

近紫外探测系统作用距离分析*

崔穆涵^{1,2}, 易翔宇¹, 周 跃¹, 陈 雪¹, 章明朝¹, 闫 丰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 阐述了近紫外探测系统工作原理,在此基础上建立了基于探测器信噪比分析的近紫外作用距离模型,并详细分析了近紫外谱段目标、背景辐射特性及大气传输对探测距离的影响。以实验室现有近紫外探测器为例针对所建模型进行系统作用距离研究,最终得到不同积分时间下该探测系统的作用距离。上述方法可用于实现对近紫外探测系统作用距离的预判,为近紫外探测技术的发展与深入研究提供参考。

关键词: 紫外探测; 作用距离; 信噪比; 近紫外; 辐射特性

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201527.091012

紫外探测技术主要工作于 200~300 nm 的日盲紫外谱段以及 300~400 nm 的近紫外谱段,其在天文、环境检测及工业生产等诸多领域具有重要应用^[1-2]。在日盲紫外区,导弹尾焰或电晕产生大量日盲紫外辐射,在位于臭氧层下日盲紫外辐射极其有限的空域背景中形成亮点,可借此特性进行紫外告警或电晕放电探测^[3-6];在近紫外区,地面或近地面的飞机等空中目标挡住了大气散射的太阳紫外辐射,在均匀紫外背景上形成暗点,可借此特性进行紫外告警、紫外探测或制导^[7]。

探测系统作用距离用于表征探测系统的最大探测能力,是极为重要的性能指标。国内外很多研究人员对探测系统的作用距离进行过深入研究,目前公开文献记载的研究多围绕红外探测系统^[8]、可见光探测系统(如微光夜视系统)^[9]及日盲紫外探测系统^[10-11]。尤其是红外及可见光探测系统,已建立多种有关作用距离的模型^[12-13],研究较为成熟,然而针对近紫外探测系统的作用距离研究尚无明确文献描述。在近紫外告警、近紫外制导^[14]应用前景日趋广阔的今天,估算近紫外探测系统的作用距离具有非常重要的现实意义。

本文提出一种基于探测系统信噪比分析的近紫外探测系统作用距离推算模型,同时,针对所建模型对实验室现有紫外探测器进行了系统作用距离研究。

1 近紫外探测系统结构组成及原理

近紫外探测系统结构简单,主要由光学系统、近紫外滤光片及紫外探测器组成,其中紫外探测器通常选择宽光谱响应紫外谱段增强的电荷耦合器件(CCD)或互补型金属氧化物半导体(CMOS)。近紫外探测系统工作流程主要有三个步骤,首先光学系统接收目标的近紫外辐射,近紫外辐射经过光学窄带滤波后入射到光电转换单元,通过光电图像的处理与转换形成数字视频图像,然后图像信号传递至信号处理单元,通过空间滤波等图像预处理完成对目标的初级判断,最后结合信号处理的相关算法,如时间特征和帧相关算法,完成对图像信号中目标有无的判断,并进一步给出空间位置和灰度等级的信息。

近紫外探测系统的工作主要基于 300~400 nm 的近紫外波段能够大部分透过大气层这一特性,均匀散布在大气层中的近紫外辐射由于成分较多形成“紫外窗口”。相比之下,飞机等空中目标的低紫外辐射使二者形成较高的景物对比度。成像时均匀散布的近紫外光在天空中呈现亮背景,而飞机等物体呈现暗目标,以此来探测有效目标。

