

基于最小互信息的自适应偏振差分成像方法

韩裕生^{1,2}, 周浦城², 乔延利¹, 薛模根², 王峰²

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 解放军炮兵学院 信息工程系, 安徽 合肥 230031)

摘要: 偏振信息解析是偏振成像探测涉及的一个重要课题。针对传统的偏振差分成像方法存在的不足, 从信息论的角度出发, 提出了一种基于最小互信息的自适应偏振差分成像方法。首先, 利用偏振信息解析得到的斯托克斯参量图像, 计算得到偏振片透光轴与所选参考坐标轴的成任意夹角的出射光强度图像; 然后, 以归一化互信息为评价指标, 寻找具有最大不相关的两幅出射光强度图像; 最后, 根据找到的两幅图像的差分结果进行成像。实验结果表明, 提出的方法不仅具有更好的抑制背景、突出目标细节特征的能力, 而且得到的图像质量更高, 从而验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 光学偏振; 偏振差分成像; 互信息

中图分类号: O436.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)03-0487-05

Adaptive polarization difference imaging approach based on minimum mutual information

Han Yusheng^{1,2}, Zhou Pucheng², Qiao Yanli¹, Xue Mogen², Wang Feng²

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Department of Information Engineering, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: Polarization information analysis is an important topic for polarization imaging detection. To overcome the drawback of the conventional polarization difference imaging method, from the viewpoint of information theory, a kind of adaptive polarization difference imaging approach based on the principle of minimum mutual information was introduced. Firstly, according to the Stokes parameters images obtained by polarization information analysis, the outgoing light intensity image oriented by any angle between the transmission axis of the filter and the selected reference coordinate axis was calculated. And then, taking the normalized mutual information as the evaluation index, two outgoing light intensity images with maximum irrelevance were found out. Finally, these images were used to imaging by difference operation. Experimental results show that the proposed method not only has better ability to restrain the background and pop out the details of targets, but also can obtain better image quality which testifies its feasibility and validity.

Key words: optical polarization; polarization difference imaging; mutual information

收稿日期: 2010-06-17; 修订日期: 2010-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40876095)

作者简介: 韩裕生(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要从事偏振遥感技术方面的研究。Email: hanyusheng2000@yahoo.com.cn

导师简介: 乔延利(1958-), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为偏振定量遥感。Email: yljiao@aiofm.ac.cn

0 引言

地球表面的任何目标,在反射、散射和发射电磁波的过程中,都会产生与自身性质密切相关的偏振特征。偏振成像探测能够提供有关目标的表面粗糙度、纹理走向、导电率等信息,将信息量从三维(光强、光谱和空间)扩充到七维(增加了偏振度、偏振角、偏振椭率和旋转方向),为实现目标空间结构的反演奠定了基础^[1]。在过去的十几年中,偏振探测获得了迅速的发展,在气溶胶探测^[2]、水体污染监测、伪装目标检测^[3]等领域都得到了广泛的应用。

在偏振成像探测中涉及到的一个重要问题是偏振信息的解析。这是因为,一方面,仅靠人的肉眼并不能直接观察到偏振信息,需要将偏振成像系统获取的偏振信息以某种适当的形式显示出来,以便能够被人眼所接收和察觉;另一方面,许多实际应用的问题也需要发挥偏振成像探测的固有优势,以便充分利用目标及背景偏振特征的差异而达到增强目标探测与识别的能力。在上述需求的驱动下,许多研究人员提出了各种各样的解析方法,例如:陈立刚等人^[4]提出基于新型偏振特性因子的成像方法;Tyo 等人^[5]提出了一种偏振差分成像方法;Yemelyanov 等人^[6]采用主成分分析技术,将偏振差分成像的思想推广到具有不均匀分布的偏振统计规律的场合。

文中从信息论的角度出发,提出了一种基于最小互信息的自适应偏振差分成像方法,并通过与传统的偏振差分成像进行对比实验,验证了所提方法的可行性和有效性。

1 偏振信息解析原理

1.1 偏振信息的定量描述

由于斯托克斯参量可由光强度量纲来表征,便于测量和计算,故常用于描述地物的偏振状态:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ 2\langle E_x E_y \cos \delta \rangle \\ 2\langle E_x E_y \sin \delta \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\langle \rangle$ 表示时间平均效果; E_x 、 E_y 、 δ 分别为光波电场

x 和 y 分量的振幅和相位; I 表示光的总强度; Q 用于计算水平方向的线偏振量; U 用于计算与水平方向的夹角为 45° 的线偏振量; V 表示右旋与左旋圆偏振分量之差,由于自然界中大部分物体反射光线的 V 分量都非常微小,因此可近似认为 $V=0$ ^[7]。

