

光学学报

用于海洋水色量化遥感的光学薄膜技术

蔡清元¹, 冯旗¹, 陈刚¹, 宋庆君², 黄小仙¹, 于天燕¹, 丁静², 李耀鹏¹, 刘保剑¹, 刘建强², 段微波^{1*}, 刘定权^{1**}

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

²国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要 以海洋一号 C/D 卫星中国水色水温扫描仪 [COCTS (HY-1C/D)] 的光学薄膜研制为例, 介绍了海洋水色量化遥感中应用的光学薄膜技术。在单片基片的不同通道区域依次镀膜多块滤光膜以抑制杂散光的产生, 充分研究了光束空间角频率分布带来的光谱及偏振影响, 实现了 5% 带宽的定位精度, 将通道滤光膜对偏振灵敏度的影响降到 0.3% 以下, 采用双离子束溅射工艺来保证膜层的可靠性和光谱性能。此外, 通过光学薄膜元件的偏振调控设计以及元件间的偏振补偿, 实现了系统偏振灵敏度达到国际先进水平, 0° 扫描角时的平均偏振灵敏度小于 1%。光学薄膜技术的应用有效提升了海洋水色的量化遥感质量, 结合大气校正, COCTS (HY-1C/D) 获得的水色产品数据量化精度与美国的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和可见光红外成像辐射仪 (VIIRS) 相当。

关键词 海洋光学; 中国水色水温扫描仪; 量化遥感; 光学薄膜; 多波段集成滤光片; 偏振灵敏度

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230595

1 引言

空间遥感仪器中, 光学薄膜元件承担了遥感仪器筛选光谱、增强有效光辐射信号、屏蔽干扰光辐射的关键作用, 是量化遥感的重要一环。在海洋水色遥感领域, 有效光辐射信号在仪器接收的总光辐射中的占比极低, 导致信息反演受到无效光辐射的波动影响极大^[1], 因此, 在量化遥感中需要特别注重光学薄膜的作用, 对光学薄膜的性能提出了更苛刻的要求。遥感仪器的一些光学性能指标^[2], 如探测波段与带宽设置、波形要求、带外响应、波段响应度、偏振灵敏度等, 最终都落实到光学薄膜的性能控制上。国际上海洋遥感载荷在发射前后都会对载荷的主要光学参数进行测试、评估和分析, 典型的载荷包括美国国家航空航天局的宽视场水色扫描仪 (SeaWiFS)^[3]、中分辨率成像光谱仪 (MODIS)^[4]、可见光红外成像辐射仪 (VIIRS)^[5], 欧洲航天局的 MERIS (medium resolution imaging spectrometer)^[6], 以及日本的水色水温扫描仪 (OCTS)^[7]。通过加强不同载荷间水色遥感信息的相互比较, 加深遥感信息反演准确性和可靠性的认识, 从中获取一些经验总结以促进海洋遥感技术发展^[8-9]。量化遥感技术的发展离不开光学薄膜不断创新, 特别是红外光学元件需要光学薄膜来提升能量传递效

率, 提高成像质量^[10-11]。

2018 年和 2020 年我国分别发射了海洋一号 C/D 卫星, 其中搭载的中国水色水温扫描仪 [COCTS (HY-1C/D)] 是主要载荷之一。本文首先从海洋水色遥感的基本原理^[12]及其引出的关键问题着手, 介绍中国海洋一号 C/D 卫星水色水温扫描仪在解决这些关键问题的过程中所采用的光学薄膜技术, 分析在这些光学薄膜技术支撑下研制的水色水温扫描仪实测性能以及在轨测试和水色产品数据量化情况。

2 海洋水色量化遥感基本原理及关键影响因素

在空间海洋水色遥感中, 遥感仪器接收的光辐射信号 I_t 主要来自大气瑞利散射 I_r 、大气气溶胶散射 I_a 、海表面的反射 I_g 和水体的散射 I_w , 即

$$I_t = I_r + I_a + I_g + tI_w, \quad (1)$$

式中: t 为大气透射率。对水色有用的遥感信息只有来自水体的散射 I_w , 亦称为离水辐射, 其他的辐射则作为背景辐射 ($I_r + I_a + I_g$), 需要在大气校正过程中给予扣除。在信号占比中, 来自水体的离水辐射远低于背景辐射, 典型的离水辐射率只占遥感仪器接收光信号的不到 10%, 这使得遥感信号明显受背景辐射的波动影响。水体叶绿素、悬浮泥沙、黄色物质分布的量化反

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-31; 录用日期: 2023-04-13; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金 (62275256, 61805267)、中国科学院青年创新促进会 (2019241)、国家重点研发计划 (2021YFB3701504)、中央引导地方科技发展资金项目 (YDZX20213100003011)、上海市自然科学基金 (18ZR1445400)

通信作者: *duanweibo@mail.sitp.ac.cn; **dqliu@mail.sitp.ac.cn

演都需要基于精确量化的离水辐射率的测量,因此需要消除背景辐射的波动影响。背景辐射中,大气气溶胶散射可以通过选择合适的天气情况使其影响最小化,海表面的反射占比可通过遥感仪器姿态调整有效减小,大气校正的主要影响因素是大气瑞利散射,量化有效的水色遥感信号需要达到5%的离水辐射反演精度,要求瑞利散射计算精度达到1%^[13]。对于量化海洋水色遥感,两个重要影响因素是大气瑞利散射的偏振特性以及大气吸收谱线。因此,在海洋水色定量化遥感中,仪器需要具有低的偏振灵敏度 and 回避大气吸收谱段的探测波段,而这两项指标都需要借助光学

