不同程度的影响。考虑到反射光也会造成间隔像素之间发生串扰,故文中假设了间隔像素串扰系数为 ζ 。为了符合文中的偏振镜片排列方式,对方案 I 进行具体分析。

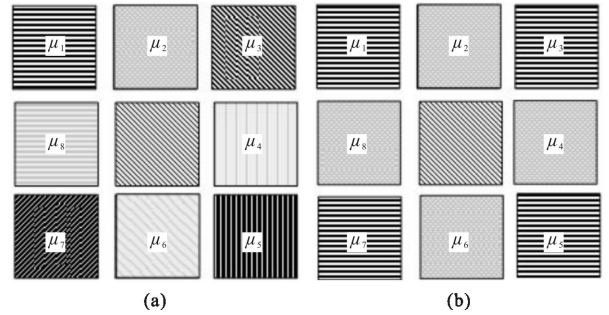


图7 (a)方案 I 排列方式(b)方案 II 排列方式

Fig.7 (a) Case I crosstalk configuration (b) Case II crosstalk configuration

为了方便分析,将像素之间光串扰和电串扰现象等效为微偏振透镜阵列的通轴与断轴透过率的变化。以下给出考虑光学串扰和电串扰因素的修正公式:

光学通轴透过率

$$q_o' = q \cdot (1 - \mu) + \frac{1}{2} (q + r) \cdot (\mu_1 \zeta_1 + \mu_3 \zeta_3 + \mu_5 \zeta_5 + \mu_7 \zeta_7) + 2r (\mu_2 \zeta_2 + \mu_6 \zeta_6) + \frac{1}{2} (q + r) (\mu_4 \zeta_4 + \mu_8 \zeta_8) \quad (28)$$

光学断轴透过率

$$r_o' = r \cdot (1 - \mu) + \frac{1}{2} (q + r) \cdot (\mu_1 \zeta_1 + \mu_3 \zeta_3 + \mu_5 \zeta_5 + \mu_7 \zeta_7) + 2q (\mu_2 \zeta_2 + \mu_6 \zeta_6) + \frac{1}{2} (q + r) (\mu_4 \zeta_4 + \mu_8 \zeta_8) \quad (29)$$

同理,给出电串扰通过率。

电串扰通轴透过率

$$q_e' = q \cdot (1 - \mu) + \frac{1}{2} (q + r) \cdot (e_1 + e_3 + e_5 + e_7) + 2r (e_2 + e_6) + \frac{1}{2} (q + r) (e_4 + e_8) \quad (30)$$

电串扰断轴透过率

$$r_e' = r \cdot (1 - \mu) + \frac{1}{2} (q + r) \cdot (e_1 + e_3 + e_5 + e_7) + 2q(e_2 + e_6) + \frac{1}{2} (q + r)(e_4 + e_8) \quad (31)$$

将光串扰与电串扰统一考虑后，通轴透过率和断轴透过率为别为：

$$q' = q_o' + q_e' \quad (32)$$

$$r' = r_o' + r_e' \quad (33)$$

将公式(32)、(33)代入(19)得出：

$$n(\theta) = \beta \frac{N_w}{2} [1 + \vartheta \text{DoLP} \cos(2\theta - 2\phi)] + \pi I_{bg} \quad (34)$$

式中： $\vartheta = \frac{q' - r'}{q' + r'}$

针对于微透镜阵列不同排列方式，像素间串扰可以进行更近一步简化。同理经过计算得出考虑像素间串扰的线偏振度等效噪声公式：

$$\text{NeDoLP}_c = \frac{\sqrt{1 + \vartheta^2 \text{DoLP}^2 \left(\frac{1}{2} - \beta\right)}}{\beta \cdot \varphi \cdot \sqrt{N}} = \frac{\sqrt{1 + \lambda^2 + \vartheta^2 \text{DoLP}^2 \left(\frac{1}{2} - \beta\right)}}{\beta \cdot \lambda \cdot \vartheta \cdot \sqrt{N}} \quad (35)$$