在描述光与物质相互作用过程中,入射光波的斯托克斯参量 S_i 与出射光波的斯托克斯参量 S_o 成线性函数关系,即:

$$S_o = M S_i \quad (2)$$

式中: M 是一个 4×4 阶矩阵,称为 Mueller 矩阵。

对于偏振态为 $S_i = [I_i \ Q_i \ U_i \ V_i]^T$ 的入射光波,当经过透光轴与参考坐标夹角为 β 的理想线偏振片后,出射光波的偏振态 $S_o = [I_o \ Q_o \ U_o \ V_o]^T$ 为:

$$\begin{bmatrix} I_o \\ Q_o \\ U_o \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\beta & \sin 2\beta \\ \cos 2\beta & \cos^2 2\beta & \cos 2\beta \sin 2\beta \\ \sin 2\beta & \cos 2\beta \sin 2\beta & \sin^2 2\beta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{则: } I_o = \frac{1}{2} (I_i + Q_i \cos 2\beta + U_i \sin 2\beta) \quad (4)$$

改变偏振片透光轴与所选参考坐标系的夹角,分别得到夹角为 β_1 、 β_2 和 β_3 时的三组出射光强 $I(\beta_1)$ 、 $I(\beta_2)$ 、 $I(\beta_3)$,代入公式(4)即可联立求出 I_i 、 Q_i 和 U_i ,并可计算出线偏振度 P 和偏振角 θ :

$$\begin{cases} P = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{Q_i^2 + U_i^2}}{I_i}, 0 \leq P \leq 1 \\ Q = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U_i}{Q_i} \right), -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

1.2 偏振差分成像

由公式(4)可知,一旦求出了 I_i 、 Q_i 和 U_i ,就可以解析出偏振片透光轴与所选参考坐标的夹角成任意角度 β 时的出射光强 $I_o(\beta)$ 。

在 Tyo 等人基于生物偏振视觉原理提出的偏振差分成像中^[8],首先将到达成像探测器上每一个像元 (x, y) 的偏振光进行正交分解,得到的两个正交线偏振分量 $I_0(x, y)$ 和 $I_{90}(x, y)$,然后采用公式(6)进行偏振信息解析

$$\begin{bmatrix} PSI(x, y) \\ PDI(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{90}(x, y) \\ I_0(x, y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: PDI 为偏振差分成像信号; PSI 代表偏振求和信息,对于理想的线偏振分析器, PSI 图像相当于传统的强度图像 I 。

从公式(6)可以看出,偏振差分成像的实质就是

利用正交分解的两个偏振光分量进行差分。研究表明,PSI 和 PDI 图像通道就是具有均分分布的偏振角场景中的两个主成分,因此,从信息论的观点来看,PSI 和 PDI 是具有最大不相关信息的最优通道^[6]。然而,在实际应用中,场景的偏振方向和线偏振度往往并不满足均匀分布的统计规律,从而导致偏振差分结果并非目标探测的最佳信号^[8]。

2 自适应偏振差分成像

为了克服 Tyo 等人提出的偏振差分成像方法的不足,基于互信息最小化原则,提出了一种自适应偏振差分成像方法。

2.1 互信息的概念

设有两个随机事件 A 和 B , a 和 b 是任意实数,则 A 、 B 的边缘概率分布可以表示为 $P_A(a)$ 和 $P_B(b)$,而它们的联合概率分布则表示为 $P_{AB}(a, b)$ 。

可以用互信息来度量两个随机事件 A 和 B 之间的相关程度,即:

$$MI(A, B) = \sum_{a,b} P_{AB}(a, b) \log \frac{P_{AB}(a, b)}{P_A(a)P_B(b)} \quad (7)$$

