

文章编号: 1672-8785(2018)12-0001-07

光学薄膜与系统的偏振控制

蔡清元^{1,2} 蒋 林¹ 李耀鹏¹ 陈 刚¹ 李大琪¹
刘定权^{1,2,3} 罗海瀚¹ 张 麟¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 上海科技大学, 上海 200031)

摘 要: 在先进遥感仪器的性能表征中, 偏振灵敏度是很重要的性能指标之一, 它在量化高精度遥感信息反演中非常重要。光学薄膜是仪器偏振灵敏度控制中非常重要的一种手段。基于薄膜光学的传输矩阵理论, 根据偏振灵敏度控制要求开展了几类光学薄膜的设计、分析和研制工作, 主要包括金属反射膜、介质-金属-介质分色膜、介质分色膜、增透膜和带通滤光膜等。给出了一些已研制光学薄膜的偏振灵敏度控制的实测结果和以此研制的遥感仪器的系统偏振灵敏度的控制情况。

关键词: 偏振灵敏度; 光学薄膜; 琼斯矩阵; 遥感

中图分类号: O484.4+1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.12.001

Polarization Control of Optical Films and Systems

CAI Qing-yuan^{1,2}, JIANG lin¹, LI Yao-peng¹, CHEN Gang¹, LI Da-qi¹,
LIU Ding-quan^{1,2,3}, LUO Hai-han¹, ZHANG Lin¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. ShanghaiTech University, Shanghai 200031, China)

Abstract: Polarization sensitivity is one of the main performance characterization indexes for advanced remote sensing instruments. It is very important in the quantification of high-precision remote sensing information extraction. Optical film is a very important means for controlling the polarization sensitivity of remote sensing instruments. On the basis of the theory of transfer matrix of optical films, the design, analysis and development of several types of optical films including metal reflective film, dielectric-metal-dielectric edge filtering film, dielectric edge filtering film, antireflection coating and band-pass filtering film are carried out according to the control requirements of polarization sensitivity. The measured results of polarization sensitivity of some coated optics and the actually controlled polarization sensitivity of the remote sensing instrument systems using those coated optics are given.

收稿日期: 2018-12-13

基金项目: 上海市自然科学基金项目(18ZR1445400); 国家自然科学基金项目(61805267)

作者简介: 蔡清元(1984-), 男, 福建晋江人, 副研究员, 主要研究方向为薄膜光学与偏振技术。

E-mail: qycail@mail.sitp.ac.cn

Key words: polarization sensitivity; optical film; Jones matrix; remote sensing

0 引言

光学薄膜器件广泛应用于光学和光电子学领域。通过实现光学薄膜器件的光学功能,各类光学系统和光电装置才能正常工作。作为一种光学仪器,遥感仪器的性能好坏在很大程度上取决于各类型的光学薄膜器件。在国际空间遥感研究中,人们普遍认为偏振遥感所包含的信息量比强度遥感更大,因而可提高目标识别率,所以发展和推广偏振遥感技术是未来空间遥感领域的一个重要趋势^[1]。偏振特性是新一代空间遥感仪器的重要指标,它在量化高精度遥感信息反演方面非常重要。先进空间遥感仪器对系统偏振灵敏度(一般指线偏振灵敏度)均提出了相应要求^[2],其表征的是仪器对不同状态偏振光的响应不一致特性。而当入射辐射光的偏振状态未知时,在遥感信息反演中则无法进行有效补偿,从而导致反演失真。国际上一些有代表性的遥感载荷(如 AVHRR、Thematic Mapper、CZCS、MODIS-T、MODIS-N、SeaWiFS、ROSIS ATMOS 等)的偏振灵敏度指标在 2%~7% 不等^[3]。海洋水色遥感仪器是国内较早提出偏振灵敏度控制要求的遥感仪器,其中已完成的 HXX-1B 达到 5% 的偏振灵敏度。目前在研的风云系列载荷和海洋遥感载荷等也均提出了 2%~5% 偏振灵敏度的控制要求。其中,新的海洋水色仪已经提出了 2% 的偏振灵敏度控制目标。一般来讲,遥感仪器的低偏振灵敏度控制要点在于以下几个方面^[3]:(1) 光学元件尽量工作在小入射角度内;(2) 实现光学薄膜的低偏振灵敏度控制;(3) 补偿膜系沉积;(4) 启用偏振补偿器;(5) 采用成对的偏振坐标轴正交工作的反射镜;(6) 以棱镜代替光栅分光;(7) 入光口采用退偏器;等等。其中,(2)~(4)均由光学薄膜主导。因此,光学薄膜是系统偏振灵敏度控制中非常关键的一环。