薄膜技术来实现。

3 用于定量化遥感的光学薄膜技术

3.1 波段响应光谱的调控技术

在星载多光谱光学遥感仪器中,带通滤光片是最重要的光学薄膜元件之一,很多遥感仪器的最终光谱响应性能指标往往由带通滤光片的性能决定。表1展示了 COCTS (HY-1C/D) 与美国的 SeaWiFS、MODIS、VIIRS 和日本的 OCTS 的水色遥感波段配置。下面介绍 COCTS (HY-1C/D) 中滤光片的研制特色。

表1 COCTS (HY-1C/D)与SeaWiFS、MODIS、VIIRS、OCTS水色波段配置对比

Table 1 Configuration of ocean color bands of COCTS (HY-1C/D), compared to SeaWiFS, MODIS, VIIRS, and OCTS

Band	Wavelength /nm				
	COCTS (HY-1C/D)	SeaWiFS	MODIS	VIIRS	OCTS
B1	402-422	402-422	405-420	402-422	402-422
B2	433-453	433-453	438-448	446-464	433-453
B3	480-500	480-500	483-493	478-498	480-500
B4	510-530	500-520	526-536	—	510-530
B5	555-575	545-565	546-556	545-565	555-575
B6	660-680	660-680	662-672	662-682	660-680
	—	—	673-683	—	—
B7	730-770 (C)	745-785	743-753	738.5-753.5	755-775
	734-754 (D)				
B8	845-885	845-885	862-877	845.5-884.5	855-875

3.1.1 集成滤光片研制

在海洋一号 A/B 卫星的 COCTS 中,水色探测波段的滤光片采用多个滤光片拼接而成的多波段组合滤光片,在每个探测波段选取一个子滤光片,不同子滤光片通过光学胶固定在一个光学基板上。由于不同滤光片之间存在拼接缝隙,当杂散光或波段信号光照射到拼接缝时,拼接缝成为强的散射光源,这使得探测组件存在较强的杂散光和波段间串扰光,不利于定量化遥感的实现。

在 COCTS (HY-1C/D) 中,水色探测波段的滤光片采用集成滤光片,其研制特点是在同一个基片的不同位置,通过掩模方式依次实现多个谱段的带通滤光片研制。由于不需要拼接多个子滤光片,也就没有拼接缝引起的强散射光,从原理上极大降低了不同波段光的串扰,同时配合金属层吸光进一步降低杂光水平。具体研制方法如下:集成滤光片采用带金属膜层光阑的基片,镀膜采用精确几何定位的金属掩模片套镀技术;通过掩模片对非镀膜区的遮挡,实现对单一波段的带通膜镀制;通过更换掩模片实现多个区域的多带通滤光片的依次制备,最后形成多波段滤光片。图1为 COCTS (HY-1D) 的可见近红外三波段集成滤光片的实物图,每个子窗口对应一种带通滤光膜。

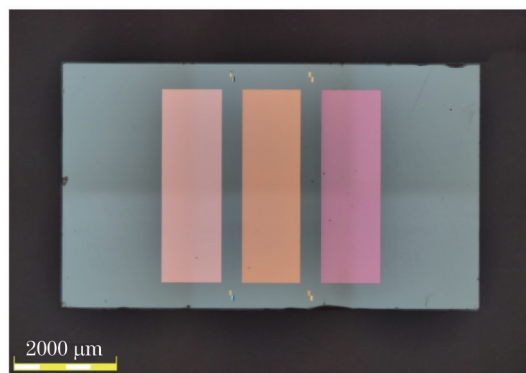


图1 COCTS (HY-1D)的可见近红外三波段集成滤光片的实物图

Fig. 1 Photo of band-pass filter of integrated three visible to near infrared bands for COCTS (HY-1D)

3.1.2 波段配置及光束空间角频率分布对滤光片光谱的影响

由于大气吸收,有效的大气遥感波段受到限制。对于定量化遥感,滤光片的性能及研制精度关系到大气遥感波段是否有效的问题。COCTS (HY-1C/D) 的水色遥感波段的光谱设置如表1所示,可以看到,海洋一号 C/D 卫星针对 B7 波段的设置进行了改进,其他国际水色遥感载荷在该波段的选择也各不相同。

在 COCTS (HY-1C) 中, B7 波段设置为 730~770 nm, 与 758~778 nm 氧气吸收 A 带存在部分交叠。由于 710~730 nm 为水汽吸收带, 因此 COCTS (HY-1C) 的遥感波段为 730~758 nm, 仅 28 nm。为了寻求高辐射能量并避开大气吸收, COCTS (HY-1D) 将 B7 波段的中心波长设为 744 nm, 带宽设为 20 nm, 同时要求极大提高带通滤光片的波形系数(矩形度), 730 nm 及 758 nm 的归一化响应小于 5%。图 2 所示为国际主流的水色遥感载荷和 COCTS (HY-1C/D) 在该波段附近的大气校正波段的响应光谱。

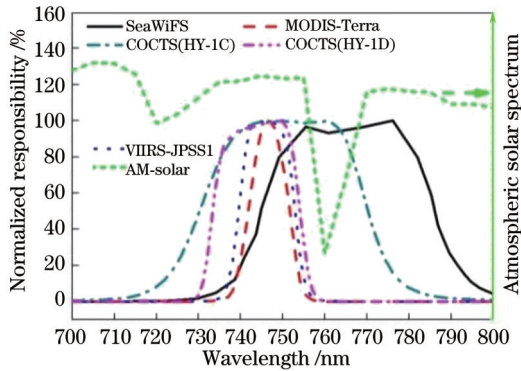


图 2 COCTS (HY-1C/D) 和星载水色遥感载荷的大气校正 B7 波段的仪器响应光谱

Fig. 2 Normalized response spectra of B7 band of COCTS (HY-1C/D) and other spaceborne ocean color sensors for atmospheric correction

