

## 基于高光谱成像技术的微小摄像头检测技术

汪林 张海洋 黄嘉昊 屈嘉惠 赵长明 张子龙

### Tiny camera detection technology based on hyper-spectral imaging technology

WANG Lin, ZHANG Haiyang, HUANG Jiahao, QU Jiahui, ZHAO Changming, ZHANG Zilong

引用本文:

汪林, 张海洋, 黄嘉昊, 等. 基于高光谱成像技术的微小摄像头检测技术[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1107-1114. DOI: 10.5768/JAO202142.0605001

WANG Lin, ZHANG Haiyang, HUANG Jiahao, et al. Tiny camera detection technology based on hyper-spectral imaging technology[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1107-1114. DOI: 10.5768/JAO202142.0605001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 无人机载多光谱侦察效能研究

Study on performance of multi spectral reconnaissance of unmanned aerial vehicle

应用光学. 2017, 38(5): 685-688 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501001>

#### 基于FP微阵列的压缩感知光谱重建研究

Research on compressed sensing spectral reconstruction based on Fabry-Perot micro-array

应用光学. 2021, 42(3): 436-442 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301010>

#### 高光谱遥感现场光谱定标精度验证方法研究

Verification method of spectral calibration accuracy for hyperspectral remote sensors

应用光学. 2017, 38(3): 463-468 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0303006>

#### AOTF成像光谱仪声光晶体光谱传递函数的研究

Study on spectral transfer function based on dual AOTF acousto-optic crystal

应用光学. 2019, 40(2): 202-209 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201004>

#### 水体透射光谱的多特征融合COD含量估算研究

COD content estimation of multi-feature fusion based on water transmitted spectrum

应用光学. 2021, 42(3): 488-493 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0302006>

#### 基于超连续光源的InGaAs探测器相对光谱响应度定标技术

Relative spectral responsivity calibration technology of InGaAs photodetector based on super-continuum light source

应用光学. 2021, 42(4): 709-716 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 06-1107-08

# 基于高光谱成像技术的微小摄像头检测技术

汪林<sup>1,2</sup>, 张海洋<sup>1,2</sup>, 黄嘉昊<sup>1,2</sup>, 屈嘉惠<sup>1,2</sup>, 赵长明<sup>1,2</sup>, 张子龙<sup>1,2</sup>

(1. 北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081; 2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对高光谱成像特点, 提出了一种基于三维特征检测微小摄像头的方案。在空间维利用猫眼效应筛选疑似目标, 在光谱维对结果进行精准判定。依据摄像头结构, 分析了可见光摄像头的反射光谱特征。基于几何光学和辐射度学, 计算和仿真了系统的探测距离。结果表明, 正常工作时, 光功率影响最小探测距离, 目标尺寸影响最大探测距离。搭建了微小摄像头光谱特征验证系统。结果表明, 采用吸收型红外截止滤光片的目标的非反射光占比曲线变化平缓且数值高, 采用反射型红外截止滤光片的目标的非反射光占比曲线可见光部分数值高, 红外部分数值低, 从 700 nm 附近开始下降, 甚至发生突变, 实验数据显示, 突变位置的斜率绝对值是红外波段斜率绝对值的 10 倍以上。实验结果与预期分析的结果一致, 验证了高光谱成像技术检测微小摄像头的可行性。

**关键词:** 高光谱; 微小摄像头; 光谱特征; 成像光谱

中图分类号: TN06; TN29

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0605001

## Tiny camera detection technology based on hyper-spectral imaging technology

WANG Lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Haiyang<sup>1,2</sup>, HUANG Jiahao<sup>1,2</sup>, QU Jiahui<sup>1,2</sup>,  
ZHAO Changming<sup>1,2</sup>, ZHANG Zilong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System (Ministry of Education), Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of hyper-spectral imaging, a scheme for detecting tiny cameras based on three-dimensional features was proposed. The results were accurately determined in the spectral dimension after the suspected target was screened out by the cat's eye effect in the space dimension. According to the camera structure, the reflection spectral characteristics of the visible light camera were analyzed. Based on the geometric optics and radiometry, the detection distance of the system was calculated and simulated. The results show that if the equipment is working properly, the optical power affects the minimum detection distance, while the target size affects the maximum detection distance. A tiny-camera spectral feature verification system was built. The results show that the non-reflective light ratio curve of the target using the absorptive infrared cut-off filter changes smoothly and the value is high. As for the curve of the target using the reflective infrared cut-off filter, the value is high in visible light part while it is low in infrared part, and the curve begins to drop near 700 nm and even mutates where the absolute slope value is more than 10 times as it in the infrared band according to the experimental data. The experimental results are consistent with the expected results of the analysis, which proves the feasibility of hyper-spectral imaging technology to detect tiny cameras.

