

航天遥感扫描系统的偏振分析

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 提出了航天遥感扫描系统的偏振计算和分析方法,对航天遥感中通常采用的三种扫描系统进行偏振计算和分析,提出了扫描系统的新的设计方案。

关键词 扫描系统 偏振灵敏度

1 引言

航天遥感器,用来对地球及其环绕天体进行辐射度测量。已有的研究表明,遥感器的辐射度精度受目标及系统的偏振特性的影响。由于被测目标的偏振特性非常复杂的,因而系统的偏振特性将使辐射度测量产生严重误差^[1]。对于辐射度性能要求较高的航天遥感器,特别是用于气象和海洋遥感的航天遥感器,应降低其偏振灵敏度,以保证辐射度测量精度。例如,美国EOS平台的MODIS,具有较高的辐射度性能要求,因此其线偏振灵敏度要求 $\leq 2\%$ ^[2]。而扫描系统是航天遥感器偏振灵敏度的主要贡献者,因而偏振特性成为扫描系统设计的主要依据。对扫描系统进行偏振分析,提出减偏思路,是扫描系统设计的主要工作之一。

本文提出扫描系统的偏振计算和分析方法,并对主要的三种扫描系统进行了偏振分析,提出了改进的设计方案。

2 偏振分析和计算方法

对光学系统偏振特性和计算分析主要有两种方法,偏振像差理论和偏振光追迹^[3-4]。偏振像差理论的方法有利于更好地理解偏振的产生,而且被用于平衡和减少光学系统或光学元件对偏振特性的影响。但是,更多的光学设计和系统分析程序使用的是偏振光线追迹的方法。这是由于,偏振像差的方法不能很好地和其它光学设计程序相结合,而且不能分析由倾斜或者偏心光学元件构成的光学系统。因此,本文采用偏振光线追迹的方法来分析航天遥感器扫描系统的偏振特性。

偏振光线追迹的过程如下: 光波的电场矢量以琼斯矢量来表示。当一条光线入射到光学界面时, 通过旋转变换, 琼斯矢量被转换为垂直和平行于入射面的 S 和 P 两个本征偏振态, 然后分别对每一本征偏振态乘以菲涅耳反射或透射因子来表示光学界面对电场矢量的作用。这两个计算过程, S 和 P 两个本征偏振态的转换和菲涅耳反射或透射因子都可以用一个 2×2 矩阵来表示。因此, 从光学界面 i 到 $i+1$ 的琼斯矢量的变换关系为

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{i+1} &= \mathbf{M}_{i+1} \mathbf{J}_i \\ \mathbf{M}_{i+1} &= \mathbf{I}_{i+1} \mathbf{R}_{i+1} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: \mathbf{R}_{i+1} 为琼斯矢量的旋转变换矩阵; \mathbf{I}_{i+1} 表示界面对电场矢量作用的 2×2 对角阵, 它的对角元为菲涅耳反射或透射因子, 它和光线在界面的入射角以及界面前后的折射率有关; \mathbf{J} 为琼斯矢量。

在每个界面, 为了方便地找到垂直和平行入射面的 S 和 P 两个本征偏振态, 引入和光线方向矢量 \vec{R}_i 有关的光线旋转坐标系。坐标系三个轴的方向矢量分别为 \vec{S}_i , \vec{P}_i 和 \vec{R}_i

$$\vec{S}_i = \begin{aligned} &\vec{R}_i \times \vec{N}_i \\ &|\vec{R}_i \times \vec{N}_i| \end{aligned} \quad (2)$$

$$\vec{P}_i = \vec{R}_i \times \vec{S}_i \quad (3)$$

其中: \times 代表矢量积, \vec{N}_i 为界面 i 的法线, \vec{S}_i 垂直于入射面, \vec{P}_i 平行入射面。

当来自界面 i 的光线入射到界面 $i+1$ 时, 由于 \vec{S}_{i+1} 垂直于入射面, 因此它垂直于 \vec{R}_i 和 \vec{R}_{i+1} , 电场矢量在这个轴上的投影为 S 分量。

$$E_{s,i+1} = \vec{S}_{i+1} \cdot (E_{s,i} \vec{S}_i + E_{p,i} \vec{P}_i) \quad (4)$$

\vec{P}_i 平行于入射面, 电场矢量在这个轴上的投影为 P 分量

$$E_{p,i+1} = -(\vec{P}_i \cdot \vec{S}_{i+1}) E_{s,i} + (\vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i+1}) E_{p,i} \quad (5)$$

把上两式写作矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} E_{s,i+1} \\ E_{p,i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{S}_{i+1} \cdot \vec{S}_i & \vec{S}_{i+1} \cdot \vec{P}_i \\ -\vec{S}_{i+1} \cdot \vec{P}_i & \vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{s,i} \\ E_{p,i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\mathbf{M}_{i+1} = \begin{bmatrix} \vec{S}_{i+1} \cdot \vec{S}_i & \vec{S}_{i+1} \cdot \vec{P}_i \\ -\vec{S}_{i+1} \cdot \vec{P}_i & \vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i+1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$E_{s,i}$ 和 $E_{p,i}$ 分别为在界面 $i+1$ 处, 入射电场矢量平行和垂直于入射面的 S 和 P 分量。

