

考虑探测器非理想性的红外偏振成像系统作用距离分析

谭畅^{1,2,3}, 王世勇^{1,2*}, 高思莉^{1,2}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为实现传统红外成像系统与红外偏振成像系统探测能力的比较,基于系统的最小可分辨温差和最小可分辨偏振度差,分别建立了二者的作用距离模型,讨论了非理想探测器的参数对系统探测能力的影响,并设计了相应实验,验证了建立模型的可靠性,为实际探测中不同应用场景下的成像系统选择提供了参考。

关键词:仿真科学技术;作用距离模型;最小可分辨温差;噪声等效偏振度

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A

Analysis of the operating distance of infrared polarimetric imaging system considering the non-ideality of the detector

TAN Chang^{1,2,3}, WANG Shi-Yong^{1,2*}, GAO Si-Li^{1,2}

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To compare the detection capabilities of traditional infrared imaging systems and infrared polarization imaging systems, the operating distance models of the systems were established based on the minimum resolvable temperature difference and the minimum resolvable polarization degree difference. The effects of parameters of non-ideal detectors on the detection capabilities of the systems were discussed, and the corresponding experiments were designed to verify the reliability of the established models. This provides a reference for the selection of imaging systems in different application scenarios in actual detection.

Key words: simulation science and technology, operating distance model, minimum resolvable temperature difference, noise equivalent polarization degree

引言

红外探测以其隐蔽性好、探测距离远、抗干扰能力强和全天工作的优势被广泛用于遥感探测、医疗卫生与海洋监管等领域,但在背景与目标红外辐射量差距不大或背景较为复杂等情况下,传统红外成像技术对目标进行探测与识别的难度较大。而

红外偏振探测在采集目标与背景辐射强度的基础上,还获取了多一维度的偏振信息,因此在探测隐藏、伪装、暗弱目标和复杂自然环境中人造目标等领域,有着传统红外探测不可比拟的优势^[1-4]。但同时,偏振装置的加入也增加了成像系统的复杂度与制作成本,且对于远距离成像,在红外成像系统前

收稿日期: 2023-03-01, 修回日期: 2023-04-24

Received date: 2023-03-01, Revised date: 2023-04-24

基金项目: 上海市现场物证重点实验室基金(2017xcwzk08), 上海技术物理研究所创新基金(CX-267)

Foundation items: Supported by the Shanghai Key Laboratory of Criminal Scene Evidence funded Foundation (2017xcwzk08), the Innovation Fund of Shanghai Institute of Technical Physics (CX-267)

作者简介(Biography): 谭畅(1994-), 女, 吉林白山人, 博士研究生, 主要研究方向为红外偏振成像仿真. E-mail: 452483903@qq.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: s_y_w@sina.com

加入偏振装置对成像系统的探测距离的影响,有待进一步的研究论证。

目前国内外学者在红外成像系统与偏振探测系统的性能分析与仿真建模方面取得了一定成果,但对于红外偏振成像系统作用距离的分析,往往还是通过讨论加入偏振装置对红外成像系统最小可分辨温差的变化,而不是系统的偏振探测能力。Michael Jones^[5]等人讨论了焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)井尺寸、偏振器消光比(Extinction Ratio, ER)、像素串扰和后续图像处理算法等因素对成像系统性能的影响,Bradley Preece^[6]等人对特定探测器进行建模仿真,用以预测成像系统的信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)、噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)和噪声等效辐照度(Noise Equivalent Irradiance, NEI)等性能参数。Greg Finney^[7]等人对特定体系结构的偏振探测器进行建模,论证了其设计的偏振成像系统的可行性与优势。电子科技大学的王娟^[8]等人介绍了热成像系统最小可分辨温差(Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD)的一般模型,并编制了Matlab程序进行计算。华北光电技术研究所的胡晓强^[9]等人结合传统红外成像系统的探测距离模型建立了基于偏振度信噪比的红外偏振探测距离模型,但并未考虑偏振装置的加入对系统光学效率的降低,以及偏振探测器一些非理想因素对系统探测能力的影响。北京理工大学的夏润秋^[10]等人对特定探测场景,海面环境中红外偏振成像系统的探测距离进行了建模,但同样未考虑偏振装置对成像系统光学效率和噪声性能的影响。

本文将从分析成像系统最远探测距离的角度出发,对成像系统的探测能力进行评估。综合考虑影响成像系统探测能力的各个因素,参考传统红外成像系统作用距离模型,基于系统的偏振探测能力,建立了红外偏振成像系统的作用距离模型,讨论了偏振装置非理想性对系统探测能力的影响,并设计实验验证了建立模型的可靠性。

1 红外成像系统作用距离建模

目前较为公认的对扩展源目标探测距离进行估算的方法是MRTD法^[11]。该方法规定,对于空间频率为 f 的目标,人眼通过红外成像系统能够观察到该目标需要满足两个条件:①目标经过大气衰减到达红外成像系统时,其与背景的实际表观温差应大于或等于该频率下的成像系统最小可分辨温差

