文章编号:1001-5078(2014)10-1154-05

图像与信号处理。

基于红外偏振的特征提取与小目标检测方法

邱跳文,张 焱,杨卫平,李吉成

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 ATR 国防科技重点实验室,湖南 长沙 410073)

摘 要:针对红外目标探测所面临的杂波干扰问题,提出了一种基于红外偏振的特征提取与小目标检测方法。首先,利用人工目标和自然背景偏振特性的差异,建立了目标与背景的红外偏振信息模型,分析了其中强度信息和偏振信息的构成以及目标偏振信息的提取与增强办法。 然后,将斯托克斯矢量、部分偏振光分解、变偏振理论相结合实现了目标偏振特征的提取与背景杂波抑制及随机噪声消除,进而实现了红外小目标的检测。仿真数据实验结果及与现有方法的对比证明了该方法的有效性和可靠性。该方法可用于对抗红外伪装隐身及红外诱饵技术,提升红外目标的探测能力,富有应用价值。

关键词:小目标检测;红外偏振信息;特征提取;变偏振;斯托克斯矢量;建模 中图分类号:TN219 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.10.018

Method for feature extraction and small target detection based on infrared polarization

QIU Tiao-wen, ZHANG Yan, YANG Wei-ping, LI Ji-cheng (ATR Key Laboratory, College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To solve the problem of clutter interference in infrared target detection, a novel method of feature extraction and small target detection based on the infrared polarization information is proposed. Firstly, according to the differences of polarization characteristics of artificial target and natural background, a model of infrared polarization information of targets and the background is established. The components of intensity and polarization information are analyzed as well as the extraction and enhancement of the target polarization information. Then, the three theories of the stokes vector, partially polarized light decomposition and variable polarization are combined to extract target polarization feature, suppress background clutter and eliminate random noise, thus achieve detection of infrared small target. Experimental results on simulated data and comparisons with three existed methods demonstrate the effectiveness and reliability of the proposed method, which can be used against infrared camouflage concealment or infrared decoy technology, and has great application value.

Key words: small target detection; infrared polarization information; feature extraction; variable polarization; Stokes vector; modeling

1 引 言

红外小目标检测是预警侦察、防空反导、精确 制导等领域的一个重要课题,由于背景杂波及噪 声干扰,在成像平面上仅占少数几个像素的小目 标往往淹没于其中,因此小目标的检测也是一个 难点问题。加之各种红外伪装隐身以及红外诱饵 技术的出现,使得传统的基于红外辐射强度图像 的目标检测方法受到了极大挑战。而红外偏振成 像探测技术是近十多年来迅速发展起来的新型成 像探测技术,该技术不仅可以探测目标景物的红

收稿日期:2014-03-06;修订日期:2014-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61302145, 61101185) 资助。

作者简介:邱跳文(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为红 外偏振成像自动目标识别。E-mail:qiutiaowen@126.com

外辐射强度信息,还可以获取到红外辐射的偏振 信息,甚至能够依据偏振特征的不同区分红外辐 射强度相同的目标。由于红外偏振成像探测技术 所具有的上述特点和优势,它已成为解决人工目 标探测问题的有效方法。

自 20 世纪 60 年代起,国外学者便开始了红外 偏振的探索性研究,其后便开始应用于目标的探 测识别。Richard D. Tooley^[1]探讨了利用红外偏振 信息进行人工目标检测的可行性,提出了采用水 平偏振分量和垂直偏振分量作差来抑制背景,实 现目标检测的方法。Firooz A. Sadjadi 等^[2]利用红 外辐射强度、偏振度、偏振角三通道信息提取目标 统计特征,并将其作为目标检测的依据,实现了小 目标检测。João M. Romano 等^[3]提出了一种基于 长波红外偏振图像和贝叶斯判决的异常检测算 法,实现了人工目标的全天候检测。尽管这些方 法能够利用偏振信息实现复杂背景下的人工目标 检测,然而它们对信息的利用都处在图像处理层 面,而没有从偏振机理上进行挖掘,因此对杂波背 景和噪声的抑制能力受限。