4 计算与分析

为了分析 δ 、 β 、 N 和 NoLP 不同因素对 DeNoLP 影响，以下分别予以讨论，并利用计算机进行仿真分析。

(1) δ 对 NeDoLP 的影响

为了分析 δ 对 NeDoLP 的影响，给定 $\beta=0.5$ 和 $\vartheta=1$ 以便分析 δ 对 NeDoLP 的影响，通过计算机分析得出结果，如图 8 所示。

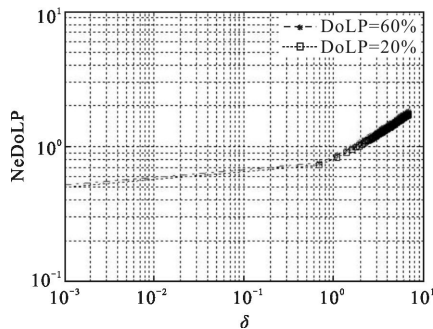


图 8 δ 与 NeDoLP 关系图

Fig.8 δ vs NeDoLP

分析图 8 得出，在 $\delta \geq 1$ 时， NeDoLP 随着 δ 增大而增大；在 $\delta \leq 0.1$ 时， δ 对 NeDoLP 的影响可以忽略。

(2) N 于 NeDoLP 的影响

为了得出 N 对于 NeDoLP 的影响，文中假设 δ 为 0，得到如下公式：

$$\text{NeDoLP} = \frac{\sqrt{1 + \vartheta^2 \text{DoLP}^2 \left(\frac{1}{2} - \beta\right)}}{\beta \cdot \vartheta \cdot \sqrt{N}} \quad (36)$$

首先，文中假设 $\text{DoLP}=0.5$ ， $\vartheta=1$ 带入公式(36)，得出 NeDoLP 与 N 的关系，如图 9 所示，由图 9 分析得知，(1) 当 DoLP 、 ϑ 和 β 值一定情况下，随着 N 值的增大， NeDoLP 随之减小。(2) 在 DoLP 、 ϑ 和 N 为定值情况下，随着 β 值在取值范围内的增大， NeDoLP 随之减小。

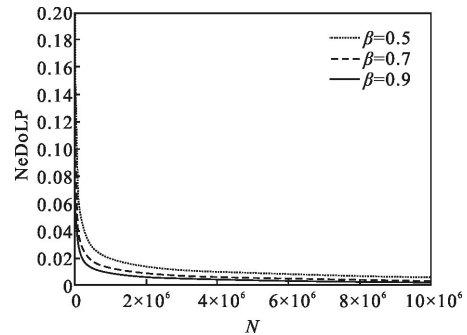


图 9 NeDoLP 与 N 关系图

Fig.9 NeDoLP vs N

(3) 对于 NeDoLP 的影响

为了分析 DoLP 对于 NeDoLP 的影响，令 $N=1$ ，带入公式(27)，分别计算当 β 取值为 0.4、0.5、0.8 和 1 时， DoLP 与 NeDoLP 对应关系，如图 10 所示。由图 10 分析得知：(1) 当 DoLP 、 ϑ 和 N 为定值情况下， β 值越大， NeDoLP 值越小，与图 9 得出结论(2)相一致。(2) 当 $\beta \geq 0.5$ 时， NeDoLP 随着 DoLP 值的增大而增大；当 $\beta \leq 0.5$ 时， NeDoLP 随着 DoLP 值的增大而减小。

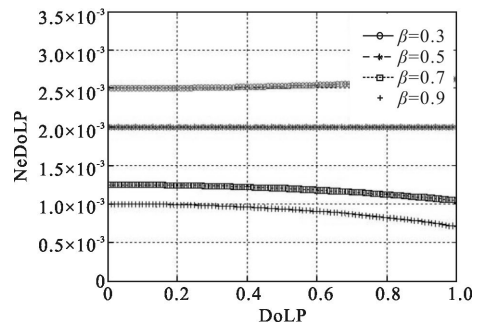


图 10 NeDoLP 与 DoLP 关系图

Fig.10 NeDoLP VS DoLP

(4) β 对于 NeDoLP 的影响

为了分析 β 对于 NeDoLP 的影响, 令 $\vartheta=1$ 和 $N=1$, 带入公式(27), 分别计算当 DoLP 取值为 50%、10%和 1%时, NeDoLP 与 β 的对应关系, 如图 9 所示。由图 9 分析得知: 当 DoLP、 ϑ 和 N 为定值情况下, NeDoLP 随着 β 值增大而减小与图 10 分析得出结论(1)相一致。

