

## 基于单像素探测器的高灵敏度近红外成像系统

霍娟,李明飞,杨然,赵连洁,张安宁,莫小范

(北京航天控制仪器研究所,北京 100094)

**摘要:** 昼夜光电成像技术经过了几十年的发展,现在已经进入到实用阶段,在军事、航天、天文等领域中占有十分重要的地位。为解决极弱光环境下难以成像的问题,在分析了微光像增强器和近红外固体成像技术之后,提出了一种新型的成像系统,利用空间光调制器和单像素探测器对目标信息进行调制和探测,之后利用关联算法即可恢复出探测目标的图像,基于此成像系统实现了 17km 外的成像实验。该成像系统有望实现高灵敏度成像,对突破无月夜晚等极弱光环境下的光电成像具有重大意义。

**关键词:** 近红外成像; 高灵敏度; 单像素探测器; 空间光调制器; 关联算法

**中图分类号:** TN21    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S104001

## High sensitive near infrared imaging system based on single element detectors

Huo Juan, Li Mingfei, Yang Ran, Zhao Lianjie, Zhang Anning, Mo Xiaofan

(Beijing Institute of Aerospace-Control-Device, Beijing 100094, China)

**Abstract:** After tens of years development, photo-electronic imaging during day and night has entered the practical stage, and plays an important role in military, aerospace, astronomy, etc. In order to realize the photo-electronic imaging in low-light-level, a new-type of imaging system was proposed by analyzing the Image-Intensifier Tubes and near-thermal imaging. In this new-type of imaging system, spatial light modulator and single element detectors could be used to modulate and detect the information of the objective, after that correlation algorithm was used to restore the objective image. In experiment, a setup based on single element detectors was built to take an image of the television tower for a long distance about 17 km range. High sensitive imaging could be realized by this new-type of imaging system. The results demonstrate that this new imaging system is a promising approach to achieve photo-electronic imaging in low-light-level, such as moonless night.

**Key words:** near infrared imaging; high sensitivity; single element detector; spatial light modulator; correlation algorithm

收稿日期:2016-02-08; 修订日期:2016-03-15

基金项目:国家自然科学基金(11304007, 11204011, 60907031, 61501015)

作者简介:霍娟(1986-),女,工程师,博士,主要从事关联成像方面的研究。Email:juanita\_huo@163.com

## 0 引言

高灵敏度光电成像作为天文导航的主要技术手段,自上世纪起至今一直备受关注,有别于传统的激光成像<sup>[1]</sup>,高灵敏度成像主要研究的是在夜晚或光线极弱的环境中,当人眼受到低照度条件下的视觉限制时,如何利用光—电信息转换成像的问题。高灵敏度光电成像可以将人眼不能识别的 X 光、紫外光、微弱星光、夜气辉光等各类微弱光线通过信号增强处理后转换为可见图像并清晰地显示出来,这一技术弥补了人眼在空间、时间等方面的局限性,极大的扩展了人眼的可视范围。

高灵敏度光电成像在军事、公安、天文、航天、航海、生物、医学、核物理、卫星监测、高速摄影等领域都起到了十分重要的作用<sup>[2]</sup>。高灵敏度成像技术可以在夜晚,或是由烟、雾等恶劣条件引起的低光照环境中获取目标信息,可提供全天时、高灵敏、抗干扰的导航功能。

## 1 高灵敏度光电成像技术的发展

高灵敏度光电成像技术发展之初,主要以微光像增强器为核心部件,将夜天光照明下的微弱信号,通过光—电子图像信息之间相互转换、增强、处理、显示等物理过程最终实现成像。像增强器先后经历了零代玻璃、一代级联、二代微通道板(MCP)、三代 III\_V 族光电阴极以及基于二代和三代的超二代和超三代产品,目前正在发展第四代微光夜视技术<sup>[3-4]</sup>。它们工作于可见光和近红外之间的 570~900 nm 光谱段内,将目标对夜空辐射的反射信号放大形成人眼可观察的图像,然而夜空辐射中的可见光主要来自于月光,在不同的月相下月光对于地面的照度是不同的,在无月的夜晚,利用微光像增强器很难实现成像功能。