互信息与熵之间满足以下关系:

$$\begin{aligned} MI(A, B) &= H(A) + H(B) - H(A, B) \\ &= H(A) - H(A | B) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $H(A)$ 和 $H(B)$ 分别表示随机事件 A 、 B 的熵; $H(A, B)$ 代表随机事件 A 、 B 的联合熵; $H(A|B)$ 代表已知随机事件 B 发生时随机事件 A 的熵,且:

$$H(A) = - \sum_a P_A(a) \log P_A(a) \quad (9)$$

$$H(A, B) = - \sum_{a,b} P_{AB}(a, b) \log P_{AB}(a, b) \quad (10)$$

$$H(A | B) = - \sum_{a,b} P_{AB}(a, b) \log P_{A|B}(a | b) \quad (11)$$

2.2 基于最小互信息的偏振差分成像

当偏振片透光轴与所选参考坐标的夹角为任意角度 φ_1 和 φ_2 时,得到的出射光强度图像分别为 $I_1 = I(\varphi_1)$ 和 $I_2 = I(\varphi_2)$, 其互信息为:

$$\begin{aligned} MI(I_1, I_2) &= - \sum_i p_i(I_1) \log_2 p_i(I_1) - \sum_j p_j(I_2) \log_2 p_j(I_2) + \\ &\quad \sum_i \sum_j p_{i,j}(I_1, I_2) \log_2 p_{i,j}(I_1, I_2) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: p_i 是灰度级为 i 的图像的分布概率; $p_{i,j}(I_1, I_2)$ 为两幅图像灰度的联合概率分布。

由互信息的定义可知,图像 I_1 和 I_2 的互信息 $MI(I_1, I_2)$ 是表征这两幅图像之间的相关程度的统计量,互信息越大,说明这两幅图像的相关性越强。因此,利用互信息可以找到具有最大不相关的两幅出射光强度图像 $I_1^* = I(\alpha)$ 和 $I_2^* = I(\beta)$, 从而可以按照下面的表达式进行差分解析:

$$APDI(x, y) = |I_1^*(x, y) - I_2^*(x, y)| \quad (13)$$

为改善互信息对重叠区域的变化敏感性,文中采用如下归一化形式的互信息来衡量两幅图像的相关性:

$$\begin{aligned} NMI(I_1, I_2) &= \\ &= \frac{\sum_i p_i(I_1) \log_2 p_i(I_1) + \sum_j p_j(I_2) \log_2 p_j(I_2)}{\sum_i \sum_j p_{i,j}(I_1, I_2) \log_2 p_{i,j}(I_1, I_2)} \end{aligned} \quad (14)$$

3 实验结果与分析

为验证文中提出的自适应偏振差分成像方法的可行性和有效性,文中利用中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的多波段偏振 CCD 相机拍摄多组偏振图像进行了实验。该系统采用 1024×1024 像元的 CCD 面阵探测器,共有 4 个测量通道,分别为 443 nm、555 nm、665 nm 和 865 nm,量化精度为 12 bit。

图 1(a)~(c)为采用 555 nm 波段拍摄的网眼布在草地背景下的 3 个偏振方向的出射光强度图像。图 2

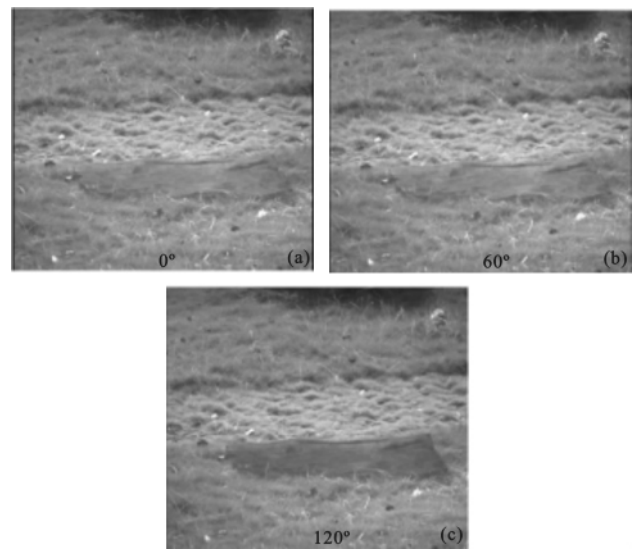


图 1 555 nm 波段下不同偏振方向的出射光强度图像

Fig.1 Outgoing light intensity image with different polarization direction at 555 nm band

为 555 nm 波段下不同偏振差分成像方法的对比结果,其中,图 2(a)和(b)分别是偏振度图像和偏振角图像,图 2(c)和(d)分别是传统偏振差分(PDI)和自适应差分成像(APDI)。不难看出,草地背景下由于单个草叶取向的随机性,造成其偏振角参数分布的离散性,体现在偏振角图像上草地背景呈现黑白夹杂的状态,因此,在这种情况下采用传统的偏振差分成像方法并不能得到目标探测的最佳信号。

