

基于信噪比的紫外红外复合告警系统模型

赵建川¹, 陈兆兵^{2,3}, 郭劲², 林洪沂^{2,3}, 周超^{2,3}, 冯栋彦^{2,3}

(1. 海军驻哈尔滨汽轮机有限责任公司军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150046;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:提出一种将红外告警与紫外告警相复合的全新告警模式。该模式能够在保证探测精度、探测距离的前提下大大降低系统虚警率,提高平台的战场生存能力。参考目前流行的设计方法,针对所提出的复合告警模式,采用了一种基于信噪比的方法对系统建模,并分析了大气透过率、探测器性能、探测信噪比以及目标背景辐射之间的关系,确立了系统探测距离和所需光学孔径的关系以及系统分辨率和光学系统焦距的关系。对系统进行分析和测试表明,该系统在实现探测距离为7.5 km条件下,分辨率可达 0.01° ,方位误差可限定在 0.04 mrad下。分析结果表明,该模型完全满足系统设计需要,对后续的光学和机械伺服参数的确定具有重要意义。

关键词:光电探测;复合告警;参数建模;信噪比

中图分类号:TN219 文献标识码:A

UV and IR complex warning system based on signal-to-noise

ZHAO Jian-chuan¹, CHEN Zhao-bing^{2,3}, GUO Jin², LIN Hong-yi^{2,3}, ZHOU Chao^{2,3}, FENG Dong-yan^{2,3}

(1. *Naval Resident Office at Harbin Turbine Co. Ltd., Harbin 150046, China;*

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: A new kind of UV and IR complex alarm warning system was presented to lower system false alarm rates and to improve platform protection levels under the conditions of guaranteeing the detection precision and distance. By referencing the popular design method, a model based on Signal-to-Noise Ratio (SNR) was designed for the proposed complex warning model. Then, the relationship among the atmosphere transmissivity, detector capability, detection SNRs and the target background radiation was analyzed, and the dependences of the detection distance on the optical apertures and the system resolution on the optical system focuses were established. After analysis and testing, it is shown that the system resolution can reach 0.01° , and the azimuth error is less than 0.04 mrad when the detection distance is 75 km, which indicates that this model can meet the system need and can set a foundation for the next designs for optics, mechanical and servo

systems.

Key words: opto-electronic detection; complex warning; parameter modeling; Signal-to-Noise Ratio (SNR)

1 引言

目前的导弹告警设备主要用于机载和舰载,多采用双色红外、红外与激光复合等告警系统,这些系统技术要求普遍较高,价格也比较贵;而在高价值地面作战平台的防护方面,各国的高效率低成本设备并不多见。本文所提出的新型告警系统的新颖之处在于采用了红外波段告警和紫外波段告警相复合的特殊方式,采用该方式可选用价格相对低廉的单个普通 IR/UVCCD 来达到较低虚警率和较高精度的告警效果。这种思想是基于我国目前在 CCD 领域的基础性研究不高,无法获得与国外告警类武器同等水平的 FPA 器件的现状而提出的,从而为我国提供了一种近期既能迅速装备部队,又能与国外单一告警装置相抗衡的低成本告警装置,大大提高我军坦克、指挥通讯车、导弹发射车等地面高价值作战平台的战场生存能力。

本文主要介绍基于信噪比模型确定该告警系统光学参数的方法。通过已确定的光学参数进一步确定系统的总体结构形式,从而为下面的结构设计与分析以及各元器件的选择提供理论支持。这种基于信噪比的光电告警系统光学参数设计方法也可以应用到其他光学系统中,具有较好的通用性。由于该告警系统采用复合型告警模式,因此本文在论述过程中采用了对紫外与红外设计相互比较的方式进行参数设计。

2 UV/IR 光学系统基本参数与系统信噪比模型的建立

光学系统参数的确定是告警器设计的第一步,也是整个设计过程中最重要的步骤之一。本文采用基于信噪比的系统模型进行设计,这种方案可以降低模型的复杂程度,较为简洁地表示设计过程中影响系统光学参数的因素。光学系统的基本参数是光学孔径 D 和焦距 f , 下面的论述主