夜空辐射的成分除了可见光之外,还包含大量丰富的近红外辐射,来自星光、400 K 月亮辐射和大气层的辉光<sup>[5]</sup>,不同月相条件下的夜空辐射如图 1 所示<sup>[6]</sup>,在完全无月光的条件下,夜空辐射主要分布在 0.7~2.5  $\mu\text{m}$  的范围内,所以基于近红外探测器实现成像为高灵敏探测提供了一种可能。

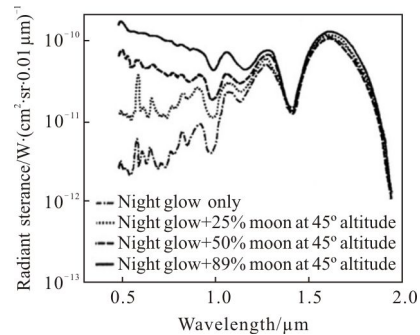


图 1 不同条件下夜空的光谱辐射分布曲线

Fig.1 Radiant sterance vs wavelength under various night-time conditions

目前近红外成像多采用 II-V 族半导体的 InGaAs 合金制造的近红外焦平面阵列作为探测器<sup>[7]</sup>,由于其本身存在的一些限制,近红外焦平面阵列在高灵敏度成像领域还未得到广泛的应用,近红外焦平面阵列由于工艺水平的限制难以做到大面阵高分辨;受发达国家的技术封锁限制,国内的近红外焦平面阵列探测器的成熟度还不足以实现无月夜晚成像;近红外焦平面阵列探测器的非均匀性问题明显<sup>[8-9]</sup>。为解决上述问题,提出了一种利用单像素探测器实现大面阵探测功能的方法:基于数字微镜阵列这种空间光调制器对回波信号进行调制,利用关联算法实现点元探测的空间成像。

## 2 单像素探测器在无月环境中的适用性分析

由于单像素探测器的接收面积很小,在微光环境中接收到的光信号也极其微弱,所以无月夜晚环境中的近红外辐射强度能否达到点元探测器的探测灵敏度是单像素探测器能否超越微光像增强器实现极弱光成像的关键。

由图 1 可以看出,图中纵坐标为光谱辐射功率,单位为  $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot 0.01 \mu\text{m})$ ,表示在单位立体角内,单位面积上接收到的强度,所以要计算出无月夜晚单位面积的辐射强度,只需对图 1 中点划曲线积分。那么对于近红外光谱(0.9~1.7  $\mu\text{m}$ ),单位面积辐射功率为:

$$P = \int_{0.9}^{1.7} \phi(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中: $\phi(\lambda)$ 为光谱辐射量。

因为对曲线积分等同于求该曲线与积分上下限围出的图形面积,所以这里采用 0.9~1.7 μm 波段光谱辐射量的均值乘以该波段长度,以计算近红外波段的辐射功率,最终得到:

$$P=5 \times 10^{-11} \times 0.8 \times 10^2 = 4 \times 10^{-9} \text{ W} \quad (2)$$

那么,在 1 单位立体角内,在地面上每平方米面积上,每秒接收到的来自夜空辐射的近红外光子数约为:

$$n=4 \times 10^{10} \quad (3)$$

所以在无月夜晚,来自夜空辐射的近红外光子数量级为  $10^{10}$ 。

下面计算无月夜晚近红外辐射经目标物体反射后到达点元探测器的光子数目。目前市面上的夜视仪工作距离约为 300 m 左右,设计了这样一个简单模型,如图 2 所示,对于一个典型的卡塞格林望远镜系统,镜头半径  $r_1$  为 10 cm,对应成像距离  $R=300$  m 外的视场半径  $r_2$  为 3.75 m。

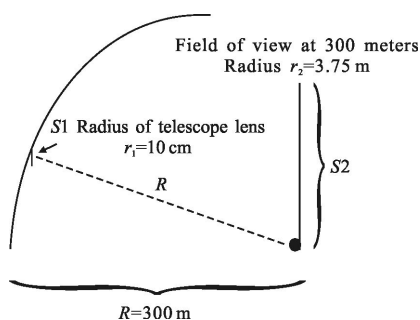


图 2 夜晚成像模型

Fig.2 Imaging model in night

地面上能够接收到来自整个半球的夜空辐射,对应球面角为  $2\pi$ ,由公式(3)可知单位面积单位球面角光子数的量级为  $10^{10}$  个光子/( $\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s}$ ),那么每秒中视场  $S_2$  内接收到的辐射光子数为:

$$n_{S_2} = 10^{10} \cdot S_2 \cdot 2\pi = 10^{10} \cdot \pi \cdot (3.75)^2 \cdot 10^4 \cdot 2\pi \quad (4)$$

