

AlGa_N 日盲紫外焦平面成像系统作用距离研究

赵菲菲 刘玉 羊毅 潘晓东

中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471023

摘要 作用距离是紫外成像探测系统的重要综合性能指标之一。依据 AlGa_N 日盲紫外焦平面成像系统的成像原理, 考虑到影响紫外系统作用距离的各个因素, 分别对点目标和面目标的作用距离进行了理论推导。受到日盲紫外成像系统作用距离影响的因素主要包括目标辐射特性、大气传输衰减、光学系统、探测器、电子处理系统等。从目标的辐射能量传递出发, 结合信噪比与虚警概率、探测概率的关系, 推导出了紫外成像系统作用距离的理论公式, 并结合系统参数进行实例计算。分析得出提高系统有效通光口径、光学透射率、滤波降噪及增加积分时间等方法可用于增加紫外成像系统的作用距离。

关键词 成像系统; 辐射照度; 紫外; 焦平面探测器; AlGa_N

中图分类号 TN23 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.061101

Research on Operating Range of Imaging System Technology Based on AlGa_N Solar-Blind UV Focal Plane Array Detectors

Zhao Feifei Liu Yu Yang Yi Pan Xiaodong

Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang, Henan 471023, China

Abstract The operating distance is one of the most important comprehensive performance indexes. Based on the imaging principle of this AlGa_N solar-blind UV focal plane array (FPA) imaging system considering the influence factors of the UV system, the distance of point target and extended target are calculated respectively. The influencing factors of the solar-blind UV imaging system include the feature of target, the attenuation of the atmosphere transmission, optical system and UV FPA detectors. From the transfer of radiation energy of targets, the operating range theoretical formulas are deduced combing the relationship of signal-to-noise, fault prediction and detection prediction. Finally, the system parameters are inputted into the operating formula. The operating formula can provide theoretical basis for performance assessment of the UV imaging system. The operating range can be improved by the means of increasing effective optical aperture, optical transmissivity, integration time and adopting noise reduction methods.

Key words imaging systems; irradiance; UV; focal plane array detector; AlGa_N

OCIS codes 110.2970; 110.2960; 040.7190

1 引言

紫外传感成像系统可用于海上油监、无线通信、电晕放电探测、刑事侦察、森林防火、空间观测和灾害天气监测及预报等^[1-4]。AlGa_N 紫外探测器是一种半导体紫外探测器, 与传统的光电倍增管、微通道板(MCP)紫外探测器相比, 具有稳定性好、结构紧凑、功耗小和成本低等优势。相对其他半导体紫外探测器, 它还具有量子效率高的优点。此外, 该探测器还可以通过改变各组元配比来实现对不同波段的响应, 降低对滤光片的要求, 甚至不需使用滤光片, 提高整个光学系统效率, 是国内外重点关注的第三代紫外探测器^[5-8]。在以 AlGa_N 焦平面阵列(FPA)为核心探测器的日盲紫外成像技术中, 成像系统的作用距离是其重要性能指标之一。但国内外关于紫外成像系统作用距离的报道主要是针对采用 ICCD 探测器的紫外系统^[9-11]。为研究 AlGa_N 焦平面紫外成像系统的工作性能, 本文介绍了紫外成像系统的工作原理, 从目标的辐射能量传递出发, 结合信噪比与虚警概率、探测概率的关系, 推导出了紫外成像系统作用距离的理论公式, 并基于该理论结果

收稿日期: 2013-12-23; 收到修改稿日期: 2014-01-27; 网络出版日期: 2014-05-15

作者简介: 赵菲菲(1982—), 女, 博士, 工程师, 主要从事光电成像技术方面的研究。E-mail: eoei@vip.sina.com

进行了实例计算。

2 紫外焦平面成像系统的成像原理

AlGaIn 日盲紫外焦平面系统主要由紫外光学系统、紫外滤光片、紫外焦平面探测器和紫外信号处理模块构成。日盲紫外成像系统的原理如图 1 所示。辐射源所发出的紫外光通过大相对孔径紫外光学系统成像和滤光片滤波后,会聚到紫外探测器的焦平面上,通过紫外信号处理模块完成光电转换和信号处理,形成目标和背景景物的紫外视频图像。