$MRTD(f)$;②目标对系统的张角 θ_r 应大于或等于相应观察要求所需要最小视角。即:

$$\begin{cases} \Delta T(\theta) \cdot \tau(R) \geq MRTD(f) \\ \frac{1}{2f} = \theta_r \leq \frac{H}{R \cdot Ne} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\tau(R)$ 为探测距离为 R 时的平均大气透过率; H 为探测目标的高度; R 为探测距离。 $\Delta T(\theta)$ 为探测目标与背景的实际表观温差; Ne 为不同观察要求所需要的目标等效条带数;对于不同的观察要求, Ne 有不同的数值规定,如表1所示。满足上述要求的最大距离 R_{max} ,即为红外成像系统对扩展源目标的最远作用距离。

表1 不同观察要求下 Ne 的确定

Table 1 Determination of Ne under different observation requirements

| Type | Ne |
|----------------|------|
| Detection | 20 |
| Recognition | 100 |
| Identification | 200 |

对于 $MRTD(f)$ 的确定,考虑到红外成像系统电路的带宽及人眼作用,本文引用了一种较为常见的计算模型^[12]:

$$MRTD(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} SNR_{DR} \cdot f \cdot \frac{NETD}{MTF(f)} \cdot \left(\frac{a \cdot b}{t_e \cdot f_p \cdot \Delta f \cdot \tau_d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中, a 和 b 分别为探测器横向和纵向的瞬时视场, SNR_{DR} 为阈值显示信噪比, t_e 为人眼的积分时间,一般取0.2 s, Δf 为噪声等效带宽, f_p 为帧频, τ_d 为驻留时间, $MTF(f)$ 为空间频率为 f 时成像系统的传递函数; $NETD$ 为噪声等效温差,各参数计算公式如下:

$$NETD = \frac{4F^2 \sqrt{\Delta f} \lambda_p T^2}{\sqrt{A_d n_s} \tau_0 D^*(\lambda_p) c_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda}, \quad (3)$$

式中, A_d 为探测单元的面积, F 为光学系统 F 数, T 为温度, τ_0 为透镜的光学透过率, n_s 为探测器的串联单元数, $D^*(\lambda_p)$ 为峰值比探测率, λ_p 为探测器响应峰值波长, λ_1 、 λ_2 为探测器的工作波长, M_λ 为光谱辐射出射度, c_2 为第二辐射常数。

综合考虑红外成像系统的探测器、电路系统与光学系统,系统总的调制函数是各子系统的调制函数的乘积^[13],由此可得,系统调制函数 $MTF(f)$ 为^[16]:

$$\begin{aligned}
 MTF(f) &= MTF_d(f) \cdot MTF_e(f) \cdot MTF_o(f) \\
 MTF_d(f) &= \frac{\sin(\pi \cdot W^{1/2} \cdot f)}{\pi \cdot W^{1/2} \cdot f} \\
 MTF_e(f) &= [1 + (2 \cdot W^{1/2} \cdot f)^2]^{-\frac{1}{2}} \\
 MTF_o(f) &= \frac{2}{\pi} \left\{ \cos^{-1}(ff_0) - (ff_0) \cdot [1 - (ff_0)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}
 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, f_0 为光学系统截止频率, $W^{1/2}$ 是系统的瞬时视场, $W^{1/2} = a \cdot b$ 。

由此, 只需明确红外成像系统的各项基本参数与观测需求, 我们就可以计算出系统的噪声等效温差与最小可分辨温差, 进而求解出它的最远探测距离。

2 红外偏振成像系统作用距离建模

偏振成像根据成像设备的结构特性可分为分振幅探测、分时探测、分焦平面探测和分孔径探测^[14]。其中, 分时探测具有设计简单、容易计算等优点, 但只适用于静态场景; 分振幅探测可同时探测不同偏振方向的辐射, 但存在体积庞大、结构复杂、计算偏振信息对配准要求高等问题; 分孔径探测也是同时探测的一种方式, 且光学系统相对稳定, 但会带来空间分辨率降低的问题; 分焦平面偏振探测器具有体积小、结构紧凑、系统集成度高等优势, 可同时获取到不同偏振方向的偏振图像, 是目前偏振成像领域的研究热点, 也是本文的主要研究对象。图1为分焦平面探测系统示意图。

为方便分析, 我们通常用穆勒矩阵与光波 Stokes 矢量的作用来表述偏振光在传输中发生的透射反射等过程, 假设入射光 Stokes 矢量为 S^{in} , 出射光的 Stokes 矢量为 S^{out} , 则有:

$$\begin{bmatrix} S_0' \\ S_1' \\ S_2' \\ S_3' \end{bmatrix} = M \times S^{in} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

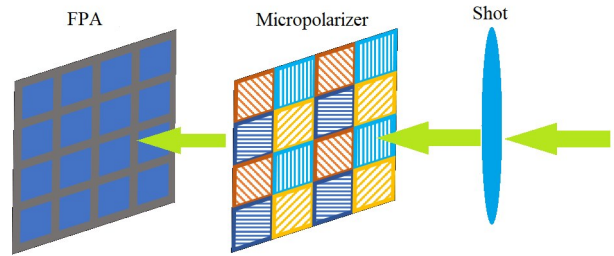


图1 分焦平面探测器系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the split-focus plane detector system

本文仿真的分焦平面偏振探测器, 是在红外焦平面上集成了一组按一定规律排列的微偏振片, 一个像元对应一个微偏振片, 其角度分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° , 相邻的 2×2 个微像元组成一个超像元, 可同时获取到四种不同的偏振态。图1为分焦平面探测系统结构示意图, 其中四个角度的非理想偏振片的 Muller 矩阵为:

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} t_{\max} + t_{\min} & (t_{\max} - t_{\min}) \cos 2\theta & (t_{\max} - t_{\min}) \sin 2\theta & 0 \\ (t_{\max} - t_{\min}) \cos 2\theta & (t_{\max} + t_{\min}) \cos^2 2\theta + 2\sqrt{t_{\max} t_{\min}} \sin^2 2\theta & (\sqrt{t_{\max}} - \sqrt{t_{\min}})^2 \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ (t_{\max} - t_{\min}) \sin 2\theta & (\sqrt{t_{\max}} - \sqrt{t_{\min}})^2 \sin 2\theta \cos 2\theta & 2\sqrt{t_{\max} t_{\min}} \sin^2 2\theta + (t_{\max} + t_{\min}) \cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{t_{\max} t_{\min}} \end{bmatrix} \\
 &= t \begin{bmatrix} 1 & \frac{e-1}{e+1} \cos 2\theta & \frac{e-1}{e+1} \sin 2\theta & 0 \\ \frac{e-1}{e+1} \cos 2\theta & \cos^2 2\theta + 2\frac{\sqrt{e}}{e+1} \sin^2 2\theta & \frac{(\sqrt{e}-1)^2}{e+1} \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \frac{e-1}{e+1} \sin 2\theta & \frac{(\sqrt{e}-1)^2}{e+1} \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta + 2\frac{\sqrt{e}}{e+1} \cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\frac{\sqrt{e}}{e+1} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, θ 为偏振片透光轴与水平方向的夹角, $e = \frac{t_{\max}}{t_{\min}}$ 为消光比, $t = \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}$ 为透射率。

传统方法认为在红外成像系统前加入偏振装置后, 会对系统的噪声等效温差与调制传递函数 $MTF(f)$ 产生影响, 改变系统的最小可分辨温差, 进

而改变系统的最远探测距离。本文将从偏振装置的偏振探测能力出发,分析成像系统的最小可分辨偏振度差,建立红外偏振成像系统的探测距离模型。

我们首先建立一个探测器偏振响应模型,该模型将探测器视为一个光子计数器,光子被转换为电子并在电容电路中累积,综合考虑探测器井的大小、偏振片消光比、信号电子与背景电子的比率以及入射辐射的偏振特性,通过应用误差传播方法对结果进行处理。从噪声等效偏振度(Noise equivalent Degree of Linear Polarization, NeDoLP)的定义出发,NeDoLP是衡量偏振探测器探测能力的指标,即探测器对均匀极化场景成像时产生的标准差。对其进行数学建模,进而分析得到红外偏振成像系统的最远探测距离。

当强度为 L 的红外辐射进入探测系统,探测器中产生的总光电子数量可表示为:

$$n = \tau \left\{ \frac{L}{2} R \left[(t_{max} + t_{min}) + (t_{max} - t_{min}) \right. \right. \\ \left. \left. DoLP \cos(2\theta - 2\phi) \right] + n_{noise} \right\}, \quad (7)$$

式中, τ 为探测器的积分时间, R 为探测器响应率, ϕ 为红外辐射的偏振角, n_{noise} 为以每秒发射电子数为单位的噪声, n_{noise} 中仅包含暗电流、产生复合噪声和读出噪声。此处的暗电流 σ_{dark} 以每秒发射电子数为单位,产生复合噪声 σ_{gr} 均值为零,标准差为 $\sqrt{n(\theta_{dp})}$ 的高斯随机变量。读出噪声 σ_{read} 为探测器数模转换和离散化过程中产生的误差,是均值为零、标准差为 σ_{read} 的高斯随机变量, $n_{noise} = \sqrt{\sigma_{dark}^2 + \sigma_{read}^2 + \sigma_{gr}^2}$ 。

对于探测器来说,积分时间越长,累积的电荷越多,探测器的信噪比(SNR)就越高,但这种增加是

$$DoLP' = \frac{\sqrt{(n_{signal}(0) - n_{signal}(90))^2 + (n_{signal}(45) - n_{signal}(135))^2}}{2 \frac{n_{signal}(0) + n_{signal}(45) + n_{signal}(90) + n_{signal}(135)}{2}} = D \cdot DoLP \quad (13)$$

可以看出, $DoLP$ 是包含多个高斯随机变量的复杂函数,采用文献[17]中计算多个测量值函数的不确定性的方法:

$$\sigma^2 = \sum_i \left[\frac{df}{dx_i} \right]^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i \neq j} \frac{df}{dx_i} \frac{df}{dx_j} \text{cov}(x_i, x_j). \quad (14)$$

最后推导出对于不考虑圆偏振的分焦平面偏振成像系统,其噪声等效偏振度表达式如下:

有限度的。随着积分时间的增加,光生载流子有更多的时间被收集,增加信号。然而,此时暗电流及其相关噪声也会增加。对于给定的探测器,最佳积分时间是在最大化信噪比和最小化暗电流及噪声的不利影响之间取得平衡,为方便分析,我们假设探测器工作在“半井”状态下,即:

$$L_{\frac{1}{2}} = \left(\frac{N}{2\tau} - n_{noise} \right) \left(\frac{2}{R(t_{max} + t_{min})} \right), \quad (8)$$

