

文章编号 1004-924X(2022)08-0908-09

双波段航空遥感相机的目标作用距离

刘学吉^{1*}, 张洪文¹, 远国勤¹, 修吉宏¹, 王健飞², 张昶³

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 空军装备部驻某地区军事代表室;
3. 长春奥普光电技术股份有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要:为解决航空遥感相机不同波段目标作用距离计算模型缺乏统一评价标准及工程闭环等问题,开展双波段航空遥感相机目标作用距离评价标准研究及工程应用案例分析。明确航空遥感相机目标作用距离的限制条件,从目标的几何和辐射特性出发。首先根据航空遥感的特点提出了目标三维投影变换关系式,得到任意观测工况下目标的等效观测尺寸;针对可见光、红外双波段点目标和面目标各自不同的辐射成像特点,分别建立了目标作用距离计算模型。接着,结合工程应用示例对不同计算模型的结果进行分析比较,给出了适合航空遥感相机远距离斜视成像条件下选用的计算模型。然后,采用某型航空遥感相机的实际飞行图像中提取的信息,对目标作用距离计算过程中信噪比及调制度的阈值进行了合理选择,并根据修正后的阈值分析了大型舰船和坦克在可见光与红外不同的探测及识别概率下对应的作用距离。分析结果表明:在载机航高18 km,大气能见度15 km,航空遥感相机可见光焦距不低于1.5 m时,可实现在50%的概率下对海面大型舰船的探测距离141 km、识别距离93 km,对陆地坦克等小目标的探测距离105 km、识别距离80 km;在红外焦距不低于1 m的条件下,可实现在50%的概率下对海面大型舰船的探测距离203 km、识别距离140 km,对陆地坦克等小目标的探测距离44 km、识别距离37 km。上述仿真的结果吻合实际,本文的成果可较好应用于工程实践。

关键词:航空相机;可见光红外;作用距离;探测识别;信噪比;调制度;对比度

中图分类号:V248.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223008.0908

Target operating range of dual band aerial remote camera

LIU Xueji^{1*}, ZHANG Hongwen¹, YUAN Guoqin¹, XIU Jihong¹, WANG Jianfei², ZHANG Chang³

- (1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Military Representative Office Stationed in a region by Air Force Equipment Department;
3. Changchun UP Optotech(Holding) Co., Ltd, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: liuxueji@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to solve the problem of lack of unified evaluation standard and engineering closed-loop for target operating distance calculation model of aerial remote sensing camera in different bands, the research on target operating distance evaluation standard of dual band aerial remote sensing camera and engineering application case analysis were carried out. Firstly, according to the characteristics of aerial remote

收稿日期:2021-08-17;修订日期:2021-10-09.

基金项目:青年科学基金项目(No. 61905240)

sensing, the three-dimensional projection transformation relationship of the target is proposed to obtain the equivalent observation size of the target under any observation condition. According to the different radiation imaging characteristics of visible and infrared dual band point target and area target, the target operating range calculation models are established respectively. Then, combined with an engineering application example, the results of different calculation models are analyzed and compared, and the calculation model suitable for long-range squint imaging of aerial remote sensing camera is given. Then, the information extracted from the actual flight image of an aerial remote sensing camera is used to reasonably select the signal to noise ratio (SNR) and modulation threshold in the calculation process of target operating distance. According to the modified threshold, the corresponding operating distance of large ships and tanks under different detection and recognition probabilities of visible light and infrared is analyzed. The analysis results show that when the flight height of the carrier is 18 km, the atmospheric visibility is 15 km and the visible light focal length of the aerial remote sensing camera is not less than 1.5 m, the detection distance of 141 km and 93 km for large ships on the sea and 105 km and 80 km for small targets such as land tanks can be realized with 50% probability. Under the condition that the infrared focal length is not less than 1m, the detection distance of 203 km and the recognition distance of 140 km for large ships on the sea and 44 km and 37 km for small targets such as land tanks can be realized with a 50% probability. The above simulation results are consistent with the reality, and the results of this paper can be better applied to engineering practice.