在研究红外偏振原理和偏振成像机理过程中, 发现对于红外小目标或红外伪装隐身目标等目标背 景对比度很小的情况下,如果能够分解出无效的强 度成分,并提取出其中最有效的偏振信息,就能够实 现目标的检测和分割,基于该想法提出了一种新的 利用红外偏振信息的目标检测的方法,建立了红外 偏振信息模型,将斯托克斯矢量、部分偏振光分解、 变偏振等理论相结合实现了背景杂波抑制、随机噪 声消除及目标偏振信息的增强,进而实现红外小目 标检测。通过仿真实验对该方法进行了测试并与已 有方法进行了对比,结果表明了该方法的有效性和 可靠性。

2 基本方案

2.1 红外偏振信息建模

目标景物的红外辐射作为一种光波,视为部分 偏振光,由非偏振光与偏振光叠加而成,非偏振光又 称为自然光^[4]。进入成像探测设备后,目标景物红 外辐射转换为红外图像,辐射强度转化为图像灰度 值,相应的自然光成分记为*I_N*,线偏振光成分记为 *I_P*,忽略圆偏振成分情况下,则辐射强度分解为:

$$I = I_N + I_P \tag{1}$$

倘若对辐射强度 *I* 进行偏振分量提取,根据马 吕斯(E. L. Malus)定律,则在偏振方向 θ 下提取的 偏振分量强度为:

$$I^{\theta} = I_{N}^{\theta} + I_{P}^{\theta} = \frac{1}{2}I_{N} + I_{P}\cos^{2}(\theta - A)$$
(2)

其自然光成分 $I_N^{\theta} = \frac{1}{2}I_N$,线偏振成分 $I_P^{\theta} = I_P \cos^2(\theta - A)$, A 为偏振角,定义为入射光的偏振方向与参考方向 x 轴的夹角。

由偏振度定义式:

$$P = \frac{|I_{\parallel} - I_{\perp}|}{|I_{\parallel} + |I_{\perp}|}$$
(3)

其中, I_{\parallel} 、 I_{\perp} 分别为两个互相垂直的偏振分量强度。

取 I_{\parallel} 为偏振角A方向下的偏振分量强度,由式 (2)得:

$$I_{\parallel} = I^{A} = I^{A}_{N} + I^{A}_{P} = \frac{1}{2}I_{N} + I_{P}$$
(4)

 I_{\perp} 为与 I_{\parallel} 垂直方向的偏振分量强度,由式 (2)得:

$$I_{\perp} = I^{A + \frac{\pi}{2}} = I_{N}^{A + \frac{\pi}{2}} + I_{P}^{A + \frac{\pi}{2}} = \frac{1}{2}I_{N}$$
(5)

由式(3)(4)(5)可得到目标像素点与背景像 素点的偏振度:

$$P = \frac{I_P}{I_N + I_P} = \frac{I_P}{I} \tag{6}$$

对任意偏振方向 θ 获取的红外偏振图像,其目标及背景像素点灰度有:

$$\begin{cases} I_{T}^{\theta}(i,j) = I_{TN}^{\theta}(i,j) + I_{TP}^{\theta}(i,j) + \omega \\ (i,j) \in \text{target} \\ I_{B}^{\theta}(i,j) = I_{BN}^{\theta}(i,j) + I_{BP}^{\theta}(i,j) + \omega \\ (i,j) \in \text{background} \end{cases}$$
(7)

公式(7)的第一式中, $I_T^{\theta}(i,j)$ 为目标像素点在 偏振方向 θ 下的偏振光强; $I_T^{\theta}(i,j)$ 为目标像素点 的自然光成分; $I_{TP}^{\theta}(i,j)$ 为目标像素点的线偏振光 成分; ω 为像素点噪声。同理,第二式中为相应的背 景像素点参数。

结合式(2)、(6)、(7),得到红外偏振信息模型 如下:

$$\begin{cases} I_{T}^{\theta}(i,j) = I_{T}(i,j) \Big[\frac{1}{2} (1 - P_{T}(i,j)) + P_{T}(i,j) \cos^{2}(\theta - A_{T}(i,j)) \Big] + \omega & (i,j) \in \text{target} \\ I_{B}^{\theta}(i,j) = I_{B}(i,j) \Big[\frac{1}{2} (1 - P_{B}(i,j)) + P_{B}(i,j) \cos^{2}(\theta - A_{B}(i,j)) \Big] + \omega & (i,j) \in \text{background} \end{cases}$$
(8)