带通滤光片是基于膜层间光学干涉效应而具有光谱滤光特性的, 这种光学干涉与光线在薄膜表面的入射角度相关。对于实际仪器中应用, 带通滤光片的实际滤光效果随着光束空间角频率分布而发生变化。为了预测带通滤光片在 COCTS 实际应用的光谱特性, 对由光束空间角频率分布引起的光谱特性变化进行分析。具体的仿真方法如下:

1) 以光学薄膜设计软件为工具, 仿真计算了所设计滤光膜系在不同入射角度的光谱特性。

2) 根据实际光线角度分布权重, 通过积分计算获得所设计滤光膜系的综合光谱特性。

3) 对比综合光谱特性和垂直入射光线的光谱, 获得中心波长、带宽等关键参数的变化范围, 用于反向推导薄膜研制时的光谱预置偏移量。

4) 根据研制的滤光片实测光谱曲线, 利用设计仿真阶段的分析结果, 预判在系统集成应用时仪器的波段响应光谱是否达标。

仍以 COCTS (HY-1D) 的 B7 谱段光谱为例, 从图 3 可以看到, 会聚光束下滤光片光谱的波形及中心波长相较于垂直光束会存在一定的变化, 表现为中心波长往短波方向移动, 光谱的矩形度变差。利用以上仿真方法, 可以获得滤光片在仪器中的实际光谱滤光效果。

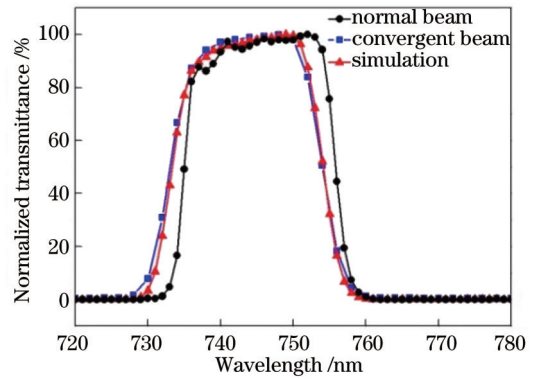


图 3 不同光束下 COCTS (HY-1D) 的 B7 波段透射光谱
Fig. 3 Normalized transmission spectra of B7 waveband of COCTS (HY-1C/D) with different incident beams

3.1.3 高性能高可靠性的光学薄膜沉积技术

为了提高研制效率和滤光片性能, 采用双离子束溅射工艺来制备 COCTS 的集成滤光片。离子束溅射工艺采用电场加速的氩离子撞击靶材, 使其中一些靶原子瞬间具有极大的动量, 从而脱离靶材沉积到基片上。沉积到基片表面的靶原子具有足够大的初始动能, 能充分进行膜层表面迁移, 形成致密膜层。因此, 该沉积技术不需要基片处于很高温度的环境, 实际研制中采用 90 °C 的沉积温度。这极大降低了集成滤光片金属层光阑功能失效的风险, 同时减小了膜层材料热光系数以及热应力对滤光片性能的影响。

滤光膜的研制采用 Nb_2O_5 和 SiO_2 作为高低折射率膜, 并使用 Nb 靶材(纯度为 99.95%) 和 SiO_2 介质靶(纯度为 99.995%)。研制设备为美国 Veeco 公司的溅射镀膜机 SPECTOR, 溅射离子源偏压为 1250 V, 束流分别为 600 mA 和 500 mA, 通入氩气的流量为 18 mL/min; 辅助离子源的偏压分别为 100 V 和 75 V, 束流分别为 450 mA 和 400 mA, 通入氧气的流量为 12 mL/min。

为了表征光学薄膜的可靠性, 进行 45 °C 温水浸泡实验 24 h、45 °C 温度和 95% 湿度的高温高湿环境实验 24 h、-25~50 °C 高低温循环实验 3 次、胶带撕拉等环境模拟及可靠性实验。实验结束后, 进行表面检查及光谱复测, 发现表面干净无损伤、光谱无变化。集成滤光片 B6 波段的光谱复测结果如图 4 所示。

3.1.4 带通滤光片的偏振灵敏度考量

偏振灵敏度(LPS; D_{LPS}) 的定义为仪器对线偏振光在偏振方向转动 180° 过程中最大响应度 I_{max} 与最小响应度 I_{min} 之差与二者之和的比值:

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

随着入射光线角度的变化, 滤光片带宽和中心波长将发生变化, 且具有偏振特性。在 VIIRS (JPSS-1) 中, 波段光谱响应的中心波长及带宽的偏振灵敏性导致 M1 和 M4 波段的偏振灵敏度发生超差^[14]。在

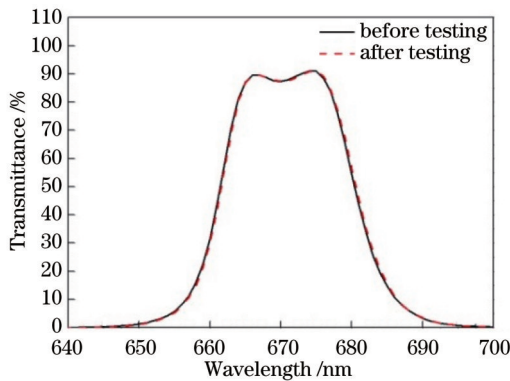


图4 集成滤光片B6波段在可靠性测试前后的透射光谱
Fig. 4 B6 transmission spectra of B6 filter before and after reliability testing