N 是探测器井的大小。定义 β 为探测器井中积累的信号电子与总电子数的比值, D 为反映探测器偏振信息保持情况的参数。

$$\beta = \frac{\frac{N}{2} - \tau n_{noise}}{\frac{N}{2}}, \quad (9)$$

$$D = \frac{t_{max} - t_{min}}{t_{max} + t_{min}} = \frac{e - 1}{e + 1}. \quad (10)$$

此时,去除噪声影响得到的信号电子数可表示为:

$$n_{signal} = \beta \frac{N}{2} [1 + D \cdot DoLP \cos(2\theta - 2\phi)]. \quad (11)$$

不考虑圆偏振情况,为了方便分析,用线偏振度($DoLP$)和偏振角 ϕ 的形式表述偏振光三个斯托克斯矢量的入射值与出射值^[5]:

$$\begin{cases} S_0 = L = \frac{\beta N}{R\tau} \\ S_1 = L \cdot DoLP \cos 2\phi = \frac{\beta N}{R\tau} DoLP \cos 2\phi \\ S_2 = L \cdot DoLP \sin 2\phi = \frac{\beta N}{R\tau} DoLP \sin 2\phi \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} S'_0 = R \cdot \tau \cdot S_0 \\ S'_1 = R \cdot \tau \cdot D \cdot S_1 \\ S'_2 = R \cdot \tau \cdot D \cdot S_2 \end{cases}$$

此时,探测器测量的 $DoLP'$ 为:

$$NeDolp = \frac{\sqrt{\delta(1 - \beta) + D^2 DoLP^2 \left(\frac{\delta + 2\beta - \delta\beta}{2} \right)}}{\beta \cdot D \cdot \sqrt{N}}, \quad (15)$$

其中, $\delta = \frac{\sigma_{read}}{\sigma_{gr}}$ 。此时,红外偏振成像系统的最小可

分辨偏振度差(Minimum Resolvable Polarization Difference, MRPD)可表示为:

$$MRPD(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} SNR_{DR} \cdot f \cdot \frac{NeDolp}{MTF_p(f)} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \beta}{t_e \cdot f_p \cdot \Delta f \cdot \tau_d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

$$MTF_p(f) = MTF(f) \cdot MTF_{pp}(f), \quad (17)$$

$MTF_{pp}(f)$ 即为偏振片的调制函数。

有了上述准备工作,可通过以下步骤计算红外偏振成像系统最远作用距离:

a. 根据已知的目标和背景偏振特性以及环境条件,计算在给定距离下,目标与背景之间的偏振度差在传输路径上的衰减。

b. 结合系统的探测器性能参数,确定目标在给定距离下是否可被观察到。如果不能则减小设定的距离。目标被观察到需同时满足衰减后的偏振度差大于或等于系统对应于该频率的最小可分辨偏振度差 $MRPD$, 目标对系统的张角 θ_r 大于或等于相应观察要求所需要的最小视场角。

$$\begin{cases} \Delta DoLP(\theta) \cdot \tau_p(R) \geq MRPD(f) \\ \frac{1}{2f} = \theta_r \leq \frac{H}{R \cdot Ne} \end{cases}. \quad (18)$$

c. 逐步增加距离,直到目标与背景之间的偏振度差不再满足观察要求。这个距离即为成像系统最远作用距离。

$\tau_p(R)$ 为大气对目标偏振度随探测距离的衰减函数,可根据不同的天气条件与已有的测量数据进行插值,计算出不同探测距离下大气对目标偏振度的衰减,图2给出了根据文献[19]中测量数据得到的偏振度随光学厚度增加衰减关系图。

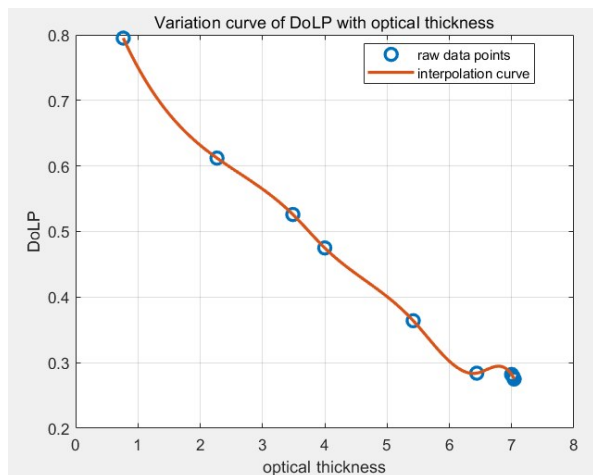


图2 DoLP随光学厚度变化曲线

Fig. 2 The DoLP Curve with the optical thickness

这里给出的横坐标是光学厚度,不同天气条件下,光学厚度对应的实际传播距离与介质的散射和吸收系数有关。

综上,我们建立了传统红外成像系统并考虑了偏振片非理想性红外偏振成像系统的作用距离模型,下面我们将对模型的可靠性进行验证,分析讨论探测器各参数对成像系统探测能力的影响。