式(8)中, $I_{r}(i,j)$ 和 $I_{B}(i,j)$ 分别是目标及背景像素 点的红外强度值,该模型将强度信息和偏振信息 (偏振度、偏振角)表达为两个相乘的因子。

2.2 偏振特征提取方案

公式(8)中,未考虑噪声ω情况下,目标与背景 像素点的红外偏振光强依偏振方向θ呈哑铃型角分 布,哑铃长轴方向即为偏振角A方向,哑铃内切圆 即为其自然光成分,可见偏振辐射光强由自然光成 分和线偏振光成分组成,在偏振角方向的线偏振光 成分最大,在垂直于偏振角方向的线偏振光成分最 小,如图1所示。





以图 1 为例,由于背景偏振角与目标偏振角的 差异,在垂直于背景偏振角方向计算偏振光强,得到 的是含有部分偏振光目标和自然光背景的偏振光强 图 $I^{\overline{A}-\pi/2}}$,这时剔除了背景的线偏振光成分。实际 处理过程中,背景偏振角方向可用整个偏振角图像 的平均值 \overline{A} 近似代替。

然后,去除掉垂直于背景偏振角方向的偏振光 强 $I^{\overline{A}-\pi/2}$ 中的自然光成分 $I_N^{\overline{A}-\pi/2} = \frac{1}{2}I_N$,这样背景像 素点的光强被抑制,剩余目标像素点的线偏振光成 分 $I_{TP}^{\overline{A}-\pi/2}$,如式(9),由此实现目标偏振特征提取,通 过阈值门限可完成目标检测。

$$I_{TP}^{\bar{A}-\pi/2} = I^{\bar{A}-\pi/2} - \frac{1}{2}I_N$$
(9)

3 实现流程

小目标检测算法实现流程图如图2所示。

1)偏振图像的采集。偏振图像的采集需要通 过红外偏振成像系统,许多文献中提出了系统的设 计方案,总的来说可以分为时序探测和同步探测两 种模式。对目标场景采集至少三个偏振方向的红外 偏振图像,就能够解算出目标景物偏振态。

2)偏振图像预处理,包括图像校正、滤波、配 准、裁剪等处理。校正用于抵消探测器响应的非均 匀性以及补偿光学元器件的非理想性。滤波用于降 低图像噪声并去除坏点。一般情况下,同一场景不 同通道获取的偏振图像都会存在微位移偏差,需要 对图像进行配准,然后对图像进行裁剪。

3)目标景物偏振态解算。对于任意红外偏振 光,可采用斯托克斯(Stokes)矢量对其进行表示。 在不少于三个偏振方向 θ 采集偏振光强(I^{θ1}、I^{θ2}、 I^{θ3})后,就能够利用式(10)求解出各斯托克斯参量 I、Q、U,即解算出了目标景物偏振态 S,并计算得到 偏振度 P 和偏振角 A^[5]。

$$I^{\theta} = I' = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\theta + U\sin 2\theta)$$
(10)

4) 目标景物偏振态分解。目标景物的偏振态 往往是部分偏振的,可以将其分解为线偏振光成分 与自然光成分之和,得到线偏振光成分强度为 $I_P = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}$,自然光成分强度为 $I_N = I - \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}$ 。

5)求解变偏振分量 $I^{\bar{i}-\pi/2}$ 。偏振方向 θ 取 $\bar{A} - \pi/2$,利用式(10)可得到垂直于偏振角 A 平均值方向的变偏振分量 $I^{\bar{i}-\pi/2}$,从而抑制背景像素点的线偏振光成分 $I_{BP}^{\bar{i}-\pi/2}$ 。

6) 变偏振分量的线偏振光成分提取。利用前两步(4)和(5)的计算结果,去除掉变偏振分量 $I^{\bar{A}-\pi/2}$ 中的自然光成分 $I_N^{\bar{A}-\pi/2} = \frac{1}{2}I_N$,剩余目标像素 点的线偏振光成分 $I_{TP}^{\bar{A}-\pi/2}$ 。

