

文章编号: 1002-2082(2008)04-0580-05

一种改进激光偏振主动成像的建模及理论分析

张绪国, 江月松, 路小梅, 黎芳

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出一种改进激光偏振主动成像的实验方法, 给出实验装置原理图, 详细分析实验装置的成像原理。在分析目标 Mueller 矩阵测量方法的基础上, 给出改进后激光偏振成像装置偏振度和强度的计算公式, 从理论上证明了该方法的可行性。然后针对实验仪器的要求分析了实验装置存在的误差, 以及 Cassegrain 望远镜对目标散射光的消偏现象。该方法与利用双旋转波片技术 (DRRT) 测量目标散射光的偏振度和强度相比可以降低对实验装置的精度要求, 同时可以提高测量速度, 不需要进行 16 次测量, 只需 1 次就可以测量出目标散射光的偏振度和强度, 进而得到偏振度和强度图像。

关键词: 激光偏振成像; 主动成像; 双旋转波片技术 (DRRT); 偏振度; Mueller 矩阵

中图分类号: TN958.58

文献标志码: A

Modeling and theoretical analysis for improving laser polarized active imaging

ZHANG Xu-guo, JIANG Yue-song, LU Xiao-mei, LI Fang

(School of Electronic Information Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An experimental method to improve the laser polarized active imaging is proposed. The schematic diagram of the experimental setup is presented, and the imaging principle of the setup is analyzed. The formulas to calculate the polarization degree and intensity for the improved experimental setup were derived based on the measurement method of Mueller matrix for the target analysis. The errors of the setup and the depolarization phenomenon of the Cassegrain telescope were analyzed. In comparison with the dual-rotating retarder technique (DRRT) for the polarization degree and intensity measurement, the accurate requirements for the experiment setup is released, and the measurement speed is increased. The polarization degree and intensity of the scattered light from the target can be obtained in only one measurement by the new method, rather than 16 times of measurement by DRRT.

Key words: laser polarized imaging; active imaging; DRRT; polarization degree; Mueller matrix

引言

和被动遥感成像相比, 激光遥感主动成像有其自身的优点, 它通过发射装置发射特定波长的激光

照明目标, 然后利用接收到的回波信息来判断目标, 也可以利用目标反射或散射光的强度、相干、消偏振等特性来分析目标本身的特性, 消除了被动雷

收稿日期: 2007-05-30; 修回日期: 2007-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40571097); 航天创新基金资助项目 (05F51073)

作者简介: 张绪国 (1982—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事激光雷达遥感偏振成像的理论及实验研究。

E-mail: zhang_xuguo@ee.buaa.edu.cn

达遥感成像靠目标自身辐射或反射其他光来成像的缺点。工作在红外波段的激光遥感已经用于矿物探测、土壤分析等,它主要是利用物体反射或散射的光的强度信息^[1]。但是,多数目标和自然背景具有相同的反射率,有时候很难分辨目标和背景,以及目标的真伪。传统的遥感成像主要是利用光波或电磁波的强度、相位或频率信息,很少涉及光波的偏振或者电磁波的极化信息。雷达发射的光波或电磁波,照射到目标表面被反射或散射后被接收系统接收,但是接收到的散射波性质和入射波不同,这是由于入射波受到目标的调制效应所致,这种调制效应由目标本身的物理结构特性以及测量装置的特性决定,不同目标对相同入射波具有不同的调制特性。根据不同目标具有不同的消偏振度,可以利用光波或电磁波的不同消偏振特性更好地区分目标和背景,并且可以发现经过伪装的目标^[2-5]。偏振成像这一特点在医学上也得到了相应的应用^[6]。

根据双旋转波片技术(DRRT)和2次测量技术,提出了一种只需1次测量就可获得2幅不同偏振方向强度图像的方法,进而求出强度和偏振度。最后利用强度和偏振度对图像进行编码,从而获得目标的强度和偏振度图像。

1 理论分析

1852年 Sir George Gabriel Stokes 发现偏振光的状态可以通过4个可以测量的参数完全表示^[3-4],第1个参数表示光的总强度,其余3个参数表示光的偏振状态,称为Stokes 矢量。Stokes 矢量 S 可以表示为