Key words: aerial camera; visible and infrared; operating distance; detection and identification; SNR; modulation; contrast

1 引言

目标的作用距离是航空遥感相机的重要技术指标,要实际获得作用距离需要载荷在已知的气象条件、观测工况、系统光电参数及目标与背景的特性参数等一系列可控的条件下测量,这在工程实践上很难实现,且在项目总体论证阶段不具备可行性。因此,对目标作用距离进行精确地仿真分析具有重要意义。

传统作用距离的分析方法采用光电成像系统瞬时视场角作为系统极限分辨角,进而根据约翰逊(Johnson)准则进行目标作用距离分析,这种单纯考虑几何分辨率的作用距离评估方法的计算结果与实际观察效果差异较大^[1]。文章[2-3]等综合考虑了可见光目标辐射特性、光电探测系统的响应特性的影响,推导了可见光信噪比和作用距离的计算公式并给出了计算实例,由于该模型忽略了大气条件的影响,因此只适用于短距离或大气条件影响不显著条件下光电成像的分析场景。陈玉茹^[4]等将观测目标分为点目标和面目标,综合考虑了人眼的目标发现能力,

目标的亮度对比度,观察等级和探测概率的要求,对高分辨率可见光相机点源、面源目标的作用距离进行了估算。郭晓东^[5]等系统地分析了红外点目标作用距离理论模型。沈飞^[6]等将模型中目标辐射强度替代为目标与背景的辐射强度差,对理论模型未考虑背景辐射强度等不足进行了改进。崇元^[7]等还考虑了红外点目标在像元弥散作用下的影响。王忆锋^[8]等讨论了光子数、噪声等效温差和最小可分辨温差与红外点源目标和扩展源目标的作用距离之间的关系。罗振莹^[9]等考虑了背景辐射和目标成像弥散效应对探测的影响推导了噪声等效温差(NETD)表示的红外探测系统的作用距离方程。

综上,影响光电成像系统作用距离的因素众多,针对不同波段采用的计算模型也不唯一,其计算结果缺乏分析比较与工程闭环。本文从航空遥感相机的应用场景出发,完善了可见光、红外的点目标和面目标的计算模型,给出了计算实例并分析比较了各种计算模型的优劣,明确了适用于可见光与红外双波段航空遥感相机目标作用距离的分析方法,采用实际飞行图像中提取的

信息对计算模型中的阈值进行了修正,使计算结果更接近工程实际。

2 双波段航空遥感相机目标作用距离理论分析

航空遥感相机目标作用距离主要受限于以下三个条件^[10]:

(1)目标的几何分辨率,即由几何特性决定的目标成像后在探测器靶面上所占的像元数,通常由 Johnson 准则来评价;

(2)目标的成像信噪比或对比度,即由辐射特性决定的目标与背景经成像链路后在成像探测器上信号与噪声的差异;

(3)目标的辐射能量经过成像链路后可满足探测器的灵敏度要求。

因此,要分析航空遥感目标的作用距离,首先是研究目标的几何和辐射特性。

2.1 目标特性分析-几何特性

目标的几何特性通常是指被观测目标经过光学系统后成像在探测器上的几何尺寸。在航空遥感相机领域,根据其成像特点,目标成像后精确的几何尺寸需要根据目标的三维

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(90-\theta) & 0 & \sin(90-\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(90-\theta) & 0 & \cos(90-\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

应用上述投影变换关系式(1)可以得到任意观测工况下目标的等效观测尺寸,结合光学系统的焦距和载机飞行高度根据小孔成像原理可得到目标成像在探测器靶面上的投影尺寸,已知探测器像元大小后可换算得到目标所占的像元数,可根据约翰逊准则来评价几何特性所决定的观测概率。

