

文章编号 1004-924X(2018)10-2371-09

消光比与探测器噪声对基于纳米线栅偏振 成像系统偏振精度的影响

王德江*, 孙 翥, 孙雪倩

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 消光比和探测器噪声是决定纳米线栅偏振成像偏振精度的两个重要参数。为解决两参数在系统优化时的取值问题, 本文建立了两参数与偏振噪声的数学模型, 采用像元组接收光电子数作为衡量探测器噪声与系统偏振噪声的桥梁量化了两者关系。仿真分析比较了两参数在入射光偏振态变化时对偏振噪声的作用。然后搭建消光比和曝光时间可调的偏振成像系统精度实验平台, 验证该数学模型和仿真结果。仿真与实验共同表明, 系统消光比大于 20 后, 通过提高像元组接收的光电子数以抑制探测器噪声要比继续提升消光比对提高系统偏振精度的贡献大。

关键词: 偏振成像; 偏振成像精度; 纳米线栅; 消光比

中图分类号: O436.3; TP79 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182610.2371

Effect of extinction ratio and detector noise on polarization accuracy of nanometer wire grid polarization imaging system

WANG De-jiang*, SUN He, SUN Xue-qian

(Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangdj04@ciomp.ac.cn

Abstract: In remote sensing imaging, extinction ratio and detector noise are important parameters that determine the accuracy of polarization imaging of nanowire gratings. To strike a balance between the two parameters for system optimization, a mathematical model using the two parameters and polarization noise was established in this paper. The photoelectron number received by large pixels was used as a measure to quantify the relationship between detector noise and system polarization noise. The effect of the two parameters on polarization noise was compared via a simulation wherein the polarization state of incident light was changed. Then, a platform to test the accuracy of polarization imaging with adjustable extinction ratio and exposure time was built to verify the mathematical model and simulation results. The simulation results demonstrate that when the extinction ratio of the system is greater than 20, wherein increasing detector noise by increasing the number of photoelectrons received by large pixels makes a greater contribution to the polarization accuracy than increasing the extinction ratio.

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61675202); 中国科学院基金资助项目 (No. CXJJ-16S038, No. CXJJ-17S017)

Key words: polarization imaging; polarization error; nano-wire filter; extinction ratio

1 引言

光学偏振成像具有突出目标角面信息的特点^[1-7],广泛应用于遥感和生物成像等领域^[8]。随着纳米工艺的日渐成熟,基于纳米线栅的分焦平面线偏振成像系统现已广泛应用于商业和军事领域。该偏振成像系统采用像素级的马赛克式偏振调制方案,在同一时刻获得所有偏振调制分量,使得整个系统更为紧凑且不易受振动湿度等外界环境的影响,适用于动目标的实时观测。但是,该系统的误差来源相较于传统偏振成像系统有较大的区别。传统的分孔径偏振成像系统的主要误差源为多探测器响应不一致和不同光学孔径的视差^[9]。本文提出基于纳米线栅的偏振成像系统,该系统使用了像素级微偏振片和分焦平面两项技术,因此其成像误差主要有瞬时视场误差和偏振信息测量误差。其中,瞬时视场误差的研究已较为成熟^[10]。偏振信息测量误差由偏振成像系统的偏振度成像误差和偏振相角成像误差组成,按照误差本质分为非均匀性误差和随机误差。其中,非均匀性误差已得到有效的校正^[10]。而随机误差为偏振成像系统所固有的,受该系统的两大特性——低消光比和大探测器噪声的影响,表现得更为明显。并且,系统使用时往往不能同时兼顾两参数。例如,在遥感成像中往往通过减小系统 F 数的手段增大系统进光量从而使探测器的噪声减小,但此时串扰的增加将导致系统消光比的降低。陈振月等^[11]研究了探测器噪声与偏振信息测量误差的关系,但系统消光比与偏振信息测量误差的关系目前无人研究,更无人全面地研究系统的消光比、探测器噪声对偏振信息测量误差的影响。两参数在系统设计中存在此消彼长的关系,不利于系统的优化设计。因此,通过建立数学模型,定量研究两参数对该系统成像噪声的影响非常重要。

本文针对分焦平面线偏振成像系统,建立了偏振信息响应模型,根据误差理论推导出消光比、探测器噪声、目标光参数与系统偏振成像精度(偏振信息测量误差)的数学公式,给出了消光比与探

测器噪声对偏振成像测量精度影响的仿真关系曲线。为验证该数学模型与仿真结果,搭建了由纳米线栅偏振成像系统、均匀偏振光源等组成的偏振成像精度实验平台。采用改变偏振系统的光学镜头 F 数及搭建不同偏振成像系统的手段获得不同消光比的偏振成像系统;采用改变曝光时间的方式改变探测器接收的光电子数,从而改变探测器噪声。改变上述两个参量,测量偏振度方差与偏振相角方差,验证了数学模型。