**Key words:** hyper-spectrum; tiny camera; spectral characteristics; imaging spectrum

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-06-03

基金项目: 国家科学化训练基地建设关键技术与示范基金 (2018YFF0300802)

作者简介: 汪林 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光探测与成像方面的研究。E-mail: 2638654373@qq.com

通信作者: 张海洋 (1981—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事新型激光器、激光探测与成像以及激光雷达与微波雷达交叉领域等方面的研究。E-mail: ocean@bit.edu.cn

## 引言

微小摄像头因成本低廉得到广泛应用,甚至被非法使用,严重威胁人们的隐私安全甚至重要场合的信息安全。检测隐藏摄像头的方式众多,目前光学方面主要是猫眼效应<sup>[1-2]</sup>,其设备结构简单,但检测微小镜头多有不足:检测高亮光斑,对形状尺寸与镜头相近的干扰物容易误判;进入微小镜头的激光少,反射光弱,信噪比低;离焦、倾斜等会降低光斑能量。为解决猫眼效应检测方式的不足之处,提出一些其他光学探测手段,例如光斑形态学特征识别<sup>[3-6]</sup>、激光脉冲检测<sup>[7]</sup>、空间调制激光扫描<sup>[8]</sup>、偏振激光检测<sup>[9]</sup>、光学色差检测<sup>[10-11]</sup>及单光子计数检测<sup>[12-13]</sup>等,利用镜头反射光谱特征的检测方法未见相关技术报道。

成像光谱仪采集的图像包含三维信息,即二维空间信息以及第三维的光谱信息,可将猫眼效应作为辅助探测手段,检测空间成像的高亮光斑,初步确定目标的成像位置,从而针对性地分析光谱,减少计算量,加快识别速度,提高系统探测效率,降低虚警率。实验时,利用宽光谱光源照明微小摄像头,通过成像光谱仪收集反射光的图像和光谱信息,利用猫眼效应初步筛查探测目标,提取高亮位置光谱,依据光谱特征识别摄像头。

从光谱特征、推扫式成像光谱仪结构以及探测距离等方面阐述了探测原理,通过功率传输和物像关系计算探测范围,针对不同直径的照明光束,仿真了探测面辐照度与探测距离的关系。实验探究了部分典型可见光摄像头的反射光谱,以非反射光的占比曲线进行特征分析,采用最小二乘直线拟合,研究了曲线的变化趋势。

## 1 检测原理

### 1.1 光谱特征

CCD或CMOS在可见光成像系统中应用广泛,但它们对可见光和近红外光均比较敏感,为防止红外成像对可见光成像造成干扰,许多可见光成像系统采用红外截止滤光片(IR-cut filter,以下简称IRCF)。

IRCF按原理可分为2类<sup>[14-15]</sup>:吸收型和反射型。吸收型滤光片通过材料吸收滤除红外光,其中蓝玻璃滤光片广泛应用于摄像头,其光谱透过率如图1所示。蓝玻璃易潮解,通常在表面镀可见光增透膜,保护材料及增加可见光透过率;反射型

IRCF在普通白玻璃上镀红外截止膜,对红外光高反射,通常在镜头上镀可见光增透膜。

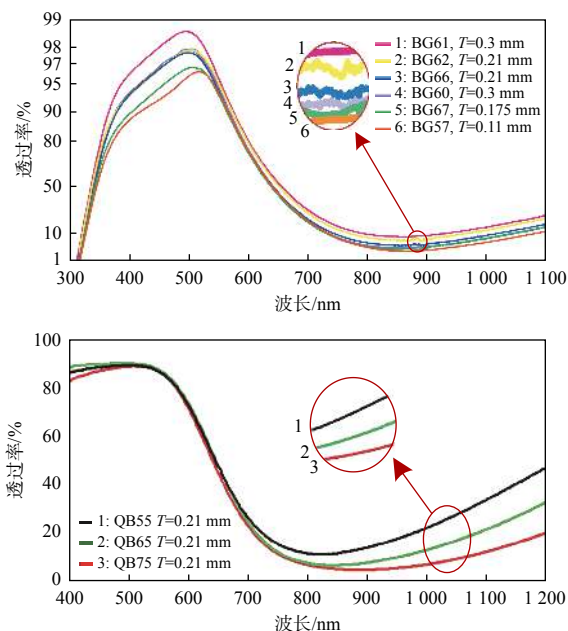


图1 典型蓝玻璃滤光片透过率曲线图

Fig. 1 Transmittance curves of typical blue glass filters

在宽光谱光源的照射下,反射光谱存在2种情况:吸收型滤光片,由于红外光被吸收,可见光有较高透过率,反射光谱中各个波段的能量均较低,若在滤光片上镀可见光增透膜,在700 nm附近可能存在能量突变;反射型滤光片,光学系统对红外光高反射,对可见光高透过,反射光谱中可见光波段能量低,红外波段能量高,交界处存在能量阶跃。

### 1.2 推扫式高光谱相机结构及参数

实验采用光栅色散型推扫式高光谱相机 GaiaField-F-V10,其结构如图2所示,包含前置系统、狭缝、准直系统、衍射光栅、成像系统及面阵 CCD 探测器,其参数如表1所示。