一般说来,遥感仪器是一个多通道同时探测的光学系统。典型的光学元件构成包含反射镜、分色片、透镜、窗口和带通滤光片等多种类型的光学薄膜器件。在这个多通道遥感载荷里,当很多光学薄膜器件(如反射镜、分色片等)工作在倾斜角度上时,均会引起信号光的偏振光谱分离,进而导致系统的偏振灵敏度增大。即使是常见的 F-B 带通滤光片,随着其在焦平面成像系统中的应用,也会存在倾斜光束的情况,进而产生偏振效应。未来的遥感用光学薄膜需要进一步考虑薄膜的偏振效应,这对光学薄膜器件提出了更高的研制要求。这些偏振相关的薄膜在不同遥感仪器中的应用波段和功能略有不同,但其设计、工作原理以及在薄膜研制过程中的关键点控制都是共通的。本文主要介绍我们在可见近红外光学薄膜低偏振灵敏度控制方面的研究及其用于海洋水色遥感仪器后所达到的系统偏振灵敏度控制情况。

1 原理与分析方法

光学薄膜的基本工作原理是薄膜光学,它描述了光在分层介质中的干涉效应以及由此引起的光的传播特性^[4]。一般来讲,我们可以采用一种被称为传输矩阵的方法来描述光在膜层中的传播行为。该方法将多层膜看成一个等效界面,而将多层膜与基底合起来看成一个等效介质。在表达上,采用一个 2×2 的特征矩阵来描述每个膜层,并引入光学导纳概念来描述基底和等效介质,从而建立起等效介质与基底及膜层的关系的数学描述。一个 K 层膜系可用式(1)表示:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{\text{sub}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,定义参数 $Y=C/B$ 为等效介质的等效光学导纳; η_j 和 η_{sub} 分别为第 j 层膜和基底的光学导纳; δ_j 为膜层的相位厚度, $\delta_j = 2\pi N_j d_j \cos \theta_j / \lambda$;参数 N_j 、 d_j 和 θ_j 分别为膜层的复折射率、厚

度以及光线的折射角。

在获得光学薄膜的能量传输及偏振特性后, 需要进一步描述光线在光路系统传输过程中的偏振状态变化, 此时就要用到偏振光学矩阵。目前有效的两种矩阵方法分别为穆勒矩阵和琼斯矩阵。其中, 穆勒矩阵描述的是以斯托克斯矢量形式表征的光线传输特性变化, 适用于完全偏振光、自然光和部分偏振光的表征; 琼斯矩阵描述的是以琼斯矢量形式表征的光束传输特性变化, 只适用于完全偏振光的表征。一般情况下, 我们均可采用穆勒矩阵和斯托克斯矢量来表征光在偏振光学系统中的传输, 而对于完全偏振光在无退偏效应的光学系统中的传输, 采用琼斯矩阵则具有更加简洁明了的优点。

在此, 对本文涉及的偏振灵敏度的概念作进一步的说明。一般来讲, 遥感仪器面对的目标辐射的偏振部分具有线偏振特性。因此, 一般采用线偏振灵敏度 (Linear Polarization Sensitivity, LPS) 来表征系统的偏振灵敏度, 其定义如下: 当一束完全线偏振光入射到一个光学系统中时, 在入射线偏振光的偏振方向旋转 180° 的过程中, 设出射光强度的最大值和最小值分别为 $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$, 则线偏振灵敏度的数学表达式为

$$LPS = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2)$$

若非特别说明, 本文中的偏振灵敏度均为线偏振灵敏度 (LPS)。

2 偏振相关薄膜的设计与研制

与系统偏振灵敏度相关的光学薄膜元件包括反射镜、分色片和滤光片等, 薄膜类型涉及金属反射膜、介质-金属-介质分色膜、介质分色膜、增透膜和带通滤光膜。

反射镜主要镀制金属反射膜。考虑到低偏振灵敏度的控制需求, 一般只能在银、金、铝膜中进行选择。由于金膜仅适用于红外波段, 目前我们主要研制银膜反射镜, 其膜系构成一般为“银膜+保护膜”。保护层主要用于防止由