2 分焦平面线偏振成像系统偏振精度建模

2.1 分焦平面线偏振成像系统简介

基于纳米线栅的分焦平面实时线偏振成像系统的核心为偏振探测器,由纳米线栅和光电探测器组成,如图 1 所示^[9]。纳米线栅上分布着刻划方向不同的微偏振片阵列,它们以相邻的 4 个微偏振片为一组,构成一个微偏振片组,与之对应的探测器像元则称为像元组,每个像元组中的 4 个小像元接收不同光强的光,这些光的偏振相角间隔 45° 。由于线栅刻蚀工艺和探测器与线栅装配工艺的限制,该系统的消光比较低,目前国际公开报道的最高水平为 100 左右^[12]。探测器接收到的光强范围不仅受目标光强范围的影响;同时,偏振度图像和偏振相角图像需要通过不同相位的光强图像的线性运算得出,因此该类成像系统必须保证探测器所有像元均工作在线性区内。在同样的场景下,该类系统的探测器接收到的光强范围更大,意味着像元组接收光电子数相比于传统相机低。由探测器特性可知,接收光电子数低意味着探测器噪声大。上述为分焦平面偏振成像系统的两个独特特征,也是该系统的主要噪声来源,与传统的偏振成像系统不同。并且,消光比与探测器噪声在基于纳米线栅的偏振成像系统中往往不能兼顾。

该类成像系统为凝视型成像系统,成像噪声采用均匀光源照明所成图像的均方根表示,在偏振成像系统中可用 NeDolp 和 NeAolp 表示^[13]。

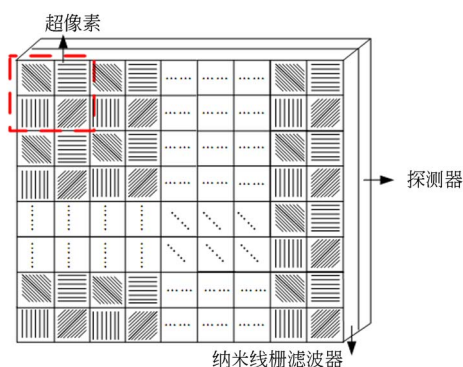


图 1 基于纳米线栅的分焦平面偏振成像系统

Fig.1 Divided focal plane polarization imaging system with nanometer wire grids

NeDolp 表示偏振成像系统对均匀偏振度光源所成偏振度图像的均方根,为成像的偏振度精度;

$$Aolp_{i,j}^{\text{in}} = 0.5 * \frac{180}{\pi} * \arctan \left\{ \frac{[PN_{i,j}^{\text{out}}(0) - PN_{i,j+1}^{\text{out}}(90)]}{[PN_{i+1,j}^{\text{out}}(45) - PN_{i+1,j+1}^{\text{out}}(135)]} \right\}, \quad (2)$$

$$Dolp_{i,j}^{\text{in}} = \frac{2}{x_{i,j}} * \frac{\sqrt{(PN_{i,j}^{\text{out}}(0) - PN_{i,j+1}^{\text{out}}(90))^2 + (PN_{i+1,j}^{\text{out}}(45) - PN_{i+1,j+1}^{\text{out}}(135))^2}}{(PN_{i,j}^{\text{out}}(0) + PN_{i,j+1}^{\text{out}}(90) + PN_{i+1,j}^{\text{out}}(45) + PN_{i+1,j+1}^{\text{out}}(135))}, \quad (3)$$

其中: $PN_{i,j}^{\text{out}}(0)$ 、 $PN_{i,j+1}^{\text{out}}(90)$ 、 $PN_{i+1,j}^{\text{out}}(45)$ 与 $PN_{i+1,j+1}^{\text{out}}(135)$ 为探测器像元组组内第 (i,j) 个像元的 PN, $x_{i,j}$ 为组内任意微偏振片的偏振效率,由于微偏振片上邻近微偏振片组的消光比与长轴透过率差别不大^[12],可表示为 $x_{i,j} = \frac{\epsilon_{i,j}^p - \epsilon_{i,j}^q}{\epsilon_{i,j}^p + \epsilon_{i,j}^q}$ 。消光

比 ER 和偏振效率的关系可表示为 $x = \frac{ER-1}{ER+1}$ 。

2.2 系统成像偏振度、偏振相角精度建模

偏振成像所测量的目标偏振度与偏振相角根据探测器内像元组的量化光子数(PN)计算得出,因此,探测器的量化噪声直接影响着偏振度、偏振相角的成像精度。探测器噪声分为随机噪声和可以被校正的非均匀噪声。随机噪声主要分为散粒噪声、暗电流噪声和读出噪声^[14]。当今科学级的背照式探测器暗电流噪声和读出噪声已小于满阱容量的千分之五^[14],当两者噪声总和小于散粒噪声的五分之一时,仅考虑散粒噪声即可,因此当像元 PN 大于满阱容量的 6% 时,可认为探测器的随机噪声主要为散粒噪声。散粒噪声作用下的探测器量化光电子数的方差可表示为 $\sigma_{\text{shot}} = \sqrt{PN}$, 即此时探测器噪声仅和量化光电子总数有关。