2 探测距离建模与仿真

2.1 信噪比模型

信噪比定义为输出的平均信号值与偏离平均值的均方根噪声值之比。在本论文所涉及的环境中,信噪比

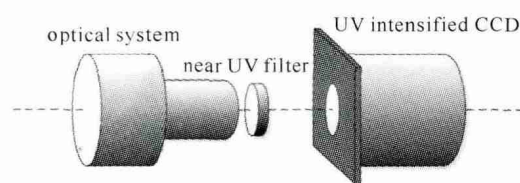


Fig. 1 Schematic setup of near UV detection system

图 1 近紫外探测系统结构图

* 收稿日期:2015-05-22; 修订日期:2015-07-21

基金项目:国家高技术发展计划项目

作者简介:崔穆涵(1988—),女,博士,从事参量测试与辐射定标的研究;crystalkaka@outlook.com。

通信作者:易翔宇(1986—),男,硕士,从事光电探测器件应用研究;503343276@qq.com。

是一个反映目标和背景在亮度上差别的量。现代辐射测量技术的实践证明:随着探测系统灵敏度的提高,其作用距离的增大主要取决于信噪比的提升,而非目标本身亮度的增加^[15-16]。以上述结论作为研究的出发点,建立基于探测系统信噪比分析的近紫外探测系统作用距离推算模型。

针对亮背景暗目标点的近紫外探测模式,根据探测器件的噪声分析,其信噪比可表示为

$$R_{SN} = \frac{N_T}{\sqrt{(N_T + N_B) + n_{\text{dark}}t + \sigma_{\text{read}}^2}} \quad (1)$$

式中: N_T 与 N_B 分别为目标与背景在探测器像元上产生的光电子数; n_{dark} 为探测器件单位时间的暗电流电子数; t 为积分时间; σ_{read} 为探测器的读出噪声。

目标与背景辐射经光学系统之后在探测器上产生的光电子数表示为

$$N_T = \sum_i \frac{\lambda_i}{hc} E_i \phi_{ti} t \quad (2)$$

$$N_B = \sum_i \frac{\lambda_i}{hc} E_i \phi_{bi} t \quad (3)$$

式中: E_i 为探测器在波长 λ_i 处的量子效率; c 为光速; h 为普朗克常数 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; λ_i 为测量波段的某一特定波长; ϕ_{ti} 与 ϕ_{bi} 分别为单位时间内目标与背景处波长 λ_i 入射到探测器像元上的辐射能量。综合式(1)~(3),信噪比可表示为

$$R_{SN} = \frac{\sum_i \frac{\lambda_i}{hc} E_i \phi_{ti} t}{\sqrt{\sum_i \frac{\lambda_i}{hc} E_i (\phi_{ti} + \phi_{bi}) t + n_{\text{dark}}t + \sigma_{\text{read}}^2}} \quad (4)$$

由式(4)可知,影响信噪比的主要因素有探测器相关参数、大气传输特性以及目标及背景辐射特性,探测器相关参数由探测器自身决定。

2.2 大气传输特性

大气是紫外辐射的主要传输媒介,对紫外辐射具有吸收和散射等作用。因此紫外辐射的大气传输特性将直接影响紫外告警系统的探测性能。目前常用的紫外大气传输特性模拟软件包为 LOWTRAN 系列,它是由美国地球物理实验室开发的单参数带模式的低分辨率大气传输模型,可计算从紫外到微波的大气传输问题,在国际上具有相当的公认性。

大气对紫外辐射产生影响的主要因素有:大气分子的吸收、瑞利散射、气溶胶散射和吸收,其对近紫外目标谱段总透过率 τ_a 是上述各项透过率的乘积,即

$$\tau_a = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \quad (5)$$

其中: τ_1 表示单独考虑大气分子吸收后的透过率, τ_2 表示单独考虑瑞利散射后的透过率, τ_3 表示单独考虑气溶胶散射和吸收后的透过率。

2.3 背景辐射特性

探测系统接收的背景辐射可看为面源对面的辐射,面辐射源各个方向亮度近似相等,因此背景辐射通量可表示为

$$\phi_{bi} = L_b(\lambda_i) A_0 \int \cos \alpha d\omega = L_b(\lambda_i) \omega_s A_0 \tau_0 \tau_a(L, \lambda_i) \quad (6)$$

式中: L_b 为背景辐射源在波长 λ_i 处的辐射亮度; α 为光学孔径平面法线与入射辐射方向的夹角,由于探测距离 L 足够远,因此 $\cos \alpha = 1$; ω_s 是立体角 $d\omega$ 在光学孔径平面的投影,其可由式(7)表示; A_0 为探测系统的光学孔径面积, $A_0 = \pi D^2/4$, D 为入瞳直径; τ_0 为光学系统透过率; $\tau_a(L, \lambda_i)$ 为大气透过率。

