

文章编号 1004-924X(2009)10-2359-06

# 基于 Lowtran 软件包和 Gabor 匹配提高紫外告警系统探测距离

陈兆兵<sup>1,2</sup>, 郭 劲<sup>1</sup>, 姜伟伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为解决紫外告警探测距离近和红外告警虚警率高的矛盾,提出了一种紫外告警与红外跟踪相复合的应用于地面设备的新型告警/跟踪一体化模式。重点分析了紫外告警系统的探测机理、捕获条件及影响其作用距离的各种因素。基于 Lowtran 软件包建立了紫外告警系统探测距离估算模型用于精确估算近程固体推进剂导弹的探测距离。考虑 UVCCD 图像信号处理对探测距离的重要影响,采用基于 Gabor 特征的图像匹配方案有效提高系统灵敏度。系统仿真实验表明,该模型在系统硬件不变以及虚警率保持 1 time/10 h 的条件下能将探测距离估算误差控制在 5% 以内,可将目前紫外告警系统的探测距离由 5 km 提高到最远 8 km,提高了告警系统的探测质量。本方案模型亦可用于其他光电探测设备。

**关键词:**复合告警;紫外告警;探测距离;目标探测;信噪比

**中图分类号:** TN97      **文献标识码:** A

## Improvement of detecting distance of UV warning system by Lowtran package and Gabor matching

CHEN Zhao-bing<sup>1,2</sup>, GUO Jin<sup>1</sup>, JIANG Wei-wei<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A new kind of UV and IR composite alarm warning system used in ground equipment was proposed to solve the problems of low detecting distances for a UV warning system and high false alarm for a IR warning system. The detecting mechanisms, capturing conditions and effecting distances of the UV warning system were analyzed. Then, a mode for estimating the detecting distance of the UV warning system based on Lowtran was established to calculate the UV warning system's detecting distance to a solid fuel missile. In consideration of the effect on the detecting distance, a new way based on Gabor for matching the diagnostic image was used to improve the detecting accuracy for distances. Some experiments to validate our theory and detecting mode were carried out, results show that the detecting distance veracity can be controlled below 5%, and the warning distance can be improved from 5 km to 8 km when the void rate is below 1 time per 10 hours. Using the proposed detec-

收稿日期:2008-11-07;修订日期:2008-12-23.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 061X20C0660)

ting mode, the detecting efficiency of the complex warning system is enormously improved. This detection mode can also be used in other optical detection equipment.

**Key words:** complex warning; Ultraviolet (UV) warning; detecting distance; target detection; Signal to Noise Ratio(SNR)

## 1 引言

近程导弹打击在现代战争中已经成为两军直接对抗时进行定点清除的有效手段。传统上各国一直比较关注战机、军舰等高价值作战设备的防护,发展了一系列机载、舰载防卫武器装备。但随着低成本精确打击导弹的广泛应用,地面重要武器装备的防护问题已经成为一个不可忽视,甚至影响战局的因素。基于此,本文设计了一种专门用于地面武器装备自身防卫的告警、跟踪与对抗一体式的模块化、小型、低成本光电对抗系统,主要应用于陆军指挥通讯车、导弹发射车、坦克、装甲车等高价值地面设备对近程、低速、固体导弹的被动防护。