3 验证与讨论

由噪声等效偏振度的定义可知,其数值越小,代表偏振探测器的性能越优秀。下面我们对影响红外偏振成像系统探测性能的各因素进行讨论,并设计实验验证本文建立模型的正确性。

3.1 参数讨论

1 偏振片消光比

消光比是衡量偏振片性能的重要参数,市售的大面积偏振片的消光比可以超过200甚至更多。对其他参数按经验进行赋值,从图3可以看到,对于给定设计参数的探测器,偏振片消光比超过20后,随着偏振片消光比的增加,探测器性能上的提升微乎其微。对于分焦平面探测器,为实现更高的消光比,不可避免地要牺牲探测器整体辐射通量。由于辐射通量降低而导致的信噪比损失可能远远超过消光比增加所获得的收益。这一结果同样可以对科研人员研制偏振片提供启发,对需要追求高消光比的偏振片来说,增大透光轴方向的最大透射率要比降低最小透射率更有益于成像系统的性能。

2 探测器井容量

红外探测器的井容量是指探测器像素在饱和之前能够累积的电荷数量的最大值。井容量是衡量红外探测器性能的一个关键参数,井容量通常以电子数(e^-)表示。较大的井容量意味着探测器可以在饱和之前存储更多的电荷,从而能够在更大的亮度范围内准确检测信号。这对于在具有广泛亮度变化的场景中捕获清晰图像至关重要。从图4可以看出,增大探测器井的容量,同样能很好地提高成像系统的偏振探测能力。

然而,井容量的增加可能会导致像素尺寸增大或探测器面积减小,这可能对系统的整体性能产生负面影响。因此,在设计红外探测器时,需要权衡井容量、像素尺寸和其他性能参数,以实现最佳性能。

3 目标偏振度

虽然推导出的噪声等效偏振度公式包含目标偏振度这一参量,但目标的偏振度本身对探测器的噪声等效偏振度没有直接影响。 $NeDolp$ 是一个衡量探测器性能的参数,它主要受探测器内部噪声、电子学和其他系统组件的影响。然而,目标的偏振度会影响探测器接收到的信号强度,从而影响信噪比(SNR)。从图5也可以看出,探测器的 $NeDolp$ 受目标的偏振度影响不大。

4 读取噪声与产生复合噪声比值

读取噪声主要来自于探测器的读出电路、放大器和其他电子元件,它通常在整个光强范围内保持相对恒定。产生复合噪声是由光子的随机到达和电荷生成引起的,与光子数成正比。在低光强下,产生复合噪声通常较小;而在高光强下,它会逐渐变大。通过计算读取噪声和产生复合噪声的比值,可以确定系统的性能瓶颈。如果读取噪声远大于产生复合噪声,这意味着系统在低光强下受到读取噪声的限制。在这种情况下,优化读出电路和放大器等元件可能会带来性能提升。如果产生复合噪声远大于读取噪声,这意味着系统在高光强下受到产生复合噪声的限制。在这种情况下,提高信号处理和光子探测效率可能有助于改善性能。从图6可以看出,降低读取噪声与产生复合噪声比值可以有效提升系统偏振探测能力。

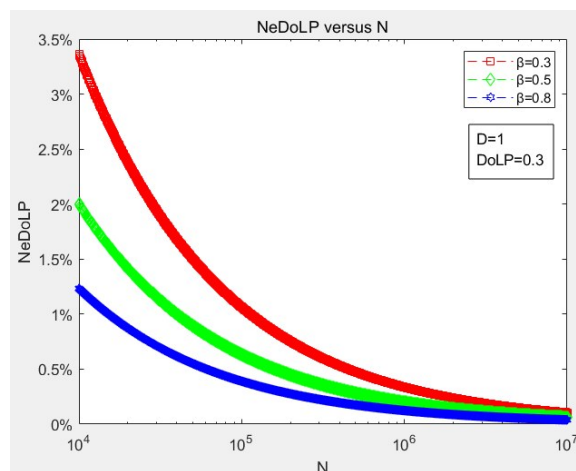


图4 探测器井容量与探测器噪声等效偏振度关系图
Fig. 4 Relationship between N and the noise equivalent degree of linear polarization

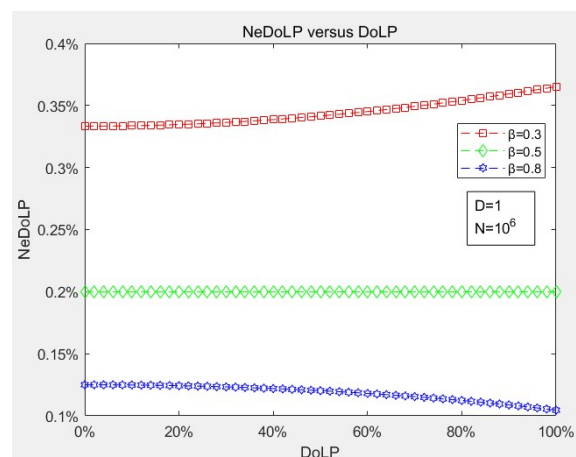


图5 目标偏振度与探测器噪声等效偏振度关系图
Fig. 5 Relationship between the DoLP and the noise equivalent degree of linear polarization

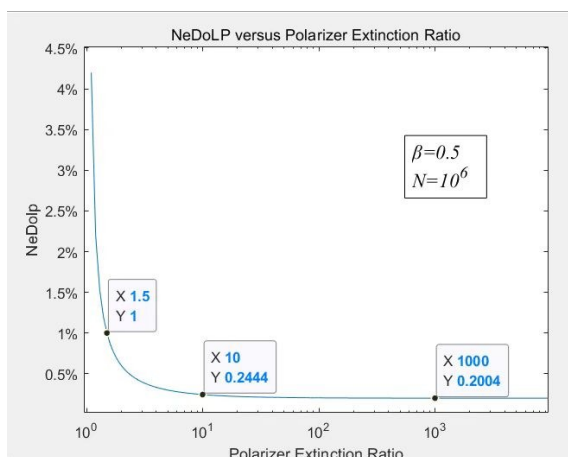


图3 偏振片消光比与探测器噪声等效偏振度关系图
Fig. 3 Relationship between the polarizer extinction ratio and the noise equivalent degree of linear polarization

