

基于瑞利分布的弱小目标能量计算方法研究

李 霁¹, 贾海萨¹, 李 周²

(1. 92941 部队 44 分队, 辽宁 葫芦岛 125001;

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)

摘 要: 随着科学技术的不断进步, 军事目标也向着小型化、超高速、低可探测度的趋势发展, 因而对目标的探测与识别能力也提出了更高的要求。文中在深入分析点目标成像过程及其能量分布的基础上, 提出基于偏态瑞利分布点目标能量计算方法, 并通过红外辐射特性测量精度对比实验进行验证, 得出应用该方法的辐射强度测量偏差可控制在 8% 以下, 而且测量离散程度更小, 可有效区分弥散点目标和背景灰度值, 证明该方法具有良好的工程适用性, 较高的测量精度且广泛的应用前景。

关键词: 瑞利分布; 点目标; 测量精度; 红外辐射特性测量

中图分类号: TN219; TP391.41 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220408

Research on energy calculation method of weak and small targets based on Rayleigh distribution

Li Ji¹, Jia Haisa¹, Li Zhou²

(1. Unit 44, No. 92941 Troops, Huludao 125001, China;

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

Abstract: With the continuous progress of science and technology, military targets are developing towards miniaturization, ultra-high speed and low detectivity, so the detection and identification ability of targets is also put forward higher requirements. Based on the deep analysis of point target imaging process and on the basis of energy distribution, based on abnormal Rayleigh distribution of point target energy calculation method, the infrared radiation characteristics and has a better precision than the experimental verification, it is concluded that the measurement deviation of radiation intensity can be controlled under 8%, and measuring the degree of discrete numerical smaller, can effectively distinguish between the point target and background. It is proved that the calculation method has good engineering applicability, high measurement accuracy and wide application prospect.

Key words: Rayleigh distribution; point target; measurement accuracy; infrared radiation characteristics measurement

收稿日期: 2022-06-14; 修订日期: 2022-12-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (62105330)

作者简介: 李霁, 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为光学测量、光电对抗。

0 引言

随着科学技术的不断进步,军事目标也向着小型化、超高速、低可探测度的趋势发展,相应的对军事目标的探测与识别能力也提出了更高的要求。现代靶场测量学中一般将红外辐射特性中的辐射强度(辐射亮度、辐射温度)作为衡量目标成像能量大小的判别依据,也作为光测设备红外系统探测与识别能力的标准。但是当光测设备距离目标较远时,目标成像一般为微弱的小目标且灰度值较低,视觉成像效果模糊;特别是对于快速飞行目标,光测设备无法准确的获取其动态投影面积,难以确定其有效地辐射强度^[1]。

目前,对这种弱小目标的探测使用最广泛的是传统的图像二值化及其增强的相关方法,首先对图像进行二值化处理,而后区分出目标和背景区域,再对背景灰度值进行扣除,最后计算出目标辐射强度^[2]。该方法仅在成像面积大且图像整体分辨率好的情况下目标特性测量精度较好,但在目标与背景边界区别不明显,整体图像对比度低的情况下目标特性测量精度会存在很大误差^[3]。

其次,有很多研究人员通过分析目标灰度图像分布情况,提出了基于正太分布、泊松分布等方法提高弥散点目标辐射特性测量精度,虽然在区分目标与背景灰度值上取得了突破,提高了测量精度,但在实际测量中发现多数的红外图像并不是呈现出完整的轴对称均匀分布状态,而是常常出现中心轴偏离的偏态分布状态^[4],导致实际上不能依照上述方法计算。因此,文中通过对多组任务图像数据的分析研究,提出了基于瑞利分布的弱小目标能量分布计算方法,用以判别和区分点状弱小目标和背景,从而提高目标特性测量精度。

1 点目标成像过程及其能量分布函数

在实际测量中,目标由于受到大气湍流、光学系统像差衍射以及系统跟踪稳定性等因素的影响,常常会对点目标辐射源产生弥散效应,造成目标与背景的混搅,形成弥散模糊图像^[5]。虽然此时成像像元数目增多,但由于点目标的能量分散,造成目标在红外靶面的图像出现模糊退化现象,且每个像元的灰度值偏