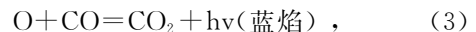
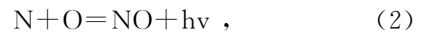
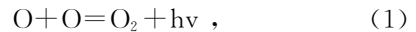
大气中的臭氧层对 200~300 nm 波长的紫外光强烈吸收,因而大气中几乎不含有这个波段的背景光,此波段被称为“日盲区”。采用日盲区紫外波段的紫外告警系统的虚警率非常低,但在探测距离和探测精度方面均不能满足引导对抗武器进行有效对抗的要求。而红外告警系统却恰好能弥补紫外告警在探测距离与探测精度上的缺陷,并且红外告警本身的易受干扰、视场较小等不足可以由紫外告警的优点所弥补。因此,本文提出一种将这两种告警系统结合起来的告警跟踪方案,希望采用较低的成本,使两者达到优势互补。本文重点分析了紫外/红外复合告警系统中紫外分系统在探测距离方面的影响因素,并针对这些因素提出一系列提高紫外告警系统探测距离的方法。选用目前先进的第三代最大射程在 10 km 以上的对地导弹的攻击参数作为设计依据,重点解决了紫外告警系统的短距离告警缺陷的问题,提出了一种基于 Lowtran 软件包的紫外告警系统探测距离估算模型和基于 Gabor 特征的图像匹配方案。最后对模型进行了仿真实验研究,并在某型号复合告警系统的硬件上进行了验证。结果表明采用新模型系统后,告警距离的估算精度大为提高,同时可将紫外告警系统的有效探测距

离由原来的最大 5 km 提高到最大 8 km。由于采用日盲区紫外告警波段,因此在告警距离提高的同时其虚警率依然能够满足在 1 time/10 h 的设计要求,从而大大提高了地面装备的防御性能,为有效实施光电对抗赢得宝贵的时间。

## 2 紫外告警系统原理与探测质量影响因素

### 2.1 紫外告警系统工作原理

近程导弹在进行攻击的整个过程中发动机几乎是不熄火的,因此可以通过探测导弹羽烟中的近紫外和中紫外辐射来对攻击导弹进行预警。紫外告警系统就是利用这一特点来探测目标的。当今大部分战术导弹均采用固体推进剂,其羽烟中均含有日盲区紫外辐射。导弹紫外辐射产生机理有两种,其一为当物体温度升高时,发出的辐射能量增加,峰值波长向短波方向移动。导弹尾焰中小的未燃尽的粒子如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  在小的非平衡温度下进行二次燃烧,从而保持尾焰温度在 2 000~3 000 K 之间,发出紫外光。其二为化学荧光中化学动力学过程导致的非平衡自由辐射,高浓度的尾焰中含有高浓度的 C, N, H, 这些物质相互作用发生化学反应,即可产生可用于探测的紫外光子,其反应方程如式(1)~(4)所示<sup>[1]</sup>。



本文所设计的复合告警跟踪系统采用 6 个固定的紫外探测器均布于系统的周围。由于采用凝视扫描,因此可以采用较高的探测帧频实现 360° 全空域覆盖的探测。紫外系统将威胁目标的空间位置信息送到信号处理系统进行处理,通过辐射定标等手段对目标的威胁等级进行排序,将最具威胁的目标的方位和俯仰信息提交给红外跟踪系统,伺服跟踪系统驱动红外跟踪器进行目标的精

确跟踪,从而为对抗系统提供来袭导弹的精确方位信息。系统使用高灵敏度、高分辨率的成像型 UVCCD 来探测目标,经采用本文所述方法后可将探测距离提高到 8 km,反应时间为 0.5 s,留给对抗的时间达到 12 s 以上。

## 2.2 影响紫外告警系统探测距离性能的因素

探测距离为  $R$  的紫外探测器在波谱段  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  上接收的辐射通量可表示为式(5)<sup>[2]</sup>:

$$\Phi_{\text{receiver}} = \frac{I(\lambda)}{R^2} A_0 \tau_a \tau_o(R, \lambda), \quad (5)$$

其中  $I(\lambda)$  为辐射源在波谱段  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  上的辐射出射度,  $R$  为辐射源到 UVCCD 的设定距离,  $A_0$  为探测系统的光学孔径面积,  $A_0 = \pi D^2/4$ , 其中  $D$  为入瞳直径。  $\tau_a(R, \lambda)$ ,  $\tau_o$  分别为大气和光学系统的透过率。

由式(6)可得影响设定探测距离  $R$  的因素

$$R = \sqrt{\frac{I(\lambda) A_0 \tau_o \tau_a(R, \lambda)}{\Phi_{\text{receiver}}}}. \quad (6)$$