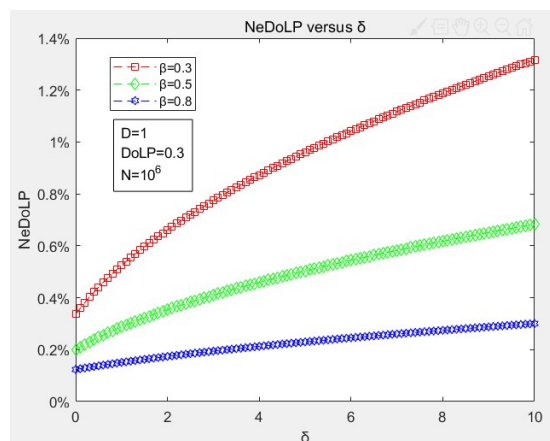


图6 δ 与探测器噪声等效偏振度关系图
Fig. 6 Relationship between δ and the noise equivalent degree of linear polarization

5 信号电子比例

综合图4~6可以看出,提升 β 的数值可有效提高探测器的偏振探测能力,由 β 的定义可知,对于确定容量的探测器, β 的取值主要取决于探测器的各种噪声与积分时间,降低探测器的工作温度、优化探测器结构、减少表面和界面缺陷等途径都可以降低探测器的噪声,调节合适的积分时间也有助于探测系统的性能提升。

3.2 实验验证

根据噪声等效偏振度的定义,利用面源黑体与红外可控部分偏振透射式辐射源创建一组均匀极化场景。如下图7所示,黑体发出的红外辐射,经过两块硅片,发生四次折射,产生了偏振效应,通过调节硅片的角度,即可产生不同线偏振度的红外辐射,其线偏振度的理论值可由下式计算^[14]:

$$DoLP = \frac{\left| \frac{T_{os}^2}{1 - R_{os}^2} - \frac{T_{op}^2}{1 - R_{op}^2} \right|}{\frac{T_{os}^2}{1 - R_{os}^2} + \frac{T_{op}^2}{1 - R_{op}^2}}, \quad (19)$$

其中,

$$T_{os} = \frac{(1 - \rho_s)^2 e^{-\alpha d}}{1 - \rho_s^2 e^{-2\alpha d}}, \quad (20)$$

$$T_{op} = \frac{(1 - \rho_p)^2 e^{-\alpha d}}{1 - \rho_p^2 e^{-2\alpha d}}, \quad (21)$$

$$R_{os} = \rho_s + \frac{\rho_s(1 - \rho_s)^2 e^{-2\alpha d}}{1 - \rho_s^2 e^{-2\alpha d}}, \quad (22)$$

$$R_{op} = \rho_p + \frac{\rho_p(1 - \rho_p)^2 e^{-2\alpha d}}{1 - \rho_p^2 e^{-2\alpha d}}, \quad (23)$$

其中, d 为硅片厚度,取0.75 mm,单晶硅片在波长10 μm 处的复折射率为 $3.4181 + 7.4 \times 10^{-5}i$,吸收系数为 $\alpha=0.92991 \text{ cm}^{-1}$ 。以 5° 为间隔,将面源黑体平面与硅片间的夹角调为 $10^\circ \sim 40^\circ$ 共七组。每组将面源黑体设置为 40°C 和 70°C 两个温度,用国产自主研发的红外分焦平面偏振探测器采取不少于128帧图像并取平均,然后将每组两个温度下相同角度获得的图像作差,以减少实验装置自发辐射和反射辐射对测量结果的干扰,差值图像就是透射部分的红外偏振辐射。对差值图像进行校正和去噪后,即可按公式计算出探测器对均匀极化场景产生的偏振度图像。计算出红外辐射的线偏振度,为减小测量误差,仅取图像中心区域的像元进行分析。该区域像元的标准差就是该成像系统的噪声等效偏振度($NeDoLP$)。探测器具体参数如表2所示。

表2 偏振探测器参数

| 分辨率 | 320×256 |
|----------|--|
| 焦距 | 24 mm |
| 像元尺寸 | 30 μm ×30 μm |
| 光谱响应波段 | 10~11 μm |
| 积分时间 | 典型值为 8 ms,可调 |
| 消光比 | 不小于 10 |
| 典型输出帧率 | 40 Hz |
| 偏置电压 | 7.2 V |
| F 数 | ~2 |
| δ | 1 |
| β | 0.4 |
| 比探测率 | $2 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ |
| 探测器井容量 | 10^6 |

