

引用格式:苗旺,李翰山.强辐射背景下光电成像探测性能计算方法[J].电光与控制,2018,25(12):11-15. MIAO W, LI H S. Calculation method of photoelectric imaging detection performance in strong radiation background[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(12):11-15.

强辐射背景下光电成像探测性能计算方法

苗旺, 李翰山

(西安工业大学电子信息工程学院, 西安 710021)

摘要:针对高灵敏度光电探测靶在强辐射背景下探测目标的可靠性问题,研究了强辐射背景下光电成像探测性能的计算方法;基于目标的光学辐射特性,建立了光电探测的灵敏度与信噪比模型,给出了电荷串扰阈值计算函数,并由此导出了光电探测与成像串扰概率模型;进行计算验证分析,结果表明,合理的信号处理和光谱滤波方式能够增强系统的探测性能,设置合理的光学系统参数可以使系统对目标的探测概率从0.3提升到0.95,串扰概率降低到0.05以下。

关键词:光电探测;灵敏度;信噪比;探测性能;探测概率;串扰概率

中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.12.003

Calculation Method of Photoelectric Imaging Detection Performance in Strong Radiation Background

MIAO Wang, LI Han-shan

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: To improve the reliability of the highly-sensitive photoelectric detection system in the background of strong radiation, the calculation method of photoelectric imaging detection performance in the background of strong radiation is studied. The sensitivity model and SNR model of photoelectric detection are built based on the optical radiation characteristics of the target, and the calculation function of the charge crosstalk threshold is given. On this basis, the probabilistic models of photoelectric detection and imaging crosstalk are derived. A computational verification and an analysis are carried out. The results show that using an effective method of signal processing and spectral filtering can enhance the detection performance of the system. The target detection probability is increased from 0.3 to 0.95 and the crosstalk probability can be reduced to less than 0.05 by setting reasonable optical system parameters.

Key words: photoelectric detection; sensitivity; SNR; detection performance; detection probability; crosstalk probability

0 引言

光电探测是检测目标参数的重要技术,影响光电探测能力的干扰因素有很多,例如探测器性能、探测目标辐射特性、探测区域背景照度等^[1-3],其中,目标的辐射特性是影响探测性能的主要因素;对于高灵敏度光电探测靶而言,在多云等弱辐射背景下,环境引起的干扰小,系统灵敏度和稳定性较高,而在强光辐射背景下,环境噪声与干扰会明显增加,同时,当强光作用到探测系统时,系统产生的电压信号随着接收辐射能量

的增大而导致探测器发生饱和串扰效应,干扰系统正常工作。

从国内外公开的文献来看,目前对光电成像探测性能的研究主要是从弱辐射与红外辐射特性出发^[4-6]:一方面,建立了相应的灵敏度与信噪比模型;另一方面,分析了辐射背景对目标探测的干扰特性,对于强辐射背景下的成像探测性能分析较少。另外,弱辐射背景的光电成像探测性能计算方法主要针对灵敏度与信噪比进行建模,而强辐射背景下的噪声大、干扰多,此时仅依靠灵敏度与信噪比已无法衡量系统探测性能。因此,为实现强辐射背景下光电成像探测性能建模,需要综合考虑目标及其背景自身辐射特性、探测系统灵敏度、信噪比,建立强辐射背景作用下探测概率与成像串扰概率模型。

本文依据强辐射背景下空间目标光学特性,建立

收稿日期:2018-05-28 修回日期:2018-06-18

基金项目:国家自然科学基金(61773305,61575155)

作者简介:苗旺(1993—),男,山东淄博人,硕士生,研究方向为光电探测。

了光电探测灵敏度、信噪比以及探测、串扰概率模型,分析了实际探测过程中影响成像探测能力的各种因素,为光电探测性能改善提供了有效的理论依据。

1 强辐射背景下的目标特性

研究光电探测系统的成像探测性能,首先需要建立强辐射背景下的目标特性模型;在光电探测过程中,探测目标的光学特性由辐射亮度体现,探测器光敏元接收的光能量来自目标反射的辐射能量。目标辐射示意图见图 1。