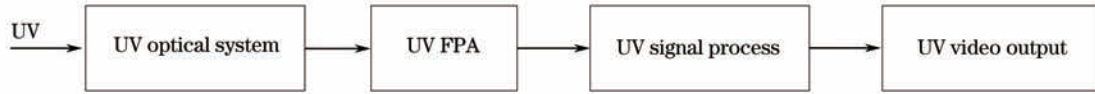


图 1 日盲紫外成像系统原理图

Fig.1 Scheme of solar blind UV imaging system

3 日盲紫外成像系统影响因素

3.1 日盲紫外目标特性分析

由于太阳光穿透地球大气层时,在 220~280 nm 紫外波段辐射被大气中的臭氧层强烈吸收,近地表范围的紫外辐射很微弱,存在所谓的“太阳光谱盲区”。系统对该波段的空中紫外目标探测时,由于自然环境的干扰较弱,信号处理的难度大大降低,有利于紫外信号的高速采集。紫外目标的辐射特性与目标的表面温度、结构特性、材料特性以及目标与探测器入瞳面的几何位置关系有关。为简化分析,假定目标为朗伯体且与探测器入瞳面法线方向垂直。

根据普朗克定律可得出温度 T_1 下波段范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 时黑体辐射的能量辐出度 $M(T_1)$ 的关系式,即:

$$M(T_1) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda k T_1)} d\lambda. \quad (1)$$

在中紫外波段,不同温度黑体的能量辐出度如表 1 所示^[12]。由表 1 可知,在温度范围为 2000~3200 K 内,随温度增加,紫外辐出度显著增加。

表 1 不同温度黑体能量辐出度

Table 1 Blackbody radiant exitance during middle ultraviolet wavelength range with different temperatures

Temperature /K	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Radiant exitance	0.0843	0.831	5.649	28.835	117.456	399.26	1171.19

当目标与探测器之间的距离为 R 时,标在探测器靶面上的像所占像素数 n 为

$$n = \frac{y \cdot f}{R \cdot a}, \quad (2)$$

式中 y 为物高, a 为像元尺寸, f 为物镜焦距。

若焦平面阵列为 $\mu \times \nu$, 其中 μ 为行数, ν 为列数,系统的圆视场角为 θ , 则 f 为

$$f = \frac{a \cdot \sqrt{\mu^2 + \nu^2}}{2 \cdot \tan(\theta/2)}. \quad (3)$$

将(3)式带入(2)式可以得出:

$$n = \frac{y \cdot \sqrt{\mu^2 + \nu^2}}{2R \cdot \tan(\theta/2)}. \quad (4)$$

当 $n \leq 1$ 时,目标为点目标源;当 $n > 1$ 时,目标为面目标源。

3.2 能量传递过程分析

3.2.1 点目标源能量传递过程推导

若单一目标辐射强度为 I , S 为目标的面积,目标辐射传输距离为 R ,大气平均透射率为 $\tau(R)$,紫外物镜透射率为 τ ,物镜的有效孔径为 D ,物镜焦距为 f 。则目标在系统镜头有效孔径面上的辐照度 E_1 为

$$E_1 = \frac{I}{R^2} \cdot \tau(R). \quad (5)$$

紫外焦平面探测器接收的光功率 J 为

$$J = \frac{I}{R^2} \cdot \tau(R) \cdot \tau \cdot \frac{\pi D^2}{4}. \quad (6)$$

若紫外焦平面阵列探测器的噪声等效功率为 P_c , 比探测率为 D^* , 单元像元大小为 $a \times b$, 面积为 A , 电子系统噪声系数为 F , 系统带宽为 Δf ; 则紫外焦平面成像系统的信噪比 $R_{SN}^{[13]}$ 为

$$R_{SN} = \frac{\tau(R) \cdot \tau \cdot \pi \cdot D^2 \cdot I}{4R^2 \cdot P_c}, \quad (7)$$

$$P_c = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f} \cdot F}{D^*}. \quad (8)$$

将(8)式带入(7)式, 得到:

$$R_{SN} = \frac{\tau(R) \cdot \tau \cdot \pi \cdot D^2 \cdot I \cdot D^*}{4R^2 \cdot F \cdot \sqrt{a \cdot b} \cdot \Delta f} \geq R_{SNmin}, \quad (9)$$

式中 R_{SNmin} 为探测要求最低信噪比。

通过(8)式, 可以得到点目标探测时, 紫外焦平面成像系统的作用距离。

3.2.2 面目标源能量传递过程推导

与3.2.1节参数定义相同, 若目标的面积为 S , 镜头的有效通光面积为 A_1 , 目标在探测器上的成像面积为 A_2 , 目标经过物镜后在探测器靶面的辐射照度 E_d 为

$$E_d = \frac{I}{R^2} \cdot \tau(R) \cdot \tau \cdot \frac{A_1}{A_2}. \quad (10)$$