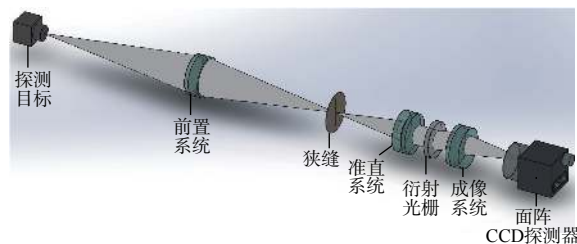


图2 推扫式高光谱相机 GaiaField-F-V10 结构图

Fig. 2 Structure diagram of sweeping hyper-spectral camera GaiaField-F-V10

表 1 推扫式高光谱相机 GaiaField-F-V10 参数及规格

Table 1 Parameters and specifications of sweeping hyper-spectral camera GaiaField-F-V10

参数	规格
光谱范围/nm	400~1000
光谱分辨率/nm	4
有效狭缝长度/mm	8.98
狭缝宽度/ $\mu\text{m}$	50
数值孔径	$F/2.8$
通光效率/%	>50
透镜焦距/mm	23
透镜视场角/( $^\circ$ )	19.8
CCD像元(空间维 $\times$ 光谱维)	1392 $\times$ 1040
像元尺寸/ $\mu\text{m}$	6.45 $\times$ 6.45

### 1.3 成像光谱仪物像关系计算

目标在成像光谱仪探测器上所成像不小于 1 个像元,才能被提取光谱。狭缝与面阵探测器满足物像关系,狭缝成像在面阵探测器上;目标与狭缝满足物像关系,狭缝位于准直系统的前焦面。目标经前置系统成像在准直系统的前焦面<sup>[16-17]</sup>,忽略衍射,狭缝等效于孔径光阑。

已知 GaiaField-F-V10 前置系统、狭缝以及面阵 CCD 探测器参数,准直系统、衍射光栅及成像系统参数未知。为简化计算,将目标与面阵探测器的物像关系转换为目标与狭缝的物像关系,忽略狭缝衍射。探测目标与狭缝之间的物像关系如图 3 所示。

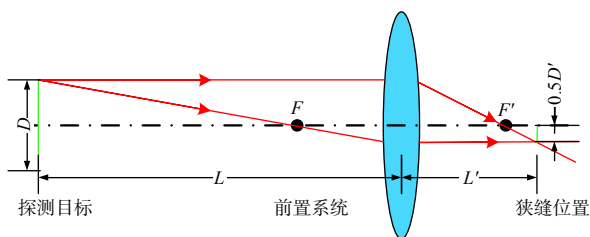


图 3 探测目标与狭缝之间的物像关系

Fig. 3 Object-image relationship between detection target and slit

如图 3 所示,设探测目标直径为  $D$ ,前置系统焦距为  $f$ ,目标垂直于光轴,物距为  $L$  ( $L > f$ ),像距为  $L'$ ,狭缝位置探测目标像的直径  $D'$  为

$$D' = \frac{f}{L-f} D \quad (1)$$

探测目标在面阵 CCD 探测器上像的大小  $D''$  为

$$D'' = \beta D' = \frac{\beta f}{L-f} D \quad (2)$$

式中:  $\beta$  为准直系统、衍射光栅以及成像系统整体的垂轴放大率。

假设狭缝在面阵 CCD 探测器上空间成像的长度  $l'$  为探测器空间维的  $2/3$ ,已知空间维像元数  $n = 1392$ ,像元宽度  $d = 6.45 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ,则  $l'$  为

$$l' = \frac{2nd}{3} = 5.9856 \text{ mm} \quad (3)$$

已知狭缝的有效长度  $l = 8.98 \text{ mm}$ ,则  $\beta$  为

$$\beta = \frac{l'}{l} = \frac{7482}{11225} \quad (4)$$

设  $D = 5 \text{ mm}$ ,已知前置系统焦距  $f = 23 \text{ mm}$ ,将参数代入(1)式得:

$$D' = \frac{115}{L-23} \quad (5)$$

将(4)式和(5)式代入(2)式得:

$$D'' = \frac{172086}{2245(L-23)} \quad (6)$$

当目标在面阵探测器上的像不小于 1 个像元时,则  $D'' \geq d$  且  $L > f$ ,代入(6)式得

$$23 \text{ mm} < L \leq 11907.187 \text{ mm} \quad (7)$$

当目标距高光谱相机  $0.023 \text{ m} \sim 11.907 \text{ m}$  时,在面阵探测器上像的大小大于 1 个像元,反射光谱可被提取。

### 1.4 探测功率计算

为简化计算,假设光谱宽度为  $400 \text{ nm}$ ,照明光束为平面波,探测目标为朗伯体,可将探测目标视为均匀发光源。目标大小远小于探测距离,忽略反射面弯曲,视为均匀发光平面,如图 4 所示。

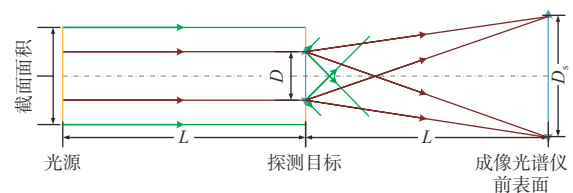


图 4 光路传输示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical path transmission