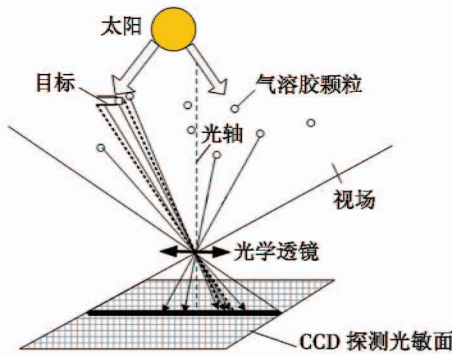


图 1 目标辐射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of target radiation

一般认为太阳是绝对温度为 5900 K 的黑体,根据普朗克黑体辐射原理,在一定光谱范围内的辐射度可表示为^[7]

$$M(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \right] \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为真空中的光速; λ 为探测波段波长; k 为玻尔兹曼常数; T 为太阳的黑体温度。

则空间目标在该波段光谱下的辐照度为

$$E_0 = \frac{M(\lambda) \cdot A}{4\pi d_r^2} \quad (2)$$

式中: A 为太阳表面积; d_r 为日地平均距离。

假设 β 表示空间目标单位辐射面元上法线和强光入射方向夹角, $\varepsilon(\lambda)$ 表示单位辐射面元反射系数,则探测目标单位面元 ds_1 实际接收到的光通量为

$$\phi_0 = \int_{\lambda} \varepsilon(\lambda) E_0 ds_1 \cos \beta d\lambda \quad (3)$$

同时,假设探测器光敏元为全扩展面,并且与法线的夹角为 γ ,目标与光敏元的距离为 m ,则光敏面元 ds_2 实际接收的光通量为

$$\phi_m = \frac{\cos \gamma}{\pi} \int_{\lambda} \varepsilon(\lambda) E_0 ds_1 \cos \beta d\lambda \cdot ds_2 \cdot \frac{1}{m^2} \quad (4)$$

2 探测能力分析

2.1 灵敏度

探测灵敏度是光电探测的核心环节,假设探测区

域背景辐射的强度为 E_B , CCD 光学系统视角为 θ ,探测距离为 d_m ,则对应的总背景辐射强度为

$$E_B = M(\lambda) \cdot \theta \cdot d_m^2 \quad (5)$$

若 CCD 光学镜头总孔径为 D , CCD 光学系统的透过率为 τ_1 ,则 CCD 获得的总背景辐射光通量为

$$\phi = \tau_1 \cdot M(\lambda) \cdot \pi \cdot D^2 / 4d_m^2 \quad (6)$$

而探测灵敏度 σ 为^[8]

$$\sigma = \phi / \phi_m \quad (7)$$

2.2 信噪比

光电系统的探测信噪比定义为探测目标输出信号与噪声比值的均方根值^[9-10]。假设 ϕ_s 为目标信号光子通量; d_s 为探测器通光口径面积; η_s 为 CCD 响应目标光谱平均量子效率; λ_s 为目标光谱透过率系数; T_c 为 CCD 曝光时间,则目标信号光电子数 n_1 可表示为

$$n_1 = \phi_s d_s \eta_s \lambda_s \tau_1 T_c \quad (8)$$

若 ϕ_n 表示背景辐射光子通量; η_n 表示 CCD 响应背景光谱平均量子效率; λ_n 表示背景光谱透过率系数; α 表示 CCD 光轴与目标的夹角 D_c/F ,其中, D_c 为 CCD 像元直径, F 为系统焦距,则背景信号光电子数 n_2 算式为

$$n_2 = \phi_n d_s \eta_n \lambda_n \tau_1 \alpha^2 T_c \quad (9)$$

在忽略探测器转移噪声和热噪声的情况下,系统信噪比 $R_{s,n}$ 可表示为^[11]

$$R_{s,n} = \frac{n_1}{\sqrt{n_2}} = \frac{\phi_s d_s \eta_s \lambda_s \tau_1 T_c}{\sqrt{\phi_n d_s \eta_n \lambda_n \tau_1 \alpha^2 T_c}} \quad (10)$$