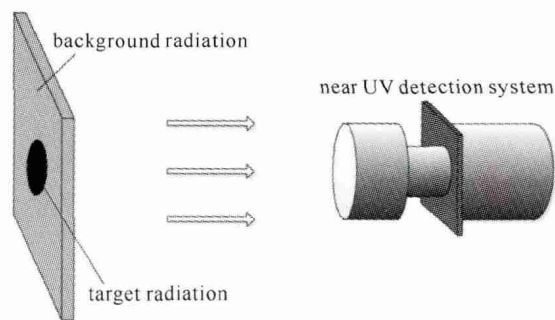


Fig. 2 Energy transfer model of near UV detection system

图2 近紫外探测系统能量传递模型

$$\omega_s = \frac{A}{L^2} = \frac{\pi (L \tan \theta)^2}{L^2} = \pi \tan^2 \theta \quad (7)$$

式中： A 为光学系统视场内的背景辐射源面积； θ 为探测系统视场角，结合式(6)~(7)可得探测系统接收的背景辐射通量最终表达式

$$\phi_{bi} = L_b(\lambda_i) \pi \tan^2 \theta \frac{\pi D^2}{4} \tau_0 \tau_a(L, \lambda_i) \quad (8)$$

2.4 目标辐射特性

探测器接收的目标辐射可视为点源对面的辐射，当探测距离 L 足够远时，探测器的光学系统接收到的辐射通量可表示为

$$\phi_{ti} = \frac{I_{ti}}{L^2} A_0 \tau_0 \tau_a(L, \lambda_i) \quad (9)$$

式中： I_{ti} 为目标辐射源在波长 λ_i 处的辐射强度，可由式(10)表示； L 为辐射源到探测器的距离。

$$I_{ti} = \frac{M_{ti} \pi R^2}{4\pi} \quad (10)$$

式中： M_{ti} 为目标辐射源在波长 λ_i 处的辐射出射度； R 为目标辐射源半径，分析得到最终目标源到探测器的辐射通量表达式为

$$\phi_{ti} = \frac{M_{ti} \pi R^2}{4\pi L^2} A_0 \tau_0 \tau_a(L, \lambda_i) \quad (11)$$

2.5 基于探测器信噪比分析的近紫外作用距离模型

综合式(4)、(8)、(11)，得到信噪比与近紫外作用距离的关系

$$R_{SN} = \frac{\sum_i \frac{\lambda_i}{hc} E_i \frac{M_{ti} \pi R^2}{4\pi L^2} A_0 \tau_0 \tau_a(L, \lambda_i) t}{\sqrt{\sum_i \frac{\lambda_i}{hc} E_i \left[\frac{M_{ti} \pi R^2}{4\pi L^2} A_0 \tau_0 \tau_a(L, \lambda_i) + L_b(\lambda_i) \pi \tan^2 \theta \frac{\pi D^2}{4} \tau_0 \tau_a(L, \lambda_i) \right] t + n_{dark} t + \sigma_{read}^2}} \quad (12)$$

若采用窄带滤光片，则由于工作谱段较窄，近紫外作用距离模型可简化为

$$R_{SN} = \frac{\frac{\bar{\lambda}}{hc} \bar{E} \frac{M_t \pi R^2}{4\pi L^2} A_0 \tau_0 \tau_a(L) t}{\sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{hc} \bar{E} \left[\frac{M_t \pi R^2}{4\pi L^2} A_0 \tau_0 \tau_a(L) + L_b \pi \tan^2 \theta \frac{\pi D^2}{4} \tau_0 \tau_a(L) \right] t + n_{dark} t + \sigma_{read}^2}} \quad (13)$$

式中：取 $\bar{\lambda}$ 为工作谱段的平均波长； $\bar{E}$ 为工作谱段的平均量子效率； M_t 为目标在工作谱段的总辐射出射度； $\tau_a(L)$ 为距离 L 时工作谱段的大气平均透过率。

