

引用格式: MEI Chaoyang, CUI Qingfeng, HU Yang, et al. Correction Method of Narcissus Effect of Cooled Infrared System Based on Differential Threshold[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1111003
梅朝阳, 崔庆丰, 胡洋, 等. 差分阈值致冷红外系统冷反射校正法[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1111003

差分阈值致冷红外系统冷反射校正法

梅朝阳, 崔庆丰, 胡洋, 孙林, 高旭东, 郑汉青

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要: 致冷红外系统的设计无法避免冷反射问题, 通常需要复杂化光学系统来减弱冷反射的影响。通过分析致冷红外系统的冷反射特性, 提出差分阈值冷反射校正法, 可以放宽光学设计阶段对冷反射的限制, 不用特意考虑冷反射。系统优化完成后进行光线追迹, 以模拟真实场景中的冷反射现象, 再通过本方法消除冷反射。设计了致冷红外光学系统, 采用该方法处理后, 从主观上看, 图像明显清晰, 从客观上看, 多个图像质量评价函数均有所提高。结果表明, 该方法可以有效减弱致冷红外系统冷反射, 简化光学系统设计, 对系统小型化、轻量化具有重要意义。

关键词: 致冷红外系统; 冷反射; 差分阈值; 光线追迹; 图像复原

中图分类号: O435

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215011.1111003

Correction Method of Narcissus Effect of Cooled Infrared System Based on Differential Threshold

MEI Chaoyang, CUI Qingfeng, HU Yang, SUN Lin, GAO Xudong, ZHENG Hanqin

(Changchun University of Science and Technology, School of Opto-Electronic Engineering,
Changchun 130022, China)

Abstract: The design of the cooled infrared system can not avoid the problem of cold reflection, so it is necessary to complicate the optical system to weaken the influence of cold reflection. By analyzing the cold reflection characteristics of the cooled infrared system, the differential threshold cold reflection correction method is proposed, which can relax the restrictions on the cold reflection in the optical design stage, without considering the cold reflection. After the system is optimized, ray tracing is carried out to simulate the cold reflection phenomenon in the real scene, and then the cold reflection is eliminated by this method. A cooled infrared optical system is designed. After using this method, the image is clear subjectively, and many image quality evaluation functions are improved objectively. The results show that this method can effectively reduce the cold reflection of the cooled infrared system, simplify the design of the optical system, and is of great significance to the miniaturization and lightweight of the system.

Key words: Cooled infrared system; Narcissus effect; Differential threshold; Ray tracing; Image restoration

OCIS Codes: 110.4850; 220.4830; 040.3060; 290.2648; 100.3020

0 引言

设计致冷红外光学系统^[1-5]时,冷反射(Narcissus)现象^[6-8]是必须考虑的问题。致冷红外探测器一般都

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(No.51-H34D01-8358-13/16)

第一作者: 梅朝阳(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计、计算成像。Email: John_mcy@163.com

导师(通讯作者): 崔庆丰(1954-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学设计、衍射光学。Email: qf_cui@163.com

收稿日期: 2021-04-06; 录用日期: 2021-07-15

<http://www.photon.ac.cn>

置于杜瓦瓶中,工作温度为 77 K,而所拍摄景物的场景温度为 300 K 左右。冷反射现象可以理解为从杜瓦瓶中发出的冷光线穿过冷窗,被光学系统的光学表面反射后又返回到杜瓦瓶中,到达探测器上,通常表现为在探测器中心叠加一块黑斑,使图像中心的大部分细节丢失,严重影响光学系统的成像质量。

在致冷红外光学系统设计中,控制冷反射的强度往往与提高光学系统像质和满足边界条件相互矛盾,完全从光学设计的角度控制各个光学表面的冷反射会增加光学系统设计压力。为了对冷反射进行定量分析和计算,2008年,张葆等^[9]提出了利用两点温度校正红外图像的非均匀性;2016年,任国栋等^[10]得到探测器平面“冷斑”的大小和平均辐照度;杨敏等^[11]提出一种消除红外偏振成像冷反射的方法;2018年,贾国伟^[12]提出了一种基于单次和多次校正差分的红外偏振成像中的冷反射去化方法,但是该方法并没有考虑图像阈值的影响,处理完之后会留有一个亮斑,使原图像的细节变得模糊。2020年,白亚烁^[13]分析了高动态范围红外图像的特点,提出多种冷反射抑制及增强显示技术。

本文分析了致冷红外光学系统的冷反射特性,提出了差分阈值冷反射校正法。该方法结合了前期光学系统设计过程,是一种光学图像联合设计方法。仿真实验结果表明,该方法能够准确地模拟冷反射对图像造成的影响,不给前端光学系统增加设计压力,在尽可能多的保留图像细节的前提下对冷反射造成的图像模糊进行消除,对系统小型化、轻量化具有重要意义。