式(2)与式(3)为包含高斯变量的复杂代数

NeAolp 表示偏振成像系统对均匀偏振相角光源所成偏振相角图像的均方根,为图像的偏振相角精度。

探测器单个像元量化的电荷数值(PN)如式 1 所示:

$$PN_{i,j}^{\text{out}}(\theta) = 0.5 * \beta * S_{0\text{in}} * (\epsilon^p + \epsilon^q) * \left\{ 1 + \frac{\epsilon^p - \epsilon^q}{\epsilon^p + \epsilon^q} * Dolp^{\text{in}} * \cos[2(\theta - \varphi)] \right\}, \quad (1)$$

其中: $PN_{i,j}^{\text{out}}(\theta)$ 为偏振相角为 θ 的微偏振片对应的像元 PN, ϵ^p 为微偏振片的长轴透过率, ϵ^q 为微偏振片的短轴透过率, $Dolp^{\text{in}}$ 为目标光矢量 $S_{0\text{in}}$ 的偏振度, φ 为目标光的偏振相角, β 为探测器的光电转换效率。

根据线栅结构得出目标光的偏振相角和偏振度与像元组中 4 个像元 PN 的电荷数的关系:

式,可根据误差传递理论,推导目标光的偏振度的方差和偏振相角方差,即可量化偏振成像的偏振方差。以偏振相角方差的误差传递过程为例,如式 4 所示:

$$\begin{aligned} NeAolp_{i,j}^{\text{in}^2} &= \left(\frac{\partial Aolp_{\text{in}}}{\partial PN_{i,j}^{\text{out}}(0)} \right) * \sigma^2 PN_{i,j}^{\text{out}}(0) + \\ &\left(\frac{\partial Aolp_{\text{in}}}{\partial PN_{i,j+1}^{\text{out}}(90)} \right) * \sigma^2 PN_{i,j+1}^{\text{out}}(90) + \left(\frac{\partial Aolp_{\text{in}}}{\partial PN_{i+1,j}^{\text{out}}(45)} \right) * \\ &\sigma^2 PN_{i+1,j}^{\text{out}}(45) + \left(\frac{\partial Aolp_{\text{in}}}{\partial PN_{i+1,j+1}^{\text{out}}(135)} \right) * \sigma^2 PN_{i+1,j+1}^{\text{out}}(135). \quad (4) \end{aligned}$$

按照式(4)结合式(1)可得,目标光偏振相角方差为:

$$NeAolp_{i,j}^{\text{in}} = \frac{28.7 * (x_{i,j} + 1)}{Dolp_{i,j}^{\text{in}} * [\beta * S_{0\text{in}} * (\epsilon_{i,j}^p + \epsilon_{i,j}^q)]^{\frac{1}{2}} * (x_{i,j} - 1)}. \quad (5)$$

式(5)包含的变量有目标光光强、光电探测器效率和长短轴透过率 3 个变量。这 3 个变量不能直接反应当前系统的工作状态,因此本文采用探测器像元组接收光电子数代替这 3 个量,同时也是探测器噪声的最直接反应形式。在此定义 $PN_{i,j}^{\text{call}}$ 为像元组接收光电子数,表达式如下:

$$PN_{i,j}^{\text{call}} = 0.5 * (PN_{i,j}^{\text{out}}(0) + PN_{i,j+1}^{\text{out}}(90) + PN_{i+1,j}^{\text{out}}(45) + PN_{i+1,j+1}^{\text{out}}(135)). \quad (6)$$

根据式(1)可推导出:

$$PN_{i,j}^{\text{call}} = \beta * S_{0\text{in}} * (\epsilon_{i,j}^p + \epsilon_{i,j}^a). \quad (7)$$

因此,式(5)可变为:

$$NeAolp_{i,j}^{\text{in}} = \frac{28.7 * (x_{i,j} + 1)}{[Dolp_{i,j}^{\text{in}} * (PN_{i,j}^{\text{call}})^{\frac{1}{2}} * (x_{i,j} - 1)]}. \quad (8)$$

同理可得偏振度方差:

$$NeDolp_{i,j}^{\text{in}} = \frac{2 * (x_{i,j} + 1)}{(PN_{i,j}^{\text{call}})^{\frac{1}{2}} * (x_{i,j} - 1)}. \quad (9)$$

可以看出,偏振度方差与偏振相角方差类似,与像元组接收光电子数开方分之一呈线性关系,与系统微偏振片的偏振效率成反比,并且偏振度方差与目标光的偏振态无关,而偏振相角方差与目标光的偏振态有关。

2.3 基于实际工程背景的偏振成像系统精度仿真

为更直接地反应消光比、探测器噪声(可用像元组接收光电子数代表)及目标光状态对系统精度影响的轻重关系。根据工程中常见的科学级可见光探测器参数,和现阶段可能达到的分焦平面偏振系统的消光比,绘制出偏振度精度与偏振相角精度曲线进行对比。

