

文章编号:1002-2082(2010)06-0871-05

超大视场红外告警系统的成像特点分析

周玉龙

(军械工程学院 光学与电子工程系, 河北省 石家庄 050003)

摘要: 为了设计出适用于超大视场红外鱼眼告警系统的有效算法, 对超大视场红外鱼眼告警系统所拍摄的红外图像进行分析, 结果发现: 超大视场红外图像中目标只表现为一个点, 红外图像的背景非常复杂; 对于天空背景, 随着仰角的增大, 其辐射亮度逐渐变小, 目标的运动轨迹被弯曲, 并随视场角的增大其弯曲程度越甚。从红外鱼眼镜头的设计理论出发, 对系统的像面照度进行了分析, 并采用美国光电工业公司的CDS100-04型黑体作为标准辐射源对分析结果进行了实验验证, 结果表明: 不同位置处灰度值的相对标准偏差仅为2.26%, 说明该系统的像面照度是均匀的; 最后, 对系统的作用距离进行了分析, 其作用距离约为9.6 km, 基本满足实际需要。

关键词: 超大视场; 红外鱼眼告警系统; 红外图像; 成像分析

中图分类号: TN216

文献标志码: A

Image analysis of ultra-wide field of view infrared warning system

ZHOU Yu-long

(Optical and Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To design proper algorithms for ultra-wide field of view (FOV) infrared fisheye warning system, the infrared image taken by the ultra-wide FOV warning system was studied. The target in the infrared image is a point target, and its background is complicated. For the sky background, its radiance will decrease and target moving track will be bent as the elevation angle increases. Such situation is deteriorated with the increase of FOV angle. Based on the design theory of the infrared fisheye lens, the illumination of the system image plane was analyzed and calibrated with CDS100-04 black body. It is found that the relative standard deviation of the gray value in different positions is only 2.26%, which indicates good image illumination uniformity. Finally, the detection distance of this system is analyzed, which is about 9.6 km.

Key words: ultra-wide field of view; infrared fisheye warning system; infrared image; imaging analysis

引言

红外搜索与跟踪系统因其被动式探测、不易受到干扰、高度隐蔽等特点而受到各国的广泛重视, 被视为未来战争不可或缺的装备之一^[1-5]。高科技

武器的应用使现代战争中的威胁具有全向性, 在空中, 飞机有可能同时遭受来自前、后、左、右、上、下方向的攻击, 对于陆地上的目标, 其有可能遭受来自空中各个方向的袭击, 为此要求红外告警和搜索

收稿日期: 2010-05-30; 修回日期: 2010-08-29

基金项目: 国家 863-707 重大专项课题资助项目(2005AA773011)。

作者简介: 周玉龙(1980-), 男, 河北定州人, 博士研究生, 主要从事光电对抗及信息处理工作。E-mail: zyljq@126.com

跟踪系统具备全向侦测能力。正因如此,世界各军事强国一直将大视角凝视红外成像技术作为红外告警系统的重点研究方向。近年,随着视角 120° ^[6]、 135° ^[7]甚至 180° ^[3]超广角红外镜头相继问世,以此为基础的超大视场红外告警系统将逐步走向实用^[8]。然而,由于超大视场红外告警系统的单机凝视视角过大,物体所成的像在其红外图像中将会表现出与普通红外图像不同的特点。现行的红外告警系统的目标检测算法、跟踪算法以及多目标威胁评估排序算法都是在对红外图像分析的基础上所提出的,如果红外图像的特点不同或变化较大将会使得常规的一些算法不再适用,若想设计出适用于超大视场红外告警系统的有效算法,分析超大视场情况下的红外图像的特点将是必要的前提。为此,本文对超大视场红外图像的特点进行了归纳和分析。文中所讨论的超大视场红外告警系统的波段为 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$;红外探测器焦平面阵列 576×768 元;填充率81%;单元探测器瞬时视场 $3.49\ \text{mrad}$;系统凝视视场范围为 $115.2^{\circ}\times 153.6^{\circ}$ 。