另外,目标与背景的对比如是衡量能否探测到目标的重要参数,可以表示为^[10]

$$C = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\phi_s d_s \eta_s \lambda_s \tau_1 T_c}{\phi_n d_s \eta_n \lambda_n \tau_1 \alpha^2 T_c} \quad (11)$$

为了提高探测系统的信噪比,需要减少环境背景引入的光噪声,因此可以依据目标与背景的光谱辐射差异,采用合适的光谱滤波技术减少不必要的光谱成份,极大地减少 CCD 接收多余的背景光能量,抑制 CCD 探测器饱和效应。

2.3 电荷串扰阈值

当探测器光敏面元上的能量增大,其势阱存储电荷量增加,若势阱存储电荷量超过其饱和和电荷量阈值,多余的电荷将接触绝缘层界面而引起表面俘获,产生饱和效应,使得多余电荷通过表面势垒溢出,引发串扰效应,导致目标和背景信号被串扰信号淹没,从而影响系统成像特征及参数测试性能^[12]。

根据体沟道结构认为,探测器光敏元的 N 型掺杂区内的施主浓度和 P 型掺杂区内的受主浓度为常数,分别为 n_a 和 n_d ,耗尽层中的电子或空穴已全部耗尽,

电荷全部由电离的施主或受主组成,由此可得到串扰电荷量阈值为

$$Q_F = qn_a \left(b - \sqrt{\frac{2\varepsilon_{si}n_dV_c}{qn_a(n_d+n_a)}} \right) \quad (12)$$

式中: b 表示 N 型层厚度; ε_{si} 表示 CCD 光敏元感光材料的体介电常数; V_c 表示栅极高电压。。

2.4 探测与成像串扰概率

探测概率是指当目标出现在探测系统的视场范围内时,系统能够探测到目标的概率,探测概率可表示为探测系统的信噪比满足一定阈值要求的概率,具体如下

$$P(R_{s,N}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{R_{s,N}}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (13)$$

光电系统的成像串扰概率是指在强辐射作用下探测器发生串扰的概率。在计算时,串扰概率可以认为是探测器势阱存储电荷量超过门限的概率,即

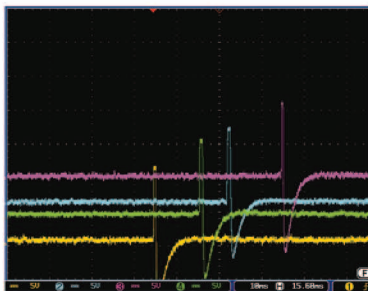
$$P(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (14)$$

3 计算分析

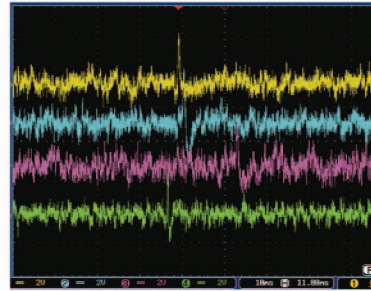
将光电探测系统设置在强辐射背景环境中,光照度为 112 356 lx,主要参数设置如下:光学系统透过率为 0.71,焦距为 58 mm,CCD 分辨率为 1292 × 964,平均量子效率为 0.32。

光学系统透过率对探测能力的影响主要体现在对辐射背景噪声的影响,为了保证噪声范围并兼顾目标信号的探测,光学透过率设置在 0.7 左右;焦距以及分辨率决定了探测视场以及探测过程中干扰的多少,为了综合分析强辐射背景的特性,选择光学系统焦距 58 mm,CCD 分辨率 1292 × 964,保证 35° 以上的探测视场。