7)完成小目标的检测。采用合适阈值对 $I_{TP}^{\overline{4}-\pi/2}$ 进行门限检测。



图 2 小目标检测算法实现流程图

4 仿真实验结果及分析

4.1 算法的实验结果及分析

依据公式(8)的红外偏振信息建模方法,对算法 进行仿真实验。仿真图像由小目标、杂波背景和随机 噪声组成,大小设为 40 × 40,背景采用某种地面背景, 小目标位于图像正中央,大小为 2 × 2。依据人工目标 与自然背景的偏振特性^[6],为不失一般性,令 $P_r \sim$ $N(0.03 \ 0.01^2)$, $P_B \sim N(0.01 \ 0.005^2)$, $A_r \sim$ $N(60^{\circ} \ 10^2)$, $A_B \sim N(10^{\circ} \ 20^2)$,并加入标准差为 1 的高斯白噪声 ω 。仿真得到的红外强度图像以及 0°、 60°、120°的偏振图像如图 3 所示,可见目标已经淹没在 强烈的背景杂波和噪声之中,难以直接进行目标检测。



图 3 仿真的红外强度图像与偏振图像

根据三通道的偏振图像计算得到的目标景物的 三个斯托克斯参量(I、Q、U)的图像如图 4,可见目 标依然镶嵌在强烈的背景杂波之中。



图 4 Stokes 参量图像

利用目标景物的斯托克斯矢量计算得到目标景物的偏振度 P 和偏振角 A 以及偏振态部分偏振光分解的自然光成分 I_N 和线偏振光成分 I_P 如图 5 所示。P 图和 A 图的背景杂波都非常强烈,尤其是 A, 对噪声源更为敏感。自然光成分 I_N 中带有很强的背景杂波;线偏振光成分由于突出了偏振信息,因此与前面各参量图相比目标更加突出,但依然受到杂波噪声的强烈干扰。



图5 偏振度、偏振角及偏振分解图像

如图 6 所示, 左图为垂直于偏振角平均值方向 的变偏振图像 I^{Ā-π/2}, 从中去除自然光成分后得到 变偏振的线偏振光成分 I^{Ā-π/2}, 其背景杂波已经得 到了极大抑制, 目标明显突出, 很容易检测出小 目标。



图6 检测结果图像

对上述各参量图引入目标背景对比度 *C* 和局 部信杂比 LSCR^[7]两个参数来评价检测效果,*C* 值反 映目标信号在背景杂波中突出的程度,LSCR 值还 能反映噪声的抑制情况,定义如下:

$$C = \left| \frac{\mu_T - \mu_B}{\mu_T + \mu_B} \right| \tag{11}$$

$$LSCR = \left| \frac{\mu_T - \mu_B}{\sigma_B} \right| \tag{12}$$

其中, μ_T 为目标灰度均值; μ_B 为背景灰度均值; σ_B 为背景灰度标准差。

计算各参量的目标背景对比度 C 以及局部信 杂比 LSCR 如表 1 所示,可见经过该方法处理之后 图像的参数值显著增加,明显大于其他各参数值,有 效地抑制了背景杂波噪声并突显了目标。

表1 各参量图像的C值和LSCR值

参量	原始强度图	$I^{0^{\circ}}$	$I^{60^{\circ}}$	$I^{120^{\circ}}$	Ι	Q
С	0.0199	0.0033	0.0323	0. 0243	0. 0371	0.8064
LSCR	0. 1691	0. 0279	0. 2773	0. 2079	0. 9368	11. 7968
参量	U	Р	A	I_P	$I^{\overline{A}-\pi/2}$	$I_{TP}^{\overline{A}-\pi/2}$
С	0. 1822	0. 4205	0. 3105	0. 4968	0.0615	0. 8807
LSCR	5.0528	8. 4458	0.2314	12. 8977	1. 5837	29. 4371

4.2 与已有方法的对比及分析

为了进一步衡量该检测方法的性能,将该方法 与文献中[1]、[2]、[3]已有的三种方法进行了对 比,四种方法的检测结果如图7所示。不难发现,本 文方法能够更好地实现背景抑制和噪声消除,而文 献[1]中方法不能较好地消除随机噪声,文献[2]的 方法未能有效地抑制背景,文献[3]中方法对背景 中的起伏敏感,不能有效区分目标真假。