银膜的划伤、腐蚀、氧化、硫化等物理和化学作用引起的反射性能衰减, 它一般采用 Al_2O_3 和 SiO_2 的复合层。根据不同的工作角度以及偏振控制需求, 银膜沉积需要达到 120 nm 以上的厚度以保证不透光, 保护膜的总厚度从几十到二百多纳米不等。

介质-金属-介质分色膜一般用于透射可见近红外光谱和反射中长波红外光谱, 同时实现两者的分离, 并将其分配到不同光路中。此类薄膜一般采用“ ZnS-Ag-ZnS ”对称结构, 但该结构的偏振灵敏度控制较差, 无法满足要求。因此, 我们提出了一种在超薄银膜沉积前后分别镀制高折射率和低折射率匹配膜层的设计, 以实现可见至近红外透射光谱的低偏振灵敏度控制。在具体研制中, 考虑到工艺的可实现性, 采用了“ ZnS-Ag-ZnS-MgF_2 ”结构, 其中第三层的 ZnS 主要充当粘合层, 用于提高膜层间的结合力。

介质分色膜, 顾名思义, 即由高低折射率的透明介质材料组成的膜堆, 其作用在于实现波长相近的不同波段光信号的高效分光。它较多采用反射短波、透射长波的分色方式。一般的膜系结构可以用 $\text{Sub|HLHL } a(0.5\text{HL}0.5\text{H})^w b(0.5\text{HL}0.5\text{H})^x c(0.5\text{HL}0.5\text{H})^y d(0.5\text{HL}0.5\text{H})^z \text{HLHL|Air}$ 进行优化设计。其中, 参数 a 、 b 、 c 、 d 为反射膜堆的中心波长相对于膜系设计参考波长的比例系数。可以看出, 此类薄膜的膜系结构比较复杂, 膜层数目达到几十甚至上百层。这对于材料特性、沉积工艺以及研制精度都有较高要求。传统的介质分色膜系由于采用 $a < b < c < d$ 的设计而具有光学导纳自然匹配的特点, 可以较容易地实现长波区的高透射。但是考虑到实际膜系所用材料 (主要是高折射率材料) 在应用波段的短波区往往具有一定的吸收, 导致反射波段的短波部分存在较大吸收。在实际应用中的倾斜角度下, 吸收更是具有明显的偏振特性, 进而造成反射光谱的偏振分离。在低偏振灵敏度介质分色膜的研制中, 我们一般需要打破传统的反射堆排列

方式,将短波反射堆放在最外层。这样可以有效减少吸收,降低反射的偏振分离。但在改变反射堆的排列后,会引起透射波段的透过率发生较大变化。因此需要进行膜系优化设计,使相关工作变得更加复杂,同时对膜系研制的精度要求也大大提高。

增透膜系大部分用于透镜或探测器窗口,一般工作在垂直入射或者近乎垂直入射的角度下,其偏振灵敏度本身就极小,所以通过进一步优化就可以忽略透镜或窗口对系统偏振灵敏度的影响。在分色片的后表面上,一般也会镀制透射波段的增透膜。这时增透膜工作在倾斜角度上,因此需要着重考虑其偏振特性。在这种情况下,一般需要根据系统偏振灵敏度的控制需要,将增透膜设计成具有偏振补偿功能的膜系。在低偏振灵敏度光学系统中,专门有一种元件通过镀制此类增透膜用于充当系统的偏振补偿器。