视场内任意一面元,其传播方向为半径为  $R$  的球体,那么该面元上的光子传播到镜头中的概率为(考虑 30%的反射率):

$$\eta = \frac{S_1}{2\pi R^2} \cdot 30\% = \frac{\pi r_1^2}{2\pi R^2} \cdot 30\% = \frac{r_1^2}{2R^2} \cdot 30\% \quad (5)$$

那么每秒中视场  $S_2$  内回到镜头  $S_1$  的光子数为:

$$n_{S_1} = 10^{10} \cdot 2\pi \cdot (3.75)^2 \cdot 10^4 \times \frac{(0.1)^2}{2 \cdot 9 \cdot 10^4} \cdot 30\% = 4.5 \times 10^8 \quad (6)$$

根据上述计算可知,由卡塞格林镜头会聚至点元探测器的光子数为  $4.5 \times 10^8$  个/s,远高于近红外光电倍增管(PMT)的探测灵敏度。所以将近红外光电倍增管作为单像素探测器应用于无月环境下的夜视成像是可行的。

### 3 基于单像素探测器的高灵敏度光电成像系统

传统的成像技术中应用的探测器均为具有空间分辨能力的面阵探测器,而单像素探测器并不具备空间分辨能力,需要利用空间光调制器,例如数字微镜阵列(DMD),对回波信号进行调制,以实现高分辨成像。在成像过程中,接收镜头对准目标,调整焦距将目标清晰成像到 DMD 微镜表面,DMD 每次选择某些像元的光强反射至点元探测器,数据处理单元将每次获得一个部分像元的光强信息进行叠加,最后利用软件根据调制信息和探测器的测量值解算得到原始的图像。

假设物体绝对透过率函数为  $T(x,y)$ ,将物体  $T(x,y)$  通过望远镜系统成像至 DMD,其传递函数为  $\delta(x,y)$ ,物体的光经过透镜成像至 DMD 表面,其透镜成像的传递函数为  $h(x,y)$ ,DMD 表面加载的调制矩阵为  $H^{(i)}(k,l)$ 。其中  $(x,y)$  代表二维空间位置坐标,  $(k,l)$  为对应调制的微镜块在矩阵中的位置( $k,l$  均为正整数),假设 DMD 共有微镜块数  $1 \leq k \leq K$  行,  $1 \leq l \leq L$  列。DMD 将物体的成像按  $+24^\circ$  和  $-24^\circ$  进行反射,根据光学反射定律,在  $+24^\circ$  和  $-24^\circ$  分别放置会聚透镜将所有光强收集,得到强度:

$$I_B^{(i)} = \sum_{(x,y)} H^{(i)}(K,L) h(x,y) T(x,y) \quad (7)$$

式中:  $I_B^{(i)}$  的上标( $i$ )代表第  $i$  次测量。根据量子成像理论得到强度二阶关联函数:

$$G^{(2)}(x,y) = \langle I_B^{(i)} H^{(i)}(K,L) \rangle = \frac{1}{M} \sum_i^M (I_B^{(i)} H^{(i)}(K,L)) \quad (8)$$

式中:  $M$  为总测量次数。将公式(7)代入公式(8)中,可得:

$$G^{(2)}(x,y) = \frac{1}{M} \sum_i^M \left( \sum_{(x,y)} H^{(i)}(K,L) h(x,y) T(x,y) \right)$$

$$H^{(i)}(K,L) = \frac{1}{M} \sum_{(x,y)} h(x,y) T(x,y) \delta([x-m], [y-n])$$

$$\sum_i^M H^{(i)}(K, L)H^{(i)}(K, L) \quad (9)$$

式中： $H^{(i)}(K, L)H^{(i)}(K, L)$ 为矩阵乘法，可分解为：

$$\sum_{l,l}^L \sum_{k,k}^K H^{(i)}(k, l)H^{(i)}(k', l') = \sum_i^M \begin{cases} H^{2(i)}(k=k', l=l') \\ +H^{(i)}(k \neq k', l \neq l')H^{(i)}(k, l) \end{cases} \quad (10)$$