小,目标与背景叠混在一起,辐射特性测量计算时如果将其当作面目标处理,会造成测量精度的降低^[6]。因此在靶场测量中,一般将远距离飞行的导弹,飞机与轮船等在红外焦平面上成像像元数量小于 8×8 的目标都考虑作为点目标处理^[7]。

在成像观测过程中,理想点目标经过稳定大气传输后,在经过线性不变的光学成像系统,最后到达红外靶面阵列的红外图像模型可以表示为^[8]:

$$G(x, y) = P * S(x, y) + t(x, y) \quad (1)$$

式中: $G(x, y)$ 为目标落在靶面的像元灰度; P 为点扩散函数 (Point spread function, PSF), 是光学系统传递函数的空间域表达; $S(x, y)$ 为目标理想图像; $t(x, y)$ 为光学成像系统的系统噪声; $*$ 表示卷积。

其模糊退化过程如图 1 所示,其中点扩散函数 P 模型的建立对目标的模糊退化恢复具有重要的意义,选取不同的模型会导致出现靶面图像的不同呈现状态,特别是会影响的目标与背景灰度位置的界定,进而影响目标的红外辐射测量精度。假设理想条件下红外靶面的能量分布函数为 $S(x_0, y_0)$, 则目标辐射能经过点扩散函数 P 模型作用后,其弥散点目标像素灰度值分布 G 可以表示为:

$$G(x_0, y_0) = K \times [P * S(x_0, y_0)] + B \quad (2)$$

式中: K 为红外光学系统的响应增益; B 为红外光学系统的响应偏置; (x_0, y_0) 为弥散目标成像中心点位置^[9]。

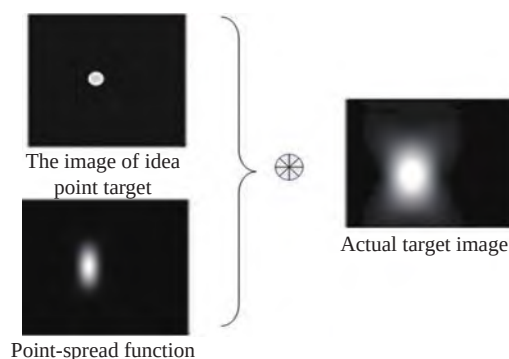


图 1 理想点目标弥散过程

Fig.1 Ideal point target discrete process

对于被测量的理想点目标在红外靶面成像时,所有像素点均可以分为目标像素和背景像素两部分组成。只有准确地识别出点目标成像的边缘位置,区分出目标和背景,才能有效的恢复出目标的真实灰度。

通过长时间持续观察发现,目标能量分布规律呈现出连续的偏态样分布形状,联想到工程中常用的瑞利分布可以通过设置参数建立弥散斑中心位置、边界带与灰度值之间的关系,因此确定弥散中心以及边界问题可以归结于概率论中数据集离散度问题。文中在总结之前研究人员经验成果上,提出了基于瑞利分布的判别方法来分辨点目标和背景。

2 基于瑞利分布点目标能量的计算方法

通过持续分析观察发现, $X(Y)$ 轴方向上不同亮度的点目标在红外靶面灰度值分布曲线图如图 2 所示的几种情况,从统计学角度来看,曲线整体分布与趋势线符合一个连续的瑞利分布概率密度函数,其定义可表示为:

$$P(x) = \begin{cases} \frac{x}{s^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2s^2}\right), & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为随机变量; σ 为参数变量,决定曲线形状的平坦程度,可对右偏斜数据、对称数据等建立数学模型,其期望、方差和得到累计分布函数分别如公式(4)~(6)所示^[10]:

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xP(x)dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \approx 1.253\sigma \quad (4)$$

$$D(X) = E(X^2) - [E(X)]^2 = \frac{4-\pi}{2}\sigma^2 \approx 0.429\sigma^2 \quad (5)$$

$$L(X) = 1 - \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

当分别设参数变量 $\sigma=0.5$ 、 $\sigma=1$ 、 $\sigma=2$ 、 $\sigma=4$ 时形成的瑞利分布概率密度曲线图如图 3 所示,其与图 2 中的目标灰度值分布曲线极为相似,曲线形状与现实状况相匹配。变量 x 可用来描述点目标像素点能量聚集程度中心位置,距离 x 越近,目标灰度值越大,成为目标灰度的概率越高;反之,则成为背景灰度的概率会越高;变量 σ 来描述数据变量集的离散程度, σ 值

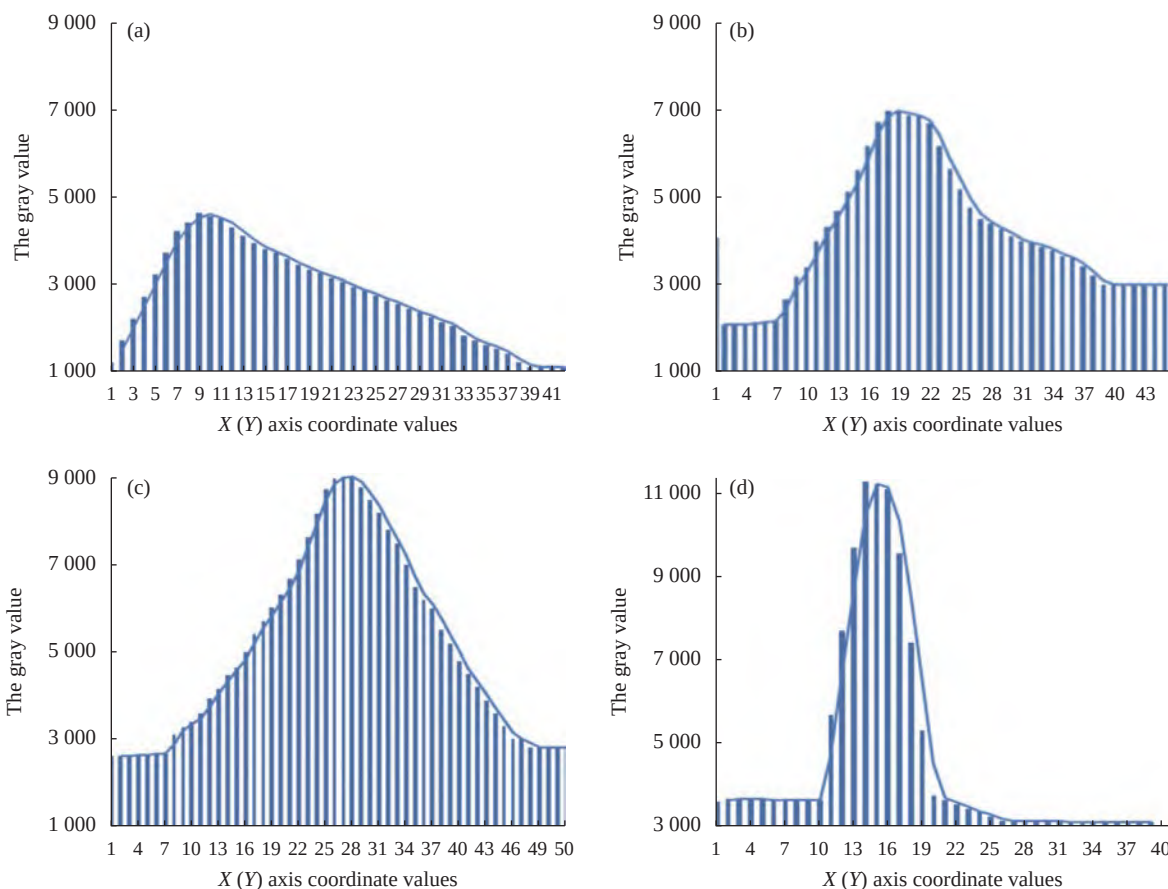


图 2 不同亮度的点目标 $X(Y)$ 轴灰度直方图

Fig.2 Gray level histogram of $X(Y)$ axis of point target with different brightness