设波长为  $\lambda$  的光束,总功率为  $P(\lambda)$ ,探测目标处光功率  $P_1(\lambda)$  为

$$P_1(\lambda) = \frac{\pi \tau_a(\lambda, L) D^2 P(\lambda)}{4S} \quad (8)$$

式中:  $\tau_a(\lambda, L)$  为波长  $\lambda$  的光传输  $L$  距离的大气损耗;



$S$ 为照明光束截面面积; $D$ 为探测目标直径。设反射系数为 $R(\lambda)$ ,成像光谱仪的通光口径为 $D_s$ ,探测距离为 $L(L \gg D)$ ,前置系统前表面接收的光功率 $P_2(\lambda)$ 为

$$P_2(\lambda) = \frac{R(\lambda)\tau_a(\lambda,L)D_s^2 P_1(\lambda)}{4L^2} = \frac{\pi\tau_a(\lambda,L)^2 R(\lambda)D_s^2 D^2 P(\lambda)}{16SL^2} \quad (9)$$

计算最小探测功率,取光学系统损耗最大值 $\tau_s$ ,则面阵探测器接收的光功率 $P_3(\lambda)$ 为

$$P_3(\lambda) = \tau_s P_2(\lambda) = \frac{\pi\tau_s\tau_a(\lambda,L)^2 R(\lambda)D_s^2 D^2 P(\lambda)}{16SL^2} \quad (10)$$

由于 $L$ 近,忽略大气影响,令 $\tau_a(\lambda,L) = 1$ ;已知GaiaField-F-V10光学系统最小透过率为50%,即 $\tau_s = 0.5$ ;设 $D = 5 \text{ mm}$ , $S = \pi \times 250^2 \text{ mm}^2$ , $D_s = 20 \text{ mm}$ , $R(\lambda)_{\min} = 0.15$ ,则

$$P_3(\lambda) = \frac{3P(\lambda)}{4000L^2} \quad (11)$$

面阵 CCD 探测器上的辐照度 $E(\lambda)$ 为

$$E(\lambda) = \frac{P_3(\lambda)}{\pi \cdot \left(\frac{D''}{2} \times 10^{-3}\right)^2} \quad (12)$$

联立(6)式、(11)式及(12)式得:

$$E(\lambda) = \frac{1260006250(L-23)^2 P(\lambda)}{2467799283\pi L^2} \quad (13)$$

设光源总功率 $P = 15 \text{ W}$ ,已知GaiaField-F-V10的光谱分辨率为 $4 \text{ nm}$ ,计算 $4 \text{ nm}$ 波段内的平均光功率为

$$P(\lambda) = \frac{15}{400} \times 4 = 0.15 \text{ W} \quad (14)$$

考虑实际情况下,光谱能量不可能均匀分布,设最小光谱功率为平均值的 $1/4$ ,即

$$P(\lambda)_{\min} = 0.0375 \text{ W} \quad (15)$$

将(15)式代入(13)式,得到 $E$ 关于 $L$ 的函数,更改照明光束截面直径,绘出 $E$ 关于 $L$ 的曲线,如图5所示。

图5显示,当探测距离趋近 $0.023 \text{ m}$ 时,辐照度趋近于 $0$ 。辐照度与探测距离正相关,当探测距离 $L > 1 \text{ m}$ 时,辐照度几近饱和。假设面阵探测器接收的满足信号处理条件的最低辐照度为 $0.003 \text{ W/m}^2$ ,照明直径为 $0.5 \text{ m}$ ,则最小探测距离 $L_{\min} = 77.07 \text{ mm}$ ,结合(7)式得到:

$$77.07 \text{ mm} \leq L \leq 11907.187 \text{ mm} \quad (16)$$

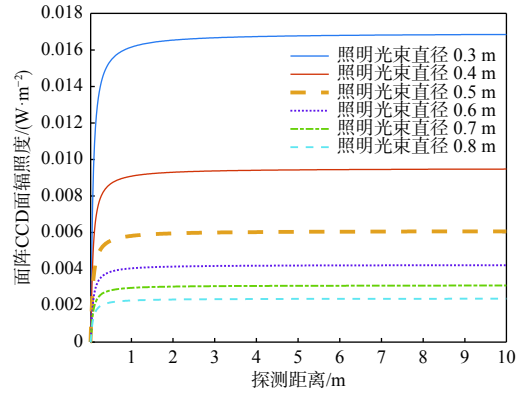


图5 面阵 CCD 探测器辐照度与探测距离关系曲线

Fig. 5 Relation curves of area array CCD detector irradiance and detection distance

## 2 实验与分析

### 2.1 实验装置

实验装置如图6所示,包含宽光谱光源、高光光谱相机、分束镜及计算机。宽光谱光源照射微小摄像头,光线反射后进入高光光谱相机,计算机处理空间和光谱数据,识别探测目标,并控制宽光谱光源和高光谱相机。实验验证光谱特征能否作为微小摄像头的判别依据,较近的探测距离便于选中成像范围,提取光谱特征。实验中探测距离设置为 $0.5 \text{ m}$ 。