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

式中: S_0 表示总光强; S_1 表示水平或垂直线偏振量; S_2 表示 45° 或 -45° 线偏振量; S_3 表示左旋或右旋圆偏振量。

很多矩阵可以用来描述目标的偏振特性,如 Jones 矩阵、相干矩阵、Mueller 矩阵等。但是, Mueller 矩阵表示目标偏振特性有其自身的特点,它不但可以表示目标的偏振特性,而且还可以表示目标的消偏振特性。照射到目标上的光 S_{in} 的偏振状态和经目标散射或反射的光的偏振状态之间可以通过 Mueller 矩阵表示成

$$S_{out} = M \cdot S_{in} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot S_{in} \quad (1)$$

Mueller 矩阵是一个 4×4 的矩阵, Mueller 矩阵的各个元素 m_{ij} 一起可以完全表示目标的消偏振特性、偏振不规则特性、衰减特性以及延迟特性。 Mueller 矩阵不仅跟目标的参数(表面粗糙度、目标材料等)有关,而且还跟入射光的波长、入射光的方向以及测量装置的特性有关。偏振度和强度用 Mueller 矩阵的各个元素表示为

$$P_d = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 m_{ij}^2 - m_{00}^2}{3m_{00}^2}} \quad (2)$$

因此只要求得物体的 Mueller 矩阵,根据(2)式就可以求出偏振度和强度,从而获得偏振度和强度编码的图像。

2 实验装置及理论分析

典型的激光偏振成像系统主要由4部分组成,即发射光学系统、偏振状态产生系统、接收系统、偏振状态分析系统以及成像信号处理部分,如图1所示。发射光学系统主要是对激光进行处理,使其变为特定偏振状态的光信号然后发射出去,其主要部分是偏振状态产生器(PSG);接收光学系统由望远镜和偏振状态分析装置组成(PSA),通过对散射光偏振状态的分析,得到目标的 Mueller 矩阵。

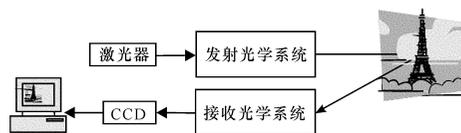


图1 激光雷达组成示意图

Fig. 1 Composition of laser radar

2.1 双旋转波片技术(DRRT)

Mueller 矩阵的测量主要采用由 R. M. A. Azzam 提出的 DRRT (dual-rotating retarders technique) 方法^[4,7-8],发射光学系统和接收光学系统分别有4种可调状态,即偏振状态产生装置(PSG)和偏振状态分析装置(PSA)中的波片可以旋转,从而有4种不同的 Mueller 矩阵,如图2所示。

通过 PSA 和 PSG 4 种状态的相互组合可以获得16种状态,因此可以得到16幅强度图像。每次波

片旋转所得到的强度可以表示为

$$I_{ij} = S(i, j)_{out_0} = W_{jPSA} \cdot M_{target} \cdot V_{iPSG} \quad (3)$$

$$i, j = 0, 1, 2, 3$$

式中: W_{jPSA} 是偏振状态分析装置位于第 j 种状态时 Mueller 矩阵的第 1 行; M_{target} 是目标的 Mueller 矩阵; V_{iPSG} 是偏振状态产生装置在第 i 个位置的 Mueller 矩阵与激光器出射光束 Stokes 矢量 $S_{emitted}$ 的乘积。当 PSG 和 PSA 位置发生变化(即 $i, j = 0 \sim 3$)时,可以得到矩阵 W 和 V 。其中,

$$W = \begin{bmatrix} W_0 \\ W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix}, V = [V_0 \ V_1 \ V_2 \ V_3]$$

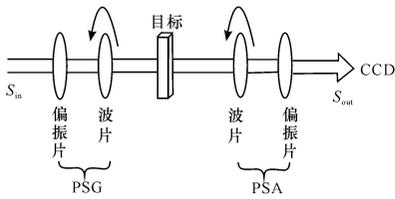


图2 DRRT 技术测量目标 Mueller 矩阵示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of DRRT for measuring Mueller matrix of target

因此可得:

$$I = W \cdot M \cdot V \quad (4)$$

如果 W 和 V 的行列式都不为 0,则可以得到物体的 Mueller 矩阵 M ,即

$$M = W^{-1} \cdot I \cdot V^{-1} \quad (5)$$

根据(2)式可以计算出偏振度 P_d 和强度 I ,从而可以得到强度和偏振度编码的图像。

DRRT 技术不但可以利用透射光,而且可以利用后向散射光测量物体的 Mueller 矩阵。S. Breugnot 等人根据 DRRT 测得的物体的 Mueller 矩阵有一个共同的特点, Mueller 矩阵对角线以外的元素都接近于 0。据此, S. Breugnot 改进了试验装置^[4],通过 2 次测量就可以得到经过偏振度和强度编码的图像,而且误差较小。在这种方法的启发下,提出了一种改进的试验装置,通过 1 次测量便可以获取偏振度和强度编码的图像。