涉及导弹羽烟的辐射出射度、大气透过率、光学系统的透过率、光学系统的入瞳直径、UVCCD 系统对辐射能量的灵敏度<sup>[3]</sup>(图像处理方案的灵敏度)。

本系统的设计参数为:紫外告警部分的虚警率为 1 time/10 h,探测概率在 96% 以上。满足探测要求的最低信噪比 SNR(见式(7))由系统的性能指标参数、虚警概率和探测概率决定<sup>[4]</sup>。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(8)表示<sup>[5]</sup>,

$$\text{SNR} = \frac{I(\lambda) \tau_a(R, \lambda)}{R^2} \cdot \frac{D^*}{\sqrt{\Delta f \times A_d}} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \tau_o(\lambda), \quad (7)$$

$$p_{\text{fa}} = p(T < V < \infty) \int_T^\infty \frac{V}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{V}{\sigma}\right)^2\right] dV = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{V}{\sigma}\right)^2\right]. \quad (8)$$

其中  $\Delta f$  为系统的等效噪声带宽,  $A_d$  为探测器的像元面积,  $D^*$  为探测器的光敏探测度,  $V$  为噪声的幅值,  $\sigma$  为噪声电压的均方根偏差,  $V/\sigma$  为门限信噪比。

依据设计要求,本文确定的紫外告警系统的信噪比为 7.2。为了提高系统的探测距离,在满足系统信噪比要求,并且大气透过率和光学系统入瞳直径不变的情况下用更好的模型来计算导弹

羽烟的紫外辐射出射度,提高光学系统的透过率,本文采用基于 Gabor 特征的图像配准方案来对 UVCCD 的探测结果进行建模分析。通过这些方法,可将紫外告警系统的探测距离由原来的 3~5 km 提高到现在的 5~8 km。

## 3 提高紫外告警系统探测距离的估算模型与图像处理方案

紫外告警系统的距离估算模型与图像处理方案的灵敏性是影响系统实际探测距离的两个主要原因。在距离估算模型的建立过程中本文既考虑羽烟中紫外辐射又考虑固体导弹发动机喷口处的紫外辐射,这样比常规的只考虑羽烟中的紫外辐射进行计算要准确得多。后续的仿真实验研究证明模型的准确性对于主动提高系统的探测距离有重要的支持作用。UVCCD 要将探测结果实时地传递给信号综合处理系统,由信号处理系统来进行目标信息的匹配与提取,因此处理方案的合理性是影响探测效果的至关重要的因素。在本文的系统中,采用了基于 Gabor 特征的图像配准方案来进行紫外信号的处理,研究表明采用这种方案能大大提高整个系统的灵敏度,使系统在 8 km 距离处仍能准确地提取到威胁目标。

### 3.1 紫外告警系统探测距离模型的建立

所建立的估算模型在紫外辐射方面主要考虑发动机喷口和羽烟中的辐射能量,其中羽烟中的辐射能量是主要部分,发动机喷口处的紫外辐射出射度能量如式(9)所示。

$$I = L \Delta A \cos \theta = \frac{\alpha \epsilon T^4 \Delta A \cos \theta}{\pi}. \quad (9)$$

其中  $I$  为全辐射强度,  $L$  为全辐射亮度,  $\Delta A$  为发动机喷口出口面积,  $\theta$  为发动机喷口截面法线与观测方向的夹角,  $\epsilon = 0.9$  为发射系数,  $T$  为发动机喷口温度。

在日盲型紫外波段中,发动机喷口处的辐射传到 UVCCD 处的能量公式如下<sup>[6]</sup>:

$$L_\lambda = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda d\lambda, \quad (10)$$

$$I_\lambda = L_\lambda \Delta A \cos \theta, \quad (11)$$

$$E_\lambda = \frac{I_\lambda}{d^2}. \quad (12)$$

其中  $L_\lambda$  为紫外辐射亮度,  $I_\lambda$  为紫外辐射强度,  $E_\lambda$

为紫外辐射照度,  $\lambda$  为波长,  $R$  为探测距离,  $M_\lambda$  为黑体光谱辐射度。

固体导弹目前主要采用掺铝高推力固体推进剂, 其辐射强度变化如图 1 所示。从图中可以看出, 随着探测方位角的增加, 导弹羽烟的辐射强度逐渐增大。当导弹为迎头方向时, 弹体要遮挡部分羽烟, 但羽烟的散射因素可以为 UVCCD 提供足够高的探测能量<sup>[7]</sup>。