当光电探测系统处在弱辐射背景下时,系统灵敏度高、稳定性强,输出目标过靶信号如图 2a 所示,此时可用灵敏度与信噪比对探测性能进行衡量;但当光电探测系统处在强辐射背景下时,其输出信号如图 2b 所示,可以看出,探测系统噪声变强,干扰较多,因此仅依靠灵敏度与信噪比已无法衡量系统探测性能,需要引入串扰概率与探测概率对探测系统进行计算分析。



a 弱辐射背景



b 强辐射背景

图 2 不同辐射背景下的探测信号

Fig. 2 Detection signal in different radiation background

3.1 辐射特性对探测能力的影响

根据式(1)、式(2)计算得到探测辐射能量与探测距离的变化曲线,如图 3 所示。

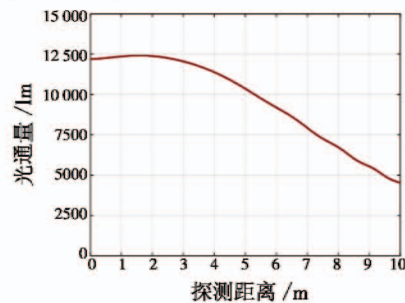


图 3 辐射能量变化曲线

Fig. 3 Radiation energy variation

从图 3 可以看出,探测距离越远,目标表面面元的辐射能对探测器的入瞳处辐射光能量贡献越小,光学衰减、渐晕造成的能量变化越强,所以目标反射到探测器光敏元的辐射能量就越小,当探测距离大于 10 m 时,光敏元接收的辐射能量衰减到了 5000 lm 以下。

图 4 为不同目标尺寸 l 下光通量 E_0 对探测灵敏度的影响,随着太阳辐射照度的增大,光电探测接收器能感知的目标辐射通量也增大,使得探测灵敏度增加,尺寸大小为 12 mm 的目标最高灵敏度可以达到 1100 左右。但当照度增加,背景光通量也在增加,导致探测器光敏面元接收的目标辐射光通量 ϕ_m 与背景辐射光通量 ϕ 的比值接近定值。

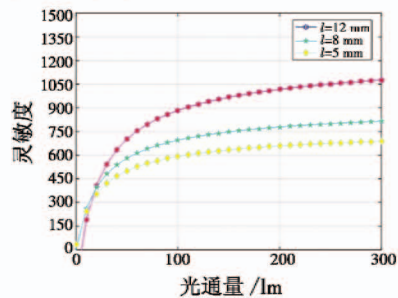


图 4 灵敏度变化曲线

Fig. 4 Sensitivity variation curve

3.2 信号调理与滤波技术对探测能力的影响

在系统参数确定的条件下,系统探测能力受不同信号处理以及光谱处理方式的影响,图 5 给出了不同处理方式下采集输出的电压信号波形,CH1 为强光下加入滤光片后信号调理电路增益为 10^5 倍时的噪声电压,CH2 为强光下不加滤光片后信号调理电路增益为 10^5 倍时的噪声电压,CH3 为强光下不加滤光片后信号调理电路增益为 10^7 倍时的噪声电压,可以看出,光谱滤波技术对于探测性能有着明显的改善。另外,灵敏度的增加会增强背景对系统干扰的程度,使串扰概率急剧增加,以致系统无法进行测试。

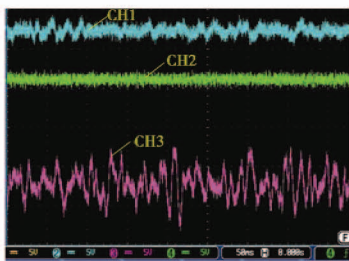
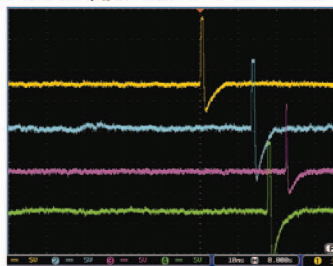
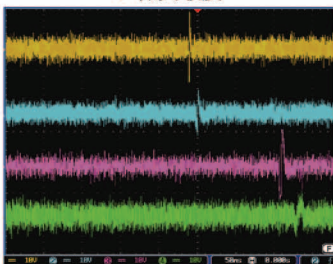


图 5 不同信号调理方式对输出信号的影响
Fig. 5 Influence of different signal conditioning methods on output signal