3 扫描系统的结构和特性

对扫描系统的设计, 需要满足两个关键要求^[5]: 一个是保证刈幅宽度; 另一个就是在规定的穿航迹和沿航迹偏离天地的角度范围内满足线偏振灵敏度的要求。现就常用的扫描系统做

扼要的分析。

3.1 45 旋转平面反射镜

45 旋转平面反射镜又称固定 45 反射镜。如图 1(a) 所示, 设入射光线的方向矢量为 \vec{A} , 平面镜的法线方向矢量为 \vec{N} , 反射光线的方向矢量为 \vec{A}' 。

平面镜的法线方向矢量 \vec{N} 和入射光线的方向矢量 \vec{A} 随扫描角 θ 而变化, 分别为

$$\vec{N} = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\theta), -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\theta) \right] \quad (8)$$

$$\vec{A} = (0, \cos(\theta), \sin(\theta)) \quad (9)$$

那么, 光线在平面镜上的入射角 α 为

$$\alpha = \frac{\vec{A} \cdot \vec{N}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{N}|} = 45^\circ \quad (10)$$

由于光线在平面镜上的入射角不随扫描而变化, 并且入射角较大, 因此这种扫描方式将具有较大的且不变的偏振灵敏度。但由于其法线的方向随扫描角而变化, 当反射光线进入到光学系统时, 需进行琼斯矢量旋转变换, 这将影响到整个系统的偏振特性。

3.2 45 摆动平面反射镜

45 摆动平面反射镜又称单轴倾斜反射镜。如图 1(b) 所示, 平面镜的法线方向矢量 \vec{N} 和入射光线的方向矢量 \vec{A} 随扫描角而变化, 分别为

$$\vec{N} = \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\theta) + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\theta), -\frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\theta) + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\theta), 0 \right] \quad (11)$$

$$\vec{A} = [-\sin(2\theta), \cos(2\theta), 0] \quad (12)$$

那么, 光线在平面镜上的入射角 α 为

$$\alpha = \frac{\vec{A} \cdot \vec{N}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{N}|} = 45^\circ - \theta \quad (13)$$

光线在平面镜上的入射角随扫描角而变化, 因此这种扫描方式的偏振灵敏度随扫描角而变化, 这将为系统的偏振补偿带来困难。

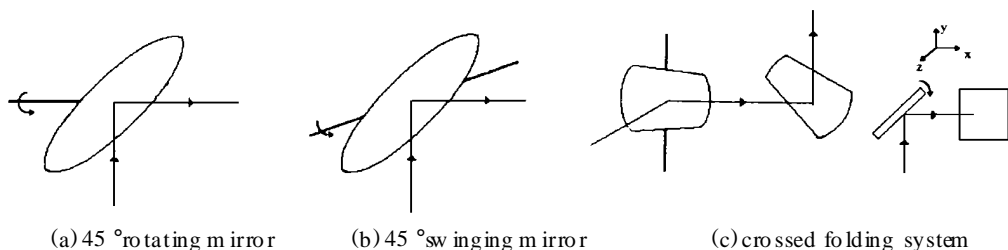


Fig. 1 Configurations of three different scan system

3.3 双反射镜补偿/活动系统

系统由一对交叉 45 的平面反射镜组成, 如图 1(c) 所示。第一块平面镜绕 z 轴转动, 提供穿越航迹扫描; 第二块平面镜是固定的, 用于补偿第一块反射镜产生的偏振。第一块平面镜相当于

— 45 摆动平面反射镜

当光线到达第二块平面反射镜时, 琼斯矢量旋转矩阵为

$$M_2 = \begin{bmatrix} \bar{S}_2 \cdot \bar{S}_1 & \bar{S}_2 \cdot \bar{P}_1 \\ -\bar{S}_2 \cdot \bar{P}_1 & \bar{S}_2 \cdot \bar{S}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由上式可见, 当光线经第一面反射入射到第二面时, 第一块平面镜电场矢量的 S 分量在第二块平面镜将变成 P 分量, 同时 P 分量将变为 S 分量, 从而降低整个系统的线偏振灵敏度。如果光线在第二块平面镜上的入射角等于在第一块平面镜上的入射角, 第二块平面镜将完全补偿由第一块平面镜产生的偏振。同时, 这种扫描系统也具有线偏振灵敏度将随扫描角而变化的缺点。