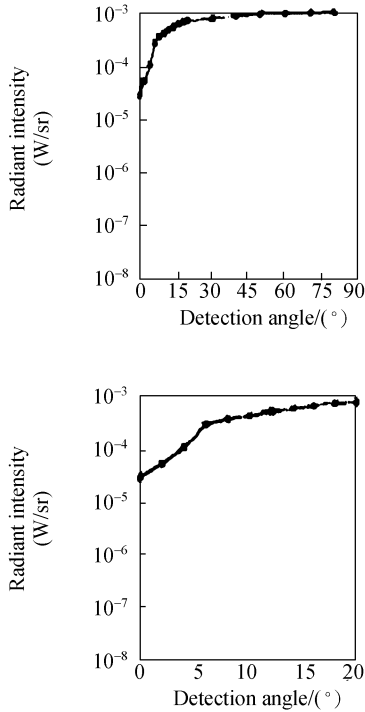


图 1 固体导弹羽烟辐射强度变化

Fig. 1 Smoke radiant intensity movement of solid missiles

发动机羽烟中的紫外辐射能量与导弹飞行状态、周围大气环境等有密切关系, 其计算较为复杂。在计算过程中采用微观谱带模型算法, 将羽烟进行有限元式的分层计算, 然后做近似积分运算, 最终得到羽烟的辐射亮度  $L_\lambda'$  和辐射照度  $E_\lambda'$ , 如式(13)、(14)所示。

$$L_\lambda' = \sum_m \sum_\omega L_{m,\omega} \cdot \Delta\omega = \sum_m \sum_\omega -L_{bb,m,T_m} \cdot [(\tau)_{m,\omega} - (\tau)_{m-1,\omega}], \quad (13)$$

$$E_\lambda' = \frac{L_\lambda'}{d^2}. \quad (14)$$

其中  $L_{m,\omega}$  为分层后的单层光谱亮度,  $\Delta\omega$  为波数间隔,  $L_{bb,m,T_m}$  为黑体光谱辐射亮度,  $(\tau)_m$  为每层光

谱透过率。将  $E_\lambda$  与  $E_\lambda'$  相加即为系统的总体辐射照度, 这里选用的是迎头方向的导弹辐射照度。

紫外告警系统的探测距离模型采用 Lowtran 仿真软件包来确立, 这个软件包是美国空军地球物理实验室编写的, 具有较高的精度和较强的经验性, 是目前公认的大气仿真软件包。利用它得到实验场地的大气衰减系数, 同时利用导弹的总体辐射强度来计算实际的告警探测距离, 如式(15)所示, 在计算过程中充分考虑了迎头导弹的弹体对紫外信号的遮挡影响。

$$R^* = (I^* \tau)^{1/2} \left( \frac{\pi D_0 D \tau_0}{2} \right)^{1/2} (D^*)^{1/2} \left[ \frac{\sigma}{(\omega \Delta f)^{1/2} V (1 + \gamma)} \right]^{1/2}. \quad (15)$$

其中  $I^*$  为总体辐射强度,  $\tau$  为探测环境大气透过率,  $D_0$ 、 $D$  分别为光学系统入射孔径和数值孔径,  $\tau_0$  为所有光学零件光谱透过率乘积,  $D^*$  为探测器光谱探测率,  $\omega$  为探测系统瞬时视场角,  $\Delta f$  为探测系统等效噪声带宽,  $V/\sigma$  为探测系统门限信噪比,  $\gamma$  为系统噪声增加百分比。