在探测过程中,为了增加极限探测距离,一般会提高参数增益,增加灵敏度,图 6a 是探测系统灵敏度为 300 的电压信号,信噪比为 10 左右,图 6b 是探测系统灵敏度为 1000 的电压信号,信噪比在 0.5 ~ 2 左右,可以看出,图 6a 中目标与背景的对比度较强,而图 6b 中的对比度较弱,目标趋于淹没在背景中,主要原因是灵敏度越大,探测距离也会增加,但是同时也引入了更多背景辐射光子通量 ϕ_n ,又减小了信噪比。



a 低灵敏度



b 高灵敏度

图 6 不同灵敏度下的探测信号
Fig. 6 Detection signals with different sensitivities

因此,由于不同环境的背景光谱特性不同,系统信噪比与灵敏度不能同时兼顾,相同信号处理方式对探测能力的贡献是不同的。在光电系统布站方式确定时,需要分析测试环境背景亮度与光谱特性,选择合理的信号处理与光谱滤波方式,使系统的信噪比和灵敏度可以同时兼顾探测要求。

3.3 光学系统参数对探测能力的影响

光学系统参数是光电探测首先需要确定的参数,因此,需要定量分析光学系统的各主要参数对系统探测能力的影响,分别分析 CCD 有效通光口径 d_e 、光学系统透过率 τ_1 以及由光学系统造成的弥散斑直径 p 对探测能力的影响。

图 7 所示为光学参数对探测概率的影响。

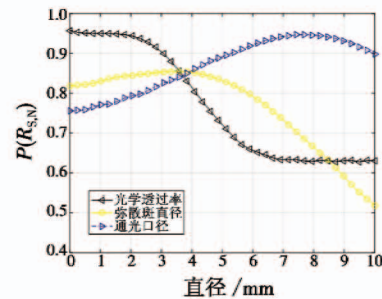


图 7 光学参数对探测概率的影响

Fig. 7 Influence of optical parameters on detection probability

从图 7 中可以看出,光学系统有效通光口径 d_e 越大,收集光信号能力越强,光敏元接收到目标辐射能量越大,信噪比会增强,探测概率增加,当口径大到一定范围后,会引入更多的背景辐射通量 ϕ_n ,但目标辐射能量不会明显增加,使得信噪比减小,探测概率变小;而光学系统透过率越高,到达光敏元的能量越大,弥散斑直径越小,能量密度越高,探测能力越强,但同样在增加到一定范围后会引入更多噪声,致使探测概率降低。另外,当光学系统参数根据环境设置合理时,探测概率可以达到 0.95 以上。

另外,像元的大小和曝光时间也会影响探测能力,图 8 为不同 CCD 像元大小和曝光时间与串扰概率的关系。

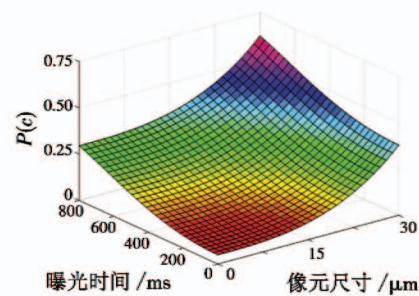


图 8 光学参数对串扰概率的影响

Fig. 8 Influence of optical parameters on crosstalk probability

从图 8 可以看出,像元尺寸越大,单像元接收的光

子数越多,平均量子效率变高,光电转换比变高,噪声产生的光电子数变大,导致串扰概率增加;而曝光时间越长,收集光背景噪声光电子数的增幅大于目标光电子数的增幅,导致了探测系统成像串扰概率随曝光时间的增大而增加。因此,为了提高系统探测概率,避免串扰引起成像性能的降低,光学系统参数在满足一定要求的情况下不可设置过大,而当光学系统参数根据环境设置合理时,成像串扰概率可以降低到 0.05 以下。

4 结束语

本文分析了强辐射背景下光电成像探测性能计算方法,依据空间目标辐射特性,建立了光电探测灵敏度、信噪比以及探测串扰概率模型,分析了实际探测过程中影响探测性能的因素;通过计算分析分别给出了目标辐射特性对探测能力影响变化曲线,信号处理与光谱滤波技术对探测能力影响变化曲线,以及光学参数对探测能力影响变化曲线,验证了理论分析的合理性,为光电探测性能的改善提供了有效的理论依据。

参考文献

- [1] LI H S. Detection distance calculation model of flying target and atmospheric influence analysis [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 129:248-255.
- [2] LI H S, LEI Z Y. Study and analysis on a new optical de-

tection design method for photoelectric detection target [J]. *Sensor Review*, 2013, 33(4):315-322.