若存在测量矩阵  $H(K, L)$  满足  $H(K, L)H(K, L) = MI$ ，其中  $M=K \times L$ ，那么该矩阵为正交矩阵。如果正交矩阵满足任一行与任一列正交，任两行之间正交  $H^{(i)}(k \neq k', l \neq l')(k, l) = 0$ ，那么满足该条件的矩阵应满足：

$$\sum_i^M \begin{cases} H^{2(i)}(k=k', l=l') \\ +H^{(i)}(k \neq k', l \neq l')H^{(i)}(k, l) \end{cases} = \begin{cases} M \\ +0 \end{cases} \quad (11)$$

则最终的公式(9)变为：

$$G^{(2)}(x, y) = \sum_{(x,y)} h(x, y)T(x, y)\delta([x-m], [y-n]) \quad (12)$$

即：

$$G^{(2)}(m, n) = \sum_{(m,n)} h(m, n)T(m, n) \quad (13)$$

然而 Hadamard 矩阵恰好是满足公式(11)的矩阵。若  $m, n$  分别代表的 DMD 微镜块以外光学矩阵完全非相干，则系统的传递函数按线性不变系统计算，理想情况下为脉冲响应函数或狄拉克函数，一般为艾里斑，那么：

$$\sum_{(x,y)} h(x, y)T(x, y) = \iint h(x, y)T(x, y)dx dy \quad (14)$$

由于 DMD 选取面积为矩形，反光物体经透镜成像至 DMD，因此从物体到 DMD 表面，实际经历两次傅里叶变换得到的放大或缩小的像。

$$\iint h(x, y)T(x, y)dx dy = \frac{1}{V} T\left(\frac{x}{V}\right)\left(\frac{y}{V}\right) \quad (15)$$

式中： $V$  为横向放大率，由成像透镜和物像距离决定，文中由望远镜光瞳孔径和等效焦距决定。将公式(14)、公式(15)带入公式(13)可得最终成像结果，即：

$$G^{(2)}(m/V, n/V) = \frac{1}{V} T\left(\frac{m}{V}\right)\left(\frac{n}{V}\right) \quad (16)$$

以上述理论推导为基础，构建出基于单像素探测器的微光成像模型，如图 3 所示，远方的目标物体，通过接收镜头，清晰地成像在数字微镜阵列

(DMD) 的微镜表面上；计算机发送命令给控制板，使其控制 DMD 的微镜翻转，DMD 将目标物体的信号光反射到  $+24^\circ$  和  $-24^\circ$  两个方向，两组信号光分别被两个点元探测器收集；采集卡将两组光强信息收集到计算机中，计算机进行关联解算，最终恢复目标物体的图像。

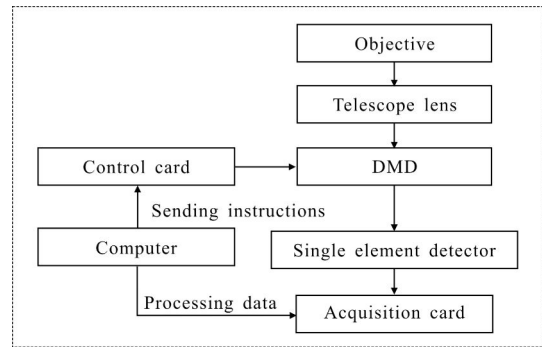


图 3 基于单像素探测器的成像模型

Fig.3 Imaging model based on single element detectors

### 4 实验结果

为验证基于单像素探测器的成像系统的可行性，依据图 3 中的成像模型搭建了实验系统，对距离实验地点 17 km 外的中央电视塔进行成像，实验结果如图 4 所示。其中，图 4(a)是在电视塔下的实拍图，在 17 km 外对图 4(a)中虚线框内的部分进行成

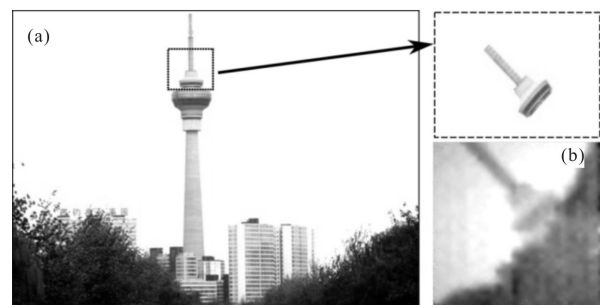


图 4 实验结果

Fig.4 Experimental results

像，实验中仅使用 DMD 中间  $768 \times 768$  个像元，并且将  $24 \times 24$  个微镜对应调制矩阵中的一个元素，最终得到分辨率为  $32$  像素  $\times$   $32$  像素的图像，如图 4(b) 所示。与传统光电成像器件不同，基于单像素探测器的成像系统的帧频取决于 DMD 微镜的翻转速度和关联运算的运行时间，该实验中成像时间约为 1 s，在后