4 计算实例及讨论

本文根据提出的偏振光线计算方法, 计算了以上三种扫描方式的线偏振灵敏度。扫描范围为 $\pm 45^\circ$ 。选择银膜作为平面镜的反射膜层, 这是由于银膜和别的金属反射膜层相比, 具有低偏振特性和高反射率。图 2 为三种扫描方式下的线偏振灵敏度曲线。可以看出, 当采用 45 摆动平面反射镜时, 线偏振灵敏度随扫描角而变化, 当平面反射镜摆动到 $+45^\circ$ 时, 线偏振灵敏度最大, 这是由于此时光线在平面镜上的入射角最大。为了减少这种扫描方式的线偏振灵敏度, 可以将主光学系统的光轴上仰一定的角度, 减小光线在反射镜上的入射角, 从而降低偏振灵敏度。NASA 的 MODIS-N 就是采用的这种方法^[6]。从图 2 可以看出, 双反射镜补偿/活动系统的线偏振灵敏度和以上两种扫描方式相比, 已经大大降低。同时, 扫描角的变化将影响线偏振灵敏度, 最大达到 1.5%。

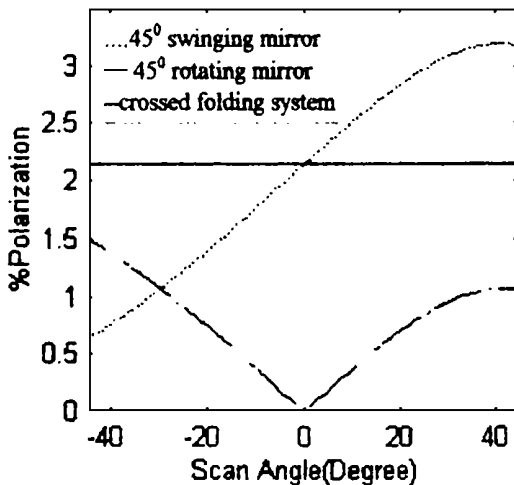


Fig 2 Comparison of linear polarization sensitivity of three scanning system

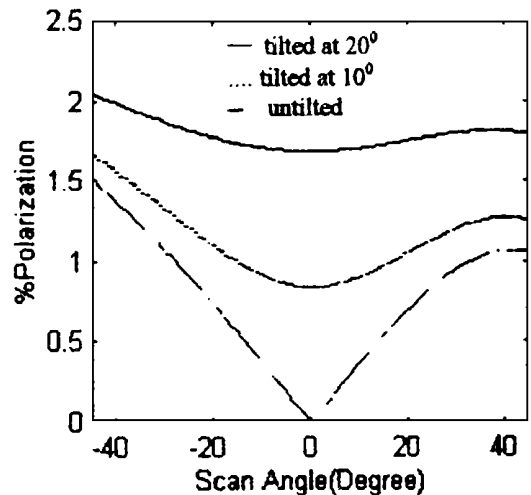


Fig 3 Comparison of linear polarization sensitivity of the second mirror tilted at different angle

通过对以上三种扫描系统的偏振特性的比较, 双反射镜补偿/活动系统具有低偏振灵敏度的特点, 可以作为最佳设计方案。但是由于其偏振灵敏度随扫描角而变化, 这将影响到辐射度

精度,同时为系统的偏振补偿带来困难。为了消除扫描角对偏振灵敏度的影响,可以将这一系统进行改进,即将第二面平面镜上仰一定角度,增大光线在第二面平面镜的入射角,从而减小扫描角对偏振灵敏度的影响。图3为第二面反射镜上仰不同角度时,偏振灵敏度随扫描角的变化。从中可以看出,第二面反射镜上仰一定的角度,将减小扫描角对偏振灵敏度的影响,但同时也增大偏振灵敏度。可以在二者之间进行折中,以获得最佳设计方案。

5 结 论

本文提出扫描系统的偏振计算和分析方法,对主要的三种扫描系统进行了偏振分析。针对现有的扫描系统的缺点,提出了新的设计方案。在减小扫描系统的偏振灵敏度的同时,降低扫描角对偏振灵敏度的影响,这种设计方案可在新一代的遥感器中获得应用。

参 考 文 献

- 1 Chipman Russel A. Polarization consideration for optical system. Proc SPIE, 1989, 28: 85~ 86
- 2 Pagano Thomas S, Durham Rodney M. Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS). Proceeding SPIE, 1939: 2~ 17
- 3 McGuire J P Jr, Chipman R A. Polarization aberrations in optical system. Current Developments in optical Engineering II, Fischer R, Smith W, Editors, Proceeding SPIE, 1987, 81: 139~ 144
- 4 Chipman R A. Polarization ray tracing Proceeding SPIE, 1987, 766: 61~ 68
- 5 韩心志 航天光学遥感辐射度学 哈尔滨工业大学出版社, 1994
- 6 Walushka E, Silverglate P, Ftaclas C, Turner A. Polarization sensitivity analysis of an earth remote sensing instrument: the MODIS-N phase B study. Proceeding SPIE, 1992, 1746

Polarization Analysis of Scan System Using in Space Remote Sensor

SONG Ning, HAN Xin-Zhi

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

Abstract

This paper introduces the calculating and analyzing method of scan system using space remote sensor. The polarization sensitivity of three scan system is analyzed and calculated, and new scan system is given.

Key words: Scan system, Polarization sensitivity.

宋 宁 男,哈尔滨工业大学物理电子与光电子学专业博士生,从师于王骥教授和韩心志教授,主要从事于航天遥感器设计,以及遥感器的杂散辐射和偏振方面的研究。