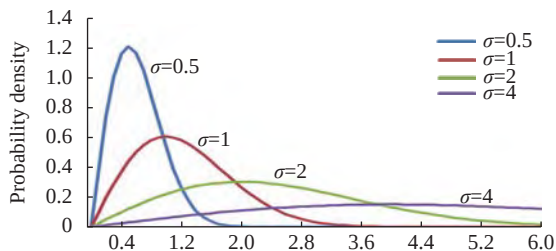


图 3 典型瑞利分布概率密度曲线图

Fig.3 Probability density curve of typical Rayleigh distribution

越小曲线形状越窄,数据集越聚集;反之, σ 值越大曲线形状越平坦,数据集越分散,符合典型的瑞利分布规律^[11]。因此,实际中不同亮度的点目标在红外靶面能量分布情况可以使用瑞利分布来反映,确定能量中心位置与灰度值之间的关系。

对瑞利分布概率密度函数进行积分,得到其累积分布函数,从工程上可以理解为空间占比率,即曲线与数轴所包含的面积,当变量 x 是固定数值时, σ 数值越大,覆盖面积越大,利用上述公式令 $\sigma=1, x=2$, 得到 $L(X)=87.3\%$; $\sigma=1, x=3$, 得到 $L(X)=98.7\%$, 同理可得到 $\sigma \geq 2$ 的情况,如图 4 所示。那么依据瑞利分布概率的计算,点目标灰度值落在区间 $(-3\sigma, 3\sigma)$ 概率为大于 98.7%, 因此对某像素点的灰度值 $P(x)$ 可以定义为: 如果 $P(x) - 3\sigma \geq G_B$ 则认为该像素灰度值为目标灰度值; 如果 $P(x) - 3\sigma < G_B$ 则认为该像素灰度值为背景灰度值^[12]。因此,可利用瑞利分布来描述实际中不同亮度的点目标弥散情况,确定弥散斑中心位置、目标与背景边界与灰度值之间相互关系。

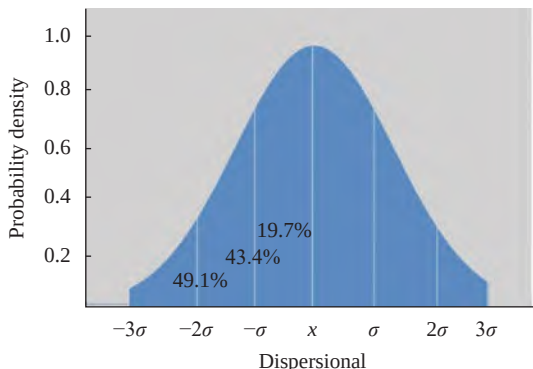


图 4 瑞利分布概率密度累计

Fig.4 Cumulative probability density of Rayleigh distribution

3 实验验证及结果分析

为考核该方法是否具有良好工程适用性和较高

的测量精度,通过辐射特性测量精度比对进行实验验证,实验选取对海作用距离试验中 400 mm 口径中波红外成像系统作为测试载体,其红外辐射测量系统参数设置如表 1 所示。另采用 600 mm×600 mm 的标准方形面源黑体作为真值目标,黑体架高固定在近海可移动的靶船上,黑体温度设置从 60 ℃ 开始逐渐升温至 130 ℃,每 10 ℃ 设置为一个温度间隔,为减少外部环境的影响,试验整体测量时间控制在 1 h 以内完成。

表 1 红外辐射测量系统参数设置

Tab.1 Parameter setting of infrared radiation measurement system

Parameter name	Value
Aperture/mm	400
Band/ μm	3.7-4.8
Pixel number	640×512
Pixel size/ μm	15
Bit depth/bit	14
Integration time/ μs	1 500/2 500

图 5 为实验中波红外实时拍摄目标截取图像,黑色方框内为传统图像二值化处理方法识别出的目标区域,圆形框内为瑞利分布法识别出的目标区域。并给出该基于瑞利分布方法处理该目标在 $X(Y)$ 方向的灰度分布图,从图中可以看出两者很好的拟合在一起。