1 普通目标的成像特点分析

由于超大视场红外告警系统几乎将半球空域的信息成像在有限的红外焦平面阵列上,从而使得探测单元对应的瞬时视场角过大,若设目标相对红外系统的张角为 α ,则有关系式:

$$\alpha=L/R \quad (1)$$

式中: L 为目标线性尺寸; R 为目标与红外系统的距离。

如国产某型教练机,其机长为11.6 m,翼展为9.63 m,机高为4.21 m,按(1)式进行计算,结果表明只要目标距离超过3 km就会在超大视场红外图像中表现为像素级目标,即点目标,无几何形状和纹理信息。图1为所拍摄的夜空中飞行的国产某型教练机飞行图像中的一帧,从图中可以看出目标只表现为一个点。这无疑给超大视场中多目标的威胁评估带来了新的挑战。众所周知,常规的对多目标进行威胁评估用到的威胁指标一般包括目标的类型、速度、距离、航向角和高度等信息,而超大视场红外告警系统对目标成像为点目标,只能得到目标的灰度和方位角信息,不能直接对目标进行有效的识别,而且也不能直接获取速度和距离信息,要想准确地对此种情况的多目标进行威胁评估,只能通过其他途径获取相关信息,例如可以增加一“黄斑”镜头以对目标进行有效识别,并及时将目标相关信

息反馈给鱼眼系统;采用“两站”法或“多站”法以获取目标的距离信息。

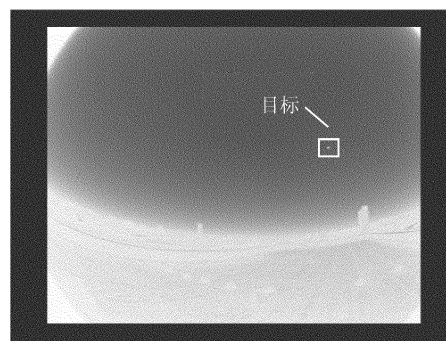


图1 超大视场红外告警系统所拍摄的红外图像
Fig. 1 The infrared image taken by ultra-wide FOV infrared warning system

2 系统像面照度的均匀性分析

2.1 像面照度均匀性的设计理论分析

在普通光学系统中,文献[9]已经证明,若物平面上各点亮度均为 B ,且沿各方向的亮度相同,当不存在斜光束渐晕时,轴外像点与轴上像点照度之比为

$$E'/E_0=\cos^4\omega' \quad (2)$$

从(2)式可知,即使没有斜光束渐晕存在,在普通光学系统中,像面上的照度是不均匀的,随着像方半视场角 ω' 的增大,像点照度按 $\cos^4\omega'$ 规律下降。当存在斜光束渐晕时,若轴外斜光束截面积与轴上点光束截面积之比为 K_a ,则有关系式:

$$E'=K_a E_0 \cos^4\omega' \quad (3)$$

在实用中,若 $\omega'\geq 60^{\circ}$,则视场边缘的照度便不足中央的6.5%。对于红外鱼眼告警系统来说,像面照度分布有如此严重的差异将使红外鱼眼告警系统无法应用。从上式可以看出,在光学设计方面,可以采取两方面的措施来提高鱼眼镜头像面照度的均匀性:1) 利用高额桶形畸变使 $|\omega'|$ 大幅度变小,如本文中的红外鱼眼镜头,其与 $\omega=100^{\circ}$ 对应的 ω' 为 12.19° ,相应的 \cos^4 为0.91;2) 充分利用像差渐晕使轴外物点成像光束截面尽量增大,即使使(3)式中 K_a 值尽可能增大,以抵消 $\cos^4\omega'$ 的影响,本文中的红外鱼眼镜头 K_a 值为1.18。因而从设计理论上来看,系统的像面照度分布应该是均匀的。