图 7 四种方法的结果图像比较

为了对四种方法性能进行定量比较,仍采用 C 值和 LSCR 值,并以程序运行时间评价检测速度(硬 件环境(Intel G630 2.70GHz CPU,1.84GB 内存)和 软件环境(Windows XP 和 Matlab R2011a 平台)下, 不包括图像导入及预处理的时间,只计算检测算法 的运行时间),结果如表2所示。可见本文方法的 C 和 LSCR 均明显大于其他方法,运行时间也相对较 少,说明该方法优于已有的三种方法,与前面的主观 评价一致。

	本文 方法	文献[1] 中方法	文献[2] 中方法	文献[3] 中方法
С	0. 8807	0. 3673	0. 0746	0. 1692
LSCR	29. 4371	1. 6916	1. 5347	2. 4319
Running time/s	0. 02081	0.01720	0.07402	0.04580

表 2 四种检测方法的性能比较

采用接收机工作特性(ROC)曲线对各检测方 法进行综合分析,结果如图 8 所示。可见本文方法 性能最佳,其次是文献[2]中方法。因此,从图像主 观效果、量化指标及 ROC 曲线几种评价结果来看, 均证明本文方法是一种有效的检测方法。



5 结 论

本文方法建立在人工目标与自然背景的红外偏 振特性差异的基础上,如偏振度、偏振角的分布差 异。根据已有的研究成果,人工目标的偏振度要大 于自然背景的偏振度,且人工目标的偏振度分布要 比自然背景的更为集中,人工目标的偏振角与自然 背景的相比也存在较大的差异,所以仿真实验的 理论基础是可靠的。实际上偏振度的细微差异就 能为我们所利用,而且在目标与背景的偏振度几 乎不存在差异时,仅凭偏振角的差异本文方法依 然有效。实际情况中,目标与背景的偏振度和偏 振角的双重差异提供了丰富的信息,增加了该方 法的可靠性。采用含有小目标、背景杂波及随机 噪声的红外偏振仿真数据对本文方法进行了实验 及分析,实验结果也表明该方法能够很好地抑制 背景杂波及噪声,突出目标信息,与已有三种检测 方法的对比实验也体现出了该方法的有效性、可 靠性与简便性。

参考文献:

- Tooley R D. Man-made target detection using infrared polarization [C]. SPIE Conference Series, 1990, 1166: 52-58.
- [2] Firooz ASadjadi, Cornell S L Chun. New experiments in the use of infrared polarization in the detection of small targets[C]. SPIE Proceedings, 2001, 4379:144 – 155.
- [3] João M. Romano. Day/Night polarimetric anomaly detection using SPICE imagery [J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50 (12): 5014-5023.
- [4] LONG Huaisheng, ZHANG Zhongxian, Tan Hengying. The polarization of light and its application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999. (in Chinese) 龙槐生,张仲先,谈恒英.光的偏振及其应用[M]. 北 京:机械工业出版社, 1999.
- [5] MA Lixiang, LI Fanning, NIU Jiyong. Research on influencing factors of target polarization characteristics[J]. Laserr & Infrared, 2013, 43(8):886-889. (in Chinese) 马利祥,李范鸣,牛继勇. 目标红外偏振特性的影响因素研究[J]. 激光与红外,2013,43(8):886-889.
- [6] TANG Kun,ZOU Jiwei,JIANG Tao, et al. IR polarization properties of a target and its background[J]. Infrared and Laser Engineering,2007,36(5):611-614. (in Chinese) 唐坤,邹继伟,姜涛,等. 目标与背景的红外偏振特性 研究[J]. 红外与激光工程,2007,36(5):611-614.
- [7] CHENG Gong, GUO Wei, HAN Junwei, et al. Infrared dim small target detection based on morphological band-pass filtering and scale space theory [J]. Acta Optica Sinica, 2012,32(10):1-8. (in Chinese) 程塨,郭雷,韩军伟,等. 基于形态学带通滤波和尺度 空间理论的红外弱小目标检测[J]. 光学学报,2012, 32(10):10150011-8.