以实验室现有近紫外探测器及光学系统为例，相关参数如图 3~4 及表 1 所示。

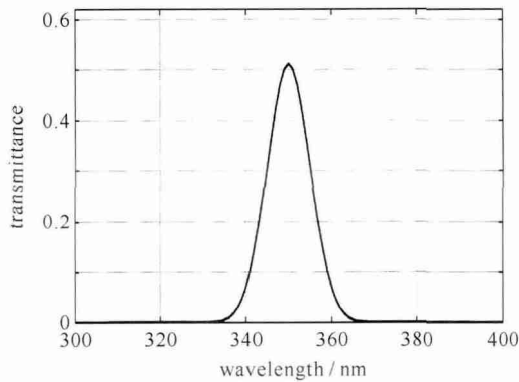


Fig. 3 Transmittance of the optical system

图 3 光学系统透过率曲线

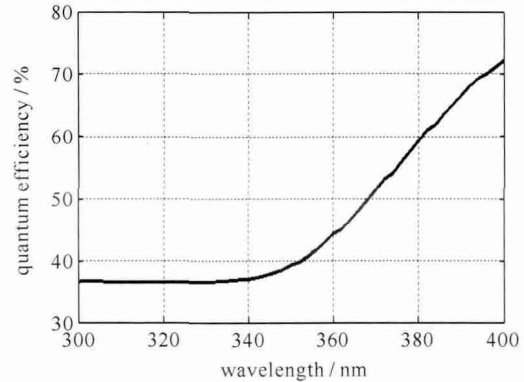


Fig. 4 Quantum efficiency of the detector

图 4 探测器量子效率曲线

实验室常用峰值波长位于 310, 350, 390 nm 处的近紫外滤光片，带宽 20~30 nm。以峰值波长 350 nm、带宽 20 nm 的近紫外滤光片为例，采用 LowTran7 软件计算其带内的大气透过率，结果如图 5 所示。

针对论文重点关注的 340~360 nm 波段，通过大气传输特性模拟软件计算其背景辐射亮度 $L_b(\lambda_i)$ 特性曲线如图 6 所示，软件设置的初始环境与计算大气透过率环境相同。

表 1 实验室近紫外探测器及光学系统相关参数

Table 1 Parameters of the existing near UV detector and optical system

focal distance f/mm	transmittance τ_0 (filter inc.)	F#	entrance pupil diameter D/mm
optical system			
150	see Fig. 3	2.3	65
dark electron number $n_{\text{dark}}/\text{s}^{-1}$	readout noise σ_{read}	integration time	quantum efficiency QE (340~360 nm)
near ultraviolet detector			field angle $2\theta/(^{\circ})$
150	30 e^- (RMS)	$30\text{ }\mu\text{s}\sim 6\text{ s}$	$37\%\sim 44\%$
			near ultraviolet detection system
			8