2.2 目标特性分析-辐射特性

(1)针对可见光成像:航空遥感相机主要探测的是来自物体表面反射的太阳光辐射,因此,可见光探测的应用主要受到太阳高角、大气条件及目标自身反射率等条件的限制。

(2)针对红外成像:红外波长的覆盖宽度较广,可包含 0.76 μm 到 1000 μm ,其中近红外和短波红外仍主要来源于目标反射的太阳光谱,在航空遥感相机成像领域主要应用的中波和长波红

尺寸经过坐标变换后在与观测视轴(光学系统光轴)正交的探测器像面上的投影来确定,如图 1 所示。

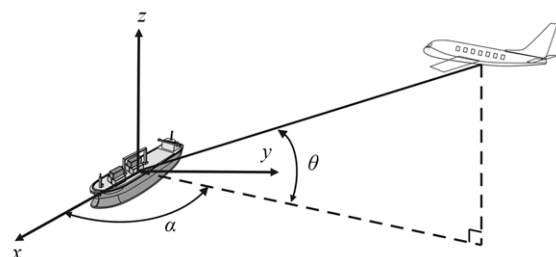


图 1 目标三维坐标系与观测视轴几何投影关系示意图
Fig. 1 Geometric projection relationship between target 3D coordinate system and observation line of sight

在航空遥感领域,对目标的观测往往采用斜视远距离探测,这样目标的三维尺寸需要经过在观测视轴投影变换后,才能获取在探测器靶面上的成像尺寸。

假定目标坐标系 $t(x, y, z)$, 分别对应目标长宽高三个方向,观测坐标系 $d(x_1, y_1, z_1)$, 视轴投影方向与目标长度方向夹角为 α , 视轴与海平面夹角为 θ ; 由 t 到 d 的变换关系为 $t \cdot R_z(\alpha) \cdot R_y(90-\theta) = d$, 即:

外则主要来源于被摄物体的自发热辐射,在辐射波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的黑体辐射强度可根据普朗克方程(2)计算得到,在根据目标在特定温度下的发射率就可以得到红外波段目标的辐射特性情况^[11]。

$$M_e(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} \right] d\lambda, \quad (2)$$

式中 h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数; c 为真空中的光速; T 为黑体温度。

目标辐射特性直接决定了观测信噪比或对比度,为了更准确地描述目标与背景所对应的信号与噪声的差异程度,应对可见和红外的点目标与面目标采用不同的评价方法。

2.2.1 可见光点目标的信噪比计算

对于可见光点目标(如果成像在探测器上的像元数在几个像元以内通常可以将目标视作点

目标),通常采用等效电子法,用于描述大气背景下背景信号对成像质量影响的有效信噪比的表达式为^[3]:

$$SNR = \frac{S_g}{\sqrt{S_t + S_g + \sigma_R^2 + D_e}}, \quad (3)$$

式中: S_g 为地物辐射反射产生的光生电子数,可由式(4)计算; S_t 为包含大气散射等总的入射辐射产生的光生电子数,可由式(4)计算; σ_R^2 是探测器的读出噪声均方根值的平方; D_e 是探测器暗信号输出电子数。

其中目标入射到探测器的光敏面后激发的信号电子数的计算表达式为:

$$S_g = \frac{\pi A_d L_\lambda \tau_a \tau_0}{4F^2 h \nu} \eta t, \quad (4)$$

式中 A_d 为探测器像元面积; t 为积分时间; F 为镜头相对孔径的倒数; τ_0 是光学系统的透过率; τ_a 是大气透过率; L_λ 为目标或背景辐亮度; η 为探测器量子效率; h 为普朗克常数; ν 是光频率。