2.2 改进后的试验装置

根据 Mueller 矩阵对角线以外的元素接近 0 的性质, S. Breugnot 等人在 DRRT 技术的基础上改进了试验装置,该试验装置取消了对波片的旋转,降低了试验装置的精度,并且只需要测量 2 幅图像,从而提高了测量速度。该实验装置需要选择特定的波片,并且波片和偏振片需要选定适合的

角度。

在 S. Breugnot 等人改进的试验装置的基础上,为了使试验装置紧凑,利用 Cassegrain 望远镜代替 Newton 望远镜,同时把偏振旋转器和偏振片替换为偏振分束器(PBS),改进后的实验装置原理如图 3 所示。

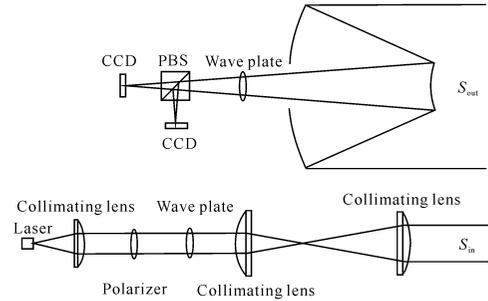


图3 改进后的试验装置原理图

Fig. 3 Principle diagram of improved experimental setup

2.3 理论分析

目标的 Mueller 矩阵可以表示为

$$M = \begin{bmatrix} M_{00} & & & \\ & M_{11} & & \\ & & M_{22} & \\ & & & M_{33} \end{bmatrix}$$

式中: M_{00} 表示总的后向散射光强; M_{11} 和 M_{22} 相近,表示线消偏振; M_{33} 表示圆消偏振。偏振度的简化形式^[4]为

$$P_d = \frac{M_{11} + M_{22} + M_{33}}{3M_{00}} \quad (6)$$

为了获取(6)式偏振度的表述形式,偏振片透光轴与轴的夹角为 -72.385° ,波片采用 $1/8$ 波片,其快轴与 x 轴的夹角为 45° ,则 PSG(发射部分偏振片和波片的组合)的 Mueller 矩阵^[3-4,9]可以表示为

$$M_{PSG} = M_C \cdot M_p = \begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{2}/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} & 0 \\ 1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/\sqrt{3} & -1/\sqrt{6} & 0 \\ 1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 0 \\ 1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/\sqrt{3} & -1/\sqrt{6} & 0 \end{bmatrix}$$

此时光通过 PSG 后得到的归一化入射光 Stokes 矢量可以表示为

$$S_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

散射光的 Stokes 矢量 S_{out} 可以表示为

$$S_{out} = M \cdot S_{in} = \begin{pmatrix} M_{00} \\ -M_{11}/\sqrt{3} \\ -M_{22}/\sqrt{3} \\ -M_{33}/\sqrt{3} \end{pmatrix}$$

对于 PSA (接收部分波片和偏振片的组合), 波片和偏振分束器 (PBS) 也要选择适当的角度, 使得两种不同偏振状态的强度通过简单的运算就可获得偏振度。此时选择 $1/8$ 波片的慢轴与 x 轴的夹角为 45° , PBS 的透光方向与 x 夹角为 -72.385° 。PSA 两种状态的 Mueller 矩阵可以表示为^[4]

$$M_{PSA1} = \begin{pmatrix} 1 & -1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ -\sqrt{2}/\sqrt{3} & \sqrt{2}/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{3} & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{PSA2} = \begin{pmatrix} 1 & 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ \sqrt{2}/\sqrt{3} & \sqrt{2}/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & \sqrt{2}/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

最后由 CCD 接收到的光的 Stokes 矢量可以表示为

$$S_{CCD} = M_{PSA} \cdot S_{out}$$

其中 Stokes 矢量的第一项即是总的光强, 经过 PBS 分束后的 2 束光的强度分别为

$$I_1 = M_{00} + \frac{1}{3}(M_{11} + M_{22} + M_{33})$$

$$I_2 = M_{00} - \frac{1}{3}(M_{11} + M_{22} + M_{33}) \quad (8)$$

由偏振度 (6) 式可以求出:

$$P_d = \frac{M_{11} + M_{22} + M_{33}}{3M_{00}} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (9)$$