2.2 像面照度均匀性的实验分析

上述的分析从设计理论上使红外鱼眼镜头像面照度达到均匀,但对于实际鱼眼镜头的像面照度分布还需要实验去验证。选择美国光电工业公司的

CDS100-04 型黑体作为标准辐射源(黑体的相关参数如表 1 所示),对系统像面照度的均匀性进行实验。具体实验过程及结果为:调整黑体的温度为一定值,本文黑体的温度为 10° ,并使黑体充满视场,采集图像。图 2 为其中一帧,假定黑体的温度是均匀的,黑体靶面上的不同区域可看作是同一目标的不同位置,图中标出了 7 个典型的位置,此时红外图像中各点的灰度值大小将能反映出系统像面照度的均匀性。由于镜头是中心对称的,所以图中的 7 个位置将能反映出整个系统的像面照度均匀性,图中每个位置均对应 10×10 的像素,对其取平均代表该位置处的灰度值,实验数据如表 2 所示。经计算,其相对标准偏差(RSD)仅为 2.26%,表明不同位置处的灰度值基本不变,证明像面照度均匀性良好。基于这个结果,在对多目标的威胁评估排序中,可以考虑利用目标的平均灰度增加速率来描述目标的逼近速率。由于探测器填充因子使得目标灰度存在闪烁问题,可以对连续若干帧(3~5 帧)进行累加后取平均,以消除灰度闪烁问题所带来的影响。

表 1 CDS100-04 型黑体参数

Table 1 CDS100-04 black body parameters

温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	发射率	温度稳定/ $^{\circ}$	温度均匀性
0~100	0.97 ± 0.02	$\pm 0.003(0 \text{ 到 } 75^{\circ}\text{C})$	$\pm 0.3\%$

表 2 不同位置处的灰度值

Table 2 The gray values of different positions

位置	1	2	3	4	5	6	7	RSD/%
灰度值	42.19	42.08	42.51	42.61	42.43	43.12	43.03	2.26

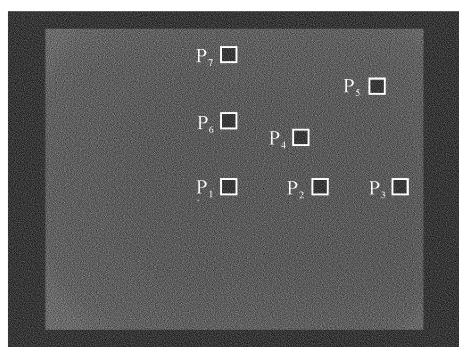


图 2 黑体充满视场的红外图像

Fig. 2 The infrared image with black body overflowing field of view

3 超大视场红外图像的背景特点分析

图 3 为所拍摄的红外图像中的一帧,由于视场

很大,场景中既有处于低频部分的天空背景,也有处于高频部分的地面建筑物、天地线等,相对于小视场的红外成像系统而言,超大视场红外告警系统的背景更加复杂,从而给目标检测算法带来了新的挑战。普通探测系统的视场范围较小,该小范围内的背景亮度变化不大,如无云团等杂波干扰则可认为是均匀背景,而超大视场红外告警系统的视场范围较大,则该大视场范围下背景亮度的均匀与否不应再被忽略。对 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 波段,天空背景的辐射亮度主要与环境温度和相对系统仰角有关,仰角越大辐射亮度越小,图 3 中用方框框起来的部分为天空背景,图 4 为所绘制的天空背景灰度值等高曲线,从图 3 可知同一仰角处天空背景的辐射亮度相同,随着仰角的增大,辐射亮度逐渐变小。