COCTS (HY-1C/D)初样设计阶段,项目组已针对COCTS中光束空间角频率分布引起的带通滤光片的偏振灵敏度进行分析,并对后光学系统进行全新的设计,以改善光束空间角频率分布。表2展示了COCTS的滤光片在系统中的偏振灵敏度分布,可以看到,采用全新的后光学系统后,滤光片的偏振灵敏度极小,不会造成偏振灵敏度超差。

3.2 低偏振灵敏度的光学薄膜调控技术

偏振灵敏度调控要求是海洋水色遥感用光学薄膜与其他遥感载荷用光学薄膜的重要区别之一。COCTS (HY-1C/D)的指标要求是:在 $\pm 20^\circ$ 扫描角内,仪器偏振灵敏度小于2%;在 $\pm 57^\circ$ 扫描角内,仪器偏振灵敏度小于5%。

遥感仪器的偏振灵敏度主要是由光线在光学元件的倾斜入射造成的,其控制要点包含多个方面^[15]:1)光

学元件尽量工作在小入射角度;2)研制低偏振灵敏度的光学薄膜;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)用棱镜代替光栅分光;7)入光口采用退偏器;等等。其中,2)~4)均由光学薄膜主导。在具体仪器研制的流程中,仪器的光路设计方案是优先确定的,即1)、5)~7)在仪器设计阶段已经确定,并构成偏振灵敏度调控的基础,而最终的偏振灵敏度取决于光学薄膜的设计及研制水平。

COCTS (HY-1C/D)的低偏振灵敏度调控涉及反射膜、分色膜(截止滤光膜)、增透膜(减反膜)和带通滤光膜等。对仪器偏振灵敏度的调控,除了控制单一光学元件的偏振灵敏度,更要注重不同元件间的偏振补偿,从而实现整体最优的效果。蔡清元等^[16-17]已针对低偏振灵敏度光学薄膜的设计方法和研制控制要点进行论述,以下主要针对不同元件间的偏振互补设计进行论述。

COCTS (HY-1C/D)的光学系统主体继承了COCTS (HY-1A/B)的方案^[18],其中的改动主要是对分色片工作角度进行调整以及后光学透镜组的重新设计,分色片1和分色片2从原来 45° 分别调整为 30° 和 35° ,这主要是基于降低偏振灵敏度的考虑。重新设计的后光学透镜组可降低滤光片会聚光束的光锥角,从而减小波段光谱偏移量以及降低偏振灵敏度。光路前段的反射镜光学系统没有改变,这使得几个主要反射镜的入射角度仍然很大,其中扫描镜工作角度为 45° ,K镜3个面分别工作在 60° 、 30° 和 60° ,这对反射镜的偏振灵敏度控制提出了高的要求。图5为与系统偏振灵敏度关系最密切的几个元件的偏振光路示意图。

表2 COCTS (HY-1C)带通滤光片的偏振灵敏度分析

Table 2 Simulated LPS induced by band-pass filters in COCTS (HY-1C)

Filter	Band	LPS / %			
		Pixel 1	Pixel 2	Pixel 3	Pixel 4
Visible five-band integrated filter	B1	0.10	0.01	0.01	0.10
	B2	0.20	0.16	0.16	0.20
	B3	0.25	0.19	0.19	0.25
	B4	0.19	0.25	0.25	0.19
	B5	0.25	0.31	0.31	0.25
Visible-NIR three-band integrated filter	B6	0.10	0.01	0.01	0.10
	B7	0.20	0.15	0.15	0.20
	B8	0.16	0.12	0.12	0.16

反射镜采用银膜加多层保护层的设计方案,利用多层保护膜层内部的光学干涉原理,实现不同反射镜之间的偏振互补,代表性设计是K镜的第一和第三反射面,这两个反射面的工作状态一样,入射角度均为 60° ,在 $400\sim 450\text{ nm}$ 蓝光波段都很难实现低的偏振灵敏度。但是通过不同的保护层设计,将二者的偏振反射光谱设计成相反的变化趋势,最终实现的光谱偏振

分离如图6所示。在蓝光波段,K镜的第一和第三反射面的光谱偏振分离是相互补偿的。至于其他波段的偏振分离,则通过系统中其他光学元件进行补偿,例如图6中的分色片1的偏振分离与反射镜刚好相反,可以与反射镜形成偏振互补。分色片2前表面的分色膜是由数十个膜层组成的复杂结构,研制难度大,因此以其自身的偏振分离最小为目标进行研制,后表面镀制

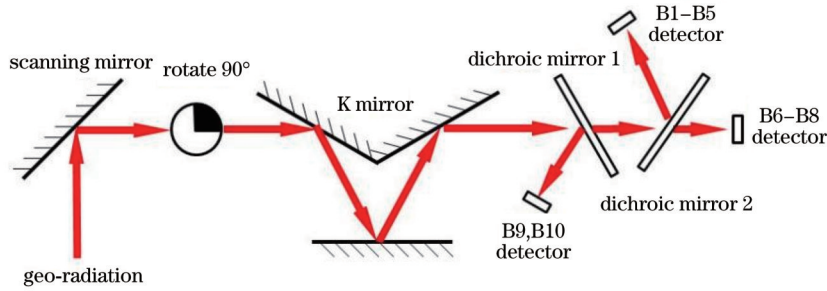


图 5 COCTS (HY-1C/D)的偏振光路示意图

Fig. 5 Simplified lightpath diagram for polarization analysis of COCTS (HY-1C/D)

