

光学系统探测器上的辐照度的偏振分析

宋 宁 韩心志

(哈尔滨工业大学航天电子与光电工程系 哈尔滨 150001)

摘 要 推导出了光学系统探测器上的辐照度误差与入射光以及光学系统的偏振特性之间关系的公式,分析了入射光以及光学系统的线偏振灵敏度对光学系统的探测器上的辐照度的影响,并计算了卡氏望远镜的探测器上的辐照度误差。

关键词 辐照度 偏振灵敏度 相干矩阵

1 引 言

在辐射度测量技术中,就其本质而论,是测量目标的光谱辐射度。以光辐射作为目标的信息载体,以它的固有特性(方向、强度、偏振等)来反映目标特征。目前,光辐射的偏振特性对光辐射测量的影响还未得到详尽的研究。但已有的研究表明,光学系统对具有不同偏振特性的入射辐射光待测量具有不同的响应。由于待测辐射源的偏振特性是非常复杂的,因而光学系统的偏振响应将使光辐射测量产生严重误差^[1]。

在航天光学遥感中,这种影响尤为严重,这是由于来自地面目标的散射光或反射光具有惊人的偏振灵敏度,特别是线偏振灵敏度^[2]。例如,在可见光波段,森林、植被等的散射光大约有20%以上的线偏振灵敏度;沼泽和水面的反射光有50%以上的线偏振灵敏度,特别是在入射角接近布儒斯特角时。当航天遥感器对地面目标进行辐射度测量时,光学系统的线偏振灵敏度将影响到航天遥感器的辐射度测量精度。如果不十分清楚系统的线偏振灵敏度,无法对系统进行补偿,获得精确的辐射度测量。

本文推导出光学系统探测器上的辐照度误差公式,分析了入射光以及光学系统的线偏振灵敏度对辐射度测量的影响,并对卡氏望远镜探测器上的辐照度误差进行了计算。

2 光学系统探测器上的辐照度误差公式

当光学系统对辐射源的小面元成像时,假定被入射光瞳收集并从出射光瞳传输到探测器

上的能量在探测器上是均匀分布的, 探测器表面上的辐照度为^[3]

$$E_{\text{det}} = \frac{\Phi_{\text{exit}}}{\delta} \quad (1)$$

其中 Φ_{exit} 为光学系统出瞳出射的总辐射功率 (W/m^2), δ 为探测器上像的有效面积 (m^2)。

出瞳的总辐射功率 Φ_{exit} , 定义为出瞳上的时间平均辐照度对出瞳面积的积分

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{exit}} &= \iint_{\text{出瞳}} E_{\text{exit}}(x, y) dx dy \\ &= \frac{\varepsilon c}{n} \iint_{\text{出瞳}} \text{Tr}[J_{\text{exit}}(x, y)] dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $E_{\text{exit}}(x, y)$ 为出瞳上 (x, y) 点的时间 - 平均辐照度, ε 为介质常数, c 为真空中的光速, n 为折射率, $J_{\text{exit}}(x, y)$ 为出瞳上 (x, y) 点出射波的相干矩阵。

于是

$$E_{\text{det}} = \frac{\varepsilon c}{n \delta} \iint_{\text{出瞳}} \text{Tr}[J_{\text{exit}}(x, y)] dx dy \quad (3)$$

其中 Tr 代表矩阵的秩。

出瞳上 (x, y) 点出射波的相干矩阵 $J_{\text{exit}}(x, y)$, 可以根据任意光线路径的光学系统的琼斯矩阵和来自辐射源的入射波的相干矩阵来计算^[4]:

$$J_{\text{exit}}(x, y) = T(x, y) J_i T^+(x, y) \quad (4)$$

其中 $T(x, y) = \begin{bmatrix} T_{11}(x, y) & T_{12}(x, y) \\ T_{21}(x, y) & T_{22}(x, y) \end{bmatrix}$ 为光线经过出瞳上 (x, y) 点光学系统的琼斯矩阵,

T^+ 为 T 的厄米伴随阵, J_i 为入射光波的相干矩阵。

假设入射光为部分线偏振光, 那么其相干矩阵为^[4]

$$J_i = \frac{1}{2} I_i \begin{bmatrix} 1 + P_i \cos(2\theta_i) & P_i \sin(2\theta_i) \\ P_i \sin(2\theta_i) & 1 - P_i \cos(2\theta_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 I_i 为入射光波的强度, P_i 为入射光波全偏振分量的偏振灵敏度, θ_i 为入射光波全偏振分量的方位角。