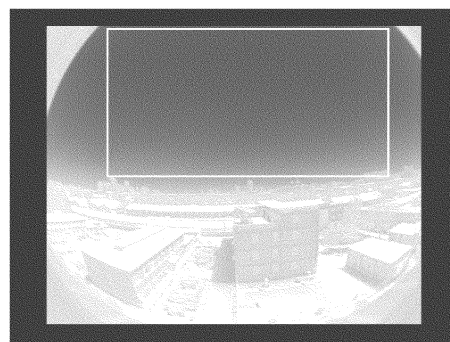


图 3 超大视场红外告警系统所拍摄的红外图像

Fig. 3 The infrared image of ultra-wide FOV infrared warning system

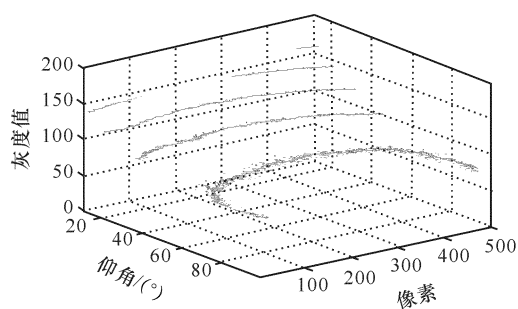


图 4 天空背景灰度值随仰角变化的等高线

Fig. 4 The sky background gray value contour line as the function of altitude angle

4 超大视场红外图像中目标运动轨迹特点分析

超大视场红外告警系统为了能够将尽量大的空域成像在有限的红外焦平面上,必定要打破传统的物像关系所满足的“相似”成像准则,即采用“非

相似”成像思想,从而在像空间引入大量的“桶形”畸变,使物空间的直线在像空间变弯曲,并且越靠近视场边缘,这种弯曲程度越甚。同样,对于本来直线运动的目标,在红外图像中其运动轨迹将变为一条曲线。图5~7给出了国产某型教练机以不同视场角飞行的轨迹,该型教练机实际上在以匀速直线状态飞行,但在视场中由于视场角的不同,其飞行轨迹曲线的弯曲程度也不同,视场角越大弯曲程度越甚。

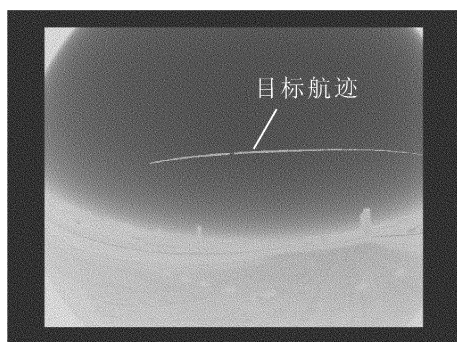


图5 国产某型教练机在视场中间形成的航迹

Fig. 5 The flight track of domestic training aircraft in the middle of FOV

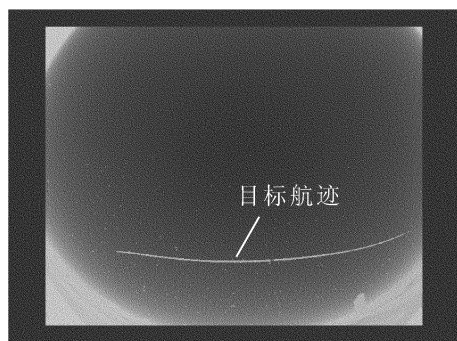


图6 国产教练机在靠近视场边缘所形成的航迹

Fig. 6 The flight track of domestic training aircraft on the edge of FOV

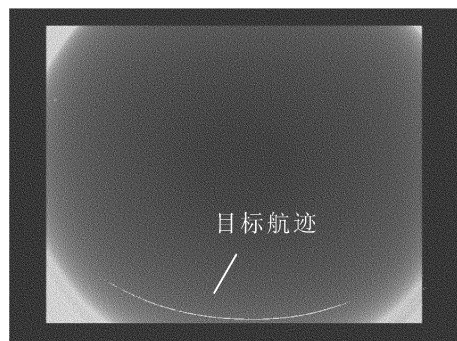


图7 国产教练机在视场边缘所形成的航迹

Fig. 7 The flight track of domestic aircraft on the edge of FOV

5 超大视场红外告警系统的作用距离分析

作用距离是红外告警系统的核心指标之一,它将直接决定红外告警系统能否真正投入使用。根据文献[10],红外告警系统的作用距离方程为

$$R^2 = \delta | (L_t - L_{bg}) / N_t | A_t A_o \tau_a(R) \tau_o D^* / (A_d / 2t_{int})^{1/2} \text{SNR} \quad (4)$$

