

文章编号: 0253-2239(2007)10-1771-4

激光雷达偏振成像遥感的望远镜系统偏振分析*

路小梅 江月松 饶文辉

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100086)

摘要: 激光雷达偏振成像主要是利用不同目标散射光偏振度的差异来实现对目标成像的。由于大部分光学系统都存在消偏振效应,因此系统自身的消偏振问题在成像过程中必须考虑。根据近轴理论和消像差的要求设计出卡塞格伦望远镜的几何结构,应用琼斯理论、光波的相干矩阵和菲涅耳反射理论对空气和卡塞格伦望远镜的交界面进行了消偏振分析,并使用 Matlab 软件仿真了卡塞格伦望远镜在镀金属反射膜前后,反射光偏振度在望远镜径向直径上各点的变化曲线。根据仿真结果可以看出偏振成像系统中使用的卡塞格伦望远镜在镀铝金属反射膜时其消偏振效应在成像过程中可以忽略。

关键词: 成像系统; 激光雷达; 消偏振; 琼斯理论; 相干矩阵

中图分类号: TP7 文献标识码: A

Polarization Analysis of The Cassegrain Telescope Used for the Lidar Polarization Active Imaging System

Lu Xiaomei Jiang Yuesong Rao Wenhui

(School of Electronic Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100086)

Abstract: The lidar polarization system realizes imaging for targets by the polarization differences of light scattered by the different targets. Because there exist the depolarization effects in a majority of systems, the depolarization problem of system itself must be considered in the process of imaging. According to the adaxial theory and requirement of optical aberration, the geometrical structure of Cassegrain telescope is designed. Then the depolarization behavior of the interface between air and reflecting mirrors of Cassegrain telescope is analyzed by using Jones formalism, coherent matrices of optical waves and law of Fresnel reflection. And the polarization degree of light is emulated, which is reflected from every point of reflecting mirror coated with and without thin film, relative to the diameter of Cassegrain telescope through the help of Matlab software. Based on the simulation, it is deduced that the polarization degree of light reflected from the telescope overcoated with aluminium film in the imaging system can be ignored in the imaging process.

Key words: imaging system; lidar; depolarization; Jones formalism; coherent matrix

1 引 言

激光雷达偏振成像技术在主动成像的基础上,充分利用激光的偏振信息,获取更多更精确的目标特征信息,获取的偏振图像可以有效地区分金属与非金属、人造目标和自然目标等^[1],因而近年来激光雷达偏振成像遥感技术引起了人们极大的关注。在激光雷达偏振成像遥感系统中,偏振光的接收系统是关键技术之一。卡塞格伦(Cassegrain)望远镜能

同时消除球差和彗差,且具有结构紧凑等特点,因此本文主要分析以卡塞格伦望远镜为主体的偏振光接收系统的偏振效应。

当入射光斜入射到光学器件的分界面时,反射光的偏振度与入射光的偏振度会有所不同^[2]。因此为了消除望远镜系统在成像过程中的偏振效应,首先根据消像差的要求设计出卡塞格伦望远镜的几何结构,并使用 Zemax 光学设计软件对望远镜进行像

* 国家自然科学基金(40571097)和航空基础科学基金(05F51073)资助课题。

作者简介: 路小梅(1981-),女,山东招远人,博士研究生,主要从事激光雷达偏振成像方面的研究。

E-mail: xiaomeilu-2008@sohu.com

作者导师: 江月松(1959-),男,江苏淮阴人,教授,博士生导师,主要从事成像信息科学与技术、激光空间信息技术、红外光电信息获取与处理技术等方面的研究。E-mail: yuesongjiang@vip.sina.com

收稿日期: 2007-01-30; 收到修改稿日期: 2007-04-09

差矫正,以优化卡塞格伦望远镜的结构。然后根据界面反射光偏振度的分析,可知卡塞格伦望远镜的主镜、次镜的表面需镀合适的金属反射膜,才能达到忽略望远镜偏振效应的目的。并用 Matlab 软件对该望远镜系统的偏振效应进行了仿真。