根据公式 (4) 和 (5) 得到

$$\text{Tr}[J_{\text{exit}}(x, y)] = \frac{1}{2} I_i [C(x, y) + A(x, y) P_i \cos(2\theta_i) + B(x, y) P_i \sin(2\theta_i)] \quad (6)$$

其中:

$$C(x, y) = T_{11}(x, y) T_{11}^*(x, y) + T_{21}(x, y) T_{21}^*(x, y) + T_{12}(x, y) T_{12}^*(x, y) + T_{22}(x, y) T_{22}^*(x, y)$$

$$A(x, y) = T_{11}(x, y) T_{11}^*(x, y) + T_{21}(x, y) T_{21}^*(x, y) + T_{12}(x, y) T_{12}^*(x, y) + T_{22}(x, y) T_{22}^*(x, y)$$

$$B(x, y) = T_{11}(x, y) T_{12}^*(x, y) + T_{12}(x, y) T_{11}^*(x, y) + T_{21}(x, y) T_{22}^*(x, y) + T_{22}(x, y) T_{21}^*(x, y)$$

将公式 (6) 代入公式 (3) 得

$$E_{\text{det}} = \frac{I_i \epsilon c}{2n\delta} \iint_{\text{出瞳}} [C(x, y) + A(x, y) P_i \cos(2\theta_i) + B(x, y) P_i \sin(2\theta_i)] dx dy \quad (7)$$

将上式进行合并并简化得到

$$E_{\text{det}} = \frac{I_i \epsilon c}{2n\delta} \iint_{\text{出瞳}} C(x, y) dx dy \left\{ 1 + \frac{P_i \cos(2\theta_i) \cdot \iint_{\text{出瞳}} A(x, y) dx dy + P_i \sin(2\theta_i) \cdot \iint_{\text{出瞳}} B(x, y) dx dy}{\iint_{\text{出瞳}} C(x, y) dx dy} \right\}$$

$$= \frac{I_i \epsilon c \tau}{n\delta} (1 + P_{\text{sys. avg}} P_i \cos(2\theta_i - \alpha)) \quad (8)$$

其中, $\tau = \frac{\iint_{\text{出瞳}} C(x, y) dx dy}{2}$ 定义为光学系统的透射系数,

$P_{\text{sys. avg}} = \frac{\sqrt{\left(\iint_{\text{出瞳}} A(x, y) dx dy \right)^2 + \left(\iint_{\text{出瞳}} B(x, y) dx dy \right)^2}}{\iint_{\text{出瞳}} C(x, y) dx dy}$ 为光学系统的平均线偏振灵敏度,

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\iint_{\text{出瞳}} B(x, y) dx dy}{\iint_{\text{出瞳}} A(x, y) dx dy} \right)。$$

那么, 由于偏振灵敏度造成的探测器上的辐照度误差为

$$\frac{\Delta E_{\text{det}}}{E_{\text{det}}} = P_{\text{sys. avg}} P_i \cos(2\theta_i - \alpha) \quad (9)$$

3 讨 论

由公式(8)和(9)可以看出, 探测器上的辐照度误差受到入射光的偏振灵敏度和方位角以及光学系统的平均线偏振灵敏度的影响。

(1) 当入射光为自然光时, 入射光的偏振灵敏度为 0 ($P_i = 0$), 探测器上的辐照度和光学系统的平均线偏振灵敏度无关, 无需考虑光学系统的平均线偏振灵敏度。

(2) 当入射光为部分线偏振光时, 探测器上的辐照度误差和光学系统的平均线偏振灵敏度成正比, 并受入射光的全偏振分量的方位角和偏振灵敏度的影响。

(3) 当入射光为线偏振光时, 入射光的偏振灵敏度为 1 ($P_i = 1$), 探测器上的辐照度误差受光学系统的平均线偏振灵敏度的影响较大。当光学系统的平均线偏振灵敏度为 1 时, 得到最大的辐照度误差。

(4) 当光学系统的平均线偏振灵敏度较小时 ($P_{\text{sys. avg}} \rightarrow 0$), 入射光的偏振度和方位角不对探测器表面辐照度误差产生影响。因此, 在光学系统的设计中, 应尽量减小光学系统的平均线偏振灵敏度。