科学级探测器满阱数根据工艺的不同有所区别,典型的最大满阱在 20~120 ke⁻。探测器像元组的光电子数 $PN_{i,j}^{\text{call}}$ 由光源的光强和系统的工作模式共同决定,但限于探测器满阱数。本文选择仿真及实验的像元组接收光电子数为 7~220 K,其中 7 K 代表暗目标或选择小阱深探测器的工况,220 K 代表选用大阱深探测器且工作在最佳工作模式下的工况。像元组接收光电子数的仿真数值覆盖了后续的实验数值。微纳工艺刻划出的微偏振片消光比可达几百,但贴合于探测器表面后由于串扰的影响,最终结果均只达到 100 以下^[12]。结合实验所能达到的系统消光比,仿真中采用的消光比为 7,20,28,44 与 500。

根据式(9),得到偏振度方差与像元组接收光电子数(探测器噪声的直接反应量)和消光比的关系如图 2 所示,图中 ER 是消光比的简称。从仿真结果可以看出,消光比越高、像元组接收的光电子数越多,偏振度成像方差越低;消光比越高,提升消光比对减小偏振度方差的作用越低。以像元组接收光电子数为 20K 为例,消光比为 20 时系统的偏振度精度仅和消光比 500 的偏振度方差相差 0.2%,但消光比为 20 的系统偏振度方差在像

元组接收光电子数从 20K 增加到 30K 时即可上升 0.28%。消光比为 44 的系统的偏振度方差在仿真区域内比消光比为 500 的系统最高仅差 0.08%,该值仅占系统偏振度方差(消光比为 44、像元组接收光电子数为 20K 时)的 5.6%。由此说明,消光比为 40 的偏振成像系统再提升消光比对成像精度的提升效果非常有限。形成对比的是,消光比为 44 的系统偏振度精度在像元组接收光电子数从 20K 增加到 30K 时即可上升 0.3%。可以得出结论,当消光比大于 20 后,提升像元组接收光电子数比提升消光比更能优化系统的偏振度精度,并且消光比大于 44 与消光比为 500 的系统偏振度精度已经差别不大。当系统处于消光比为 20 且像元组接收光电子数为 7K 的典型工况下,PNRS 提高两倍。

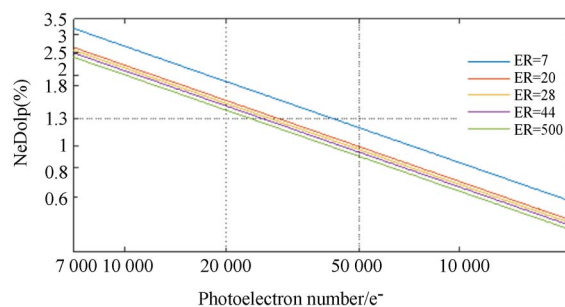


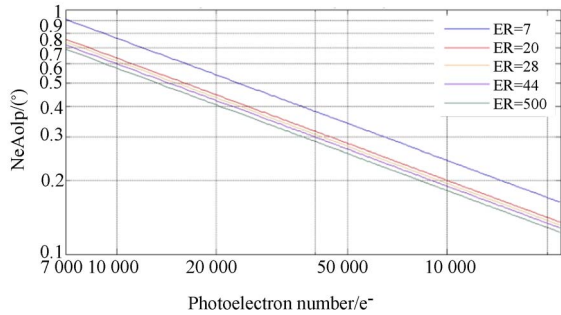
图 2 像元组接收光电子数和偏振度精度的关系

Fig. 2 Relationship between NeDolp and photoelectron number

同样地,根据式(8)仿真偏振相角精度与目标光偏振度和像元组接收光电子数的关系。首先仿真目标光偏振度为 1 时,像元组接收的光电子数与偏振相角精度在不同消光比下的关系,如图 3 (a)所示。而后仿真不同目标光偏振度下,典型的消光比与像元组接收电子数下的偏振相角精度,如图 3 (b)所示。

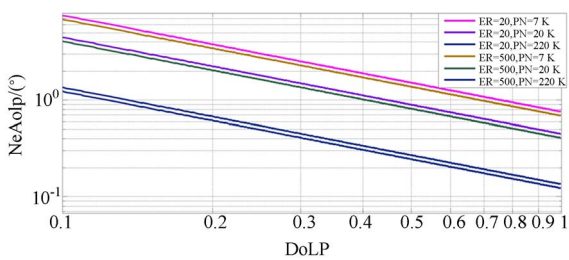
由图 3 (a)可以看出,当入射光偏振度为 1 时,消光比与像元组接收光电子数对偏振相角方差(偏振相角精度)的作用结果与上述条件对偏振相角方差(偏振相角精度)相似。从图 3 (b)可以看出,入射光偏振度越低,偏振相角精度越低。很明显,提高消光比对于提升偏振相角精度的贡献有限,而提高像元组接收光电子数对提升偏振相角精度的作用更大。