2 理论分析

激光雷达偏振成像遥感系统如图 1 所示。它是基于双重旋转延迟器技术(Dual-rotating-retarder technique, DRRT)的结构。功率 10 W 的 Thomson 半导体激光器发射波长 $\lambda=806\text{ nm}$ 的光,由偏振状态产生器(PSG)产生所需的完全偏振光,经准直透镜后完全偏振光照射到目标。卡塞格伦望远镜(焦距 946 mm,主镜直径 144 mm)接收目标的散射光,接收的散射光经偏振状态分析器(PSA)后聚焦在 CCD 焦平面上。偏振状态产生器和偏振状态分析器均由偏振片(偏振状态产生器中偏振片的透光轴

是垂直的,偏振状态分析器中偏振片的透光轴是水平的)和由步进电机控制的延迟器组成。

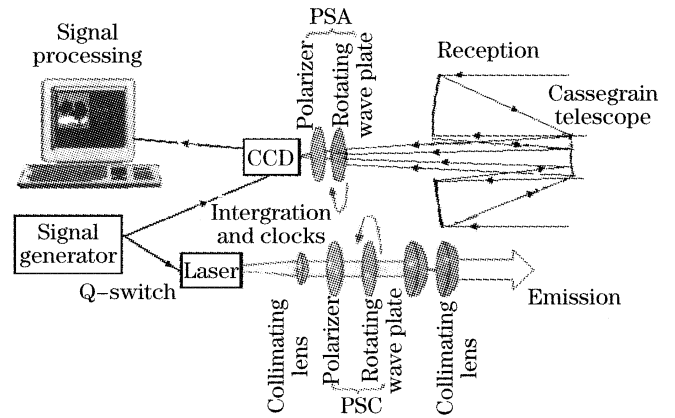


图 1 激光雷达偏振成像遥感系统

Fig. 1 Lidar polarization imaging remote sensing system

假设入射光是偏振度为 p (偏振度定义为^[3]:光波中完全偏振分量的强度和光波总强度之比)的部分偏振光,其全偏振分量是方位角为 θ 椭圆角为 ϵ 的椭圆偏光,则入射光的笛卡儿相干矩阵为^[4]

$$J_i = \frac{I}{2} \begin{bmatrix} 1 + p \cos 2\theta \cos 2\epsilon & p(\sin 2\theta \cos 2\epsilon - j \sin 2\epsilon) \\ p(\sin 2\theta \cos 2\epsilon + j \sin 2\epsilon) & 1 - p \cos 2\theta \cos 2\epsilon \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 I 是入射光波的总强度。设笛卡儿坐标系与本征坐标系的夹角为 φ ,则本征相干矩阵为

$$J_i^{sp} = \mathbf{R}(\varphi) J_i \mathbf{R}^+(\varphi) = \frac{I}{2} \begin{bmatrix} 1 + p \cos 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon & p[\sin 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon - j \sin 2\epsilon] \\ p[\sin 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon + j \sin 2\epsilon] & 1 - p \cos 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{R}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$ 为笛卡儿坐标系到本征坐标系的旋转矩阵, $\mathbf{R}^+(\varphi)$ 为 $\mathbf{R}(\varphi)$ 的共轭转置矩阵。

设界面反射的琼斯矩阵为: $\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_p & 0 \\ 0 & \gamma_s \end{bmatrix}$,其中 γ_p, γ_s 分别为反射界面 p 分量和 s 分量的振幅反射系数。

取反射界面是空气与折射率为 n 的介质交界面,入射角为 i ,则 γ_p, γ_s 为

$$\gamma_p = \frac{n^2 \cos i - (n^2 - \sin^2 i)^{1/2}}{n^2 \cos i + (n^2 - \sin^2 i)^{1/2}}, \quad \gamma_s = \frac{\cos i - (n^2 - \sin^2 i)^{1/2}}{\cos i + (n^2 - \sin^2 i)^{1/2}}, \quad (3)$$

界面反射光的本征相干矩阵为^[4]

$$J_o = \boldsymbol{\gamma} J_i^{sp} \boldsymbol{\gamma}^+ = \frac{I}{2} \begin{bmatrix} |\gamma_p|^2 [1 + p \cos 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon] & \gamma_s^+ \gamma_p p [\sin 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon - j \sin 2\epsilon] \\ \gamma_s \gamma_p^+ p [\sin 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon + j \sin 2\epsilon] & |\gamma_p|^2 [1 - p \cos 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