1 基本原理和方法

1.1 冷反射原理

冷反射是致冷红外光学系统中特有的一种噪声或者干扰,设计时必须考虑,致冷红外光学系统的冷反射效应可以通过特征量 YNI 来表示。冷反射产生的原理为:如果将红外光学系统的致冷探测器看作冷光源,并将从冷光源中发出的光线视为冷光线,追迹从致冷探测器中心发出的边缘光线,当冷光线垂直入射到光学系统的透镜表面(如图 1(a)中的面 2)或冷光线汇聚在透镜表面(如图 1(b)中的面 4)时,根据光路可逆原理,冷光线会被表面反射,重新聚焦到焦平面上。从图 1(a)可以看出,当边缘冷光线在透镜表面上的入射角为 0° 时,冷反射现象最明显,从图 1(b)可以看出,当边缘冷光线在透镜表面的入射高度为 0° 时,冷反射现象最明显。

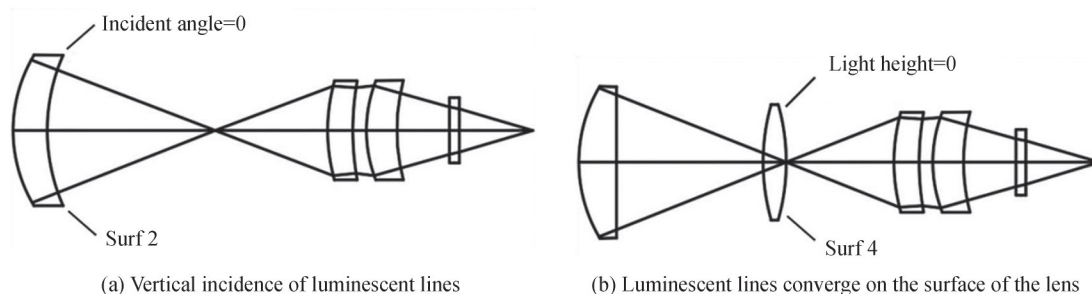


图 1 红外光学系统的冷反射现象
Fig.1 Narcissus effect of infrared optical system

1.2 冷反射研究方法

在致冷红外光学系统中,不可避免地会产生冷反射问题,本研究提出一种差分阈值^[14]冷反射校正法,旨在针对致冷红外光学系统设计所特有的成像缺陷,即冷反射,对图像进行模拟重建并复原,以减弱冷反射所造成的图像模糊。所提算法流程如图 2。

首先,利用光学设计软件搭建致冷红外光学系统,通过优化使系统达到较好的成像质量。其次,通过冷反射分析,确定冷反射最严重的几个面,再通过限制将该系统冷反射尽量控制在较少的表面,以降低后期追迹模型的建立难度,同时保持较好的成像质量,这就完成了光学系统的前端设计。再将系统导入 Tracepro 软件^[15]中,以探测器为表面光源,追迹得到系统的冷反射光斑辐射强度大小和范围。将其看成是一种非均匀噪声以矩阵形式导入 MATLAB 软件中,使矩阵大小与所拍摄图像的像素相匹配,并添加到原图像中以模拟冷反射图像,最后做差分运算,与此同时对阈值进行处理,最终得到复原之后的图像。

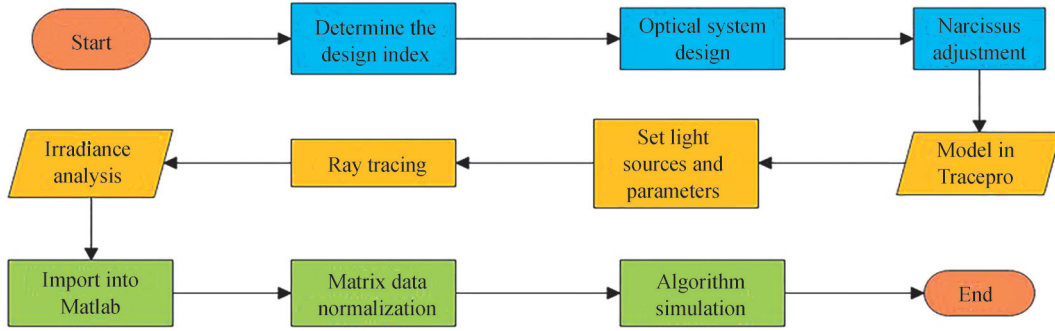


图2 所提方法流程

Fig.2 Flow of proposed method

1.3 冷反射模型构建及去除方法

通过 Tracepro 软件仿真得到的冷反射辐射强度矩阵可表示为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