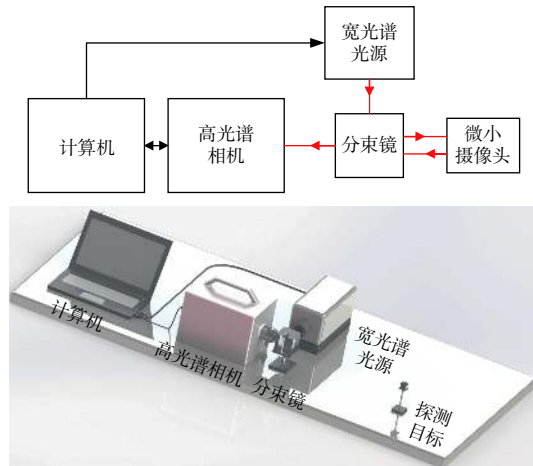


图6 实验装置结构

Fig. 6 Structure diagram of experimental device

检测多种微小目标,如表2所示,包含4个手机摄像头,1个常规摄像头,2个微小摄像头,1个灯泡中的微小摄像头,1个强反射白色金属,如表2所示,已知目标A、B、D、E、G中包含反射型IRCF,目标C、F中包含吸收型IRCF。

表 2 探测目标说明

Table 2 Description of detection targets

序号	孔径	类型	IRCF类型
A	$f/2.0$	手机前置摄像头	反射型
B	$f/2.2$	手机后置摄像头	反射型
C	$f/2.4$	手机前置摄像头	吸收型
D	$f/2.8$	手机后置摄像头	反射型
E	$f/2.0$	常规摄像头	反射型
F	$f/1.0$	微小摄像头	吸收型
G	$f/1.0$	微小摄像头	反射型
H	$f/1.0$	灯泡中的微小摄像头	吸收型
I		白色金属	

## 2.2 实验结果及分析

通过非反射光(透射或吸收)的光谱功率  $P_{nr}(\lambda)$  在照射光谱功率  $P_{sr}(\lambda)$  中的占比  $\eta(\lambda)$  反映滤光情况,  $\eta(\lambda)$  在可见光波段表示透过率, 在红外波段, 若采用反射型 IRCF,  $\eta(\lambda)$  表示透过率, 其数值低; 若采用吸收型 IRCF,  $\eta(\lambda)$  表示吸收率, 其数值高。非反射光占比计算如(17)式所示:

$$\eta(\lambda) = \frac{P_{nr}(\lambda)}{P_{sr}(\lambda)} = \frac{P_{sr}(\lambda) - P_r(\lambda)}{P_{sr}(\lambda)} \quad (17)$$

式中:  $P_r(\lambda)$  为反射光谱功率。目标位置的照射光谱难以获得, 通过将光源光谱和  $P_r(\lambda)$  曲线在两端进行数值匹配, 得到  $P_{sr}(\lambda)$ , 因此透过率或吸收率曲线(下文简称  $\eta(\lambda)$  曲线)两端误差较大。

对  $\eta(\lambda)$  曲线分段直线拟合, 计算斜率, 并研究其变化趋势。图 7、图 8、图 9、图 10 表明,  $\eta(\lambda)$  曲线在 500 nm 以下和 900 nm 以上的变化趋势不稳定, 误差大, 拟合波长范围选为 500 nm~900 nm。实验获得的  $\eta(\lambda)$  曲线, 均在 500 nm~600 nm 和 700 nm~900 nm 范围内, 变化小, 部分曲线在 600 nm~700 nm 范围内存在突变。为体现突变, 将波长范围细分为 500 nm~600 nm, 600 nm~625 nm, 625 nm~650 nm, 650 nm~675 nm, 675 nm~700 nm, 700 nm~900 nm 等 6 段, 采用最小二乘法拟合。实验所得可见光成像系统  $\eta(\lambda)$  曲线的分段直线拟合斜率如表 3 所示。

表 3 可见光成像系统  $\eta(\lambda)$  曲线的分段直线拟合斜率Table 3 Segmented straight line fit slope of  $\eta(\lambda)$  curve of visible light imaging system( $\times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$ )

探测目标序号	500 nm~600 nm		600 nm~700 nm		700 nm~900 nm		500 nm~600 nm 曲线突变
	斜率	变化趋势	最小斜率		斜率	变化趋势	
A	3.6	缓慢上升	-0.78		-9.5	快速下降	无
B	3.3	缓慢上升	-70		2.3	缓慢上升	较大
C	3.7	缓慢上升	-14		-1.2	缓慢下降	较小
D	1.9	缓慢上升	-13		-17	剧烈下降	无
E	3.4	缓慢上升	-48		0.57	缓慢上升	较大
F	2.6	缓慢上升	-2.3		-2.4	缓慢下降	无
G	3.6	缓慢上升	-2.8		-8.4	快速下降	无
H	-3.1	缓慢下降	-3.8		-2.1	缓慢下降	无