2.2.2 可见光面目标的对比度计算

对可见光面目标来说,影响分辨的主要因素是目标与背景之间的亮度差异,往往采用对比度来量化这种差异:

$$C = \left| \frac{L_0 - L_b}{L_b} \right|, \quad (5)$$

其中 L_0 为目标亮度, L_b 为背景亮度;如果目标和背景的初始对比度为 C_0 ,经过传播距离 R 后的对比度 C_R 为:

$$C_R = C_0 \frac{1}{1 + S G (e^{\sigma R} - 1)}, \quad (6)$$

式中 R 为观察距离, σ 为可见光消光系数, $S G$ 称为天空-地面背景亮度比^[4]。该计算模型对气象条件和环境因素的考虑并不充分,冯皓^[12]等指出了方程本身的缺陷。因此,我们引入调制度方法来评价目标与背景之间的亮度差异,目标的调制度 $M_{\text{目标}}$ 可表示为:

$$M_{\text{目标}} = \frac{L_0 - L_b}{L_0 + L_b}. \quad (7)$$

用调制度衡量分辨本领的好处是,可以将地面目标通过大气、相机光学系统、探测器和显示器的各个环节的调制度连乘得到最终被人眼接收的信号调制度,如式(8)所示,并且人眼分辨图像中目标灰度的极限调制度是已知的^[13]。

$$M_{\text{人眼}} = M_{\text{目标}} \times M_{\text{大气}} \times M_{\text{相机}} \times M_{\text{探测器}} \times M_{\text{显示器}}. \quad (8)$$

2.2.3 红外点目标的信噪比及探测距离计算

R. D 小哈得逊^[14]给出了红外点目标的探测信噪比的表达式:

$$SNR = \frac{\pi \cdot \tau_a \cdot \tau_a \cdot (\epsilon_0 \cdot L_0 - \epsilon_b \cdot L_b) \cdot \sqrt{A_d} \cdot \frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}}}{4F^2}, \quad (9)$$

式中 ϵ 表示目标和背景的发射率。

将观测立体角代入式(9)后,考虑到成像弥散效应后,可得到红外点目标的探测距离公式为^[15]:

$$R^2 = \frac{\Delta I \cdot \tau_a \cdot A_0 \cdot \tau_0 \cdot D^*}{N_t \cdot (A_d \cdot \Delta f)^{\frac{1}{2}} \cdot SNR}, \quad (10)$$

式中 R 表示作用距离; ΔI 表示目标与背景辐射强度之差; A_0 为光学系统入瞳面积; D^* 为探测器平均比探测率; N_t 为目标在探测器上弥散后的像元数; Δf 表示探测器噪声等效带宽。

2.2.4 红外面目标的信噪比计算

对红外面目标来说,目标张角往往远大于红外系统的瞬时视场,此时,对红外目标的分辨能力往往受限于目标和背景之间的温度差异,即辐射对比度,红外探测器的MRTD是红外成像系统的一个重要指标。它表示在空间频率一定的情况下,能够分辨背景与目标间温差的最小值。该指标可以对系统探测能力进行综合地评价。客观MRTD计算公式为^[16]:

$$MRTD = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2m}} \times SNR_{\text{TH}} \times NETD_{\text{sys}} / MTF_{\text{sys}}(f), \quad (11)$$

式中 $NETD_{\text{sys}}$ 是系统噪声等效温差; m 为目标高宽比修正因子,在实验室对四杆靶成像,其 $m=7$; SNR_{TH} 表示信噪比阈值; $MTF_{\text{sys}}(f)$ 表示目标在不同空间频率处的调制传递函数。

在光学系统的入瞳处,红外面目标的信噪比可表示为:

$$SNR_{\text{面目标}} = \frac{\Delta L \cdot \tau_a}{M_e(\lambda, T_{\text{MRTD}})}, \quad (12)$$