拍摄的红外图像可表示为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{M1} & Y_{M2} & \cdots & Y_{MN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

定义 α 为归一化校正因子,将 Z 矩阵中的数据转化为对应的灰度值, β 为阈值校正因子,将 Z 矩阵的维度扩充为 $M \times N$ 的 Z' 矩阵,其余位置数据扩充完保留 Y 中对应位置数据,得到受冷反射影响的图像矩阵

$$X = Y - \alpha'Z' + \beta \quad (3)$$

即

$$X = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & Y_{1N} \\ \vdots & Y_{ij} - \alpha Z_{11} + \beta & Y_{i,j+1} - \alpha Z_{12} + \beta & \cdots & Y_{i,j+n-1} - \alpha Z_{1n} + \beta & \vdots \\ \vdots & Y_{i+1,j} - \alpha Z_{21} + \beta & Y_{i+1,j+1} - \alpha Z_{22} + \beta & \cdots & Y_{i+1,j+n-1} - \alpha Z_{2n} + \beta & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & Y_{i+n-1,j} - \alpha Z_{n1} + \beta & Y_{i+n-1,j+1} - \alpha Z_{n2} + \beta & \vdots & Y_{i+n-1,j+n-1} - \alpha Z_{nn} + \beta & \vdots \\ Y_{M1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & Y_{MN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于图像的灰度值在 $0 \sim 255$ 之间,因此,若 $X' = Y - \alpha Z' > 0$,则 $\beta = 0$;否则, β 的取值将 X' 对应位置数据置为 0;则去除冷反射的图像可被分割为两部分,第一部分为大于 0 的情况,直接对图像相加

$$W = X + \alpha Z' \quad (5)$$

$$W = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & Y_{1N} \\ \vdots & Y_{ij} + \beta & Y_{i,j+1} + \beta & \cdots & Y_{i,j+n-1} + \beta & \vdots \\ \vdots & Y_{i+1,j} + \beta & Y_{i+1,j+1} + \beta & \cdots & Y_{i+1,j+n-1} + \beta & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & Y_{i+n-1,j} + \beta & Y_{i+n-1,j+1} + \beta & \cdots & Y_{i+n-1,j+n-1} + \beta & \vdots \\ Y_{M1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & Y_{MN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

第二部分为灰度值等于0的情况,由于图像是稀疏变化的,将这些灰度值取冷反射图像 X 矩阵对应数据周围8个灰度值的平均值,若小于原值,认为所得的平均值是可信的,否则,再取外围16个灰度值的平均值,若小于原值,认为所得的平均值是可信的,否则,将该值置为后一个平均值。后续仿真结果表明,该方法可以尽可能地保留图像细节,同时使图像断层平滑。阈值处理流程如图3,最终将两部分的数据整合到一起,就得到了复原之后的消除冷反射的图像。

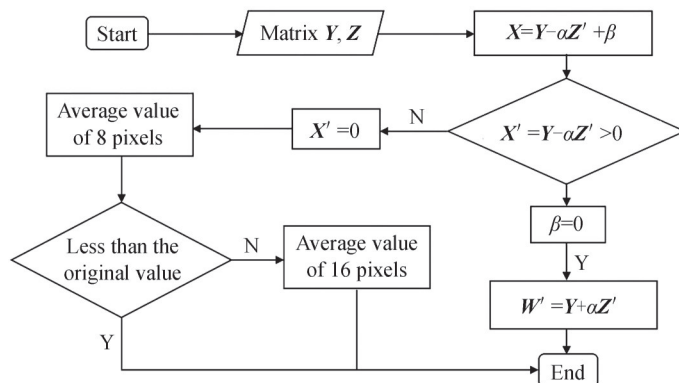


图3 阈值处理流程

Fig.3 Flow of threshold processing

2 设计实例及结果分析

2.1 光学系统设计

基于经典透射式致冷红外系统,结合冷反射特性分析,针对分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 、像元尺寸为 $15 \mu\text{m}$ 的高德红外GAVIN615B型探测器,设计的光学系统^[16]指标如表1。

表1 系统设计指标
Table 1 System design index

Parameter	Content
Focal length/mm	60
F -number	2
Wavelength/ μm	3.7~4.8
Field of view/($^\circ$)	6
MTF	$>0.45@33 \text{ lp/mm}$