要针对这两个参数的确定展开。

图 1 示出了红外探测系统的主要工作过程:目标通过光学系统在探测器平面上成像,经后续的电子学处理输出探测信号^[1]。在这一过程中,系统的探测能力将受到背景干扰和大气衰减等因素影响^[2]。对于搜索告警系统而言,往往认为目标小于系统的瞬时视场,即认为其为点目标^[3]。本系统就是根据点目标进行探测和告警的。

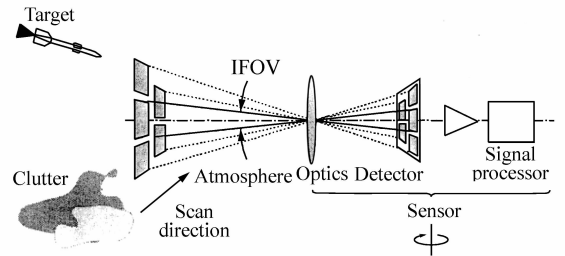


图 1 紫外红外探测场景图

Fig. 1 UV/IR exploration scene

距离为 R 的探测器在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 上接收的辐射通量为 ϕ_{receiver} 。

$$\phi_{\text{receiver}} = \frac{I(\lambda)}{R^2} \cdot A_o \tau_a \tau_o (R, \lambda), \quad (1)$$

其中 $I(\lambda)$ 为辐射源在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 上的辐射出射度, R 为辐射源到探测器的距离, A_o 为探测系统的光学孔径面积, $A_o = \pi D^2/4$, 其中 D 为入瞳直径。 $\tau_a(R, \lambda)$, τ_o 分别为大气和光学系统的透过率。

对探测系统而言,当其接收到的辐射能量大于探测器可反应的最小辐射通量 S_{min} 时,才可探测到目标^[4],即有如下关系成立:

$$\phi_{\text{receiver}} \geq S_{\text{min}}, \quad (2)$$

当探测器噪声为系统的主要干扰时,可将系统看作噪声限探测系统^[5]。噪声限探测系统有下列关系。

$$S_{\text{min}} = (\text{SNR}) \text{NEP}, \quad (3)$$

其中, SNR 为系统探测要求的信噪比, NEP 为探测器的噪声等效功率,可表示为 $\text{NEP} = (\Delta f \times A_d)^{1/2} / D^*$, 其中, Δf 为系统的等效噪声带

宽; A_d 探测器的像元面积; D^* 为探测器的光敏探测度。

综合式(1)、(2)、(3),系统探测要求的信噪

$$SNR = \frac{I(\lambda)\tau_a(R,\lambda)}{R^2} \cdot \frac{D^*}{\sqrt{\Delta f \times A_d}} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \tau_o(\lambda), \quad (4)$$

通常,满足探测要求的最低信噪比 SNR 由系统的性能参数虚警概率和探测概率决定^[6]。系统的虚警概率是由噪声电压超过门限电压引起的。当只有噪声输入时,考虑噪声服从瑞利分布,虚警率用式(5)表示:

$$p_{fa} = p(T < V < \infty) = \int_T^\infty \frac{V}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{V}{\sigma}\right)^2\right] dV = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{V}{\sigma}\right)^2\right], \quad (5)$$

其中 V 为噪声的幅值; σ 为噪声电压的均方根偏差; V/σ 为门限信噪比。当信号、噪声同时输入系统时,探测概率为“信号+噪声”的幅值超过门限电压 T 的概率。当 $SNR > 7$ 时,分布趋向高斯分布^[7],此时,探测概率如式(6)。

$$p_d = \int_T^\infty p_d(\rho) d\rho = \int_T^\infty \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\rho-a}{\sigma}\right)^2\right] d\rho = \Phi\left(\frac{a-T}{\sigma}\right), \quad (6)$$

$$\frac{a}{\sigma} = \frac{a-T}{\sigma} + \frac{V}{\sigma}, \quad (7)$$

其中 ρ 为“信号+噪声”的幅值; a 为信号幅值; T 为门限电压。可见,根据系统的探测概率和虚警概率一般可以确定系统探测所需的信噪比。

对于本系统,提出的性能指标探测概率 p_d 为 96%,红外虚警时间 τ_{fa} 为 1 次/2 h,紫外虚警时间为 1 次/10 h^[8],其中,虚警概率 p_{fa} 用虚警时间 τ_{fa} 表示为式(8):

$$p_{fa} = \frac{1}{f_0\tau_{fa}}, \quad (8)$$

其中 f_0 为系统的电子通带中心频率。取系统的电子通带中心频率为 50 Hz,经计算,系统的虚警概率 p_{fa} 为 5.56×10^{-6} ,同时,已知系统所要求的