### 3.2 基于 Gabor 特征的图像处理方案

UVCCD 系统能否对一定距离内的导弹目标做出反应, 很大程度上取决于信息处理系统对变化背景下运动目标的信息处理能力。目前主要采用基于特征和基于梯度的方法来提取运动目标<sup>[8]</sup>, 本文采用基于 Gabor 特征的告警系统自动补偿方法来检测微弱紫外信号。仿真实验证明该方法能大大提高系统的探测距离, 在精确的距离模型支持下, 其探测微弱信号的能力大大提高。

首先用 WITKIN 和 LINDBERG 提出的尺度空间理论对 UVCCD 传送到信息处理系统的图像进行卷积<sup>[9]</sup>, 得到不同尺度参数下各帧图像的表达形式。然后将帧中各兴趣点与设定好的阈值进行比较, 去除不适合匹配的噪声点, 余下的点即为后续处理的参数点。采用相关算法找到这些点的特征方向, 然后对图像上的点进行匹配, 以此来区分是否为可靠的匹配, 同时将在阈值外的相对不可靠的图像点去掉, 最后代入式(16)所示的 8 参数投影变换模型进行描述, 即可求得匹配点的投影变换关系<sup>[10]</sup>。其中  $\mathbf{M}$  为投影变换矩阵,  $(x_a, y_a, 1)$ ,  $(x_b, y_b, 1)$  分别为不同视角探测到的示例对应点的齐次坐标。

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 \\ n_4 & n_5 & n_6 \\ n_7 & n_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

本文采用这种模型匹配方案有效解决了以往硬性匹配带来的较大偏差,因为在剔除不可靠点的条件下进行正确匹配,然后将正确匹配的结果反向代入所有帧匹配模型,对不可靠点采用插值补偿原则进行修正<sup>[1]</sup>,这样的数据处理方法有效抑制噪声,提取微弱的紫外信号,在保证低虚警率的同时大大提高了整个系统的灵敏性,有效提高了系统的探测距离。在安全系数为 1.5,虚警率保持 1 time/10 h 的情况下,系统在晴朗的中纬度干燥地区的探测距离最高可达 8 km。

## 4 紫外告警系统参数模型仿真实验分析

为了验证所提出的紫外告警系统距离探测模型和图像匹配算法模型对提高系统告警距离的作用,进行了半实物仿真研究和外场距离探测仿真实验。在仿真实验研究过程中采用紫外羽烟模拟装置来模拟近程固体导弹的紫外辐射。该装置硬件包括卤钨灯、反射镜装置以及滤光片等核心部件,同时还有将这些部件整合到一起的外框架以及运动驱动装置;软件方面包括驱动卤钨灯的驱动电路和驱动步进电机的驱动板。依据式(15)设定和验证了系统的探测距离,同时对所提出的图像处理方案与常规的直接进行图像匹配与提取的图像采集方案进行了比较。进行外场仿真实验时,采用逐渐逼近法来验证新方案对紫外信号的敏感性,通过由远及近和由近及远的手段不断调整紫外羽烟模拟装置与紫外告警系统的中心距

离。考虑到实际的导弹是在空中飞行,其环境与地面仿真环境在大气的透过率、吸收、散射等方面有差异,所以在实验过程中采用相关经验参数对探测结果进行了修正。

仿真实验研究表明,本文所提出的紫外告警系统的距离探测模型在充分考虑导弹发动机喷口紫外辐射和羽烟紫外辐射的条件下,能进一步提高探测距离的估计准确度,其误差范围在 5% 以内,能为实际探测距离参数的准确设定提供有效支持。基于 Gabor 特征的图像匹配模型能有效提高系统的灵敏度,将系统的探测距离提高到 8 km,且在系统探测距离提高的过程中并未牺牲系统的低虚警率特性。