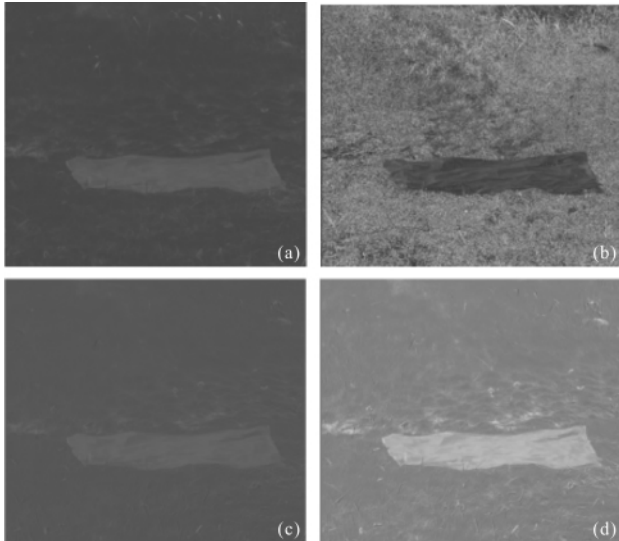


图 2 555 nm 波段下不同偏振差分成像方法得到的对比结果

Fig.2 Comparison results of different polarization difference imaging methods at 555 nm wave band

从视觉效果来看,图 2(d)明显要比图 2(c)更加清晰、网眼布轮廓在草地背景下更为突出。为方便定量分析,对所获取的图像中的网眼布与草地背景的灰度值对比度 C 定义如下:

$$C = \frac{\left| \sum_{(x,y) \in R} W_T(x,y) - \sum_{(x,y) \in R} W_B(x,y) \right|}{\sum_{(x,y) \in R} W_T(x,y) + \sum_{(x,y) \in R} W_B(x,y)} \times 100\% \quad (15)$$

式中: $W_T(x,y)$ 、 $W_B(x,y)$ 分别为网眼布和草地背景在图像的像素位置 (x,y) 处所对应的灰度值; R 为选择区域。在图像灰度值大于人眼响应阈值时, C 越大,说明越容易从背景中识别目标,反之,则识别目标难度越大。

为定量描述图像的质量,选取了光谱波段分别为 443 nm、555 nm、665 nm 和 865 nm 的网眼布偏振图像,并依次计算了相应 PDI 图像和 APDI 图像的图像熵(E)、灰度方差(GV)、平均梯度(AG)以及拉普拉斯清晰度(LC),以上客观评价指标的取值越大,表明图像质量越好,得到的结果如表 1 所示。

表 1 不同波段下不同偏振差分成像方法的计算结果
Tab.1 Calculated results using different polarization difference imaging methods at different wave band

Band/nm	Image	C	E	GV	AG	LC
443	PDI	8.2%	2.218	2 317.5	69.5	612.9
	APDI	13.7%	2.244	2 488.8	75.1	656.3
555	PDI	6.6%	2.227	2 565.4	71.3	606.4
	APDI	15.9%	2.345	2 929.2	76.1	646.9
665	PDI	6.9%	2.312	2 938.7	74.1	620.5
	APDI	14.8%	2.374	3 281.5	78.2	658.3
865	PDI	7.8%	2.092	2 688.1	81.7	696.1
	APDI	14.2%	2.116	3 011.4	83.6	735.2

可以看出:采用文中提出的自适应偏振差分成像方法得到的图像中,不仅目标与背景之间的对比度有了明显提高,而且图像质量也有显著改善。

为进一步验证文中算法的有效性,利用 2008 年 5 月份在烟台地区航拍的偏振图像进行了对比试验。图 3(a)和(b)分别是传统偏振差分成像以及文中提出的自适应差分成像的结果,图 3(c)和(d)分别是对应的图像采用罗伯茨边缘检测算子得到的结果。可以看出,采用自适应偏振差分成像得到的结果,其灰度层次更加分明,目标边缘更加清晰、突出,能够为后续的目标检测与识别提供更好的条件。利用图像熵作为评价指标,可以计算得到 PDI 图像的熵为 2.255,APDI 图像的熵为 2.274。