续实验中,拟逐步改进算法和控制板程序,成像时间有望大幅缩短。在实验中所使用的探测器是适用于可见光波段的光电倍增管(PMT),为实现基于单像素探测器的高灵敏度近红外实验系统,需在原有实验系统上进行改进,一方面要更换 DMD 使其适用于红外波段,另一方面需要更换现有 PMT,使用近红外波段的 PMT,近红外波段的 PMT 灵敏度较高,基于单像素探测器的高灵敏度近红外系统有望实现  $10^{-4}\sim 10^{-6}$ lx 甚至更低照度下的成像功能。

## 5 结 论

高灵敏度昼夜成像技术在天文导航中扮演十分重要的角色,为满足高灵敏度成像中对低成本、全天时的要求,提出了一种基于单像素探测器的高灵敏度近红外成像系统。通过计算,利用光电倍增管作为探测器的近红外成像系统可实现无月夜空下的极弱信号成像,打破了传统光电成像系统只能在晴朗有月夜晚成像的限制。利用点元探测器和空间光调制器,基于强度关联算法即可实现成像功能,针对 17 km 外的中央电视塔进行了成像实验,验证了该系统的可行性。将在此基础之上对装置和软件部分进行改进并进行夜晚实验,以促进此类高灵敏度红外成像系统早日应用于天文导航。

## 参考文献:

- [1] Wang Xiaodong, Sun Liyan, Wei Zongkang, et al. A method of true color processing of the pointcloud models of the 3D laser imaging system [J]. *Navigation and Control*, 2014, 13(6): 6-10. (in Chinese)  
王晓东, 孙丽艳, 魏宗康, 等. 三维激光成像系统的点云模型真彩色处理方法[J]. *导航与控制*, 2014, 13(6): 6-10.
- [2] Ai Kesong. Development and prospect of low-light-level (LLL) night vision technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(4): 303-307. (in Chinese)  
艾克聪. 微光夜视技术的进展与展望[J]. *应用光学*, 2006, 27(4): 303-307.
- [3] Jin Weiqi, Liu Guangrong, Bai Tingzhu, et al. Some technological progresses and their analysis in night vision[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 405-412. (in Chinese)  
金伟其, 刘广荣, 白廷柱, 等. 夜视领域几个热点技术的进展及分析[J]. *光学技术*, 2005, 31(3): 405-412.
- [4] Xie Jianfeng, Wang Yingrui. Compare and research imaging performances of low light CCD imaging devices[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S5): 64-67. (in Chinese)  
谢剑锋, 王英瑞. 微光 CCD 成像器件性能比较研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S5): 64-67.
- [5] Zheng Weijian, Jin Weiqi, Su Junhong. The developing potential of near-infrared imaging night-vision technologies [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(4): 269-273. (in Chinese)  
郑为建, 金伟其, 苏君红. 近红外固体成像夜视技术发展的潜力[J]. *红外技术*, 2005, 27(4): 269-273.
- [6] Kozlowski L J, Terinant W E, Zandian M, et al. SWIR staring FPA performance at room temperature [C]//SPIE, 1996, 2745: 93-100.
- [7] Li Yingwen, Chen Fusheng, Luo Yan. Latest development and application market of uncooled thermal imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 257-260. (in Chinese)  
李颖文, 陈福胜, 罗艳. 非制冷热成像最新发展和应用前景[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(3): 257-260.
- [8] Zhang Mingtao, Zhu Lei, Liu Yinnian, et al. Design and application on temperature controlling system of  $320 \times 256$  element short wave infrared focal plane array [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 173-180. (in Chinese)  
张明涛, 朱磊, 刘银年, 等.  $320 \times 256$  短波红外焦平面温控系统设计与应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(3): 173-180.
- [9] Lv Yanqiu, Xu Yunhuan, Han Bing, et al. Study on  $128 \times 1$  element linear InGaAs short wavelenth infrared focalcover mapping using a Markov random field based approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96: 302-303.