带通滤光膜用于光学系统探测波段最终精细的光谱调制。理想的带通滤光膜在光谱形状上应该是通道内全透射通道外全截止的矩形框。带通滤光膜最重要的参数是中心波长和带宽。随着焦平面成像技术的发展,滤光片用于主光线倾斜的会聚光束的滤光。这会导致带通中心波长和带宽发生变化。其中,s光和p光在倾斜入射时的带宽会朝着相反方向发生变化,导致最终带通滤光膜存在偏振灵敏度。目前来讲,还没有一种明确的薄膜设计可以有效消除由入射角度变化引起的带宽偏振特性,一般只能结合滤光膜的仿真分析来指导光路设计的改进,比如采用像方远心光路以减小光线入射角度。

在薄膜研制完成后,需要对其光学性能和可靠性进行测试。在光学性能测试中,主要是用光谱仪和椭偏仪分别测量反射光谱、透射光谱和椭偏光谱,然后分析测量结果与技术指标的符合性,由此指导进一步改进的方向。可靠性测试主要用于保证光学薄膜元件在地面上有效工作1~2年以及在空间中

有效工作5~8年,其常规测试项目包括浸泡测试、附着力测试、表面质量检验、可清洗能力测试、湿度测试和温度交变测试。另外,低温冲击试验、高能粒子辐照试验、原子氧试验、真空紫外辐照试验、激光损伤试验等则须根据不同元件的具体工作环境和寿命要求进行选择性试验。

3 结果与讨论

结合工程上对遥感仪器偏振灵敏度控制的需要,我们在相关任务涉及的各类光学薄膜元件上同时进行了光谱与偏振的调控设计和研制。下面介绍已研制的光学薄膜元件的部分结果。

反射镜的薄膜根据其工作角度进行设计和实际研制。图1所示为工作在30°、45°和60°入射角度的银膜反射镜在可见近红外波段的反射光谱。可以看出,整体反射效率较高,除蓝光波段(400~500 nm)外的波段的反射率基本达到97%以上。45°反射镜的蓝光波段效率较低,这主要是考虑到遥感仪器光路的第一块镜体一般工作在45°上,会面临最严苛的环境,最容易发生性能衰减,因此对该45°反射镜的银膜保护进行了加强处理,即在保证反射镜的偏振灵敏度能够满足任务要求的情况下牺牲了一定的能量效率。图2所示为不同反射镜的偏振灵敏度测试结果。可以看出,偏振灵敏度均控制在1%以下,而且通过减小倾斜角度可以明显降低反射镜的偏振灵敏度。

介质-金属-介质分色片的偏振灵敏度控制主要是针对可见近红外波段进行的。我们研制了一种工作在35°入射角上的此类分色片,其前表面上镀制“ZnS-Ag-ZnS-MgF₂”结构的分色膜系,后表面上镀制400~900 nm的增透膜系。图3和图4所示分别为最终分色片的光谱结果和偏振灵敏度分布情况。在实际应用的项目中,该分色片的偏振控制同时还承担了对前光路中反射镜累积的偏振控制偏差进行补偿的作用(主要由增透膜系的研制来完成)。因此,该分色片自身的偏振灵敏度虽然显得较