式中 T_{MRTD} 表示叠加了阈值信噪比对应的MRTD后的背景温度; ΔL 表示目标与背景的辅亮度差。

3 双波段航空遥感相机目标作用距离计算示例

假定载机飞行高度 18 km,光学系统的相关参数如表 1 所示,水平大气能见度 15 km,视轴投影与目标长度方向夹角 45°,太阳高度角 45°,顺光观测,采用 Modtran4.0 软件计算太阳照度及大气透过率;目标反射率 0.4,海洋背景反射率 0.1,陆地背景反射率 0.25,目标与背景温差 5℃,发射率均取 0.9,可见光信噪比的探测和识别阈值分别为 5 和 10;可见光调制度的探测和识别阈值分别为 0.01 和 0.02;红外信噪比的探测和识别阈值分别为 3 和 5,采用上述不同计算公式对表 2 中的不同目标类型计算作用距离,计算结果如表 3 所示。

表 1 光学系统的相关参数

Tab. 1 Parameters of optical system

Parameters	Visible	Infrared
Wave band(μm)	0.5~0.85	3.7~4.8
Focal length(mm)	1 500	1 000
F-number	6	4
Pixel size(μm)	7.4	15

根据表 3 所示,对本文第二节提出的几种计算方法做如下总结:

(1)可见光信噪比方法在原理上并没有考虑

表 2 目标类型及几何尺寸

Tab. 2 Target type and geometry (m)

Target type	Length	Width	Height
Large ship	320	75	60
Midsized ship	125	15	7.5
Missile launcher	15	3	3
Tank	6	3	3

到目标大小的影响,因此在其他条件不变,目标和背景的反射率一定的情况下,应用该公式计算出的作用距离与目标尺寸大小无关;

(2)可见光调制度法虽然考虑了目标大小的影响,但因航空遥感相机可见光光学系统的焦距较长,大小目标对应的空间频率均较低,对应的传函数值变化对最终调制度计算结果的影响甚微,故目标像元数满足观测阈值时,目标尺寸大小并不会显著影响观测距离的远近;

(3)红外点目标的作用距离公式与目标尺寸大小强相关,这是因为目标与背景的辐射强度差与目标的面积大小有关,但该公式的应用是有限制条件的,即目标为点目标;

(4)红外 NETD 法与可见光调制度法一样,将目标大小的影响体现在了目标经光学系统成像后的传函数值大小上,但航空遥感相机红外光学系统的焦距通常远小于可见光,且红外探测器的像元尺寸较大,这就造成了红外系统的几何分辨率较低,因此在应用该方法计算红外小目标的作用距离时需要考虑目标像元数的影响,表格 3

表 3 不同计算方法对不同目标类型的作用距离计算结果比较

Tab. 3 Comparison of calculation results of operating range of different target types by different calculation methods

Target type		Large ship	Midsized ship	Missile launcher	Tank
Visible SNR	Detection distance(km)	120	120	75	75
	Recognition distance(km)	95	95	45	45
Visible modulation	Detection distance(km)	96	96	80	80
	Recognition distance(km)	73	73	55	55
Infrared point target	Detection distance(km)	203	112	52	44
	Recognition distance(km)	187	100	44	37
Infrared surface target	Detection distance(km)	170	165	180 (78)	150 (54)
	Recognition distance(km)	140	135	150 (62)	129 (42)

中计算结果后的括号中给出了引入约翰逊准则(选取探测概率 100%,识别概率 50%)考虑目标像元数影响后的修正结果。

综上,考虑到航空遥感相机远距离斜视成像的特殊性,我们在计算可见光目标的探测距离时采用信噪比法;在计算可见光目标的识别距离时采用调制度法;在计算红外目标的探测距离时采用点目标公式,在计算红外目标的识别距离时采用 NETD 法;同时,对小尺寸目标的观测时还需要考虑目标像元数是否满足观测所需的阈值条件。

4 双波段航空遥感相机目标作用距离的试验分析与计算阈值修正

4.1 双波段航空遥感相机的航拍数据分析

为使仿真结果更吻合实际,我们选择某航空遥感设备的航拍图像,如图 2 所示。借鉴辐射定标的手段,将原图在无损无对比度拉伸的情况下提取出一些典型地物的灰度值,结合已标定的探测器参数及图像注释信息等已知的成像条件,对图像的观测信噪比及调制度进行了提取,采用前文总结的计算方法给出仿真结果作为对比,如表