B、D 分别为智能手机和老式手机的后置摄像头, 透射或吸收情况如图 7 所示, 可见光部分的透过率高, 红外部分反射率高。B 的  $\eta(\lambda)$  曲线在 700 nm 骤然下降, D 的曲线变化平缓, 两者在可见光和红外光的  $\eta(\lambda)$  值均差异明显。

如表 3 所示, B 和 D 在可见光部分的透过率呈上升趋势, 但幅度小。B 的拟合直线在 600 nm~700 nm 之间, 最小斜率为  $-7.0 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$ , 绝对值大, B 的  $\eta(\lambda)$  曲线发生突变, 镀膜较好; B 在 700 nm~900 nm 波段, 斜率接近 0, 吸收率曲线较稳定, 而 D 的斜率为负且绝对值较大, 持续波段较长, 吸收率曲线持续以较快速度下降。可判断 B 和 D

包含反射型 IRCF。

手机前置摄像头透射或吸收情况如图 8 所示, A、C 来自智能手机。A 在可见光和红外的  $\eta(\lambda)$  值差异较明显, 曲线在 700 nm 附近缓慢下降。C 在整个波段的  $\eta(\lambda)$  值较高, 700 nm 附近有小突变, 整体上可见光波段的  $\eta(\lambda)$  值更大。

如表 3 所示, A、C 在可见光部分的透过率呈缓慢上升趋势。C 的拟合直线在 600 nm~700 nm 存在数值为负、绝对值较大的斜率, 值为  $-1.4 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$ , C 的  $\eta(\lambda)$  曲线在该波段有较小突变; C 在 700 nm~900 nm 波段, 斜率趋近 0, 吸收率曲线基本不变。A 的斜率在红外波段为负值, 绝对值较

大,吸收率曲线较快下降。判定目标A包含反射型IRCF,目标C采用吸收型IRCF,C镀有可见光增透膜。

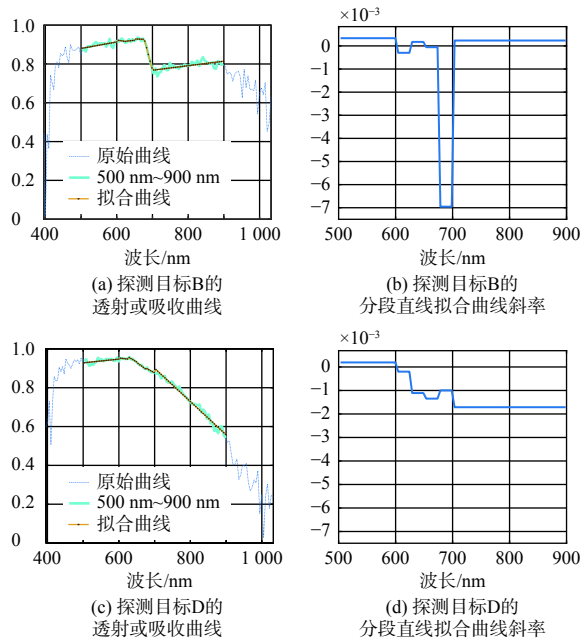


图7 手机后置摄像头透射或吸收情况

Fig. 7 Transmission or absorption of rear camera of phone

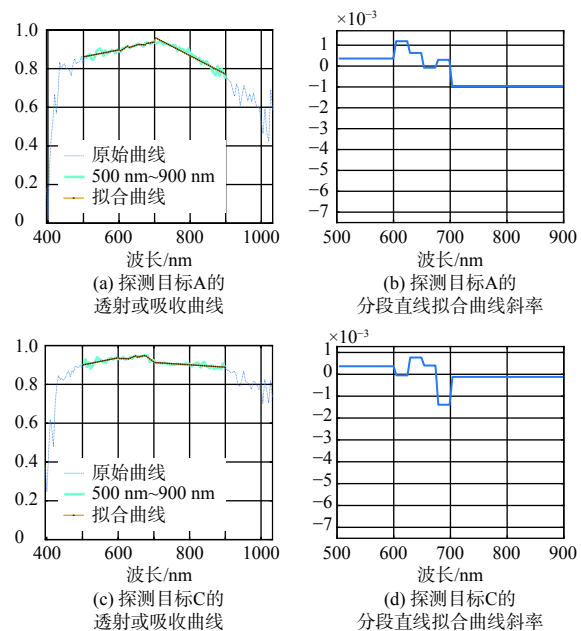


图8 手机前置摄像头透射或吸收情况

Fig. 8 Transmission or absorption of front camera of mobile phone

普通微小摄像头透射或吸收情况如图9所示,H隐藏在灯泡中,F和H在可见光和红外波段的 $\eta(\lambda)$ 值较高,曲线变化缓慢,G的曲线在可见光波段较平稳,在红外波段则以相对较快的速度降低。