- [3] LI H S. Target infrared radiation calculation model and method based on finite element analysis method in infrared photoelectric detection system [J]. *Sensor Review*, 2017, 37(1):26-32.
- [4] LI H S. Space target optical characteristic calculation model and method in the photoelectric detection target [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13):3689-3694.
- [5] 赵慧洁,谷建荣,籍征,等. 红外多光谱技术在昼夜交替时段探测的应用[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2):84-90.
- [6] 杨帆,宣益民,韩玉阁. 空间目标红外地基探测的信噪比分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11):2879-2885.
- [7] 王建立. 空间目标地基光电探测与识别技术的发展[J]. *飞行器测控学报*, 2015, 34(6):489-499.
- [8] 陈超,杨鸿儒,吴磊,等. 水下目标光电探测技术及其进展[J]. *应用光学*, 2011, 32(6):1059-1066.
- [9] 谭碧涛,陈洪斌,王群书,等. 光电系统对空间目标探测能力综合评估方法[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(1):011013-1-011013-6.
- [10] 李振伟. 空间目标光电观测技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2014.
- [11] 朱炳利. 基于 CCD 的超快光电探测方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [12] 吴庆川. 高分辨率整层大气透过率直接测量技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2017.

(上接第 10 页)

仿真结果表明,引入无人机平台的使用风险成本对任务执行成本进行扩展,在很好地进行传感器调度的同时能减小无人机平台的使用风险,有利于提高无人机执行任务时的生存力。

4 总结

本文以多平台传感器最优任务规划为目标,结合隐马尔可夫建模理论,建立了基于信息熵理论的传感器调度决策模型,从而使针对特定任务的多平台传感器调度使用的成本最优化。在此基础上,研究了在一些特殊情况下的传感器动态调度策略,为减少无人机平台的使用风险,提出了包含风险成本在内的扩展任务成本的概念,并基于此进行了无人机平台传感器的任务调度仿真。仿真结果表明,通过对传感器平台的优化调度,可以在平台使用风险最低的情况下达到多传感器平台的调度成本最优化目标,从而为战场环境中不确定性建模和分析奠定了基础。

参考文献

- [1] DAMARLA T. Hidden Markov model as a framework for

situational awareness [C]//The 11th International Conference on Information Fusion, 2008:676-682.

- [2] 阳东升. 指挥控制组织设计方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- [3] AN W, SINGH S, PATTIPATI K, et al. Dynamic scheduling of multiple hidden Markov model-based sensors [J]. *Journal of Advances in Information Fusion*, 2008, 3(1):33-49.
- [4] BOUSSEMART Y, FARGEAS J L, CUMMINGS M L, et al. Comparing learning techniques for hidden Markov models of human supervisory control behavior [C]//AIAA Infotech@ Aerospace Conference, 2009:1-13.
- [5] 吴漫君. 基于隐马尔可夫模型的股价走势预测[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [6] PAK C. Near real-time risk assessment using hidden Markov models [D]. Fort Lauderdale: Nova Southeastern University, 2011.
- [7] 吕迎迎. 空天地信息网络下协同作战指挥控制组织设计研究[D]. 西安:西北工业大学, 2013.
- [8] AN W. Hidden Markov model-based formulations of sensor scheduling in dynamic environments [M]. Ann Arbor: ProQuest Dissertations & Theses, 2011.
- [9] 王志堂,蔡淋波. 隐马尔可夫模型(HMM)及其应用[J]. *湖南科技学院学报*, 2009, 30(4):42-44.