γ_p^+, γ_s^+ 分别为 γ_p, γ_s 的共轭转置。则反射光偏振度为

$$p = \left[1 - \frac{4 \det J_o}{(\text{Tr} J_o)^2} \right]^{1/2} = \left\{ 1 - \frac{4c^2(1-p^2)}{[(1+c^2) + (1-c^2)p \cos 2(\theta - \varphi) \cos 2\epsilon]^2} \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

其中 $c = |\gamma_s| / |\gamma_p|$ 。

激光器发出的单色光经偏振状态产生器后成为完全偏振光。由(5)式可以看出完全偏振光($p=1$)经过介质交界面反射后,反射光的偏振度保持不变,与入射方向无关。完全偏振光照射到目标之后,由于目标的消偏振作用,散射光为部分偏振光,由望远镜接收,再经过偏振状态分析器到达 CCD 成像。

图 1 所示系统主要是依据目标的消偏振不同,由目标的偏振度编码成像的。因此要求系统自身的消偏现象越小越好。由米勒(Mueller)矩阵的极分解可知^[5],偏振状态分析器、偏振状态产生器不存在消偏现象,因此在激光雷达偏振成像遥感系统中只考虑望远镜的消偏现象。

3 望远镜系统

在激光雷达偏振成像遥感系统中,偏振光的接收系统是卡塞格伦望远镜。卡塞格伦双反射镜系统的初步设计,主要是根据光电系统所要求的焦距 f' ,次镜的横向放大率 β 和主镜后截距 b 来确定主镜与次镜的顶点曲率半径 r_{01} 、 r_{02} ,偏心率 e_1 、 e_2 以及它们之间的距离 d 。设计的方法一般分为两个步骤,首先是根据近轴理论计算 r_{01} 、 r_{02} 和 d ^[6]:

$$\begin{aligned} r_{01} &= -\frac{2f'}{\beta}, & r_{02} &= -\frac{2(\beta b + f')}{\beta^2 - 1}, \\ d &= -\frac{f' - b}{1 + \beta}, \end{aligned} \quad (6)$$

然后再根据消像差要求找出 e_1^2 、 e_2^2 ,以确定主镜和次镜的面型^[7]。

3.1 卡塞格伦望远镜的几何结构

卡塞格伦双反射镜系统光路如图 2(偏振光的接收部分)所示,其主镜 M_1 、次镜 M_2 的偏心率平方分别为 $e_1^2=1$ 、 $e_2^2=1.4871^2$ 。望远镜系统焦距 $f'=946 \text{ nm}$,次镜的横向放大率 $\beta=5.1$,后截距 $b=144.76 \text{ mm}$ 。根据上面公式求出系统初始结构参量,

并使用 Zemax 软件进行优化,以消除像差。

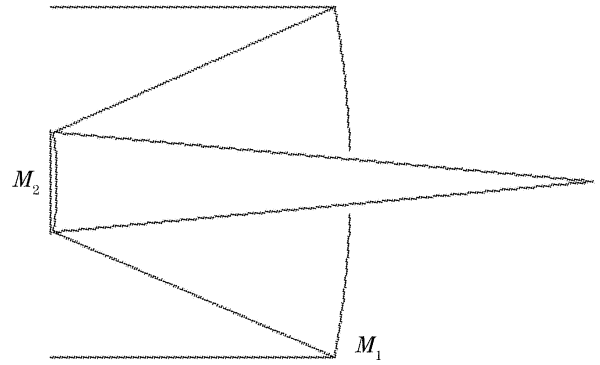


图 2 卡塞格伦望远镜几何结构

Fig. 2 Geometrical structure of Cassegrain telescope

使用 Zemax 的优化评价函数 DISC 进行优化设计后,消除了望远镜几何结构上的系统像差,满足了望远镜系统成像的结构性质。

3.2 卡塞格伦望远镜的偏振效应

若反射面是空气与金属的交界面,则只要以复折射率 $\tilde{n}=n(1+ik)$ 代替(3)式 γ_p, γ_s 中的实折射率 n 即可^[8]。若此时的 γ'_p, γ'_s 分别是主镜、次镜 p 分量和 s 分量振幅反射系数的乘积。则由理论分析可得反射光波的偏振度为

$$p' = \left[1 - \frac{4\det\mathbf{J}_o}{(\text{Tr}\mathbf{J}_o)^2} \right]^{1/2} = \left\{ 1 - \frac{4c'^2(1-p^2)}{[(1+c'^2) + (1-c'^2)p\cos 2(\theta-\varphi)\cos 2\epsilon]^2} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