比可由式(4)表示,因为紫外和红外采用同样的探测模式,因此,可采用同一个噪声比模型。

探测概率 p_d 为 96%。根据式(5)、(6)、(7),并代入所选紫外和红外 CCD 的具体参数,可求得满足探测要求的红外信噪比为 7,紫外信噪比为 7.2。

3 UV/IR 探测系统与光学参数之间关系的分析

探测器的最小可分辨单位为一个像元,反映到空间为瞬时视场,即为单个像元对应的视场角。水平和垂直瞬时视场可分别表示为 HIFOV 和 VIFOV。红外系统要求的垂直观场为 4° ,则系统的瞬时视场 IFOV 为 $IFOV = 4^\circ/384 = 0.010^\circ$,即 $36''$;而紫外 CCD 的俯仰与方位视场要求均为 60° ,因此可依据前述公式得到紫外的瞬时视场。因为系统的瞬时视场由光学系统的焦距及探测元件的有效面积决定,得到系统的瞬时视场和探测像元面积,即可求出对应的光学系统的焦距。

设探测器尺寸为 $l \times d$ (垂直 \times 水平),光学系统以探测器为视场光阑。假设目标的尺寸为 L ,其在探测器上的投影尺寸为 l ,如图 2,可以得到系统焦距为 f' 与像方半视场角 ω 关系为:

$$\tan\omega = \frac{l}{2f'}, \quad (9)$$

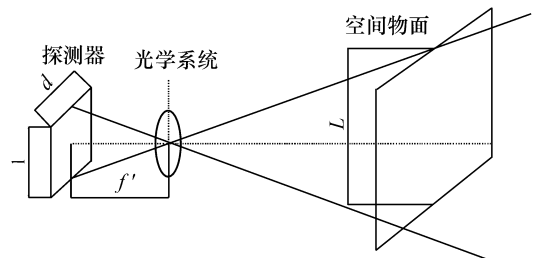


图2 焦平面和物空间对照图

Fig. 2 Comparison of focal plane and aim space

上式是一个简化的一维表达式。因为任何光

学系统的视场都是两维的,则垂直和水平半视场角可分别表达为:

$$\begin{aligned}\bar{\omega}_V &= \tan^{-1} \frac{1}{2f'} \\ \bar{\omega}_H &= \tan^{-1} \frac{d}{2f'},\end{aligned}\quad (10)$$

由于瞬时视场很小,正切值可用弧度代替,若单像元尺寸为 $a^* \times b^*$ (垂直 \times 水平),瞬时视场为 IFOV,则有:

$$\begin{aligned}\text{IFOV}_V &= \alpha = \frac{a^*}{f'} \\ \text{IFOV}_H &= \beta = \frac{b^*}{f'},\end{aligned}\quad (11)$$

根据瞬时视场与焦距的关系,可以得到红外系统与紫外系统的焦距,其中红外系统焦距为 186 mm,紫外系统焦距为 108 mm。随着系统焦距的增大、光学视场减小,即系统的分辨率随着焦距的增加而增加。因此为了保证系统的光学视场要求,选用的红外焦距要 ≤ 186 mm,紫外焦距要 ≤ 108 mm。系统的分辨率不仅与探测器的像元尺寸有关,而且还随着焦距的增大而增大,它决定跟瞄告警的精度。已知系统给出的性能指标为跟瞄定向精度 $3'$,相当于单个像元对应的视场角要 $< 0.050^\circ$ 。而紫外的扫描精度比较低,要求视场角为 1° 。根据式(11)可知,红外系统的最小焦距为 40 mm,而紫外系统的最小焦距为 28 mm。由此可确定系统的焦距范围,其中红外系统为 40 ~ 186 mm,紫外系统为 28 ~ 108 mm。