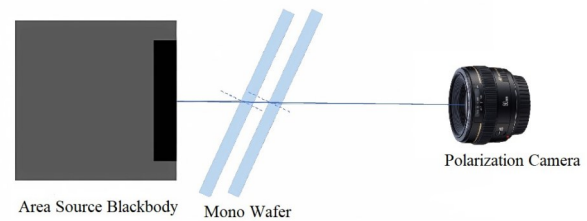


图7 实验示意图

Fig. 7 The schematic diagram of the experiment

利用本文建立的探测器仿真模型(公式(12)~(13))计算出硅片的线偏振度仿真值,公式(19)可计算出硅片线偏振度的理论值,与实验的测量值进行对比,图8展示了三组数据的变化曲线。从图中可以看出,三组数据存在一定偏差,这可能与硅片调节角度误差、面源黑体稳定性、干涉效应、硅片摆放是否平行等因素有关,但在误差允许的范围内,实验验证了偏振探测系统的性能,也证明了本文建立仿真模型的可靠性。

$NeDoLP$ 测量结果如表3所示。

从上表可以看到, $NeDoLP$ 测量值与仿真值的差值基本能控制在5%以内,实验结果再次印证了本文设计模型的可靠性。

3.3 实例计算

应用建立的模型对高2.3 m、宽2.7 m、温度 47°C 、发射率为1的目标的最远探测距离进行预测,目标差分温度 6°C 、背景温度 27°C 、发射率1、目标偏振度30%、背景偏振度1%,使用3.2节中样机的探测器参数,采用文献[18]中介绍的“等效衰减系数-距离”关系的快速逼近法对红外探测系统最远作用距离 R 进行求解,得到表4的结果。

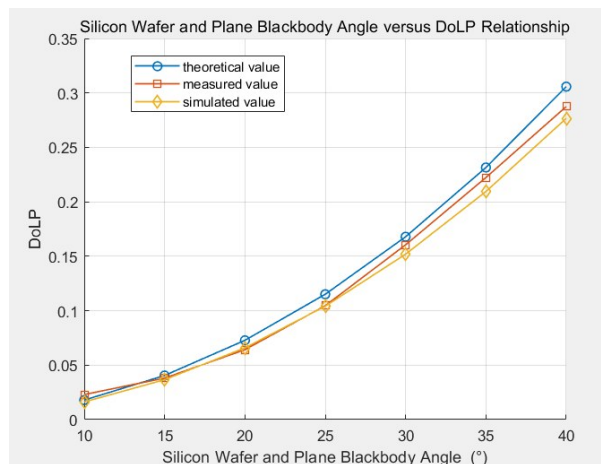


图8 线偏振度理论值、测量值与本文模型仿真值曲线图

Fig. 8 The theoretical, measured and simulated curves of the DoLP

表3 实验结果

Table 3 The experimental result

| 角度 | 偏振度 | NeDoLP 仿真值/ (%) | NeDoLP 测量值/ (%) | 误差 |
|-----|---------|--------------------|--------------------|--------|
| 10° | 0.021 7 | 0.295 8 | 0.304 8 | 2.952% |
| 15° | 0.037 1 | 0.296 2 | 0.302 9 | 2.212% |
| 20° | 0.064 1 | 0.296 7 | 0.309 8 | 4.229% |
| 25° | 0.103 9 | 0.297 1 | 0.312 7 | 4.989% |
| 30° | 0.162 0 | 0.297 4 | 0.310 6 | 4.250% |
| 35° | 0.226 2 | 0.298 4 | 0.310 1 | 3.773% |
| 40° | 0.305 4 | 0.301 6 | 0.312 2 | 3.395% |

表4 红外成像系统的最远作用距离

Table 4 The maximum operating range of the infrared imaging system

| Probability | 0.5 | 0.7 | 0.8 |
|---------------------|-------|-------|-------|
| Detection/(km) | 7.544 | 5.827 | 4.253 |
| Recognition/(km) | 2.305 | 1.746 | 1.255 |
| Identification/(km) | 1.243 | 0.985 | 0.668 |

根据红外探测系统最远探测距离,利用本文第二节提出的方法,得到不同探测概率下红外偏振成像系统最远作用距离结果,如表5所示。

所选例子为目标与背景偏振度差异大于其温

表5 红外偏振成像系统的最远作用距离

Table 5 The maximum operating range of the infrared polarization imaging system

| Probability | 0.5 | 0.7 | 0.8 |
|---------------------|-------|-------|-------|
| Detection/(km) | 9.836 | 7.835 | 6.328 |
| Recognition/(km) | 2.864 | 2.532 | 1.937 |
| Identification/(km) | 1.037 | 0.998 | 0.874 |

差,所以在这种探测场景下红外偏振成像系统的探测能力要优于红外成像系统。探测器的参数不同、探测场景与目标的变化都会对模型的结果产生影响,但本文提供的成像系统作用距离模型可为实际探测中不同应用场景下的成像系统选择提供参考。

4 结论

针对不同的探测场景,红外成像系统与红外偏振成像系统在最远探测距离方面哪个更有优势并没有定论,探测目标的大小、背景与目标的温差与偏振度差、大气透过率、具体探测器的参数等因素都会对成像系统的最远探测距离产生影响。经实验验证,本文所建立的非理想红外偏振成像系统的响应模型是可靠的,可以用于估算成像系统的最远作用距离,针对不同的探测场景,读者可通过实验确定探测器的具体性能参数,利用仿真软件或实验测量的方式获取探测目标的温度与偏振信息,明确探测环境的具体大气参数,利用模型对红外成像系统与偏振成像系统的最远作用距离进行预估,选择更具优势的成像系统。