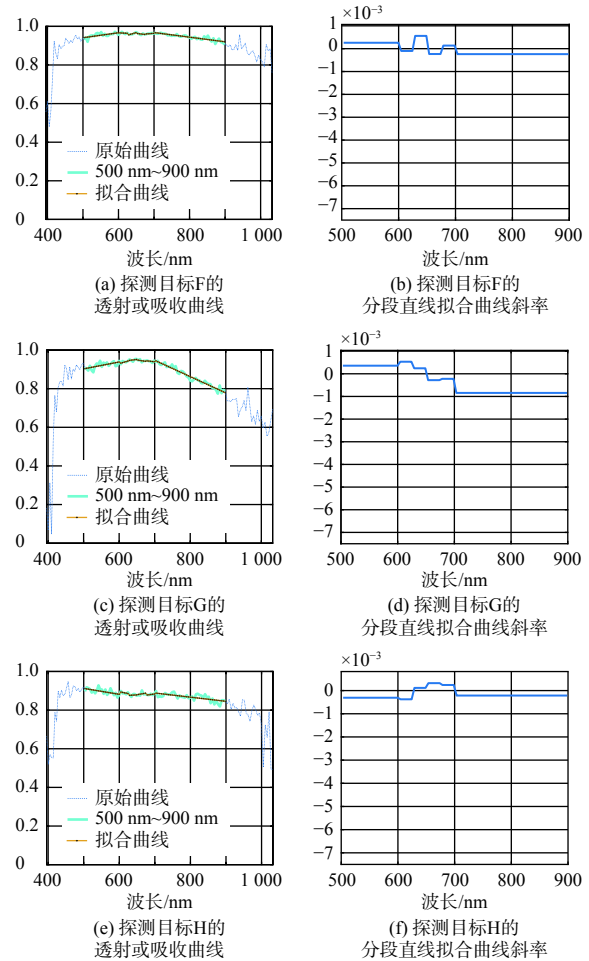


图9 微小摄像头透射或吸收情况

Fig. 9 Transmission or absorption of tiny camera

如表3所示,F和H全波段拟合直线斜率均趋近于0, $\eta(\lambda)$ 曲线变化缓慢。G在可见光波段的斜率为正且接近0,透过率基本不变,而红外波段的斜率为负,绝对值相对较大,透过率曲线变化幅度相对较大。判定目标G包含反射型的IRCF,目标F和H采用吸收型IRCF。

一种常规摄像头的反射光谱,如图10所示,

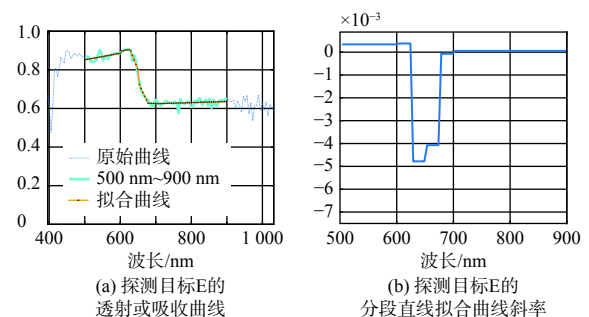


图10 常规摄像头透射或吸收情况

Fig. 10 Transmission or absorption of conventional camera

E 在实验结果中效果最明显,在可见光波段有较高透过率,在红外波段透过率骤降,两者数值差异在此次实验中最大。

如表 3 所示,在 600 nm~700 nm 范围内,存在一个数值为负、绝对值很大的斜率,其值为  $-4.8 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$ ,  $\eta(\lambda)$  曲线在该波段骤降。在 500 nm~600 nm 和 700 nm~900 nm 波段,斜率接近 0,  $\eta(\lambda)$  值基本不变。可以判定目标 E 采用反射型 IRCF。

实际探测微小目标时会辅以猫眼效应设备,成像光谱仪主要探测其检测出的高亮区域,对检测结果造成干扰的主要是强反射体。如图 11 所示, I 是一种白色金属,具有强反射特性,对各波段的光吸收率较小,即  $\eta(\lambda)$  值偏低,可以通过比较探测目标的  $\eta(\lambda)$  (吸收率) 数值大小进行筛查。

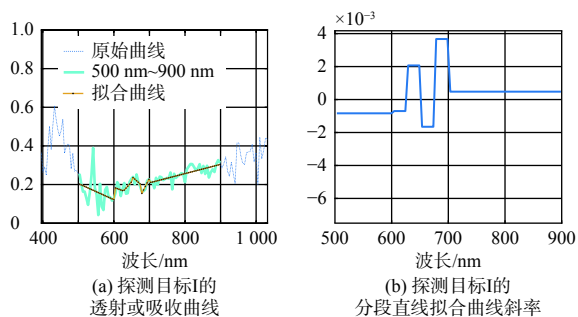


图 11 白色强反光干扰物光线吸收情况

Fig. 11 Absorption of light of white strong-reflective interferent

如表 3 所示,实验所得的  $\eta(\lambda)$  曲线均在可见光波段变化缓慢,斜率绝对值最大为  $3.6 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$ ,在红外波段有缓慢变化和快速下降两种情况,斜率绝对值最大为  $1.7 \times 10^{-3} \text{ nm}^{-1}$ ,最小为  $5.7 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ 。曲线若在 600 nm~700 nm 范围内存在突变,所得实验数据显示该波段斜率最小值的绝对值是 700 nm~900 nm 波段斜率绝对值的 10 倍以上。