通过软件优化后,得到最终致冷红外光学系统的结构,如图4,光学系统共有六块镜片,满足上述各项系统设计指标。

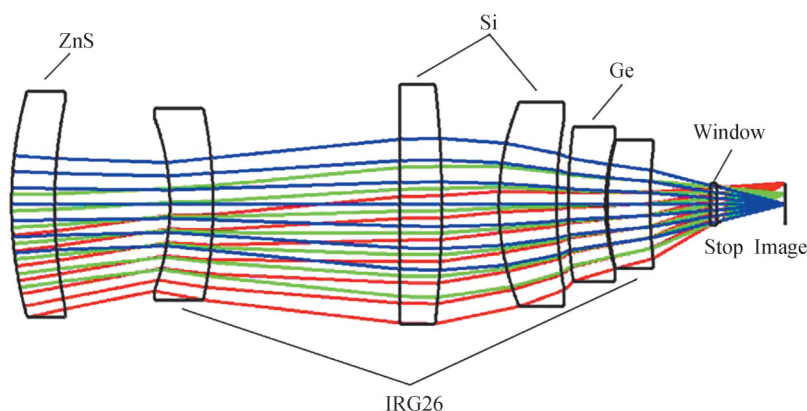


图4 致冷红外光学系统初始结构

Fig.4 The initial structure of cooled infrared optical system

系统各个表面的 YNI 值如表 2。可以看出,系统第 4 面的 YNI 值为 $-0.249\ 92$,其绝对值接近于 0,系统第 2 面和第 11 面的 YNI 值分别为 $0.772\ 15$ 和 $0.955\ 30$,都接近于 1,而其他所有表面的 YNI 值均大于 1。

表 2 初始系统各表面 YNI
Table 2 YNI of each surface of the initial system

Surf	YNI	Surf	YNI
1	1.814 16	8	-4.329 79
2	0.772 15	9	-4.318 81
3	-2.739 44	10	1.213 20
4	-0.249 92	11	0.955 30
5	1.821 16	12	-1.840 64
6	-2.681 29	13	-1.371 60
7	3.144 99	14	-1.296 58

图 5 为所设计系统的调制传递函数 MTF 曲线,所有视场的 MTF 都接近衍射极限,系统成像质量优良。

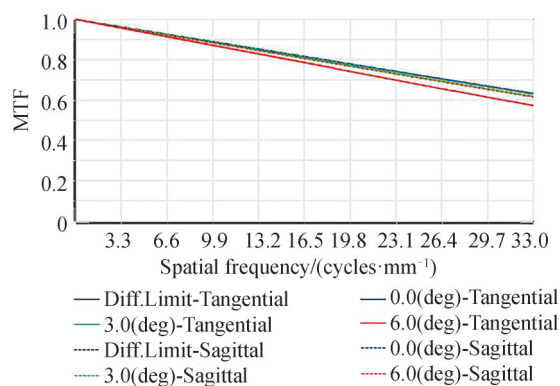


图 5 光学系统 MTF 曲线
Fig.5 MTF curves of optical system

若对冷反射加以限制,将所有表面的 YNI 值均优化到 1 以上,如表 3 所示,从光学设计的角度消除冷反射,在不添加镜片数的前提下,系统的调制传递函数 MTF 曲线会迅速下降,如图 6(a)。因此,在光学设计时需要通过增加镜片数来提高系统成像质量,会增大系统重量和尺寸,使成本变高,不利于系统的小型化、轻量化。为了展示这种消除冷反射的方法,从简化后续光线追迹模型的角度考虑,通过 Zemax 软件优化使系统产生冷反射的面尽量少,同时保证系统的 MTF 曲线几乎没有下降,如图 6(b)。

表 3 限制系统各表面的 YNI
Table 3 Limit the YNI of each surface of the system

Surf	YNI	Surf	YNI
1	2.901 69	8	-5.300 57
2	1.304 08	9	-5.168 70
3	-2.470 01	10	1.701 74
4	1.000 43	11	1.583 10
5	2.282 11	12	-1.594 47
6	-3.013 99	13	-1.465 54
7	4.090 49	14	-1.390 52

本系统的冷反射可看作仅由第 4 个光学表面产生,如表 4,由于冷反射光斑尺寸大于探测器尺寸,其他表面反射的冷光线均匀平铺在探测器表面,对成像像质的影响近似忽略不计。这样,大大简化了后续追迹和模拟过程,有助于快速验证所提方法的有效性。