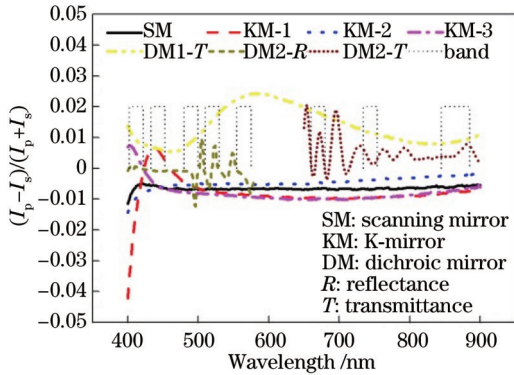


图 6 COCTS (HY-1D)的偏振相关主要光学元件的偏振特性,其中 I_p 和 I_s 分别表示元件对 p 光和 s 光的响应度
Fig. 6 Measured polarization properties of dominant polarization optics, where I_p and I_s are responsibilities of optics to p-polarized light and s-polarized light

B6~B8的增透膜,参与整体偏振调控。

4 水色水温扫描仪响应光谱及偏振灵敏度评估

研制的光学薄膜元件最终在水色水温扫描仪上进行集成安装,并在很大程度上决定了水色水温扫描仪的海洋水色遥感数值量化能力。通过对遥感仪器的响应光谱及偏振灵敏度进行评估,并对比已经获得成功应用的典型海洋水色遥感仪器的性能,以确保水色水温扫描仪在轨获得的海洋水色遥感数据的可靠性和精度。

遥感仪器的响应光谱决定了仪器能否有效避开大气吸收,进而进行高精度的大气校正,获得高质量的遥感数据。图 7 所示为 COCTS (HY-1C/D)的水色波段响应光谱与国际典型水色遥感载荷 MODIS、VIIRS、SeaWiFS 和 OCTS 的对比。可以看到,COCTS (HY-1C/D)的波段光谱矩形度与 2017 年发射的 VIIRS (JPSS1)基本相当。其中,COCTS (HY-1D)的 B7 波段在图 7 所有水色波段中具有最好的矩形度,在最大化有效遥感信号的同时,避开了大气水汽和氧气吸收带,如图 2 所示。

对于水色遥感,仪器的偏振灵敏度至关重要。由于没有标准通用的商用测量仪器,项目组自研了一套偏振灵敏度测量系统,其测量原理为:先利用积分球获

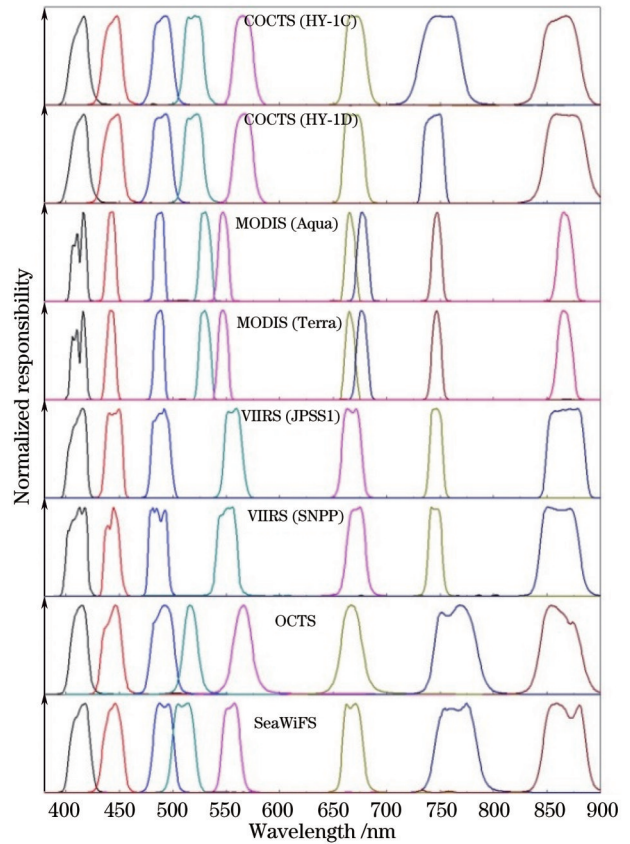


图 7 COCTS (HY-1C/D)与星载水色遥感载荷的水色遥感波段响应光谱对比

Fig. 7 Comparison of normalized response spectra of COCTS (HY-1C/D) and other spaceborne ocean color sensors in ocean color channels

得近似自然光,再经过可 360°转动的线偏振器获得光强稳定、偏振方向可变的偏振光,利用该偏振光进行仪器偏振响应度测量,进而计算得到偏振灵敏度。利用空气对该仪器进行测量精度确认,表明测量不确定性小于 0.2%。此外,以光学薄膜元件的偏振测量结果为基础,利用琼斯矩阵方法对偏振光在仪器中的偏振传递进行仿真,可以获得仪器的偏振灵敏度。以 COCTS (HY-1D)为例,将琼斯矩阵的计算结果与仪器实测结果进行比较,如图 8 所示。二者的结果相互符合,说明仪器的偏振灵敏度较高。以 0°扫描角的情