总之,从偏振度方差和偏振相角方差的仿真



(a) 偏振相角精度和像元组接收光电子数在入射光偏振度为 1 时的关系曲线

(a) Relationship between NeAolp and photoelectron number with different system extinction ratios and DoLP of 1



(b) 不同消光比和不同入射光偏振度时偏振度和偏振相角精度的关系曲线

(b) Relationship between DoLP of input light and NeAolp with different system extinction ratios and photoelectron numbers

图 3 偏振相角精度与像元组接收光电子数、入射光偏振度的曲线图

Fig. 3 Relationship among NeAolp, photoelectron number and DoLP of input light

中可以看出,提高消光比不但工艺复杂、成本高,且大于 20 或者 44 后对偏振信息的测量精度的提升效果极其有限,而选择阱深大的探测器,优化曝光策略,可以大幅提升偏振信息的测量精度。

3 偏振信息测量精度实验验证

3.1 实验系统

实验系统如图 4 所示,光源为大口径积分球,其出光口径为 60 mm,直径为 1.2 m,均匀性大于 99%,后接光阑口径 15 mm,焦距为 500 mm 的平行光管,获得视场角为 1.67° 的均匀平行光源,该光源用于模拟遥感成像中的目标光源。平行光管

后接偏振分析器,该偏振分析器由精密旋转台、光谱滤光片和偏振滤光片组成,用于获得精密可控的偏振态光源。其中,精密旋转台的重复角定位精度为 5',滤光片透过波段为 450~700 nm,截止波段为 1 200 nm,偏振片为 thorlab 公司的 LPVIS0200,透过率大于 0.8,消光比优于 1 000。相对于采用液晶调制^[16]或反射式玻璃堆^[17],采用这种方式获得的可控偏振态光源可以在相对较大的发散角和相对较宽的波段内保证较高的光源偏振态精度,易于测量带镜头的全色偏振成像系统的偏振参数,具有较高的遥感成像工程应用价值。

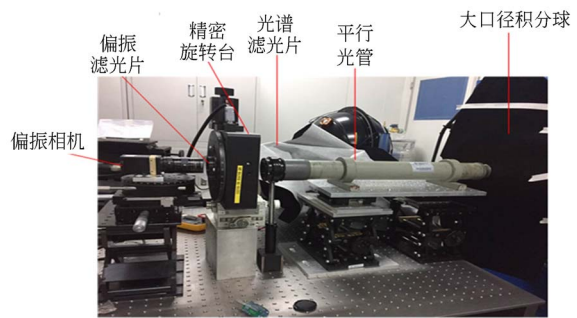


图 4 偏振信息测量实验装置实物图

Fig. 4 Experimental apparatus for measurement of polarization information

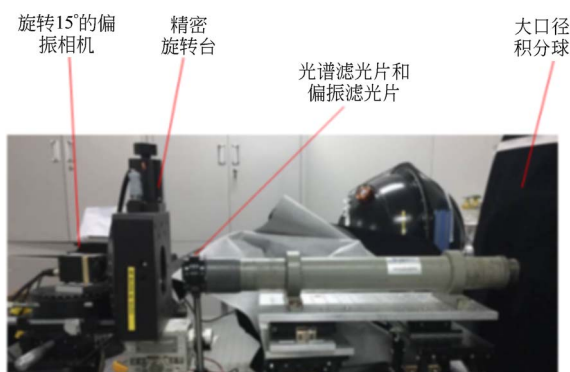
按照上述方法,在不同的镜头 F 数条件下,采用 4D 偏振相机得出的平均消光比如表 1 所示。

表 1 450~750 nm 不同消光比与 F 数的对应关系

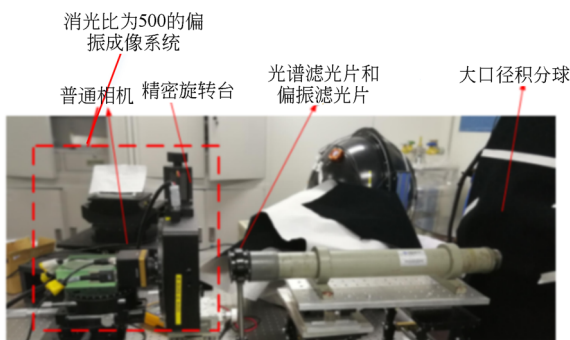
Tab.1 Correspondence of extinction ratio to F number from 450 nm to 750 nm

镜头 F 数	2	4	22
消光比	20	28	44

在不安装镜头的条件下,使偏振探测器靶面与平行光管的倾斜角度约为 15°,消光比由于光学串扰的原因较低,可以模拟超小 F 数的偏振成像系统。实验系统如图 5(a)所示,此时实测的消光比为 7。手动旋转大消光比的偏振片,后端放置强度相机由于强度探测器动态范围和光学误差的影响,偏振片的消光比实测为 500,实验系统如图 5(b)所示。强度相机为 imperx 的 B2041 内置柯达的 KAI-04070 探测器,手动旋转的偏振片型号为 LPVIS0200。