### 3 结论

在成像光谱技术的基础上,提出了一种通过图像和光谱信息识别微小摄像头的探测技术。利用猫眼效应确定疑似目标,利用光谱特征精准判定微小摄像头。分析了可见光摄像头因为包含红外截止滤光片而可能存在的反射光谱特征。建立了计算探测距离的数学模型,光照充足的情况下,最大探测距离受目标大小影响,最小探测距离受光功率影响。计算数据显示,5 mm 口

径目标的理想最大探测距离在 11.9 m 左右,该探测技术适用于室内检测。实验研究了部分摄像头的反射光谱,通过分段最小二乘法直线拟合的方式分析了非反射光占比曲线变化趋势。研究表明,吸收型红外截止滤光片导致目标的非反射光占比曲线变化平缓且数值高,反射型红外截止滤光片导致曲线可见光部分数值高,红外部分数值低,从 700 nm 附近开始下降,甚至在 600 nm~700 nm 之间发生突变,实验数据显示突变位置的斜率绝对值是 700 nm~900 nm 斜率绝对值的 10 倍以上。实验结果符合原理分析所预测的两种情况。基于光谱特征的检测方式为微小摄像头的检测提供了一种新思路。

### 参考文献:

- [1] ZHAO Yanzhong, SUN Huayan, ZHENG Yonghui. An approximate analytical propagation formula for Gaussian beams through a cat-eye optical lens under large incidence angle condition[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(7): 074101.
- [2] 李旭东, 米建军, 茹志兵, 等. 基于激光主动探测的“猫眼效应”研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(2): 342-347.  
LI Xudong, MI Jianjun, RU Zhibing, et al. Cat's-eye effect based on active laser detection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 342-347.
- [3] LIU Chun, ZHAO Changming, ZHANG Haiyang, et al. Analysis of mini-camera's cat-eye retro-reflection for characterization of diffraction rings and arrayed spots[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-12.
- [4] GONG Mali, HE Sifeng. Periodicity analysis on cat-eye reflected beam profiles of optical detectors[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(5): 053110.
- [5] GONG Mali, HE Sifeng, GUO Rui, et al. Cat-eye effect reflected beam profiles of an optical system with sensor array[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(16): 4461.
- [6] 李晓英, 牛春晖, 吕勇, 等. 光阑衍射对“猫眼”回波功率分布的影响[J]. *应用光学*, 2016, 37(5): 776-782.  
LI Xiaoying, NIU Chunhui, LYU Yong, et al. Influence of aperture diffraction on power distribution of echo wave in cat-eye system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(5): 776-782.
- [7] REN Ximing, LI Li. Recognizing cat-eye targets with dual criterions of shape and modulation frequency[J]. *Chinese*



- Optics Letters*, 2011, 9(4): 41101-41104.
- [ 8 ] ZHAO Yanzhong, SUN Huayan, SHAN Congmiao, et al. A new identification method aimed at optical targets using an active interference laser beam[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(10): 1019-1022.
- [ 9 ] ZHOU Bin, LIU Bingqi, WU Dongsheng. Research on echo energy of ‘cat-eye’ target based on laser’s character of polarization[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics. China: IEEE, 2011: V2-302.
- [ 10 ] AUCLAIR M, SHENG Yunlong, FORTIN J. Identification of targeting optical systems by multiwavelength retroreflection[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(5): 054301.
- [ 11 ] ABEL N J, MARCINIAK M A, HAERI M B, et al. Wave-optics modeling of aberration effects in optical cross section measurements[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(8): 4302.
- [ 12 ] BULLER G, WALLACE A. Ranging and three-dimensional imaging using time-correlated single-photon counting and point-by-point acquisition[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4): 1006-1015.
- [ 13 ] HENRIKSSON M, SJÖQVIST L. Time-correlated single-photon counting laser radar in turbulence[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2011, 8187(1): 13.
- [ 14 ] NAKAMUR J. 数码相机中的图像传感器和信号处理[M]. 徐江涛, 高静, 聂凯明, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2015: 21-31.
- NAKAMUR J. Image sensor and signal processing in digital camera[M]. Translated by XU Jiangtao, GAO Jing, NIE Kaiming, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 21-31.
- [ 15 ] 谢宜风, 刘军英, 李宇航, 等. 光学功能薄膜的制造与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 256-257.
- XIE Yifeng, LIU Junying, LI Yuhang, et al. Manufacturing and application of optical functional thin film[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 256-257.
- [ 16 ] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感: 原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 38-67.
- TONG Qingxi, ZHANG Bing, ZHENG Lanfen. Hyperspectral remote sensing: principle, technology and application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 38-67.
- [ 17 ] 李西灿, 朱西存. 高光谱遥感原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 25-32.
- LI Xican, ZHU Xicun. Hyperspectral remote sensing principle and method[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019: 25-32.