4 所示。

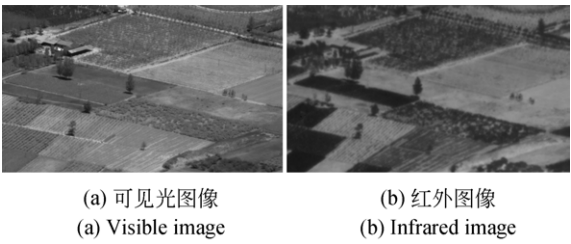


图 2 某航空遥感设备航拍图像
Fig. 2 Outfield images taken by an aerial remote sensing equipment

4.2 作用距离计算中的阈值选择

从表 4 中的数据可以看出,实际飞行图像提取出的结果与理论计算结果并不完全一致,这里除了存在输入条件误差、图像处理误差等误差因素外,主要原因是存在观测概率问题。为了更好地使仿真计算结果贴近工程实践,我们对大量飞行图像中同一观测目标的信噪比及调制度数据进行重复提取,参考 Johnson 准则将目标的观测等级分类并对应不同的观测周数(像元数),从而得到相应的观测概率的方法给出了适用于远距离航空遥感成像条件下不同观测概率对应的信噪比及调制度阈值,如表 5 所示。

表 4 调制度与信噪比的图像信息提取与仿真结果对比
Tab. 4 Comparison of image information extraction and simulation results based on modulation and SNR

Target type	Target size (m) Length×Width× Height	Imaging distance (km)	Visibility (km)	Visible mod- ulation ex- traction re- sults	Visible mod- ulation simu- lation results	Infrared SNR extrac- tion results	Infrared SNR simu- lation results
Civilian house	48×7.85×13.5	30.9	6	0.019 943	0.016 479	9.775 715	8.558 674
Window	2.6×1.8	100	15	0.003 559	0.001 082	6.007 505	4.292 335
Car	4.6×1.85×1.68	80	15	0.003 657	0.005 076	6.230 161	7.021 039
Truck	12×2.5×3.68	50	10	0.021 194	0.019 943	11.685 522	9.281 503
Billboard	62.5×20.7	33.4	25	0.075 748	0.068 434	20.062 828	18.146 193
Signal tower	75.4×12.6	33	25	0.039 840	0.042 051	15.078 757	15.820 237
Telegraph pole	26.7×2.7	30	7	0.020 668	0.017 479	10.456 532	9.466 506

4.3 修正阈值后的计算结果

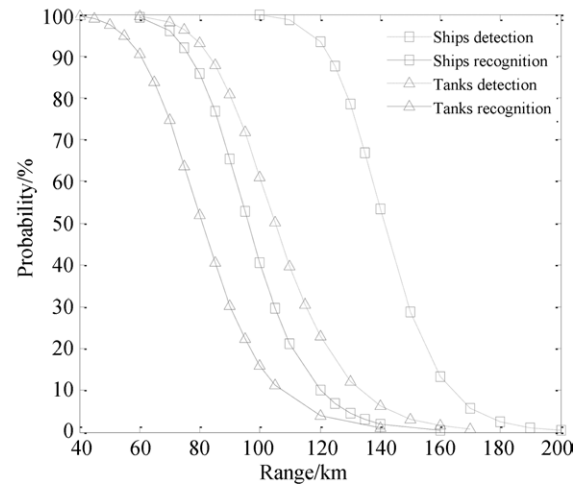
采用表 5 中的阈值条件,分别选取大型舰船和坦克为观测目标,其它设置条件与第三节的计