(a) 低消光比实验装置
(a) Low extinction ratio



(b) 高消光比实验装置
(b) High extinction ratio

图 5 不同消光比的实验装置示意图

Fig. 5 Apparatus for measurement of polarization in formation with various exaction ratios

测量过程中,条件变量为消光比和像元组接收光电子数 $PN_{i,j}^{caall}$ 。其中,消光比有 5 种变化, $PN_{i,j}^{caall}$ 变化主要靠调节曝光时间改变。为保证实验中像元组中的每个像素都在线性区内,实际像元组接收的光电子数从 7K 改变到 26K,限制于 4D 相机的满阱容量 (20 ke^-) 和目标光源。由于目标光源的偏振度为 1,因此像元组中的 4 个像元接收到的光强相差较大,为了使每个像元工作在线性区内,必须降低像元组接收的光电子数。

实验中,首先固定消光比,改变不同像元接收的光电子数,以靶面的像元组接收光电子数的平均值作为最终值,分别为 7.4K、9.7K、12.3K、19K、21K、23K 及 27K,测得 $PN_{i,j}^{caall}$ 对偏振精度的影响。测量过程中,每隔 10° 旋转偏振片角度,以改变入射偏振光的偏振态,而后采集 32 组不同偏振分析器相角的偏振度测量结果,分别算出 32 组测量结果的标准差取平均值^[11],作为该条件下的

偏振度方差,以消除偏振分析器角度对测量结果的影响。改变变量进行 35 次实验(每次包含 32 组不同偏振角度),实验结果如图 6 所示,对应的仿真结果如图 2 所示。

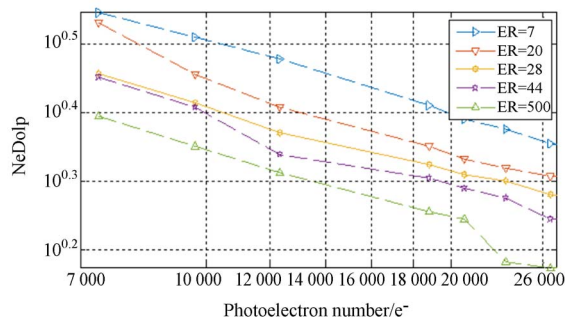


图 6 偏振度精度和像元组接收光电子数的实验曲线
Fig. 6 Experimental relationship between NeDolp and photoelectron number in experiment

按照相似的步骤,得到光源偏振度为 1 时,偏振相角方差与消光比及像元组接收光电子数的实验曲线如图 7 所示,对应的仿真结果如图 3(a) 所示。

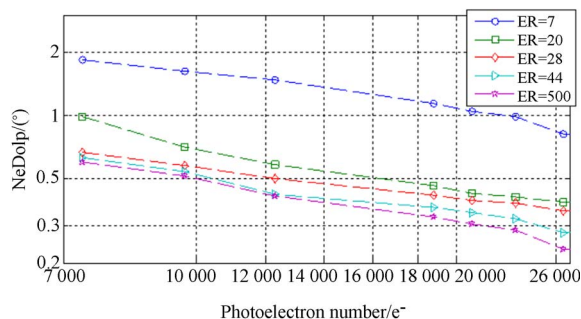


图 7 偏振相角精度与像元组接收光电子数的实验曲线
Fig. 7 Relationship between NeAolp and photoelectron number in experiment

在偏振度精度和偏振相角精度的测量过程中,由于相机工作温度、光学表面灰尘等的影响,不可避免地会出现一定的实验误差,导致实验曲线不够平滑。此外,实验中消光比为 500 和消光比为 44 的偏振度精度差别较大,与实验结果稍微不符。其原因有以下几点:

(1) 偏振成像系统的探测器 KAI-2020 为柯达老款探测器,其读出噪声和暗电流噪声与市面主流探测器 KAI-04070 有一定差距^[15];

(2) 非均匀校正也是存在一定误差的,因为像素刻划偏振相机的偏振性能受线栅刻划参数和由

线栅和探测器间距造成的光学串扰的双重影响,其特性不能仅用传统的线偏振片穆勒矩阵表征。

总之,实验结果与仿真结果趋势相同,虽然存在误差,但仍可以验证当消光比大于 20 后,提升像元组接收光电子数比提升消光比更能优化系统的偏振度精度,能够证明本文建模的正确性;并且进一步说明了,消光比大于 44 后再增加消光比对偏振成像系统的偏振成像精度影响很小,优化曝光策略和选用大阱深探测器才是提升偏振成像系统