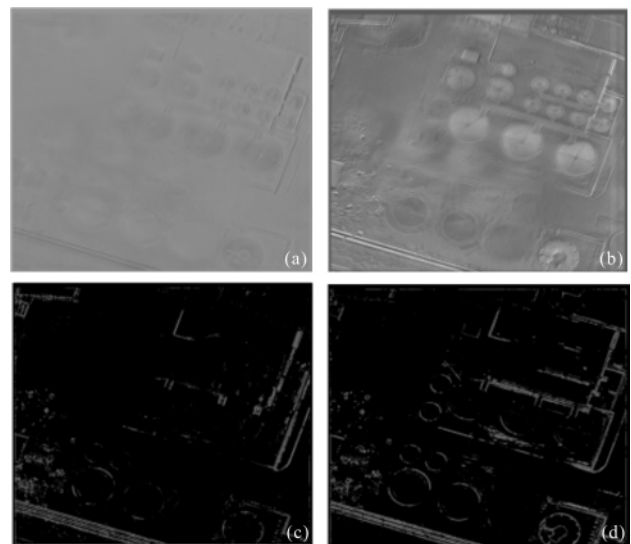


图 3 不同偏振差分成像的边缘检测结果

Fig.3 Edge detection results of different polarization difference imaging methods

4 结论

偏振信息解析是偏振成像探测中涉及的一个重要问题。文中针对 Tyo 等人提出的偏振差分成像方法存在的不足,从信息论的角度出发,提出了一种基于最小互信息的自适应偏振差分成像方法,通过对多组偏振图像数据进行对比实验,结果表明,利用文中方法得到的结果具有更好的抑制背景、突出目标细节信息的能力,且得到的图像质量更高,从而验证了该方法的可行性和有效性,为利用偏振图像进行目标检测与识别打下了良好的基础。后续工作将着重研究在文中处理结果基础上的自动目标检测方法。

参考文献:

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [2] Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. Theory analysis of polarization characteristic of the light scattered by the aerosol

[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 862-865. (in Chinese)

- [3] Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. Polarimetric imaging of camouflage screen in visible and infrared wave band[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 424-427. (in Chinese)
- [4] Chen Ligang, Hong Jin, Qiao Yanli, et al. New polarization parameter and its transitive relation [J]. *Opto -Electronic Engineering*, 2007, 34(9): 66-69. (in Chinese)
- [5] Tyo J S, Rowe M P, Pugh E N, et al. Target detection in optically scattering media by polarization -difference imaging [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(11): 1855-1870.
- [6] Yemelyanov K M, Lin S S, Pugh E N, et al. Adaptive algorithms for two -channel polarization sensing under various polarization statistics with nonuniform distributions[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5504-5520.
- [7] Demos S G, Alfano R R. Optical polarization imaging [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 150-155.
- [8] Tyo J S. Optimum linear combination strategy for an N -channel polarization -sensitive imaging or vision system [J]. *J Opt Soc Am A*, 1998, 35(3): 359-366.

(上接第 466 页)

构形变采取了过于简单的形变公式及理想化的边界条件所导致的。而有限元模拟采用数值方法更大程度模拟了实际情况,因此也更准确。所以,采用有限元分析的 x/w 结果并利用公式(22)、(23),可以更准确地计算出灵敏度与谐振频率。

3 结论

设计了一种高灵敏度细长矢量水听器结构。归纳出影响光纤激光矢量水听器灵敏度和谐振频率的关键因素,给出了一种在不降低谐振频率下提高灵敏度的设计方法。用 ANSYS 有限元分析来验证并给出了修正理论结果的方法,证明了文中提出的 V 型曲折梁结构具有较高灵敏度,适于细长型光纤激光矢量水听器的应用。

参考文献:

- [1] Leslie C B, Kendall J M, Jones J L. Hydrophone for measuring particle velocity [J]. *Journal of the Acoustical*

Society of America, 1956, 28: 711-715.

- [2] Xing Shiwen. The study of three -dimensional vector hydrophone and array technology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
- 邢世文. 三维矢量水听器及其成阵研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [3] Zhang W, Li X, Zhang F, et al. Underwater fiber laser geophone: theory and experiment [C]//2009 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2009: 1-2.
- [4] Zhang Yinghui, Liu Huihang, Wang Decheng. Spring Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 377-378, 380-381. (in Chinese)
- 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 377-378, 380-381.
- [5] Zhang Hailan. Theoretical Acoustics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 9-10. (in Chinese)
- 张海澜. 理论声学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 9-10.
- [6] Tian K, Liu Y, Wang Q. A practical package technique for FBG-based temperature independent sensor [C]//7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology, 2004, 3: 1908-1910.