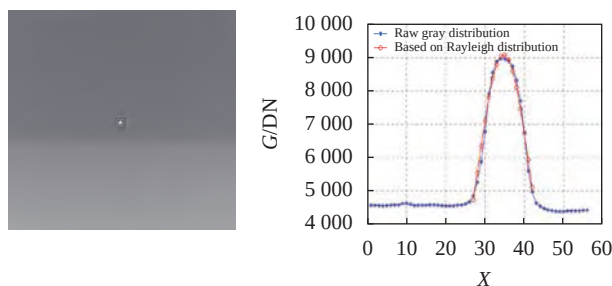


图 5 实验中红外目标图像及瑞利分布拟合情况

Fig.5 Infrared target image and Rayleigh distribution fitting in the experiment

考虑目标成像清晰且便于分析与判断的原则,观测距离设置为 3.5 km 的高山上,经理论计算目标成像约为 4×4,满足大于 10 倍的辐射源尺寸的要求,因此

可以将此标准辐射源黑体看成点目标处理。图 6 为该黑体不同温度时刻呈现在 MATLAB 上的灰度变化,从图像上可以看出,选取出的点目标在 $1500\ \mu\text{s}$ 积分情况下的 $70\ ^\circ\text{C}$ 、 $90\ ^\circ\text{C}$ 、 $110\ ^\circ\text{C}$ 和 $130\ ^\circ\text{C}$ 成像能量分布均呈现出典型瑞利分布形式^[13]。而且目标成像

灰度值区间在 $4000\sim 14000$ 之间,满足中波红外成像系统最低灰度可探测值约 1500,最高灰度可探测值约 15000 要求,且成像像元数来说满足点目标测量计算的要求。