精度的重要方向。

3.2 成像实验

偏振成像结果如图 8 所示。图 8 中包含 A 区域与 B 区域的灰度、偏振度和偏振相角三类图像。每类图像有三个细分类,分别为单次拍摄的高曝光值图像、单次拍摄的低曝光值图像和 100 张平均近似的无噪声图像。为定量计算图像的噪声,把 100 张平均图像认为是理想的无噪声图像计算单次曝光图像的噪声如式(9)和式(10)所示。

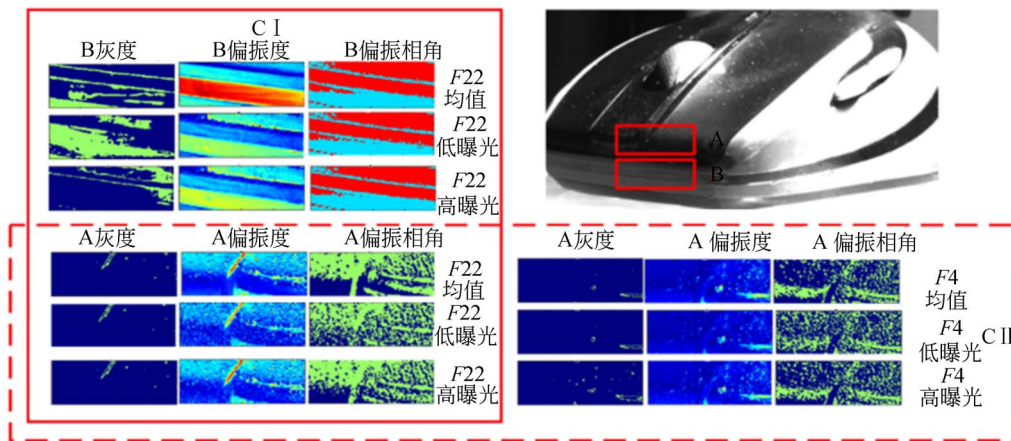


图 8 不同消光比的实验装置在不同曝光条件下的偏振图像

Fig. 8 Images obtained with different exposure time for ERs of 44 (F=22) and 20 (F=4) respectively

$$NeDolp_{pic} = \frac{\sqrt{\sum (DoLP_{single} - DoLP_{aver})^2}}{pix_{num}}, \quad (10)$$

$$NeAolp_{pic} = \frac{\sqrt{\sum (AoLP_{single} - AoLP_{aver})^2}}{pix_{num}}, \quad (11)$$

式中: $DoLP_{single}$ 为单次拍摄图像的偏振度, $DoLP_{aver}$ 为 100 张图像的平均偏振度, pix_{num} 代表区域内像素数的个数。由上式计算得出的 A、B 两区域在 F 数为 22(消光比为 44)时的结果如表 2 所示,具体的对比图像如图 8 中的 CI。

表 2 消光比为 44 时区域 A 和 B 的偏振精度

Tab. 2 Polarization accuracies of areas A and B for ER of 44

指定区域	接收光子数/ ke^-	偏振度/%	偏振度精度/%	偏振相角精度/ $^\circ$
A, 高曝光	4	55	3.76	5.1
A, 低曝光	1.225	55	5.9	6.87
B, 高曝光	2	20	5.13	10.4
B, 低曝光	0.58	20	8.5	16

由表 2 可以看出,同一偏振成像系统采集的

图像具有不同的偏振度与偏振相角精度。表中,区域 A 的高曝光值图像的 PNRS 是区域 A 低曝光值的 3 倍,导致偏振度精度降低 1.56 倍。而在相同的高曝光条件下,由于 A 区域的 PNRS 为 B 区域的两倍,A 区域的偏振度精度变为 B 区域的 1.36 倍,再加上 B 区域的偏振度为 A 区域的一半,共同导致 B 区域的偏振相角精度仅为 A 区域的一半。

消光比为 28 的系统对 A 区域的拍摄结果如表 3 所示。

表 3 消光比 28 时区域 A 的偏振精度

Tab. 3 Polarization accuracy of area A for ER values of 28

指定区域	接收光子数/ ke^-	偏振度/%	偏振度精度/%	偏振相角精度/ $^\circ$
A, 高曝光	10.2	55	3.15	3.68
A, 低曝光	1.225	55	6.4	7.2

比较表 2 与表 3 可知,消光比降低一半仅使得 $NeDolp$ 减小 0.5%。并且,低消光比时,提升

系统的像元组接收光电子数仍可以得到精度较高的图像,如 CII 区域图像所示。消光比为 28 的 A 高曝光区域的偏振度精度高于消光比为 44 的 A 高曝光区域 0.61%。

4 结 论

本文推导了分焦平面偏振成像系统的消光比、像元组接收光电子数(探测器噪声)和入射光偏振状态与偏振成像系统偏振信息测量精度的数学关系式。通过仿真确定了上述 3 个参数对偏振精度影响的权重关系,进而通过定量实验和成像实验共同验证该数学模型和仿真结果。实验证明在消光比大于 20 后,提升像元组接收光电子数