总光强为

$$I = I_1 + I_2 \quad (10)$$

通过对偏振度编码可以得到分辨率更高的图像, 通过光强相加就可得到目标的强度图像。

2.4 误差来源

系统误差主要包括:

1) 激光稳定性影响

由于激光器波长的不稳定性, 经过 PSA 之后光的 Stokes 矢量并不完全和 (7) 式一样, 这样经过 PSA 后得到的光就不能通过简单的加减运算求出正确的偏振度。

2) 接收系统消偏振影响

光源发出的光经过 PSA 变为完全偏振光, 经目标散射后被 Cassegrain 望远镜接收, 由激光器发出的光经过透镜以及发射镜时其偏振状态不发生变化^[9]。系统中对光偏振影响的主要因素是望远镜, 根据其所镀膜不同, 对接收的光偏振有一定的影响。

3) 机械装置精度影响

由于实验对波片和偏振片的位置精度要求较高, 如果偏振片和波片的方向角存在误差, 那么经过 PSG 后光的 Stokes 矢量也不能严格遵守 (7) 式, 所以计算出的偏振度有一定的误差。

2.5 望远镜消偏分析

由于整个系统中只有望远镜对散射光的消偏有影响, 因此, 为了使望远镜对散射光的偏振态影响最小, 应该对望远镜镀适当的金属膜, 使其偏振尽量小^[10]。对于由空气进入金属膜的反射, 其反射率和入射角度有关, 根据偏振度和反射率之间的关系, 可以算出偏振度和入射光与望远镜夹角之间的关系, 如图 4 所示。

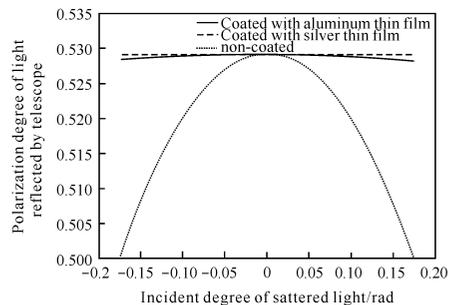


图 4 镀膜前后望远镜消偏曲线对比

Fig. 4 Comparison of telescope depolarization curves before and after coating

由图 4 可以看出, 镀银金属膜对入射光偏振度的改变最小。实际应用中需考虑金属膜的价格及镀膜技术等因素, 在望远镜的主镜、次镜上均镀铝膜就可以满足要求。

3 结论

本文对一种改进的激光偏振成像的实验装置进行建模和分析, 从理论上说明该实验装置的可行性, 和 DRRT 及 S. Breugnot 等人改进的试验装置相比, 该系统减少了机械装置的复杂程度, 不需要对波片进行旋转, 只需要通过 1 次测量就可以求出目标

对光的消偏程度。最后对所得到的图像进行偏振度编码,可获得目标和背景的对比度更高的图像。

参考文献:

- [1] STOLL M Ph, ZALLAT J. Laser polarimetry at 10.6 μm and modeling of scattering by soils and particular media[J]. SPIE, 1997,3059:163-173.
- [2] 庄钊文,肖顺平,王雪松. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
ZHUANG Zhao-wen, XIAO Shun-ping, WANG Xue-song. Radar polarization information processing and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1999. (in Chinese)
- [3] COLLETT E. Polarized light, fundamentals and applications [M]. New York: Marcel and Dekker, 1993.
- [4] BREUGNOT S, CLEMENCEAU P. Modeling and performances of a polarization active imager at $\lambda=806\text{ nm}$ [J]. Opt. Eng., 2000,39(10):2681-2688.
- [5] CLEMENCEAU P, BREUGNOT S, COLLOT L. Polarization diversity active imaging [J]. SPIE, 1998,3380:284-291.
- [6] 陈蕾,章恩耀,孙利群,等. 正交偏振光谱微循环成像方法及装置[J]. 应用光学,2007,28(2):169-172.
CHEN Lei, ZHANG En-yao, SUN Li-qun, et al. Method and apparatus of orthogonal polarization spectral microcirculation imaging [J]. Journal of Applied Optics, 2007,28(2):169-172. (in Chinese)
- [7] CHIPMAN R A. Polarization diversity active imaging[J]. SPIE, 1997,3107:68-73.
- [8] AZZAM R M A. Mueller-matrix ellipsometry: a review[J]. SPIE, 1997,3121:400-409.
- [9] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003.
LIAO Yan-biao. Polarized light [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [10] CHIPMAN R A. Polarization analysis of optical systems[J]. Opt. Eng., 1989,28(2): 90-99.