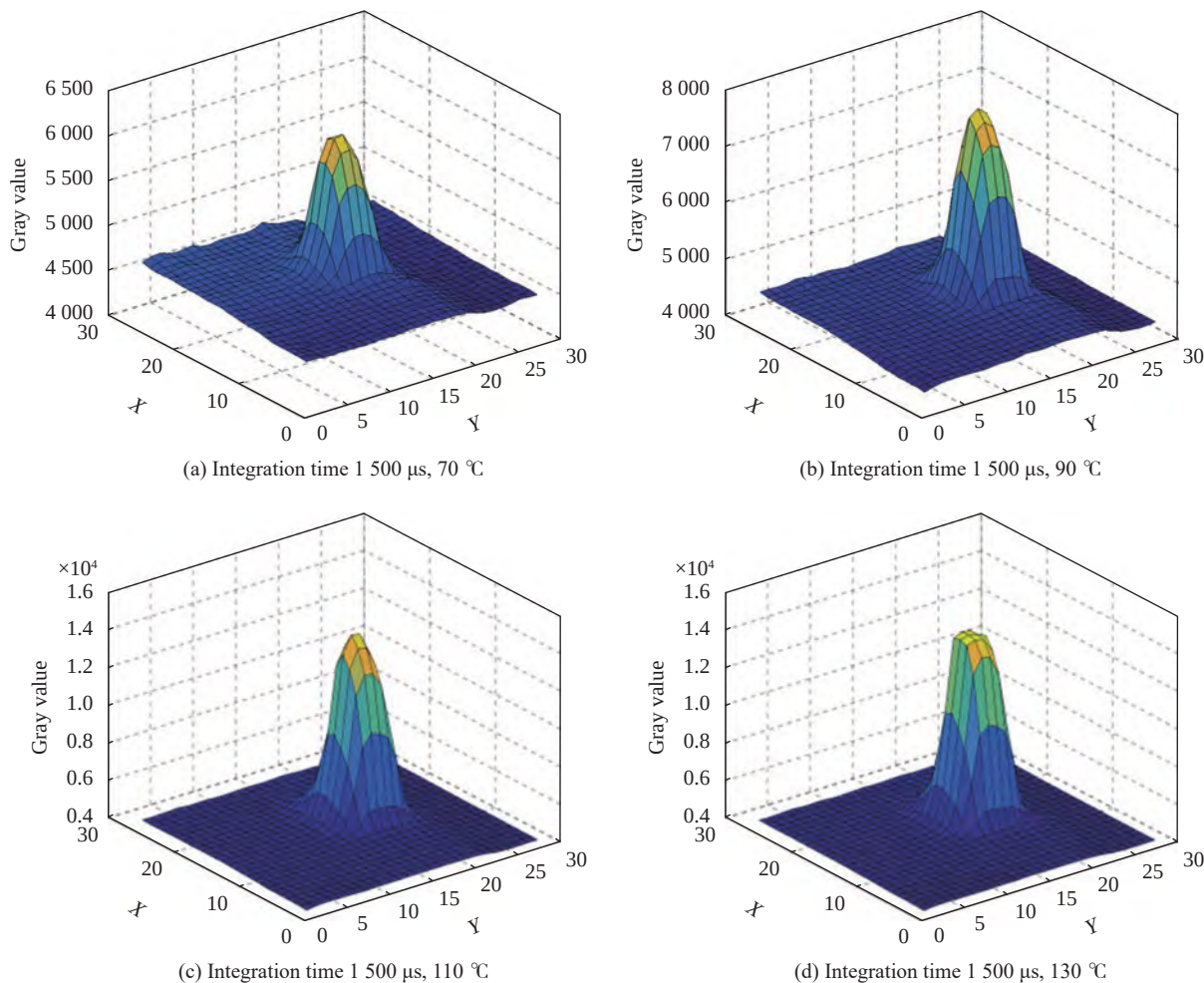


图 6 不同温度下的成像灰度分布

Fig.6 Image gray distribution at different temperatures

为检验基于瑞利分布对弱小目标能量判断方法是否具备较好的测量精度,将应用传统图像二值化处理^[14]得到的辐射强度与应用基于瑞利分布图像处理得到的辐射强度进行对比实验,在相同的外部环境条件下,采用同一的红外辐射特性测量设备,选取相同的积分时间和温度,以面源黑体辐射源作为测量真值,利用两种不同方法下辐射强度测量值与黑体标定真值之差作为测量偏差,即测量精度,得到数据结果如表 2 所示。

通过对比和分析不难发现,应用基于瑞利分布方法的辐射强度测量偏差绝对值可控制在 8% 以下,而应用传统图像二值化处理方法得到的辐射强度值偏差绝对值高达 20% 以上;而且从图 7 也可以看出,应用基于瑞利分布的计算方法得到的测量数据离散程度更小,集中度更高^[15]。因此在探测距离较远、大气情况复杂、目标弥散严重、整体图像对比度低等目标与背景边界区别不明显情况下,应用基于瑞利分布目标能量计算方法可有效提高特性测量精度。

表 2 不同计算方法测量结果数据对比
Tab.2 Comparison of measurement results of different calculation methods

$t/\mu\text{s}$	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Blackbody radiation intensity/ $\times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$	Radiation intensity with binaryzation/ $\times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$	Error	Radiation intensity with Rayleigh distribution/ $\times 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$	Error
1 500	60	3.084 6	3.510 6	13.81%	3.157 2	2.35%
	70	4.161 5	4.559 7	9.57%	4.144 1	-0.41%
	80	5.520 9	5.950 0	7.77%	5.585 7	1.17%
	90	7.212 4	7.582 9	5.14%	7.390 1	2.46%
	100	9.289 8	9.771 6	5.19%	9.311 9	0.23%
	110	11.810 4	12.395 8	4.96%	11.388 5	-3.57%
	120	14.835 1	15.597 4	5.14%	14.833 6	-0.01%
	130	19.110 6	20.543 2	4.42%	19.557 8	0.70%
2 500	60	3.084 6	3.415 6	10.73%	3.290 1	6.66%
	70	4.161 5	4.487 9	7.84%	4.231 9	1.69%
	80	5.520 9	5.856 4	6.08%	5.533 1	0.22%
	90	7.212 4	7.595 5	5.31%	7.015 8	-2.72%
	100	9.289 8	9.831 6	5.83%	9.301 1	0.12%
	110	11.810 4	10.527 5	-10.86%	11.980 8	1.44%
	120	14.835 1	15.239 1	2.72%	14.176 6	-4.43%
	130	18.427 6	19.241 5	4.42%	18.557 8	0.70%