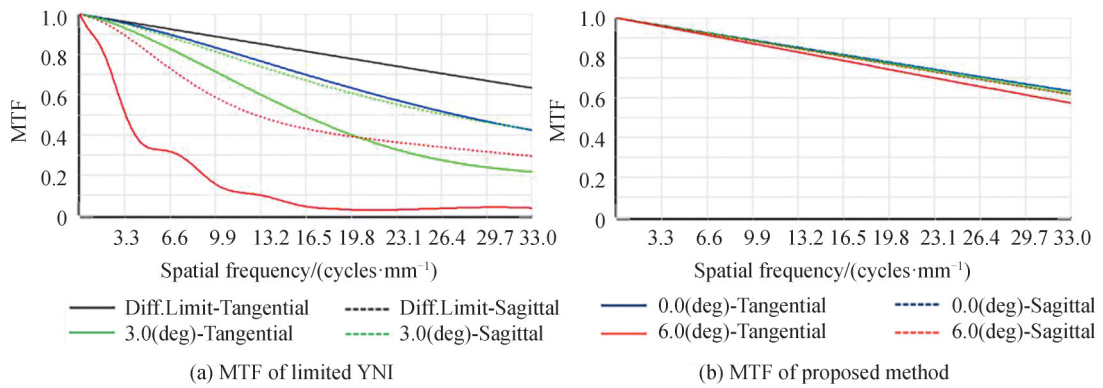


图6 光学系统MTF曲线
Fig.6 MTF curves of optical system

表4 最终系统各表面的YNI
Table 4 YNI of each surface of the final system

Surf	YNI	Surf	YNI
1	2.041 98	8	-4.463 68
2	1.008 98	9	-4.433 69
3	-2.705 89	10	1.264 11
4	-0.100 05	11	1.000 14
5	2.007 39	12	-1.841 61
6	-2.701 34	13	-1.380 99
7	3.328 76	14	-1.305 97

2.2 Tracepro 光线追迹

在 Tracepro 杂散光分析软件中,导入上述光学系统,将探测器设为 77 K 的表面光源,设置第四面材料的反射率为 2%,其余各面透射率均为 99%,通过反向光线追迹得到第四面的反射光线,图 7 为 Tracepro 光线追迹示意图。

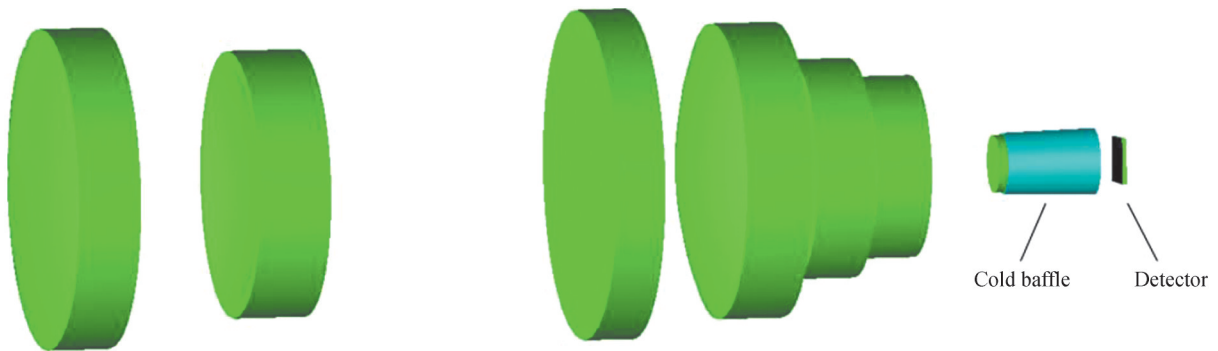


图7 Tracepro 光线追迹示意
Fig.7 Tracepro ray tracing diagram

最后一片矩形元件模拟探测器,黑色表面作为表面光源,在实际系统中杜瓦瓶对光线进行致冷,探测器前面放置的是冷光罩,置于杜瓦瓶前端,杜瓦瓶后端结构在示意图中不予给出,对追迹过程没有任何影响。在 Tracepro 中进行光线追迹,得到冷反射辐射出射度分析图,如图 8,横纵坐标代表探测器中心区域尺寸大小,可以看出冷反射是一种非均匀噪声,从中心到四周,冷反射能量逐渐减弱。

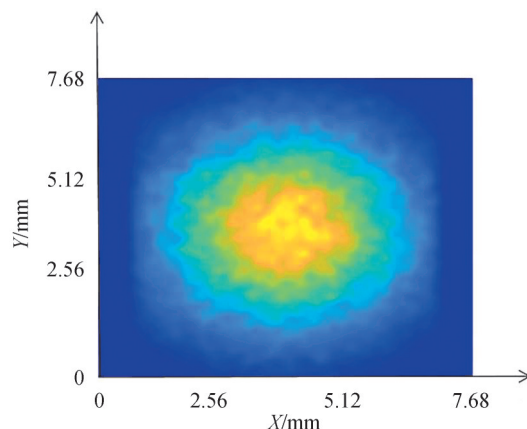


图8 冷反射光斑示意图

Fig.8 Schematic diagram of cold reflection spot

2.3 差分阈值法校正冷反射

将 Tracepro 中得到的冷反射辐射出射度分析图以矩阵形式导入 MATLAB 中,仿真得到的系统冷反射三维模型如图 9,横纵坐标取探测器表面中心正方形区域,可以看出模型基本符合高斯分布模型,再加上冷反射本身的非均匀特性,可以看作一种类高斯非均匀分布,辐射强度由四周向中心不断增大。