比提升消光比更能优化系统的偏振精度,并且消光比大于 44 与消光比为 500 的系统偏振度精度已经差别不大。该结论为偏振成像系统的参数分配和精度优化提供了重要的理论基础。

在基于压接工艺的像素刻划偏振相机制备过程中,选用大阱深的探测器意味着探测器的靶面面积增大,此时靶面平整度将会降低。平整度的降低导致压接时探测器和微纳线栅的距离变大,增加了串扰,从而使偏振成像系统消光比降低。因此,基于压接工艺的纳米线栅的偏振成像系统,其像元组接收的光电子数和消光比这两个参数呈此消彼长的关系。本文为上述两个参数的设计和基于压接工艺的纳米线栅偏振成像系统的精度优化奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 王霞,夏润秋,金伟其,等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3175-3182.
WANG X, XIA R Q, JIN W Q, *et al.*. Development of infrared polarization imaging detection technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175-3182. (in Chinese)
- [2] 莫春和,段锦,付强,等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 190-195.
MO CH H, DUAN J, FU Q, *et al.*. Research progress of polarized imaging military applications in foreign countries (Part 1)[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(3): 190-195. (in Chinese)
- [3] 莫春和,段锦,付强,等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(下)[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 265-270.
MO CH H, DUAN J, FU Q, *et al.*. Research progress of polarized imaging military applications in foreign countries (Part 2)[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 265-270. (in Chinese)
- [4] 王霞,梁建安,龙华宝,等. 典型背景和目标的长波红外偏振成像实验研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 32-38.
WANG X, LIANG J A, LONG H B, *et al.*. Long-wave infrared polarization imaging of typical backgrounds and targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 32-38. (in Chinese)
- [5] 罗海波,刘燕德,兰乐佳,等. 分焦平面偏振成像关键技术[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(1): 8-13.
LUO H B, LIU Y D, LAN L J, *et al.*. Key technology of sub-focal plane polarization imaging[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2017, 34(1): 8-13. (in Chinese)
- [6] 张涛,徐文畅,王德江,等. 基于像素级偏振相机的超像素校正[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3179-3186.
ZHANG T, XU W CH, WANG D J, *et al.*. Pixel correction based on pixel-level polarization camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 3179-3186. (in Chinese)
- [7] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENCULT D B, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [8] MYHRE G, HSU W, PEINADO A, *et al.*. Liquid crystal polymer full-Stokes division of focal plane polarimeter [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(25): 27393-27409.
- [9] GRUEV V, PERKINS R, YORK T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(18): 19087-19094.
- [10] TYO J S, LACASSE C F, RATLIFF B M. Total elimination of sampling errors in polarization imagery obtained with integrated microgrid polarimeters[J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(20): 3187-3189.
- [11] CHEN Z, WANG X, PACHEAO S, *et al.*. Impact of CCD camera SNR on polarimetric accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53(32): 7649-7656.
- [12] 张志刚,董凤良,张青川,等. 像素偏振片阵列制

备及其在偏振图像增强中的应用[J]. 物理学报, 2014, 63:232-241.

ZHANG ZH G, DONG F L, ZHANG Q CH, *et al.*. Polaroid pixel array and its application in polarization image enhancement [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63:232-241. (in Chinese)

[13] NORDINA G P, MEIE J T, *et al.*. Diffractive optical element for stokes vector measurement with a focal plane array[C]. *SPIE Conference on Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing II*,1999,3754:169-177.

[14] 王德江, 匡海鹏. 模拟增益对电荷耦合器件信噪比与动态范围影响的实验研究[J]. 物理学报, 2010, 60(7):644-649.

WANG D J, KUANG H P. Experimental study on the influence of analog gain on signal-to-noise

ratio and dynamic range of charge coupled devices [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 60(7):644-649. (in Chinese)

[15] IRE K A, MCKINNON A E, UNSORTH K, *et al.*. Technique for evaluation of CCD video-camera noise[J]. *IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology*,2008,18(2):280-284.

[16] ZHAO X, BERMAK A, BOUSSAID F, *et al.*. Liquid-crystal micropolarimeter array for full Stokes polarization imaging in visible spectrum [J]. *Opt. Express*, 2010,18(17):17776-17787.

[17] KANG Q, LI J J, CHEN L G. Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*,2015,35(4):0412003.

作者简介:



王德江(1981—),男,黑龙江双鸭山人,副研究员,2004年于南开大学获得学士学位,2007年于清华大学获得硕士学位,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事伺服控制系统和红外探测技术等方面的研究。E-mail:wangdj04@ciomp.ac.cn



孙雪倩(1994—),女,黑龙江大庆人,博士研究生,2012年于吉林大学获得学士学位,主要从事偏振成像方面的研究。E-mail:sunxueqian0201@163.com



孙 霁(1989—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事偏振成像方面的研究。E-mail:sunhe_ciomp@163.com