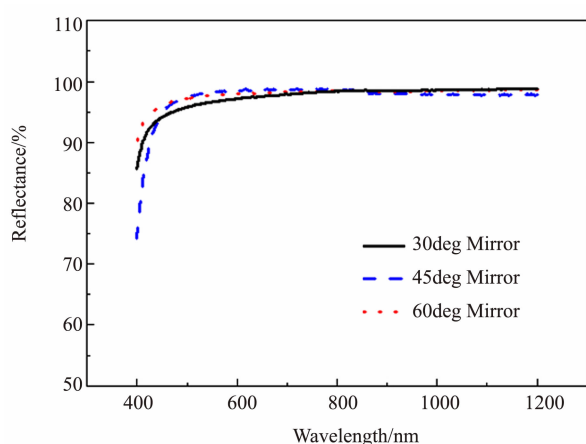


图 1 带保护层银反射镜的反射光谱

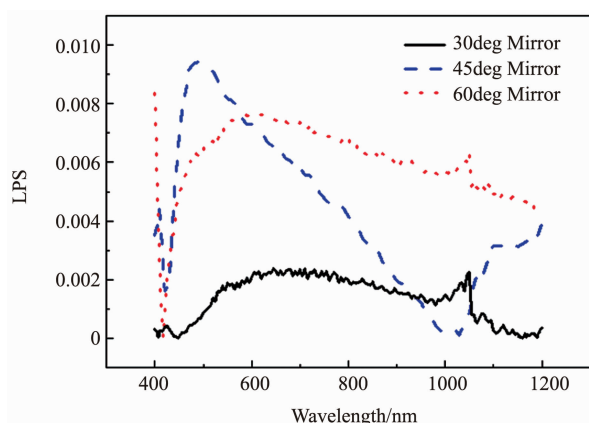


图 2 带保护层银反射镜的偏振灵敏度

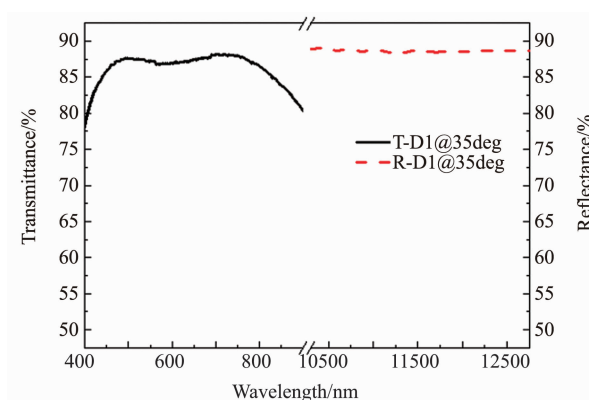


图 3 介质-金属-介质分色膜的透射和反射光谱

大, 但是被放进系统中考虑时, 系统的偏振灵敏度可以得到有效减小。

介质分色片的偏振灵敏度控制同时考虑透射光谱和反射光谱。由于膜系结构非常复杂, 大角度工作的分色片的偏振灵敏度非常难于控制。我们研制的此类分色片工作在 30° 的入射

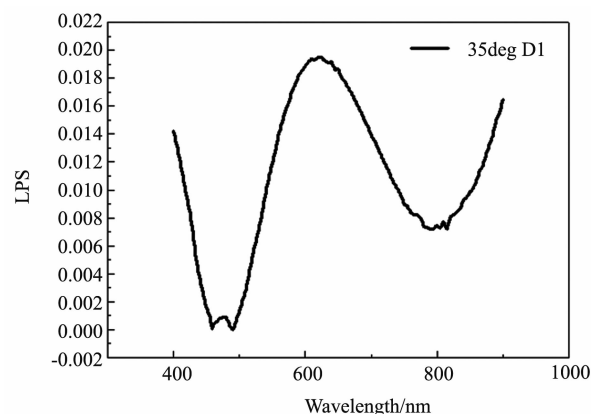


图 4 介质-金属-介质分色膜对可见近红外光的偏振灵敏度

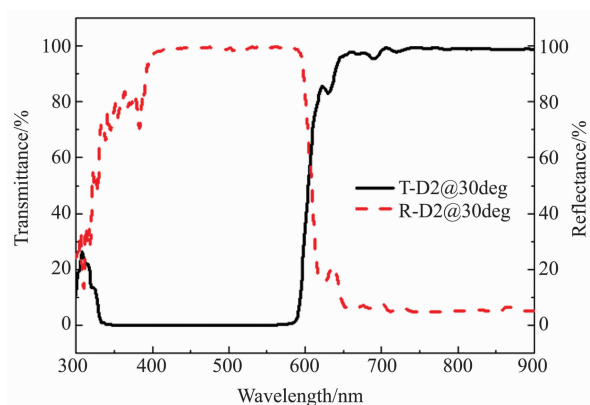


图 5 介质分色膜的透射和反射光谱(反射光谱采用参比片测量, 背面未做增透)

角度下, 其前表面上镀制反射 $402 \sim 575 \text{ nm}$ 、透射 $660 \sim 885 \text{ nm}$ 的分色膜系, 后表面上镀制 $660 \sim 885 \text{ nm}$ 的增透膜, 且增透膜同时对 $660 \sim 885 \text{ nm}$ 波段的偏振灵敏度进行系统整体的偏振补偿。从图 5 中的分色片光谱来看, 工作波段的平均反射率及平均透过率达到 99%。从图 6 中的偏振灵敏度分布情况来看, 工作波段的偏振灵敏度基本控制在 1% 以内, 膜系优化设计中重点关注的 $400 \sim 500 \text{ nm}$ 波段的偏振灵敏度从传统分色片的 2%~5% 降低到 0.2% 以下。