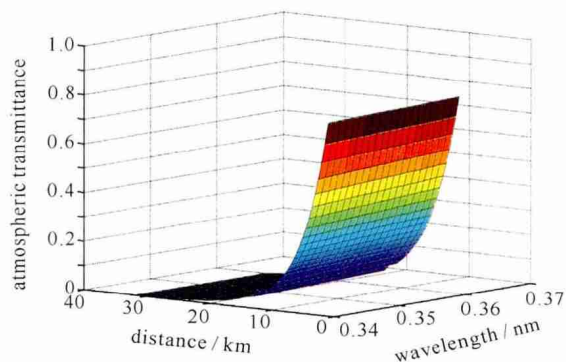


Fig. 5 Atmospheric transmittance of filter with peak wavelength of 350 nm

图 5 峰值波长 350 nm 的大气透过率曲线

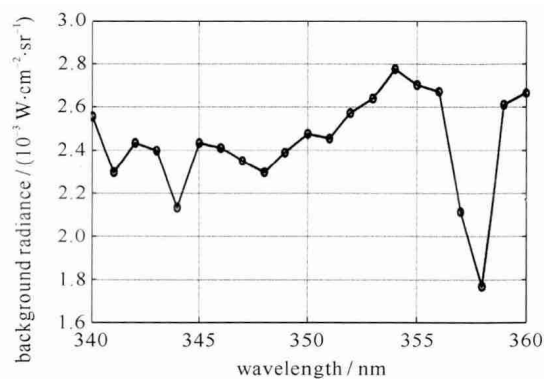


Fig. 6 Background radiance in 340~360 nm band

图 6 340~360 nm 波段背景辐射亮度特性曲线

近紫外探测系统的目标源多为导弹尾焰或羽烟,假设目标辐射源为温度 $T=2200\text{ K}$ 、半径 $R=1\text{ m}$ 的黑体;根据普朗克定律,该目标源在某一波长 λ_i 处的辐射出射度可表示为

$$M(\lambda_i, T) = BT^5 f(x) \quad (14)$$

根据最大辐射定律可得 $B=1.2862 \times 10^{-11}\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-5}$ 为一常数,通过查找黑体辐射表得到目标辐射出度曲线如图 7 所示。

针对本文以光电探测器为接收器的近紫外光电探测系统,目标能被系统探测到需满足如下三点必要条件:(1)目标在探测器上所占尺寸应大于 2×2 个像元;(2)目标在探测器像面上的辐照度应大于探测器的最低允许辐照度;(3)目标和背景的探测器输出信号信噪比 SNR 应满足目标捕获概率要求,一般在目标捕获概率大于 95% 以上时,信噪比 $R_{\text{SN}} \geq 6$ 。本文取 $R_{\text{SN}}=6$,将上述数值代入式(12)中,计算得到探测系统作用距离。依次验算相应作用距离下是否满足目标能被系统探测到的必要条件(1)与(2),针对必要条件(1),以作用距离 13 km 为例,目标辐射源落在探测器上的成像尺寸为 $12\text{ }\mu\text{m} \times 12\text{ }\mu\text{m}$,实验室探测器像元尺寸 $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$,成像所占尺寸大于 2×2 个像元;针对必要条件(2),目标在探测器上辐照度与探测器最低允许辐照度的关系已经在式(4)中有所体现,因此已无需单独考虑。最终得到作用距离结果如表 2 所示,可知针对实验室现有的滤光片,光学系统及探测器,该近紫外探测系统作用距离为 13 km。

表 2 实验室近紫外探测系统作用距离

Table 2 Detection range of the near UV detection system in lab

integration time/ μs	detection range/km
30	1
300	2
3×10^3	3
3×10^4	5
3×10^5	8
3×10^6	11.5
6×10^6	13

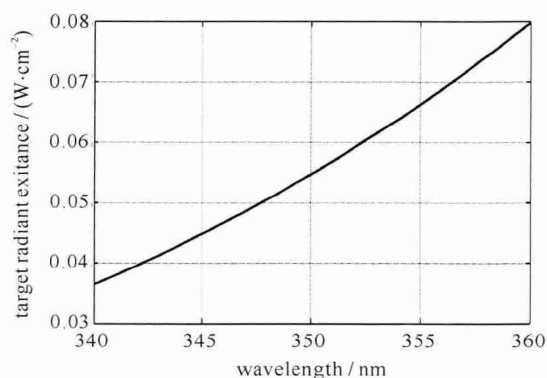


Fig. 7 Target radiant exitance in 340~360 nm band

图 7 340~360 nm 波段目标辐射出度曲线

3 结 论

本文建立了基于探测器信噪比分析的近紫外作用距离模型,并详细分析了近紫外谱段目标、背景辐射特性及大气传输对探测距离的影响。以实验室现有设备器材为例针对所建模型进行系统作用距离研究,分析得到实验室现有近紫外探测系统作用距离为 13 km。所建模型可应用性强,易于分析计算,对近紫外探测系统的发展具有一定的现实作用。

参考文献:

- [1] Gorokhov E V, Magunov A N, Feshchenko V S, et al. Solar-blind UV flame detector based on natural diamond[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, **51**(2):280-283.
- [2] 汤义男,赵卫,谢小平. 大气信道简化单次散射模型[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(1):22-26. (Tang Yinan, Zhao Wei, Xie Xiaoping. Atmospheric channel simplification single scatter model. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(1):22-26)
- [3] Zheng Q, Huang F, Huang J, et al. High-responsivity solar-blind photodetector based on thin film[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, **33**(7):1033-1035.
- [4] 易明,王晓,王龙. 美军光电对抗技术,装备现状与发展趋势初探[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5):602-605. (Yi Ming, Wang Xiao, Wang Long. Status quo and trend of American army of electro-optic countermeasure technology and equipment. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5):602-605)
- [5] 朱利,刘尚合,张悦,等. 高灵敏度电晕放电辐射信号探测方案[J]. *强激光与粒子束*, 2014, **26**:033201. (Zhu Li, Liu Shanghe, Zhang Yue, et al. High sensitivity detection scheme for corona discharge radiation signal. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**:033201)
- [6] Zhou W, Li H, X Yi, et al. A criterion for UV detection of AC corona inception in a rod-plane air gap[J]. *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, **18**(1):232-237.
- [7] 许强. 军用紫外探测技术及应用[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2010:4-10. (Xu Qiang. Military ultraviolet detection technology and its application. Beijing: University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010:4-10)
- [8] Dario Cabib, Buckwald R A, Moshe Lavi, et al. Missile warning and countermeasure systems in-flight testing, by threat simulation and countermeasure analysis in the field[C]//Proc of SPIE. 2006:62061Y.
- [9] 牛燕雄,汪岳峰,雷鸣,等. 微光夜视仪最大作用距离的估算[J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(6):620-622. (Niu Yanxiong, Wang Yuefeng, Lei Ming, et al. Research of the most operation range's estimation of low-light level night vision instruments. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2000, **11**(6):620-622)
- [10] 陈兆兵,郭劲,姜伟伟. 基于 Lowtran 软件包和 Gabor 匹配提高紫外告警系统探测距离[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(10):2360-2364. (Chen Zhaobing, Guo Jin, Jiang Weiwei. Improvement of detecting distance of UV warning system by Lowtran package and Gabor matching. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(10):2360-2364)
- [11] Eichinger W E, Cooper D I, Archuletta F L, et al. Development of a scanning, solar-blind, water Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(18):3923-3932.
- [12] Clarke J T, Skinner W R, Vincent M B, et al. Laboratory studies of alkali metal filter deposition, ultraviolet transmission, and visible blocking[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(9):1803-1813.
- [13] Lee H, Oh C, Hahn J W. Calibration and uncertainty analysis of an optical emission spectrometer measuring the absolute spectral radiant exitance of UV signatures[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, **37**(1):116-121.
- [14] 王玺,方晓东,聂劲松. 军用紫外技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(s1):58-61. (Wang Xi, Fang Xiaodong, Nie Jinsong. Military ultraviolet technology. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(s1):58-61)
- [15] 达争尚,何俊华,陈良益. 信噪比对高速视频系统作用距离制约的分析[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(2):165-168. (Da Zhengshang, He Junhua, Chen Liangyi. SNR limitation of high-speed visual image system detection distance. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(2):165-168)
- [16] Tandra R, Sahai A. SNR walls for signal detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2008, **2**(1):4-17.

Detection range model of near ultraviolet detection system

Cui Muhan^{1,2}, Yi Xiangyu¹, Zhou Yue¹, Chen Xue¹, Zhang Mingchao¹, Yan Feng¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Since the detection range is one of the core indexes for practical application of near ultraviolet detection system, the study of detection range has great practical significance. This paper expounds the principle of near ultraviolet detection system and builds the near ultraviolet detecting range model based on the signal to noise ratio(SNR) analysis of photoelectric detection system. In addition, it analyzes some effects on detection range in detail, including the radiation characteristics in the near ultraviolet spectrum and atmospheric transmittance. Finally, it gives an example using the existing near ultraviolet detector in lab in studying the detection range based on the established model. The study can provide effective theoretical guidance for the development and deep research in the field of near ultraviolet detection technology.

Key words: ultraviolet detection; detection range; signal to noise ratio; near ultraviolet; radiation characteristic

PACS: 52.70.Nc; 61.80.Ba