根据几何关系, $\frac{S}{A_2} = \frac{R^2}{f^2}$, 且 $A_1 = \frac{\pi}{4} \times D^2$, 则目标经过物镜后在探测器靶面的辐射照度 E_d 为

$$E_d = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{I}{S} \cdot \tau(R) \cdot \tau \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2. \quad (11)$$

信噪比公式为

$$R_{SN} = \frac{\pi \cdot I \cdot \tau(R) \cdot \tau \cdot D^2}{S \cdot f^2 \cdot E_{min}} \geq R_{SNmin}, \quad (12)$$

式中 E_{min} 为探测器噪声等效探测辐射照度。

通过(12)式, 可以得到面目标探测时, 紫外焦平面成像系统的作用距离。

根据(9)式和(12)式可以推出, 当紫外辐射目标源的辐射强度和系统视场角已经确定的情况下, 紫外成像系统的作用距离与光学系统的有效通光孔径、透射率、电子系统噪声、探测器比探测率及系统带宽等有关。光学系统有效通光孔径和透射率的提高, 可增加系统的作用距离。紫外成像系统图像信号处理通过滤波降噪处理的方式, 也可增加系统的作用距离。另外, 通过提高探测器的积分时间, 可以减小噪声等效带宽 Δf , 从而增加紫外成像系统的作用距离。

3.3 信噪比与虚警概率、探测概率的关系

3.3.1 虚警概率与门限信噪比

如果搜索视场内本来没有目标而系统却误认为有目标, 这种错误出现的概率叫虚警概率。为了尽可能滤去噪声以突出目标信号, 通常让信号和噪声通过一窄带滤波器。当无目标信号时, 噪声通过该窄带滤波器, 其幅值的概率密度分布函数为瑞利分布, 即

$$P(\nu) = \frac{\nu}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\nu}{\sigma}\right)^2\right], \quad (13)$$

式中 ν 是检测器输出的噪声电压幅值, σ 为噪声电压均方根偏差。虚警概率 p_f 为噪声电压超过门限电平 u_{th} 的概率, 其表达式为

$$p_f = P(u_{th} < \nu < \infty) = \int_{u_{th}}^{\infty} \frac{\nu}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\nu}{\sigma}\right)^2\right] d\nu = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u_{th}}{\sigma}\right)^2\right], \quad (14)$$

式中虚警时间为 T , 告警时间为 t_d , 虚警概率为

$$p_f = \frac{t_d}{T}. \quad (15)$$

3.3.2 探测概率

在搜索视场中出现目标时, 系统能够将它探测出来的概率即为探测概率。由于目标出现, 所以它的信号与噪声一同被系统接收。当信噪比较大时, 系统输出电压的幅值分布近似于高斯函数, 即

$$P(A) = \frac{\nu}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(A-a)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (16)$$

式中 A 为信号加噪声的总幅值, a 为信号幅值, a/σ 为信噪比。

将 $P(A)$ 从门限电平 u_{th} 积分至 ∞ , 即得到信号与噪声的和超过门限的概率(探测概率), 即

$$p_d = P(u_{th} < A < \infty) = \Phi\left(\frac{a - u_{th}}{\sigma}\right), \quad (17)$$

式中 Φ 表示标准的正态分布函数。

$$R_{SNmin} = \frac{a}{\sigma} = \Phi^{-1}(p_d) + \sqrt{-2 \ln p_f}. \quad (18)$$

估算系统的作用距离时, 根据系统要求的虚警概率和探测概率, 通过(18)式计算出信噪比的最低要求, 再根据目标成像特性带入(9)式或(12)式, 推算出系统的作用距离。

3.4 计算实例

根据上述推导过程可知, 计算系统作用距离时首先应判断探测方式是点目标探测还是面目标探测, 然后选择对应的公式进行计算。以下通过实例进行说明。

表2 目标及系统相关参数

Table 2 Relevant parameters of the target and system

Target		System		
Radiation intensity $I/(W/Sr)$	Target size S/m^2	Optical transmittance τ	Circular viewing angle $\theta/(^\circ)$	Detector array $\mu \times \nu$
2.85×10^{-2}	1×0.54	0.7	80	320×256

将表2数据带入(4)式, 可以得出:

- 1) 当 $R < 0.13$ km 时, 对应该系统, 目标为面目标源;
- 2) 当 $R \geq 0.13$ km 时, 对应该系统, 目标为点目标源。