其中 $c' = |\gamma'_s|/|\gamma'_p|$ 。

由(7)式可以看出完全偏振光($p=1$)由空气和金属的交界面反射后,反射光的偏振度保持不变,与光波的入射方向和材料的折射率 n 无关。当入射光为部分偏振光($0 < p < 1$)时,反射光的偏振度随着入射方向、折射率 n 的不同而不同。消偏振系数与入射角的关系参阅文献^[9]。

实际使用的卡塞格伦望远镜表面镀有高反射金属膜^[10],以增加光的反射。反射镜材料是光学玻璃,其折射率 $n=1.48$ 。根据卡塞格伦望远镜几何结构设计的参量用 Matlab 软件进行仿真,结果如图 3 所示,其入射光为平行于望远镜主轴的偏振度为 0.6 的部分偏振光。

在激光雷达偏振主动成像遥感系统中,主要是通过目标对入射完全偏振光的消偏振现象来侦察目标,并区分目标与周围背景的,因而偏振成像系统对入射光偏振度的影响越小越好。由仿真结果可以看出未镀膜的系统其自身对入射光的偏振度改变较大,会严重影响根据偏振度编码成像的激光雷达偏

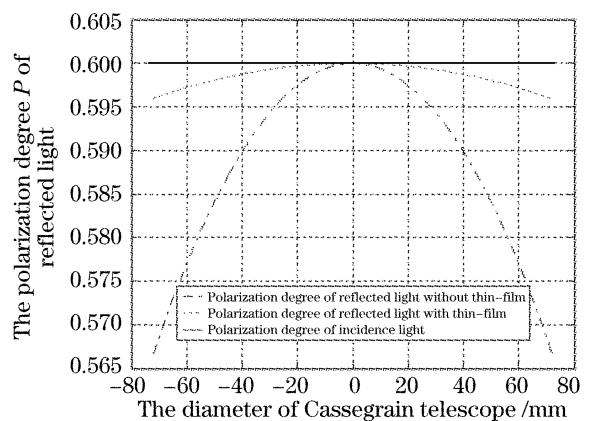


图 3 反射光偏振度随望远镜直径的变化曲线

Fig. 3 Polarization degree curve of reflected light versus the diameter of the telescope

振成像遥感系统的成像质量;镀膜之后的望远镜对入射光偏振度的改变则较小。望远镜膜系的选取将在下面进行进一步的讨论。

3.3 膜系设计

通过上面的讨论,可以看到应用恰当的金属反射膜,能够很好地消除卡塞格伦望远镜的偏振效应。激光雷达偏振成像遥感系统是利用遥感目标对入射

光波偏振度的改变来区分目标与周围背景的,所以需采用不改变入射光波偏振度的金属反射膜。根据理论消偏振分析可知当 $c'=1$ 时,由(7)式可得 $p'=p$,即反射光和入射光的偏振度相同,系统不改变入射光波的偏振度^[11]。一般情况下, $|\gamma'_p| \neq |\gamma'_s|$, $c' \neq 1$,因此反射光波的偏振度相对于入射光波的偏振度将会发生变化。为选取合适的金属反射膜, Matlab 软件对镀有不同金属反射膜的卡塞格伦望远镜进行仿真。图 4 是镀不同的金属反射膜时反射光偏振度随望远镜直径的变化曲线。

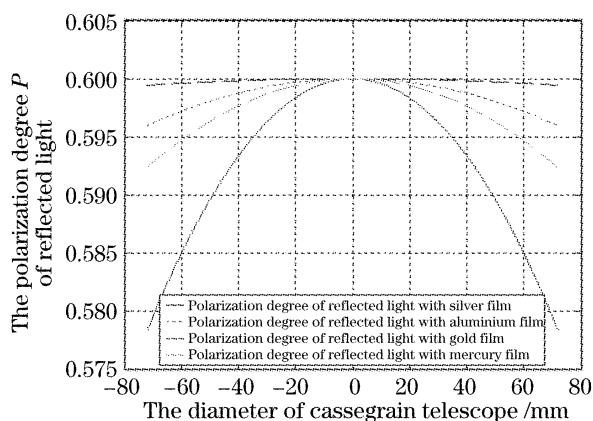


图 4 反射光偏振度随着镀不同金属膜望远镜直径的变化曲线

Fig. 4 Polarization degree curve of light reflected from the telescope overcoated with different thin film