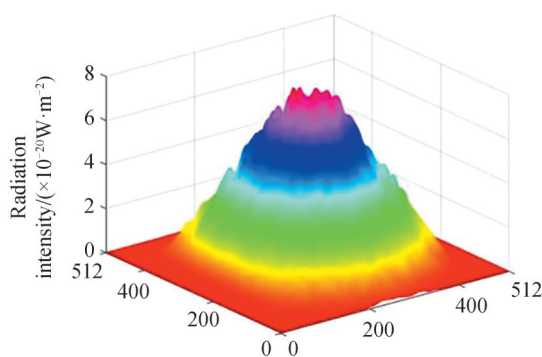
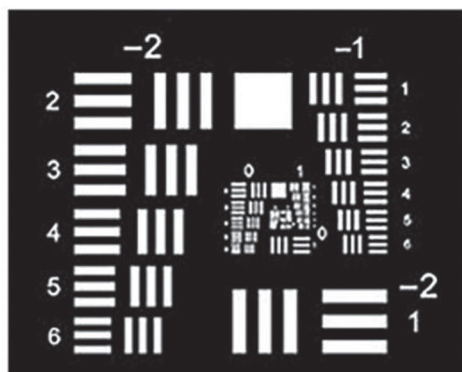


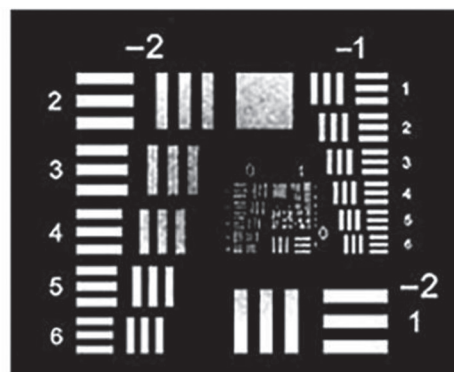
图9 Matlab 模拟图

Fig.9 Simulation diagram of Matlab

首先根据得到的冷反射辐射强度范围和大小,将各个矩阵单元数据与分辨率板灰度值相匹配,得到添加冷反射复原前后的分辨率板对比图,如图 10。其中图 10(b)为添加完冷反射的图像,图 10(c)为不考虑阈值的影响,处理所得的图像,图 10(d)为考虑阈值的影响,本方法处理所得的图像。



(a) Original image



(b) Add narcissus effect image

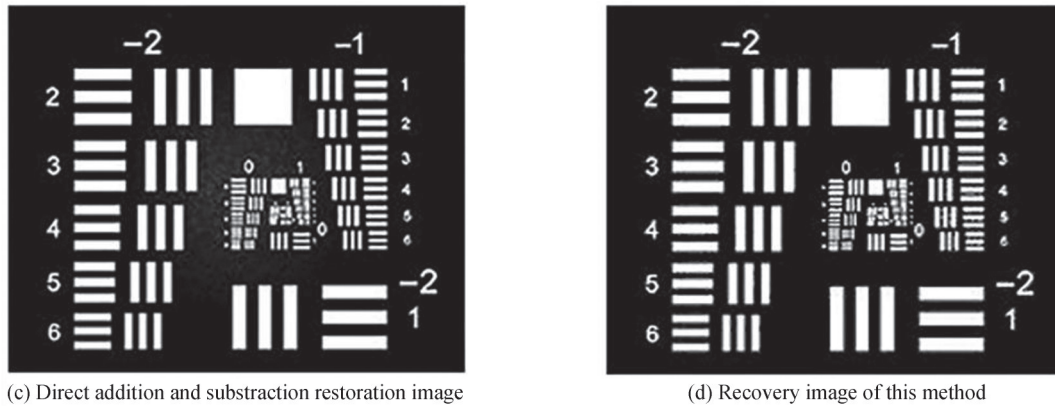


图10 分辨率板成像复原前后结果对比

Fig.10 Comparison of results before and after imaging restoration of resolution plate

接下来根据得到的冷反射辐射强度范围和大小,将各个矩阵单元数据与图像灰度值相匹配,并叠加到已拍摄的红外图像(图11(b))中来模拟致冷红外系统冷反射。首先,不考虑阈值的影响,处理所得的图像如图11(c),然后考虑阈值的影响,所得的图像如图11(d)。