带通滤光片的偏振灵敏度主要是由于因倾斜入射导致的 s 分量和 p 分量的带宽变化所造成的透射总能量差异而引起的, 如图 7 所示。目前, 在优化膜系设计时并没有有效的消除方

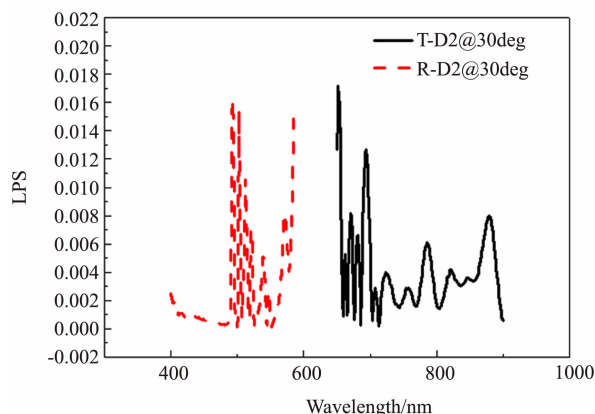


图 6 介质分色膜的偏振灵敏度

法, 只能尽量减小入射角度或者借由其他补偿膜系来相互抵消。在实际的工程研制中, 需要通过滤光片的实际入射光束情况进行分析, 计算出滤光片对不同成像点的偏振灵敏度值, 然后进行系统整体的考量, 必要时还需要对光路进行改进设计。图 8 所示为某个 550 nm 带通滤光片在不同角度下的偏振灵敏度的计算结果。该结果可以用于定性分析各波段的滤光片偏振灵敏度变化趋势。从中可以看出, 带通滤光片的偏振灵敏度基本与入射角度的平方成正比。量化分析需要根据具体的膜系设计、光束分布、中心波长与带宽情况分别进行仿真计算或实际测量。