况为例,将 COCTS (HY-1C/D)的实测偏振灵敏度结果与 MODIS 和 VIIRS 的数据进行对比,结果如表 3 所

示,可以看到,COCTS (HY-1D)具有最好的偏振灵敏度实测结果。

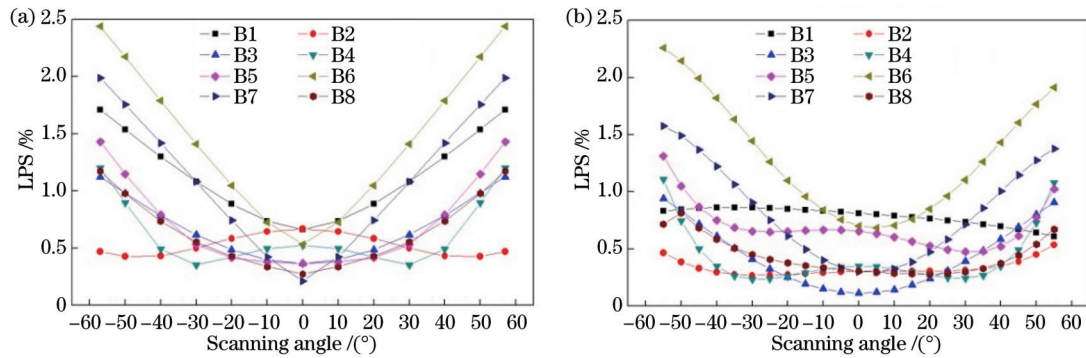


图 8 COCTS (HY-1D) B1~B8波段的偏振灵敏度随着扫描角的变化结果。(a)光学元件的组合计算结果;(b)仪器实测结果
Fig. 8 LPS results of COCTS (HY-1D) in B1-B8 bands with different scanning angles. (a) Calculated results based on measured results of optical elements; (b) measured results of COCTS

表 3 COCTS (HY-1C/D)与 MODIS、VIIRS 的偏振灵敏度对比
Table 3 Comparison of LPS among COCTS (HY-1C/D), MODIS, and VIIRS

Band of COCTS (HY-1C/D)	LPS / %					
	COCTS (HY-1C)	COCTS (HY-1D)	MODIS (Terra)	MODIS (Aqua)	VIIRS (SNPP)	VIIRS (JPSS-1)
B1 (412 nm)	1.95	0.81	4.47	4.00	1.79	5.66
B2 (443 nm)	1.37	0.29	2.78	1.84	1.53	3.94
B3 (490 nm)	0.41	0.25	1.01	0.54	0.82	2.68
B4 (520 nm)	0.19	0.26	1.12	0.70	—	—
B5 (565 nm)	0.31	0.59	0.82	1.39	1.16	4.18
B6 (670 nm)	0.94	0.97	1.41	0.50	0.84	1.79
	—	—	1.76	0.43	—	—
B7 (750/744 nm)	0.44	0.54	1.20	0.41	0.94	0.79
B8 (865 nm)	0.27	0.33	0.99	1.77	0.28	0.32

5 在轨测试及水色产品质量验证

水色遥感是量化遥感的典型代表,遥感仪器的最终性能和遥感能力需要高可靠性、高精度的量化数据来体现。对于遥感仪器,衡量数据量化水平的遥感仪器参数有很多,其中与光学薄膜相关的参数主要有

典型辐亮度信噪比(SNR)、辐射校准精度(RCE)、非均匀性校正精度(NUCE)等。COCTS (HY-1C/D)发射后,在轨工作正常,项目组组织了在轨测试,获得两套仪器水色遥感波段的在轨性能参数,部分参数如表 4 所示。各项性能指标均满足任务书要求,保证了水色水温扫描仪具有精确获取水色遥感信息的能力。

表 4 COCTS (HY-1C/D)的在轨性能测试结果
Table 4 Characteristics of COCTS (HY-1C/D) based on satellite on-orbit test

Band	Typical radiance / (mW·cm ⁻² ·μm ⁻¹ ·sr ⁻¹)	COCTS (HY-1C)			COCTS (HY-1D)		
		SNR	RCE / %	NUCE / %	SNR	RCE / %	NUCE / %
B1	9.10	515	2.39	0.14	847	1.50	0.25
B2	8.41	767	2.55	0.14	1130	2.84	0.55
B3	6.56	668	2.81	0.28	1243	1.99	0.16
B4	5.46	650	2.41	0.16	1394	3.27	0.21
B5	4.57	637	2.41	0.14	891	3.03	0.68
B6	2.46	550	2.51	0.18	452	3.33	0.26
B7	1.61	569	3.28	0.24	534	1.68	0.08
B8	1.09	424	5.54	0.18	615	4.58	0.25

仪器的性能是保证遥感数据可靠准确的基础,在实际应用中,需要将遥感数据转化成国民经济主战场以及国家重大需求等所需要的产品信息。COCTS 的水色遥感主要应用于对叶绿素质量浓度、悬浮泥沙质量浓度和可溶性有机物等水色要素的定量化探测,用于支持水生产品经济发展。2018 年 9 月,海洋一号 C 卫星发射,测试正常后交付用户单位使用。用户单位对 COCTS (HY-1C) 的遥感数据进行全球海洋叶绿素分布的精确反演,获得与 MODIS 和 VIIRS 高度一致的叶绿素分布,表明 COCTS (HY-1C) 具有令人满意的全球叶绿素质量浓度观测能力^[19]。2020 年 6 月,海洋一号 D 卫星发射成功,与 C 卫星形成上、下午卫星网

络。该卫星网络具备了每天两图的全球覆盖能力,其水色遥感能力也得到了极大提升。对 COCTS (HY-1C/D) 性能及水色数据一致性进行测试,获得 2020 年 9 月 7—14 日全球海洋的叶绿素质量浓度分布,并与同期 MODIS 和 VIIRS 的数据进行比对^[20],如图 9 所示。可以看到:COCTS (HY-1C/D) 获得的两幅全球叶绿素质量浓度分布高度一致;在定量化数值上,与国际公认的水色遥感载荷 MODIS 获得的叶绿素质量浓度分布具有相似的结果。这些结果充分表明 COCTS (HY-1C/D) 具备了高性能高定量化的水色遥感能力,具备了遥感数据业务生产能力,也充分说明仪器所采用的光学薄膜技术的适用性和先进性。