4 计算举例

本文利用偏振光线追迹的方法^[5], 编制了计算机程序, 计算了航天遥感中常用的卡氏望远镜的平均线偏振灵敏度, 将其代入公式(9), 得到探测器上的辐照度误差和入射光的偏振灵敏度和方位角的关系曲线, 如图 1 所示。卡氏望远镜由二共轴球面镀银反射镜组成, 选择入射光的波长为 $0.4\mu\text{m}$ 。当卡氏望远镜前加入一 45° 镀银扫描反射镜对地面进行扫描时, 得到探测器上的辐照度误差和入射光的偏振灵敏度和方位角的关系曲线, 如图 2 所示。由图可以看出, 探测器上的辐照度误差和入射光全偏振分量的偏振灵敏度和方位角成比例关系。当入射光为自然光时, 辐照度误差和光学系统的平均线偏振灵敏度无关。当卡氏望远镜前加入扫描反射镜时, 由于光学系统的平均线偏振灵敏度增大, 引起辐照度误差增大。如果此时无法满足辐射度测量精度, 应对光学系统进行偏振补偿。

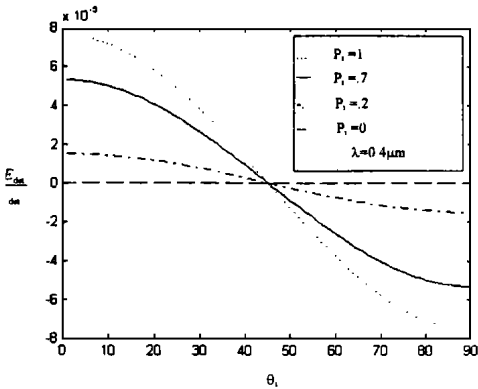


Fig. 1 The irradiation error of Cassegrain telescope

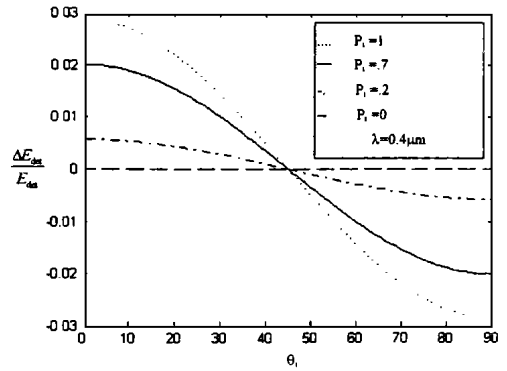


Fig. 2 The irradiation error of Cassegrain telescope with scan mirror

5 结 论

本文从理论上推导出探测器上的辐照度误差与光学系统的平均线偏振灵敏度以及入射光的偏振灵敏度和方位角之间关系的公式, 并计算了实际光学系统探测器上的辐照度误差。当航天遥感对地面目标进行辐射度测量时, 由于来自地面目标的散射光或反射光为部分线偏振光, 光学系统的平均线偏振灵敏度将影响到辐射度测量精度。因此, 在航天遥感器光学系统的设计过程中, 应对其平均线偏振灵敏度提出设计要求。

参 考 文 献

- 1 Chipman Russel A. Polarization consideration for optical systems. Proceeding SPIE, 1989, 28: 8586
- 2 Coulson K L. Polarization of light in the natural environment. Polarization Consideration for Optical System II, Chipman R A, 1989, 1166: 210
- 3 格鲁姆 F, 贝彻雷 R J. 辐射度学. 北京: 机械工业出版社, 1987

- 4 阿查姆 R M A 等著. 椭圆偏振光和偏振测量术. 梁民基译. 北京: 科学出版社, 1986
- 5 Chipman Russell A. The mechanics of polarization ray tracing. Proceeding SPIE, 1992, 1746: 6275

Polarization Analysis of Irradiation of Optical System on Detector

SONG Ning, HAN XirZhi

(*Department of Spaceflight Electronic and Optoelectronic Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

Abstract

This paper studies the irradiation error of optical system on detector related to the polarization sensitivity of optical system and incident light. The effect of polarization of irradiation error is analyzed. Example of Cassegrain telescope is presented, and it's irradiation error on detector is calculated and analyzed.

Key words: Irradiation, Polarization sensitivity, Coherent matrix

宋 宁 男, 哈尔滨工业大学航天电子与光电子工程系博士生, 从师于王骥教授和韩心志教授。主要从事航天遥感器的偏振、杂散辐射以及辐射度等方面的工作。