算示例相同,将可见光与红外不同的探测及识别概率下对应的作用距离分别绘制成图,如图 3 所示。

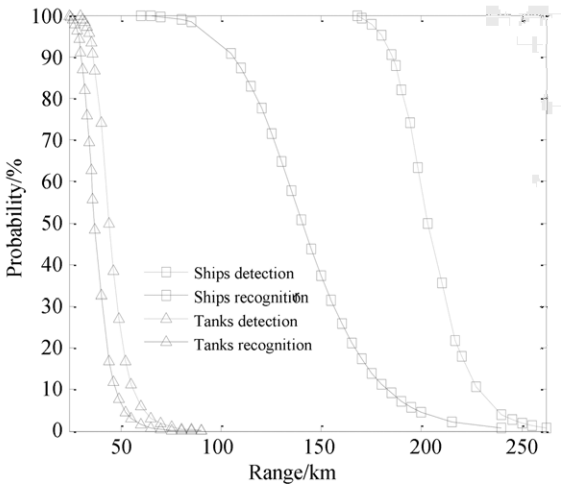
表 5 航空遥感相机远距离观测的信噪比与调制度阈值

Tab. 5 SNR and modulation threshold of long-range observation with aerial remote sensing camera

Observation state and corresponding probability		Visible SNR	Visible modulation	Infrared SNR
Detection	50%	3	0.003	3
	95%	5	0.005	6
	100%	8	0.01	9
Recognition	50%	10	0.01	5
	95%	20	0.02	10
	100%	30	0.04	15



(a) 可见光对大型舰船和坦克的探测及识别概率
(a) Visible detection and recognition probability of large ships and tanks



(b) 红外对大型舰船和坦克的探测及识别概率
(b) Infrared detection and recognition probability of large ships and tanks

图 3 可见与红外对大型舰船及坦克的探测识别距离与概率分析

Fig. 3 Visible and infrared detection and recognition distance and probability analysis of large ships and tanks

5 结 论

本文给出了航空遥感相机目标作用距离的主要限制条件,从目标的几何和辐射特性出发,归纳总结了针对航空遥感相机远距离斜视条件下可见光与红外双波段观测下目标作用距离的分析方法,并给出了计算示例,分析并比较了不同计算方法的优缺点,给出了适合航空遥感相机远距离斜视成像条件下选用的计算公式。采用某型航空遥感相机的实际飞行图像中提取的信息,对目标作用距离计算过程中信噪比及调制度的阈值进行了合理选择,并根据修正后的阈值分析了大型舰船和坦克在可见光与红外不同的探

测及识别概率下对应的作用距离,并绘制了曲线图。本文明确了对航空遥感相机远距离成像的作用距离的分析手段,以实际飞行数据修正了分析结果,结果表明:在载机航高 18 km,大气能见度 15 km,航空遥感相机可见光焦距不低于 1.5 m 时,可实现在 50% 的概率下对海面大型舰船的探测距离 141 km、识别距离 93 km,对陆地坦克等小目标的探测距离 105 km、识别距离 80 km;在红外焦距不低于 1 m 的条件下,可实现在 50% 的概率下对海面大型舰船的探测距离 203 km、识别距离 140 km,对陆地坦克等小目标的探测距离 44 km、识别距离 37 km。上述仿真的结果吻合实际,本文的成果可较好应用于工程实践。

参考文献:

- [1] KORB A R, GROSSMAN S I. Model of Large-format EO-IR sensor for calculating the probability of true and false detection and tracking for moving and fixed objects [C]. *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVI*. Baltimore, Maryland, USA. SPIE, 2015: 9452: 1-12.
- [2] 李锋, 董峰. 星载空间目标可见光探测系统探测能力研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(23): 285-289.
LI F, DONG F. Study on detection capability of space target space-borne optical detection system [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(23): 285-289. (in Chinese)
- [3] HOU Z F, ZHAO W, YU F. The visible light imaging detection performance of spaced target [C]. *Photoelectronic Technology Committee Conferences, SPIE Proceedings. Various, China*. SPIE, 2016: 131-138.
- [4] 陈玉茹, 胡以华, 芮键. 高分辨率可见光相机作用距离的估算[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(3): 40-42.
CHEN Y R, HU Y H, RUI J. Operating range prediction of high resolution visible light camera [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(3): 40-42. (in Chinese)
- [5] 郭晓东, 左志高, 岳松, 等. 红外点目标探测系统的作用距离理论模型分析[J]. 红外, 2019, 40(7): 18-25.
GUO X D, ZUO Z G, YUE S, *et al.* Theoretical model analysis of operation range of infrared point target detection system [J]. *Infrared*, 2019, 40(7): 18-25. (in Chinese)
- [6] 沈飞, 兰延豪, 康戈文, 等. 临近空间基红外探测隐身飞机尾焰的仿真研究[J]. 上海航天, 2017, 34(1): 73-79.
SHEN F, LAN Y H, KANG G W, *et al.* Research on infrared detection simulation of stealth aircraft exhaust plume based on near-space [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(1): 73-79. (in Chinese)
- [7] 崇元, 艾葳, 王玉坤. 红外点目标探测距离估算模型[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(6): 59-62.
CHONG Y, AI W, WANG Y K. Operating distance estimation model of infrared point target [J]. *Command Control & Simulation*, 2020, 42(6): 59-62. (in Chinese)
- [8] 王忆锋, 史衍丽, 李夏玲. 论红外探测系统作用距离的比较分析[J]. 红外技术, 2012, 34(9): 515-520.
WANG Y F, SHI Y L, LI X L. On the comparative analysis of range performance of infrared detection systems [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(9): 515-520. (in Chinese)
- [9] 罗振莹, 白璐, 宁辉, 等. 基于NETD的红外探测系统作用距离分析[J]. 红外, 2017, 38(5): 27-30, 43.
LUO Z Y, BAI L, NING H, *et al.* Analysis of operating range of infrared detection system based on NETD [J]. *Infrared*, 2017, 38(5): 27-30, 43. (in Chinese)
- [10] 宋宇. 机载吊舱光学系统方案论证与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
SONG Y. *The Project Approachment and Design of Airborne POD Optical System* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 丁亮. 隐身飞机尾焰红外探测仿真技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
DING L. *Research on Stealth Aircraft Exhaust Plume Infrared Detection Simulating Technique* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [12] 冯皓, 张军. 地面目标可见光探测概率规律研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 4(1): 93-98.
FENG H, ZHANG J. Study on the law associated with the probability of the horizontal visual detection [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science)*, 2003, 4(1): 93-98. (in Chinese)
- [13] 姚军财, 刘贵忠. 结合人眼对比度敏感视觉特性的视频质量客观评价[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 659-667.
YAO J C, LIU G Z. Video quality objective assessment combined contrast sensitivity characteristics of human visual system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3): 659-667. (in Chinese)
- [14] R. D. 小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
R. D. HUDSON. *Infrared System Engineering* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. (in Chinese)

- [15] 王卫杰, 黄俭, 袁光福, 等. 空基红外系统作用距离建模及应用分析[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1295-1302.

WANG W J, HUANG J, YUAN G F, *et al.* Modeling and application analysis of operating range of air-based infrared system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1295-1302. (in Chinese)

- [16] 王惠林, 栾亚东, 贺剑. 红外成像系统最小可分辨温差影响因素分析[J]. 应用光学, 2021, 42(1): 1-8.

WANG H L, LUAN Y D, HE J. Analysis on influence factors of MRTD in infrared imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(1): 1-8. (in Chinese)

作者简介:



刘学吉(1989—),男,吉林公主岭人,硕士,助理研究员,2012年于长春理工大学获得学士学位,2015年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事航空光学成像仿真及光学系统设计等方面的研究。E-mail: liuxueji@ciomp.ac.cn