References

- [1] JIANG Yao-Ting, PAN Li-Na. Military Applications and Prospects of Infrared Imaging Technology [J]. OME Information, 2003 (09): 26-29. (蒋耀庭,潘丽娜. 红外成像技术的军事应用及展望[J]. 光机电信息), 2003(09): 26-29.
- [2] HAO Xiao-Peng, SONG Jian, SUN Jian-Ping, et al. Vacuum radiance temperature national standard facility for Infrared remote sensors of Chinese Fengyun meteorological satellites [J]. Optical Precision Engineering, 2015, 23 (7): 1845-1851. (郝小鹏,宋健,孙建平,等. 风云卫星的红外遥感亮度温度国家计量标准装置[J]. 光学精密工程), 2015,23(7): 1845-1851.
- [3] XIAO Zuo-Chao, LIU Bin, WEI Jian-Cheng. Exploration of the innovative integration of infrared thermal imaging technology and artificial intelligence technology [J]. China Security, 2020 (5): 30-34. (肖作超,刘斌,魏建程. 红外热成像技术与人工智能技术创新融合的探析[J]. 中国安防), 2020 (5): 30-34.
- [4] WU Xue-Peng, WANG Bo. Research on the Protection Technology of Infrared Thermal Imagers in Marine Environment [J]. Precision Manufacturing and Automation, 2019 (1): 1-3+14. (吴学鹏,王波. 海洋环境下红外热像仪防护技术研究[J]. 精密制造与自动化), 2019(1): 1-3+14.
- [5] Jones M W, Persons C M. Performance predictions for micro-polarizer array imaging polarimeters [C]//Polarization Science and Remote Sensing III. SPIE, 2007, 6682: 51-61.
- [6] Preece B, Hodgkin V A, Thompson R, et al. Predicted NETD performance of a polarized infrared imaging sensor [C]//Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Model-

- ing, and Testing XXV. SPIE, 2014, **9071**: 92-101.
- [7] Finney G A, Persons C M, Phillips D J. Performance of a microgrid polarizer array employing a micro-optic registration element [C]//Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XIII. SPIE, 2018, **10655**: 85-95.
- [8] WANG Juan, YANG Chun-Ping, WU Jian. Programming Calculation of MRTD Performance Parameters for Thermal Imaging Systems [J]. Optics and Optoelectronics Technology, 2003, **1** (5): 56-58.(王娟,杨春平,吴健.热成像系统性能参数 MRTD 的编程计算[J].光学与光电技术), 2003,**1**(5):56-58.
- [9] HU Xiao-Qiang, ZHANG Jing. Analysis of the operating range of infrared polarization detection systems [J]. Laser and Infrared, 2016, **46** (6): 709-712.(胡晓强,张晶.红外偏振探测系统的作用距离分析[J].激光与红外), 2016,**46**(6):709-712.
- [10] XIA Run-Qiu, WANG Xia, JIN Wei-Qi, *et al.* Model of the operating range of infrared polarization imaging systems in sea environment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, **45** (03): 74-78.(夏润秋,王霞,金伟其,等.海面环境中红外偏振成像系统作用距离模型[J].红外与激光工程), 2016,**45**(03):74-78.
- [11] Dudzik M C. Electro-optical systems design, analysis, and testing [C]//SPIE. 1993, **4**: 245-298.
- [12] WANG Hong-Pei, LUAN Guang-Qi, TIAN Chao, *et al.* The effect of weather conditions on the performance of infrared assisted driving in vehicles [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, **49** (07): 84-90.(王红培,栾光琦,田超,等.天气条件对车载红外辅助驾驶性能的影响[J].红外与激光工程), 2020,**49**(07):84-90.
- [13] Ratches J A, Vollmerhausen R H, Driggers R G. Target acquisition performance modeling of infrared imaging systems: past, present, and future [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002, **1**(1):31-40.
- [14] YIN Jia-Qi. Research on Key Technologies of Infrared Division-of-Focal-Plane Polarization Imaging Detection [D]. University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics Chinese Academy of Sciences), 2021.(尹佳琪.红外分焦平面偏振成像探测关键技术的研究[D].)中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2021.
- [15] Meyers J P, Schott J R, Brown S D. Incorporation of polarization into the DIRSIG synthetic image generation model [C]//Imaging Spectrometry VIII. SPIE, 2002, **4816**: 132-143.
- [16] ZHOU Cheng-Hao. Modeling and Analysis of Operating Range of Infrared Polarization Imaging System [D]. Harbin Institute of Technology, 2013.(周程灏.红外偏振成像系统作用距离建模与分析[D].)哈尔滨工业大学, 2013.
- [17] Bevington P R, Robinson D K, Blair J M, *et al.* Data reduction and error analysis for the physical sciences [J]. *Computers in Physics*, 1993, **7**(4): 415-416.
- [18] ZHANG Xiao-Lin. On the Influence of Atmospheric Transmittance on Distance in the Distance Equation of Infrared Systems [J]. Laser and Infrared, 2006, **36** (003): 168-170.(张孝霖.论红外系统距离方程中大气透过率对距离的影响[J].激光与红外), 2006, **36**(003): 168-170.
- [19] DUAN Jin, FU Qiang, ZHANG Su, *et al.* Research on the Transmission Characteristics of Polarized Light in Smoke Environment [M]. Beijing: Science Press, 2020.(段锦,付强,张肃,等.烟雾环境下偏振光传输特性研究)[M].北京:科学出版社, 2020.