以上所有研制的光学薄膜均通过了相关的环境模拟试验和可靠性试验, 能够满足空间遥感仪器的使用环境及寿命要求。

用本文方法研制的低偏振灵敏度光学薄膜元件已应用于静止轨道 HY 成像辐射计中。整机的系统偏振灵敏度测量结果表明, 其所有探

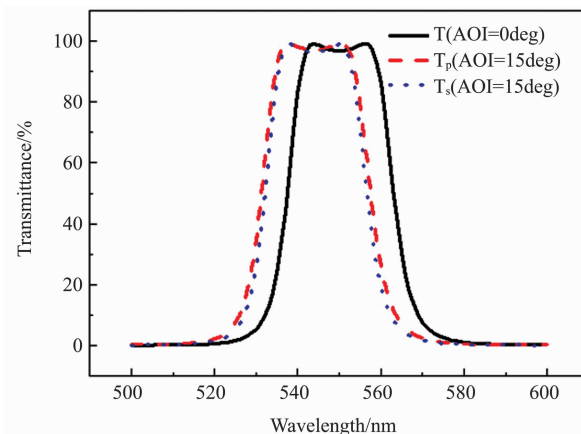


图 7 带通滤光片随入射角变化的光谱特性

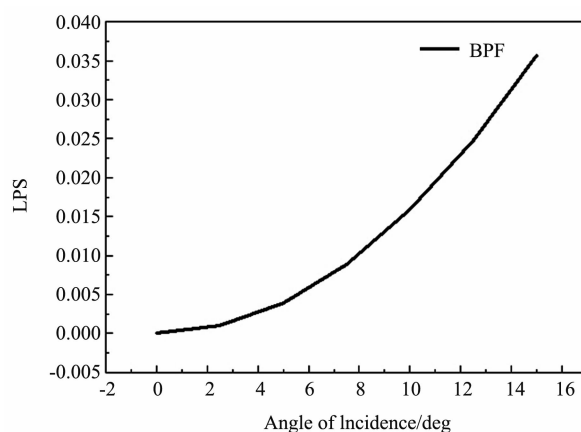


图 8 带通滤光片的偏振灵敏度随入射角度的变化

测通道的偏振灵敏度均小于 2%, 满足任务要求。另外, 目前在研的某型号项目中也大量使用了我们研制的低偏振灵敏度光学薄膜。图 9 所示为该项目载荷的简易光路。其中存在多个大倾斜角度工作的光学元件, 目前已完成了绝大多数光学薄膜元件的研制工作。根据已完成光学元件的偏振测试结果, 我们采用琼斯矩阵对系统偏振灵敏度进行了估算。图 10 所示为

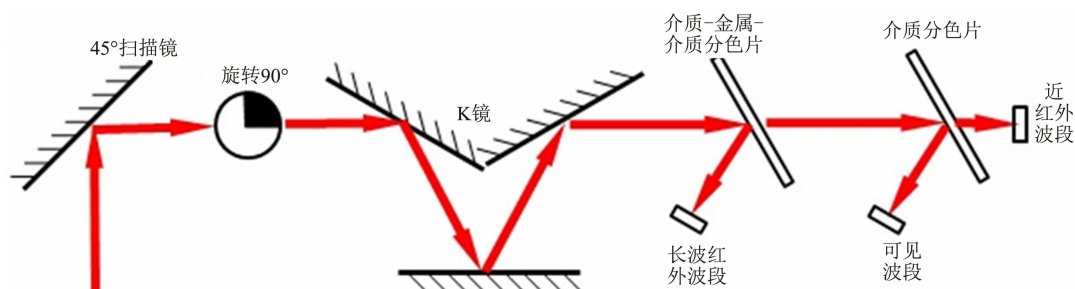


图 9 某载荷的简易光路图

根据光学薄膜元件偏振特性计算的系统偏振灵敏度随波长及扫描角的变化情况。结果表明, 该薄膜元件能够满足任务要求。

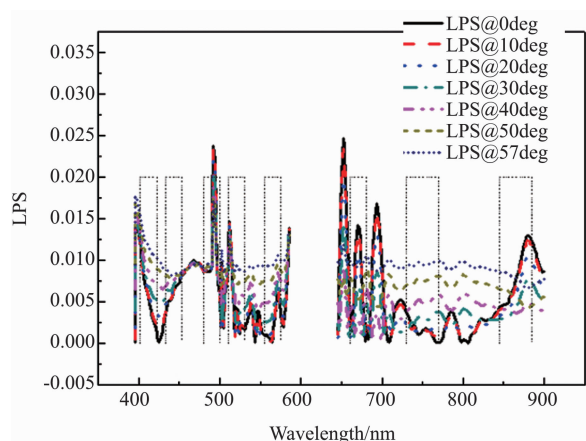


图 10 根据光学薄膜元件偏振特性计算的系统偏振灵敏度随波长及扫描角的变化情况

4 结束语

遥感仪器的系统偏振灵敏度控制需要多方面协同合作才能完成, 其中光学薄膜是非常重要的环节。针对可见近红外波段的常用光学薄

膜进行了低偏振灵敏度控制研究。研制的薄膜产品在遥感仪器上获得了应用, 实现了系统偏振灵敏度小于 2% 的控制目标。未来要将系统偏振灵敏度进一步控制在 1% 以内, 这就需要光学设计与光学薄膜密切配合。随着国内遥感仪器对偏振灵敏度指标的日益重视以及相关研究的深入开展, 1% 的偏振灵敏度研制目标将能很快实现。

参考文献

- [1] Egan W G. Photometry and Polarization in remote sensing [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, **67**(10): 122.
- [2] Cao C, Wu X. The GOES-R Advanced Baseline Imager: Polarization Sensitivity and Potential Impacts [C]. *SPIE*, 2015, **9613**: 96130K.
- [3] Chipman R A. Linear Polarization Sensitivity Specifications for Spaceborne Instruments [C]. *SPIE*, 1992, **1746**: 148–156.
- [4] Macleod H A. Thin-Film Optical Filters (4th Edition) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.