## 5 结 论

本文针对小型光电告警与跟踪系统,提出了将紫外告警与红外跟踪系统进行复合的思想,既可以发挥紫外告警的低虚警率、高探测灵敏性、设备简单、无须制冷等优点,又能抑制其探测距离较近、指向精度不高等缺点,为高价值地面设备的防护提供了一种低成本、高效率的告警跟踪对抗一体化小型设备。针对紫外告警系统探测距离较近的问题,重点探讨了一种准确估算告警距离的探测距离模型和图像匹配模型,通过分析研究证明这两种模型具有较好的实用性,完全能够满足提高探测距离的设计要求,可以在硬件条件不变,虚警率保持在 1 time/10 h 以下的情况下将系统在良好环境状况下的最远探测距离由 5 km 提高到 8 km,告警距离估算模型的误差范围控制在 5% 以内。本方案具有一定的推广性,可用于其他光电探测设备,以提高其探测灵敏性和准确性。

## 参考文献:

- [1] 李朝木. 探测导弹羽烟紫外辐射的光电高速采集系统[J]. 电子器件, 2001, 24(3): 237-244.  
LI CH M. Electronic-optical data high-speed acquisition system of ultraviolet radiation missile plume detecting [J]. *Journal of Electron Devices*, 2001, 24(3): 237-244. (in Chinese)
- [2] 王刚, 禹秉熙. 基于对比度的空中红外点目标探测

距离估计方法[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 276-280.

WANG G, YU B X. IR point target detection length estimating method in air [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 276-280. (in Chinese)

- [3] 周立伟. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.

ZHOU L W. *Detection and Recognition of Targets* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)

- [4] 王娟, 杨春平, 吴健. 红外热像仪的作用距离估算[J]. 电光与控制, 2004, 11(3): 17-19.  
WANG J, YANG CH P, WU J. Range estimation of IR thermal imaging system using Matlab[J]. *Electronics Optics & Control*, 2004, 11(3): 17-19. (in Chinese)
- [5] 谢道成, 张为华. 基于助推段红外辐射特性的 SBIRS 探测能力分析[J]. 光电技术应用, 2008, 23(2): 50-53.  
XIE D CH, ZHANG W H. Analysis of SBIRS detecting capability based on infrared radiation character in booster stage[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23(2): 50-53. (in Chinese)
- [6] 万志, 任建伟, 李宪圣, 等. 探测海洋目标的光学遥感器工作波段的选择[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1864-1868.  
WAN ZH, REN J W, LI X SH, *et al.*. Waveband selection of optical remote sensor for detecting marine target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1864-1868. (in Chinese)
- [7] 李程华, 张科, 李言俊. 紫外告警距离测算[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(4): 123-126.  
LI CH H, ZHANG K, LI Y J. The test and calculation for UV warning distance [J]. *Fire Control and Command Control*, 2007, 32(4): 123-126. (in Chinese)
- [8] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. New York: Cambridge University Press, 2000.
- [9] LINDERBERG T. Scale-space for discrete signals [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Mschine Intelligence*, 1990, 12(3): 234-254.
- [10] 张恒, 李立春, 于起峰. 一种新的运动目标检测方法[J]. 光电工程, 2008, 35(9): 11-16.  
ZHANG H, LI L CH, YU Q F. New moving target detection algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(9): 11-16. (in Chinese)
- [11] 陈波, 高亮, 阚珊珊, 等. 极紫外望远镜角分辨率评价方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1644-1648.  
CHEN B, GAO L, KAN SH SH, *et al.*. Evaluation method of angular resolution for extreme ultraviolet telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1644-1648. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈兆兵(1980—),男,山东日照人,博士研究生,2005年于青岛大学机电工程学院获学士学位,主要研究领域是光电跟踪、光电对抗等光机电一体化系统的总体研究。E-mail: chenzhaoqing999@163.com



姜伟伟(1984—),男,山东泰安人,博士研究生,2006年于阜新矿业学院获学士学位,主要从事光电经纬仪机电技术的研究。E-mail: jdw094698@163.com

#### 导师简介:



郭 劲(1964—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士研究生导师,1986年于吉林工学院获学士学位,1989年,2007年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士,博士学位,主要研究领域为光电跟踪和光电对抗系统总体研究。E-mail: china..dragon@163.com