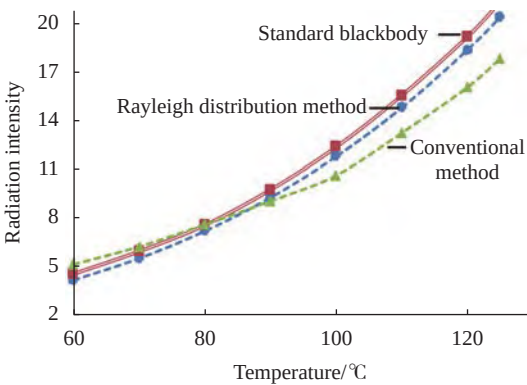


图 7 不同方法反演精度对比

Fig.7 Comparison of inversion accuracy of different methods

4 结 论

红外弱小目标的探测与识别问题一直是国内外测量技术领域研究的重点问题,它是衡量红外探测器成像能力的标准,是判别靶场光测设备红外系统探测能力的依据。文中在深入分析点目标成像过程及其能量分布的基础上,提出基于瑞利偏态分布的点目标能量计算方法,并将传统算法与文中算法在辐射特性测量精度方面进行对比,得出其测量精度有较大提

高,而且测量数值离散程度更小,可以有效区分点目标和背景。

虽然各种弱小目标的探测与识别研究如火如荼,但是在工程应用方面还存在很远的距离,下一步需要在靶场应用进行大量的仿真和试验,建立完备的红外点目标红外辐射特征数据库,从而完善拓展其实际运用前景。

参考文献:

[1] Huang Zhiguo. Research on space target of ground-based infrared detection technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)

[2] Zhang Qi. Image binarization algorithm with edge detection [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)

[3] Liu Zheng, Yang Dezhen, Li Jiangyong, et al. A review of infrared single frame dim small target detection algorithms [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(2): 154-162. (in Chinese)

[4] Wang Tao. Research on high reliability detection method of infrared dim target in complex space environment [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2017. (in Chinese)

- [5] Ming Yong, Gan Xiaomin, Yang Fan. Infrared weak target detection algorithm based on time-space domain and high-order moment [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2021(12): 1-6. (in Chinese)
- [6] Gao Bo. Research and implementation of space infrared dim target detection algorithm [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [7] Cao Lihua, Wan Chunming, Zhang Yunfeng, et al. Infrared radiation characteristic measure method of point target [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2015, 34(4): 460-464. (in Chinese)
- [8] Chang Songtao, Zhang Xiaoyu, Sun Zhiyuan, et al. Radiation measurement method for infrared small target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0504001. (in Chinese)
- [9] Wang Bing, Gao Qiong, Zhang Yanxiu. Characterization and inversion method of infrared radiation properties of helicopter in point source detection [J]. *Infrared*, 2018(5): 37-41. (in Chinese)
- [10] Li Zhou. Research on ground-based infrared characteristics measurement systems in wide dynamic range radiometry [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [11] Lu Xiaofei. The engineering arithmetic of the reflected infrared radiation characteristic for air-target [J]. *Infrared Technology*, 2013(5): 289-294. (in Chinese)
- [12] Han Jinhui, Wei Yantao, Peng Zhenming, et al. Infrared dim and small target detection: A review [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 20210393. (in Chinese)
- [13] Qian Weixian. Research on some key technologies of infrared small target detection and tracking under complex background[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] Zeng Yaqiong. Detection of infrared dim target in complex background[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [15] Wu Jie, Lin Suzhen, Lu Xiaofei, et al. Infrared dim target detection based on multi-feature fusion [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022(5): 67-71. (in Chinese)