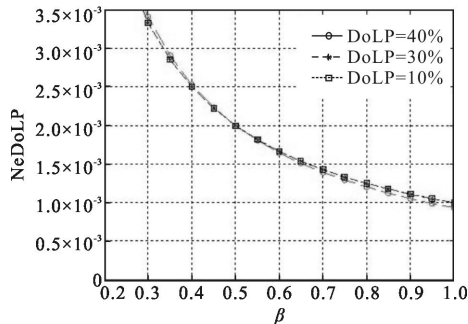


图 11 NeDoLP 与 β 关系图

Fig.11 NeDoLP vs β

5 结论

文中针对可见及近红外偏振探测问题, 提出了新型焦平面偏振成像探测器。借鉴于彩色成像 RGB 3 原色焦平面中 R, G, B 滤波片的排列方式, 结合微透镜阵列技术, 将不同偏振方向的偏振滤波片微加工到焦平面上, 对 2 个像素的近邻采用空间分布进行采样, 其对每个像素的偏振信息进行处理, 制成焦平面偏振成像探测器。

通过对阵列微透阵列偏振度探测器线偏振度等效噪声及像素间串扰等效噪声进行分析, 给出了偏振度等效噪声的精确理论公式, 并用计算机进行了模拟分析, 分析得出了 NeDoLP 的影响因素。该研究的数据与结论对微透镜阵列偏振探测器性能提高具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] Liu Xun, Hua Wenshen, Yang Jia. Camouflage effect evaluation based on hyperspectral detecting technology [J]. *Infrared and*

Laser Engineering, 2014, 43(10): 3228–3232. (in Chinese)

刘恂, 华文深, 杨佳. 面向高光谱探测的伪装效果评价方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3228–3232.

[2] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. 7th ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1999.

[3] Li Jingzhen. Handbook of Optics [M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2014. (in Chinese)

李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2014.

[4] Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, et al. Mechanism of infrared polarization detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 777–781. (in Chinese)

刘必璠, 时家明, 赵大鹏, 等. 红外偏振探测的机理[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 777–781.

[5] Gorn F. Surface landmine and trip-wire detection using calibrated polarization measurements in the LWIR and SWIR [C]//SPIE, 2001, 4491: 41–51.

[6] Frank Cremer, Wim de Jong, Klammer Schutte. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines [J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(5): 1021–1023.

[7] Paul J Wu, Joseph T Walsh. Stokes polarimetry imaging of rat tail tissue in a turbid medium: degree of linear polarization image maps using incident linearly polarized light[J]. *J Biomed Opt*, 2006, 11(1): 014031.

[8] Yang Wei, Gu Guohua, Chen Qian, et al. Method of target detection for infrared polarization image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2746–2751. (in Chinese)

杨蔚, 顾国华, 陈钱, 等. 红外偏振图像的目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2746–2751.

[9] Zhu Xiaoyang, Hou Liya, Zheng Rui, et al. Fabrication of polymer micro-lens array by micro-fluid digitalization[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 360–368. (in Chinese)

朱晓阳, 侯丽雅, 郑锐, 等. 微流体数字化技术制备聚合物微透镜阵列[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 360–368.

[10] Chen Lianghui. Development of III–V semiconductor FPA photodetectors of full optical spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 37(1): 1–8. (in Chinese)

陈良惠. III–V 族半导体全(多)光谱焦平面探测器新进展[J]. *红外与激光工程*, 2007, 37(1): 1–8.