人造目标如钢铁,抛光铝块的消偏振系数大约为 90%^[12];树木,石头等自然物体其消偏振系数大约为 35%^[1]。所以自然界的物体如树木、泥土和表面粗糙的其它物体对偏振光的消偏作用往往比人造光滑物体更大,因此偏振成像提供了识别杂乱自然背景中人造目标的手段。由 Matlab 仿真结果可以看出,镀银金属膜对入射光偏振度的改变最小,偏振度改变量小于 0.1%。实际应用中需考虑金属膜的价格及镀膜技术等因素,在激光雷达偏振主动成像遥感系统中卡塞格伦望远镜的主镜、次镜均镀铝膜。由图 4 可以看出,镀有铝膜的卡塞格伦望远镜其对入射光偏振度的改变量小于 0.5%,而人造目标消偏振系数与自然背景消偏振系数之差为 55%左右。因此在激光雷达偏振主动成像遥感系统中,镀铝膜的卡塞格伦望远镜的消偏振效应在根据偏振度编码成像的过程中可以忽略,即其对接收光偏振度的改变不影响系统区分人造目标和自然背景的能力。

4 结 论

本文通过对空气与折射率为 n 的介质交界面的

偏振分析,可以得知在激光雷达偏振成像遥感系统中接收目标散射光的望远镜系统能够消偏振,从而会影响整个系统的成像质量。因此首先根据消像差的要求,设计出了卡塞格伦望远镜系统的几何结构。然后通过理论上的消偏振分析,由 Matlab 软件对具有固定结构而镀有不同金属反射膜的卡塞格伦望远镜反射光进行仿真。仿真结果表明,当望远镜镀铝金属膜时,可忽略该望远镜接收系统对入射光偏振度的影响。实验结果证明,不论从消像差的几何结构还是从消偏振的要求来看,我们使用的卡塞格伦望远镜适用于激光雷达偏振主动成像遥感系统。

参 考 文 献

- 1 Sebastien Breugnot, Philippe Clemenceau. Modeling and performances of a polarization active imager at $\lambda=806$ nm[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(10): 2681~2688
- 2 Russell A. Chipman. Polarization analysis of optical systems[J]. *Opt. Engng.*, 1989, **28**(2): 90~99
- 3 Li Jingzhen. *Handbook of Optics* [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1991. 356~357 (in Chinese)
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991. 356~357
- 4 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. Liang Minji, Ying Shubai, Zhang Fuchu *et al.* transl., Beijing: Science Press, 1986. 40~94
R. M. A. 阿查姆, N. M. 巴夏拉. 椭圆偏振测量术和偏振光[M]. 梁民基, 尹树百, 张福初等译. 北京: 科学出版社, 1986. 40~94
- 5 S.-Y. Lu, R. A. Chipman. Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(5): 1106~1113
- 6 Gao Zhiyun, Gao Yue, Zhang Kaihua. *Military Photoelectricity System* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 13~18 (in Chinese)
高稚允, 高岳, 张开华. 军用光电系统[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 13~18
- 7 Pan Junhua. *The Design, Process and Check of Nonspherical Surface in Optics* [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 14~22 (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 14~22
- 8 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Project Optics* [M]. Beijing: China Machine Industry Press, 2000. 198~201 (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 198~201
- 9 Philippe Elies, Bernard Le Jeune, Jean-Pierre Marie *et al.*. Surface rugosity and polarimetric analysis[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2782**: 719~729
- 10 Fan Yang, Zhiqiang Huang, Tingwen Xing. Polarization analysis for laser optical system[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6149**: 614913-1~614913-6
- 11 K. Rabinovitch, G. Toker. Polarization effects in optical thin films[C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2253**: 89~102
- 12 Li Quan, Liu Zejin, Shu Baihong. The technology of identifying targets using the polarization difference of scattered light from surface[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3): 351~354 (in Chinese)
黎全, 刘泽金, 舒柏宏. 利用表面散射光偏振差异的目标识别技术[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(3): 351~354