针对大气辐射影响,利用光学系统孔径与探测距离、大气透过率之间的关系曲线进行了目标辐射强度计算,结合对系统焦距的分析,选取红外和紫外系统探测距离可靠系数均为 1.5,即当探测距离为 11.25 km 时,红外光学系统的探测孔径取 100 mm,紫外光学系统的探测孔径取 80 mm,

即可满足系统的探测距离要求。同时选定红外系统焦距为 160 mm,紫外系统焦距为 50 mm。

4 基于信噪比的光学参数的实验分析

本文依据基于信噪比的光学参数设计方法,对所要设计的紫外红外复合告警系统进行了相关分析,并依据系统的信噪比模型得到了紫外告警系统和红外告警系统各自的通光孔径和焦距。以此为基础,进行了相关的机械设计和光学结构设计,并在验证机上进行了相关的验证,得到了良好的探测跟踪效果。对系统进行了相关的实验与评估后,得到系统在实现探测距离为 7.5 km 条件下,分辨率可达 0.01° ,方位误差可以限定在 0.4 mrad 下,而系统的虚警率也基本维持在 1 次/10 h 以下。结果表明,这种基于信噪比的光学基本参数设计方法是可行的、有效的。

5 结 论

本文首先提出了复合告警的思想,根据紫外告警和红外跟踪相结合的设计思路进行高效告警装备的小型化和低成本化设计。针对系统探测指标要求,建立了基于信噪比模型的紫外与红外系统探测性能参数模型,通过对大气透过率、探测器性能、探测信噪比要求、目标和背景辐射特性等参数的分析,确立了系统探测距离和所需光学孔径的关系,并分析了系统分辨率和光学系统焦距的关系。根据系统的探测性能指标,确定了满足系统要求的紫外红外光学系统基本的结构参数。依据紫外与红外光学参数设计了整个系统,并进行了相关的验证性实验,实验证明该方法是可行的,完全可以应用于其它光学系统的设计中。

参考文献:

- [1] DOWNEY G, STOCKUM Y. Electro-optical tracking considerations[J]. *SPIE*, 1989, 1111: 70-84.
- [2] DOWNEY G A. Electro-optical tracking considerations II[J]. *SPIE*, 2003, 5082: 139-153.
- [3] 王兵学, 张启衡, 陈昌彬, 等. 凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型[J]. *光电工程*, 2004, 31(7): 60-64.
WANG B X, ZHANG Q H, CHEN CH B, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2004, 31(7): 60-64. (in Chinese)

- [4] 王卫华,牛照东,陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究[J]. 红外与毫米波学报,2006,25(2):150-152.
WANG W H, NIU ZH D, CHEN Z P. Research on the operating range of staring IR imaging system in sea-sky background [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, 25(2):150-152. (in Chinese)
- [5] ACCETTA J S, Shumaker D L. The Infrared and electro-optical system handbook[J]. *SPIE*, 1993, 2018:560-567.
- [6] 张葆,洪永丰,史光辉. 非均匀校正在红外杂散辐射抑制中的应用[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2421-2427.
ZHANG B, HONG Y F, SHI G H. Application of non-uniformity correction to stray radiation suppression of infrared optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2421-2427. (in Chinese)
- [7] 李润顺,袁祥岩,范志刚,等. 红外成像系统作用距离的估算[J]. 红外与激光工程,2001,30(1):1-4.
LI R SH, YUAN X Y, FAN ZH G, *et al.*. Operating range prediction of infrared imaging system[J]. *Infrared Laser Eng.*, 2001, 30(1):1-4. (in Chinese)
- [8] 王立辉,郁蕴健,陆段军. 大线视场大相对口径红外成像系统的光学设计[J]. 红外与毫米波学报,2008,21(1):39-41.
WANG L H, YU Y J, LU D J. Optical design of IR imaging system with large linear field of view and large relative aperture [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2008, 27(1):39-41, 46. (in Chinese)

作者简介:赵建川(1969—),男,汉族,吉林长春人,工程师,主要从事光电设备研制和改造的研究。

E-mail:zaojc@ciomp.ac.cn