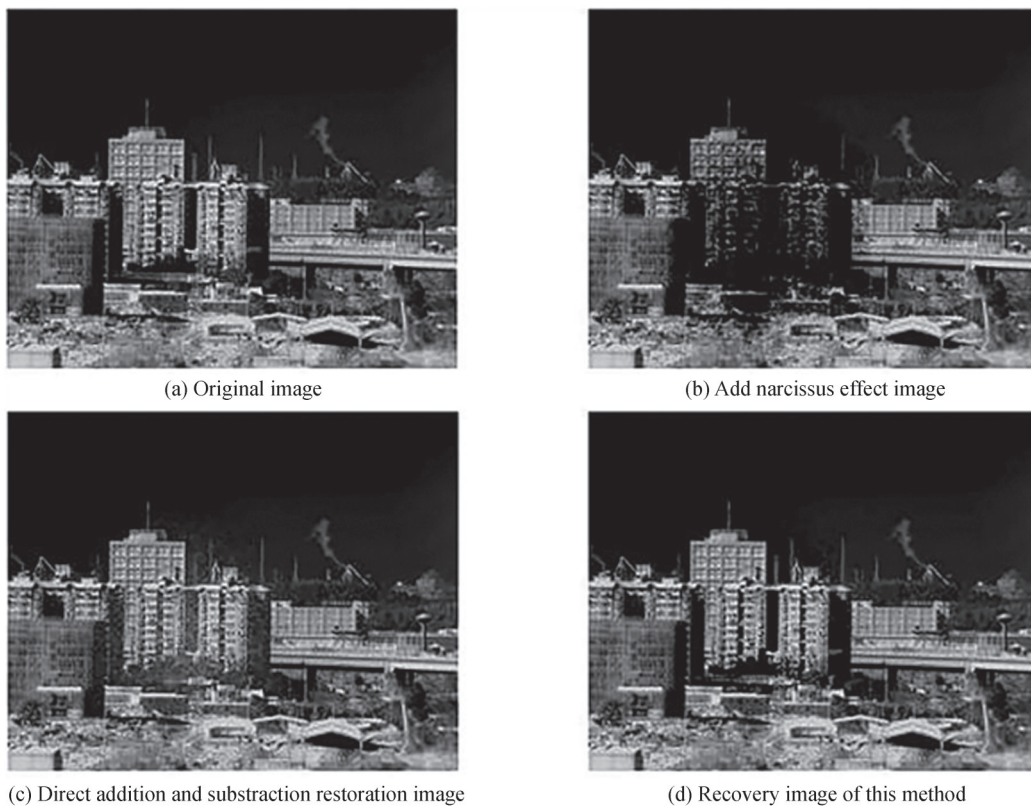


图11 模拟成像复原前后结果对比

Fig.11 Comparison of results before and after simulated imaging restoration

本文分别从主观和客观的角度对处理所得的图像进行评价。主观评价根据人的视觉对图像进行评价,客观评价主要是根据评价函数进行评价。分别使用峰值信噪比(PSNR)、结构相似度(SSIM)^[17]对图像进行客观评价。其中,PSNR数值越大越好,SSIM数值越接近于1,图像复原效果越好。

从主观方面分析:图10(b)为添加完冷反射的图像,并未产生附加的花纹,图10(c)和图11(c)中有很多

像素值因为不考虑图像差分后低于0值的部分,导致很多像素值复原后严重失真,这些部分变白,图像中间的细节模糊不清;经过本文提出的差分阈值冷反射校正法处理后,图像明显清晰,与原图几乎没有差别,如图10(d)和图11(d)所示。

对考虑阈值前后的图像使用以上评价函数进行评价,计算得到的数据结果如表5~6。可以看出:考虑阈值前后分辨率板图像和模拟图像的PSNR值分别提升了20.95%和18.65%,SSIM值分别提升了3.51%和1.82%。从而在客观上证明了本方法可以有效地减弱冷反射的影响。

表5 分辨率板的客观评价

Table 5 Objective evaluation of function value

Evaluation index	Degraded	Ordinary	Proposed
PSNR	18.668 5	22.156 4	26.798 7
SSIM	0.901 0	0.952 4	0.985 8

表6 模拟图像的客观评价

Table 6 Objective evaluation of function value

Evaluation index	Degraded	Ordinary	Proposed
PSNR	24.872 0	31.872 8	37.815 7
SSIM	0.943 4	0.974 8	0.992 5