式中: R 为目标到系统的作用距离(m); L_t 是目标的辐射亮度($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); L_{bg} 是背景辐射亮度($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); N_t 为目标在焦平面上所占的像元数; A_t 为目标有效辐射面积(cm^2); A_o 为光学系统入瞳面积(m^2); D^* 为波段有效探测度($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$); $\tau_a(R)$ 是大气透过率; τ_o 是工作时光学系统的透过率。

采用文献中的参数确定方法,以我国北方干燥地区为例,将各参数代入(4)式,经计算得出超大视场红外告警系统的理论作用距离约为9.6 km。在内蒙古阿拉善外场实验中,利用本系统能够清晰地探测到8 km处的某型火箭弹,说明其探测距离能够基本满足实际需要。

6 结束语

本文对超大视场红外鱼眼告警系统的成像特点进行了分析和总结。由于采用非相似成像原理和单机凝视视角过大,使得红外图像中目标成像特点、背景以及目标运动轨迹与小视场红外图像明显不同,导致用于小视场红外探测系统的常规算法不再适用。从红外鱼眼镜头的设计理论上对系统的像面照度进行了分析并用实验进行了验证,证明该系统的像面照度是均匀的。通过对系统的作用距离进行理论计算和实际测试,结果表明系统的探测距离能够基本满足实际需要。

参考文献:

- [1] 何立萍, 韦萍兰. 红外对抗技术和装备的发展[J]. 红外技术, 2006, 28(1): 47-49.
HE Li-ping, WEI Ping-lan. The development of infrared countermeasure technology and its equipment [J]. Infrared Technology, 2006, 28(1): 47-49. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WANG Yong-zhong. Modern military optical technology [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in

- Chinese)
- [3] WANG Yong-zhong. Some key problems about the design of IR thermal imaging fish-eye lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(7): 1078-1080.
- [4] 付伟. 舰载光电侦察告警装备发展综述[J]. 舰载武器, 2002(2): 22-27.
FU Wei. Development of shipborne photoelectric warning equipments[J]. Shipborne Weapons, 2002 (2): 22-27. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 付伟, 侯振宁. 国外红外侦察告警设备的新进展[J]. 红外技术, 2001, 23(3): 1-3.
FU Wei, HOU Zhen-ning. New advance of IR MAWS at abroad[J]. Infrared Technology, 2001, 23 (3): 1-3. (in Chinese with an English abstract)
- [6] SPENCER H M J, RODGERS M, HOFFMAN J M. Optical design of a panoramic, wide spectral band, infrared fisheye lens[J]. SPIE-OSA, 6342: 63421 (1-11).
- [7] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jian-jun. Long wave infrared fast objective with wide field of view [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(4): 460-463.
- [8] CHEN Ya-bing, WANG Yong-zhong, SUN Li-hui. An ultra-wide field staring infrared detection system [J]. SPIE, 2008, 6621: 662114(1-8).
- [9] 安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
AN Lian-sheng. Applied optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [10] 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): 8-11.
WANG Bing-xue, ZHANG Qi-heng, CHEN Chang-bin, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31 (7): 8-11. (in Chinese with an English abstract)
- [11] 王兵学, 张启衡, 王敬儒, 等. 凝视型红外搜索跟踪系统作用距离模型中参数值的确定[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 6-10.
WANG Bing-xue, ZHANG Qi-heng, WANG Jing-ru, et al. Evaluation of parameters in mathematical model for operation of starring IRST system[J]. Infrared Technology, 2004, 26(4): 6-10. (in Chinese with an English abstract)