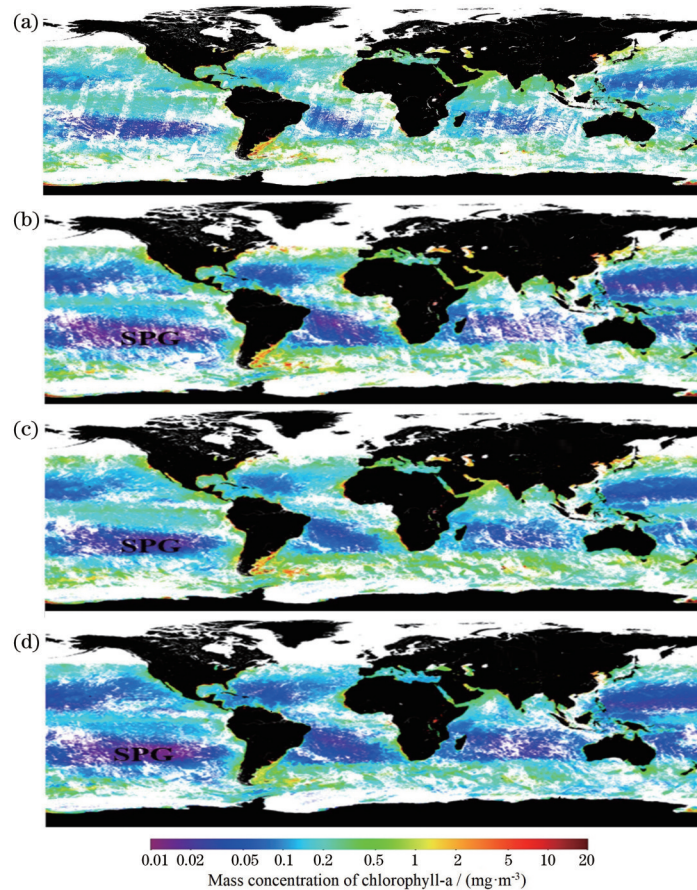


图 9 星载水色遥感载荷获取的全球叶绿素分布。(a)COCTS (HY-1C);(b)COCTS (HY-1D);(c)MODIS (Aqua);(d)VIIRS (SNPP)

Fig. 9 Global chlorophyll-a mass concentration from spaceborne ocean color sensors. (a) COCTS (HY-1C); (b) COCTS (HY-1D); (c) MODIS (Aqua); (d) VIIRS (SNPP)

6 结 论

海洋水色的定量化遥感需要进行精确的大气校正,其要求遥感仪器探测谱段避开大气吸收,同时对大气散射引起的偏振模式变化不敏感,这些性能需要借助光学薄膜技术来实现。单片多波段集成滤光片的研制技术可以有效减弱杂散光和通道间串扰光,子通道滤光膜的研制需要充分考虑光束的角度分布对光谱以及偏振特性的影响,低温溅射沉积工艺可以优化集成

滤光片的性能,提升其可靠性。对于遥感仪器的偏振灵敏度控制,除了注重光学薄膜元件的偏振调控,更要注重不同元件的偏振互补特性的设计。基于光学薄膜技术的研究及应用,COCTS (HY-1C/D) 获得与主流水色遥感载荷 MODIS 和 VIIRS 性能相当的仪器响应光谱,在偏振灵敏度控制上则具有更优的实测性能,满足了高质量定量化水色遥感的性能需求。COCTS (HY-1C/D) 获得的全球海洋叶绿素质量浓度分布相互一致,其数据质量与 MODIS 和 VIIRS 相