3 结论

针对致冷红外系统冷反射会造成图像显著模糊的问题,提出一种差分阈值冷反射校正法。本方法属于光学设计与图像处理联合设计,可以减轻前端光学系统设计的压力,准确定量得出致冷红外系统冷反射的大小和范围,对于图像差分完超过阈值的部分进行处理,可以在尽可能保留原图图像细节的前提下对冷反射造成的图像模糊进行消除。仿真结果表明,主观评价上,图像明显清晰,分辨率板和模拟图像的客观评价函数PSNR值分别提升了20.95%和18.65%,SSIM值分别提升了3.51%和1.82%。采用本文所提方法,致冷红外系统冷反射现象已得到很大程度的改善,成像质量明显提高,对系统小型化、轻量化具有重要意义。

参考文献

- [1] SHEN Weimin, XUE Mingqiu, YU Jianjun. Long wave infrared objective with large field of view and large relative aperture [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(4): 77-80
沈为民, 薛鸣球, 余建军. 大视场大相对孔径长波红外物镜[J]. 光子学报, 2004, 33(4): 77-80.
- [2] LIU Yang, AN Xiaoqiang. Analysis and control of cold reflection effect of refrigerated infrared focal plane system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 281-287.
刘洋, 安晓强. 致冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 281-287.
- [3] ALESHKO E I, KURT V I, MIRKHOV N G. Influence of the Narcissus effect on the results of the calibration of test stands for measuring the parameters of optoelectronic devices [J]. Journal of Optical Technology, 2017, 84(3): 197-200.
- [4] ZHANG Liang. Cold reflection phenomenon in staring infrared optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006 (S2): 8-11.
张良. 凝视型红外光学系统中的冷反射现象[J]. 红外与激光工程, 2006(S2): 8-11.
- [5] NIU Jinxing, ZHOU Renkui, LIU Zhaohui, et al. Analysis of stray light from thermal radiation of infrared detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2267-2271.
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2267-2271.
- [6] FAN Yongjie, JIN Weiqi, LIU Chongliang. The new development of forward-looking infrared imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 189-194.
范永杰, 金伟其, 刘崇亮. 前视红外成像系统的新进展[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 189-194.
- [7] LUO Shoujun, XIA Yinhuai, YANG Ningning, et al. Scanning long-wave infrared continuous zoom optical system [J]. Chinese Optics, 2015, 8(1): 107-113.
骆守俊, 夏寅辉, 杨宁宁, 等. 扫描型长波红外连续变焦光学系统[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 107-113.
- [8] ZHANG Shuqing, ZHOU Luyang, LU Min, et al. Design and simulation of a target scene generator with a telecentric structure in the image space [J]. Applied Optics, 2019, 58(9): 2394-2401.
- [9] ZHANG Bao, HONG Yongfeng, SHI Guanghui. Application of nonuniformity correction in suppression of infrared stray radiation [J]. Optical Precision Engineering, 2008, 16 (12): 2421-2428

- 张葆, 洪永丰, 史光辉. 非均匀性校正红外杂散辐射抑制中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12):2421-2428.
- [10] REN Guodong, ZHANG Liang, LAN Weihua, et al. Quantitative analysis of cold reflection of infrared imaging system[J]. Infrared Technology, 2016, 38(4):290-295.
任国栋, 张良, 兰卫华, 等. 红外成像系统冷反射的定量分析[J]. 红外技术, 2016, 38(4):290-295.
- [11] YANG Min, XU Wenbin, TIAN Yuze, et al. Time-sharing infrared polarization imaging system for moving target detection[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15):70-77.
杨敏, 徐文斌, 田禹泽, 等. 面向运动目标探测的分时型红外偏振成像系统[J]. 光学学报, 2020, 40(15):70-77.
- [12] JIA Guowei, YU Xiaofeng, HONG Pu. A method for removing cold reflection in infrared polarization imaging[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2018, 16(5):48-54.
贾国伟, 俞小峰, 洪普. 一种红外偏振成像中的冷反射去化方法[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(5):48-54.
- [13] BAI Yashuo. High dynamic range infrared image cold reflection suppression and enhancement display technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2020.
白亚烁. 高动态范围红外图像冷反射抑制及增强显示技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [14] ZHAO Shengnan, YUAN Sanling, WANG Hao. Threshold behavior in a stochastic algal growth model with stoichiometric constraints and seasonal variation[J]. Journal of Differential Equations, 2020, 268(9):5113-5139.
- [15] MEI Chao, ZHOU Sizhong, ZHANG Hengjin, et al. First-order ghost image analysis method of imaging optical system based on Code V and Tracepro[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4):72-75.
梅超, 周泗忠, 张恒金, 等. 基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶鬼像分析方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4):72-75.
- [16] SMITH W J. Modern optical engineering[M]. ZHOU Haixian, CHENG Yunfang, Transl. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 511-524.
现代光学工程[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 4版. 北京: 化学工业出版社, 2011:511-524.
- [17] HORÉ A, ZIOU D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM[C]. IEEE Computer Society, 2010.