根据作用距离范围, 选择面目标源或点目标源作用距离公式进行作用距离估算。

大气透射率的计算分析采用美国 LOWTRAN 软件, 计算条件是用标准大气模式, 乡村消光系数, 大气能见度为 23 km, 飞行高度为 5 km, 波长范围为 260 ~ 280 nm, 计算精度为 10 nm。不同水平距离计算的紫外波段大气透射率如表3所示。

表3 不同水平距离计算的紫外波段大气透射率

Table 3 Ultraviolet atmospheric transmissivity with different horizontal distances

Transmission distance R/km	2	3	4	5	6
Atmospheric transmissivity $\tau(R)$	0.25	0.13	0.072	0.041	0.024

当探测器 $P_e = 5 \times 10^{-15}$ W, 像元尺寸为 $a \times b = 30 \mu m \times 30 \mu m$, 系统光学透射率 $\tau = 0.7$, F 数为 0.7, 探测概率取 99%, 虚警时间取 60 min/次, 告警时间为 1 s 时, 根据(9)式可以得到系统的作用距离为 3.3 km。

4 结 论

先推导出点目标和面目标探测的判别公式, 然后以目标紫外辐射能量为依据, 分别对点目标和面目标的作用距离进行了理论推导。分析了信噪比与虚警概率、探测概率的关系, 推导出了紫外成像系统作用距离的理论公式。最后, 基于该理论结果进行了实例计算。该作用公式可以为系统性能评估提供理论参考, 分析得出提高系统有效通光口径、光学透射率、滤波降噪及增加积分时间等方法可以增加紫外成像系统的

作用距离。

参考文献

- 1 Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Research on multi-channel access technology in wireless UV scattering communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306001.
赵太飞, 王小瑞, 柯熙政. 无线紫外光散射通信中多信道接入技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306001.
- 2 Wang Baohua, Li Tuotuo, Zheng Guoxian. Research of solar blind ultraviolet detection system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 022202.
王保华, 李妥妥, 郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 022202.
- 3 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectroradiometer in air/vacuum conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101004.
杨小虎, 王淑荣, 黄煜. 大气/真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101004.
- 4 Wu Yan, Tang Yi, Liu Jianpeng, *et al.*. Optics design of far ultraviolet imaging spectrometer for ionosphere remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0122001.
吴雁, 唐义, 刘健鹏, 等. 电离层遥感远紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0122001.
- 5 Peter S, Danielle W, Patrick K, *et al.*. Solar-blind Al_xGa_{1-x}N pin photodetectors grown on LEO and non-LEO GAN[C]. SPIE, 2000, 3948: 265-272.
- 6 Zhao D G, Zhu J J, Liu Z S, *et al.*. Surface morphology of AlN buffer layer and its effect on GaN growth by metalorganic chemical vapor deposition[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(9): 1499-1451.
- 7 McClintock R, Mayes K, Yasan A, *et al.*. 320×256 solarblind focal plane arrays based on Al_xGa_{1-x}N[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 86(1): 011117.
- 8 Long J P, Varadaraajan S, Matthews J, *et al.*. UV detectors and focal plane array imagers based on AlGa_xN pin photodiodes[J]. *Opto-Electronics Review*, 2000, 10(4): 251-260.
- 9 Bai Tingzhu, Lou Ying, Guo Aihua, *et al.*. Energy transmission process of ICCD UV warning system[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(z1): 241-245.
白廷柱, 娄颖, 国爱燕, 等. ICCD 紫外告警系统能量传递过程分析[J]. *光学技术*, 2008, 34(z1): 241-245.
- 10 Kong Fanlin, Zhou Yue, Chen Xue, *et al.*. Measurement of fatigue properties of solar-blind ultraviolet intensified CCD [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 110401.
孔繁林, 周跃, 陈雪, 等. 日盲紫外像增强型 CCD 疲劳特性测试[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(11): 110401.
- 11 Yang Cheng, Zeng Qinyong, Zhu Dayong, *et al.*. Measurement of max detection distance and azimuth in solar blind ultraviolet warning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(z1): 116-119.
杨承, 曾钦勇, 朱大勇, 等. 日盲紫外告警系统探测距离及方位角测量的研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(z1): 116-119.
- 12 Zhou Wei, Wu Hanping, Wu Jing, *et al.*. Research on the method of UV target detection weak signal process[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(9): 508-514.
周伟, 吴晗平, 吴晶, 等. 紫外目标探测弱信号处理方法研究[J]. *红外技术*, 2012, 34(9): 508-514.
- 13 Zhang Youwen. *Infrared Optical Engineering*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982.
张幼文. *红外光学工程*[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.