当,可满足国内外对海洋水色遥感信息的定量化要求。

参 考 文 献

- [1] Gordon H R, Wang M H. Surface-roughness considerations for atmospheric correction of ocean color sensors II : error in the retrieved water-leaving radiance[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(21): 4261-4267.
- [2] 潘德炉, 李淑菁. 卫星海洋水色遥感信息特征量的研究[J]. *遥感学报*, 1998, 2(1): 26-31.
Pan D L, Li S J. A study on the signal characteristic scale of Satellite Ocean color remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(1): 26-31.
- [3] Chou M D, Chan P K, Wang M H. Aerosol radiative forcing derived from SeaWiFS-retrieved aerosol optical properties[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 748-757.
- [4] Esaias W E, Abbott M R, Barton I, et al. An overview of MODIS capabilities for ocean science observations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4): 1250-1265.
- [5] Hlaing S, Harmel T, Gilerson A, et al. Evaluation of the VIIRS ocean color monitoring performance in coastal regions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139: 398-414.
- [6] Cui T W, Zhang J, Groom S, et al. Validation of MERIS ocean-color products in the Bohai Sea: a case study for turbid coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2326-2336.
- [7] Shimada M, Oaku H, Mitomi Y, et al. Calibration of the ocean color and temperature scanner[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1484-1495.
- [8] Wynne T T, Stumpf R P, Briggs T O. Comparing MODIS and MERIS spectral shapes for cyanobacterial bloom detection[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(19): 6668-6678.
- [9] 张景华, 张焱, 石志广, 等. 基于偏振特征的水面饱和耀光抑制技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(24): 2401009.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G, et al. Suppression technology for saturated water surface glint based on polarization characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(24): 2401009.
- [10] 刘卓, 杨晓京, 谢启明, 等. 硫系玻璃基底红外光学薄膜的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(21): 2100003.
Liu Z, Yang X J, Xie Q M, et al. Research progress of infrared optical thin films on chalcogenide glass substrates[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(21): 2100003.
- [11] 段微波, 刘保剑, 庄秋慧, 等. 应用于空间遥感系统的红外光学薄膜研究进展[J]. *光子学报*, 2022, 51(9): 0951601.
Duan W B, Liu B J, Zhuang Q H, et al. Research progress of infrared thin film coatings applied in space remote sensing systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(9): 0951601.
- [12] 蒋兴伟, 牛生丽, 唐军武, 等. SeaWiFS 与 HY-1 卫星 COCTS 的系统交叉辐射校正[J]. *遥感学报*, 2005, 9(6): 680-687.
Jiang X W, Niu S L, Tang J W, et al. The system cross-calibration between SeaWiFS and HY-1 COCTS[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(6): 680-687.
- [13] 何贤强, 潘德炉, 尹中林, 等. 水色遥感卫星姿态对瑞利散射计算的影响[J]. *遥感学报*, 2005, 9(3): 242-246.
He X Q, Pan D L, Yin Z L, et al. Effects of satellite attitude on the Rayleigh scattering calculation[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 242-246.
- [14] McIntire J, Young J B, Moyer D, et al. Measured polarized spectral responsivity of JPSS J1 VIIRS using the NIST T-SIRCUS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9607: 96072D.
- [15] Maymon P W, Chipman R A. Linear polarization sensitivity specifications for spaceborne instruments[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1746: 148-156.
- [16] 蔡清元, 蒋林, 李耀鹏, 等. 光学薄膜与系统的偏振控制[J]. *红外*, 2018, 39(12): 1-7.
Cai Q Y, Jiang L, Li Y P, et al. Polarization control of optical films and systems[J]. *Infrared*, 2018, 39(12): 1-7.
- [17] Cai Q Y, Luo H H, Zheng Y X, et al. Design of non-polarizing cut-off filters based on dielectric-metal-dielectric stacks[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 19163-19172.
- [18] Feng Q, Zhang S M, Zheng L H, et al. Design of Chinese ocean color and temperature scanner onboard the HY-1 satellite and evaluation of its on-orbit performance[J]. *Spacecraft Engineering*, 2003, 12(3): 47-55.
冯旗, 张恕明, 郑列华, 等. 中国海洋一号卫星水色扫描仪设计与在轨性能评估[J]. *航天器工程*, 2003, 12(3): 47-55.
- [19] Ye X M, Liu J Q, Lin M S, et al. Global Ocean chlorophyll-a concentrations derived from COCTS onboard the HY-1C satellite and their preliminary evaluation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(12): 9914-9926.
- [20] 史鑫皓, 陈树果, 林明森, 等. 中国海洋水色卫星传感器 COCTS-HY1D 产品初步评价 [J]. *遥感学报*, 2023, 27(4): 943-952.
Shi X H, Chen S G, Lin M S, et al. The preliminary performance of the COCTS onboard HY-1D satellite in the global ocean[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(4): 943-952.

Optical Thin Film Technology for Quantitative Remote Sensing on Ocean Color

Cai Qingyuan¹, Feng Qi¹, Chen Gang¹, Song Qingjun², Huang Xiaoxian¹, Yu Tianyan¹,
Ding Jing², Li Yaopeng¹, Liu Baojian¹, Liu Jianqiang², Duan Weibo^{1*}, Liu Dingquan^{1**}

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

²National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

Abstract

Objective Precisely fabricated optical film elements of high performance are the basis for quantitative remote sensing instruments. For the Chinese ocean color and temperature scanner onboard HY-1C/D satellites [COCTS (HY-1C/D)], excellent characteristics such as precisely positioned spectral response, low stray light coefficient, and low polarization

sensitivity are needed to reduce the effects of atmospheric absorption and scattering. The realization of these targets ultimately requires the development of specific optical films, such as multichannel integrated filters and optical films with low polarization sensitivity.

Methods Based on the optical thin-film characteristic matrix theory, we employ commercial software to calculate the spectral and polarization properties of band-pass filters at different incidence angles of light. Additionally, we also study the spectral and polarization effects caused by the spatial angular frequency distribution of light and simulate the spectral and polarization properties of converging beams in COCTS (HY-1C/D) through an integration method. Dual ion beam sputtering is adopted to prepare multichannel integrated band-pass filters on a single substrate at 90 °C to ensure reliability and spectral performance. The Jones matrix method is utilized to analyze the effect of different optical elements on the polarization sensitivity of the system, and film designs with special polarization tuning are finished for the key optical elements. The polarization sensitivity of the system is regulated and reduced by the mutual compensation of polarization characteristics among different optical elements.

Results and Discussions The integrated filters are well prepared as shown in Fig. 1, the simulated spectral distribution of the filter in the converging beam matches very well with the measured results as shown in Fig. 3, and after a variety of environmental simulations and reliability tests, the spectra remain consistent as shown in Fig. 4. The polarization characteristic analysis of the filters ensures that the polarization sensitivity of all the filters is less than 0.31% as shown in Table 2. The sound polarization design and mutual compensation of optical films ensure that the system polarization sensitivity is effectively controlled. Equipped with well-coated optical elements, COCTS (HY-1C/D) exhibits excellent relative spectral response and low polarization sensitivity when compared with the approved space-borne radiance sensors for ocean color detection, such as MODIS and VIIRS. For COCTS (HY-1D) launched in June 2020, the B7 band for atmospheric correction still has a bandwidth of 20 nm, without overlapping with atmospheric water vapor or oxygen absorption bands as shown in Fig. 2. The measured average polarization sensitivity is less than 1% at the scanning angle of 0° (Fig. 8 and Table 3). The chlorophyll-a mass concentrations of global ocean from COCTS (HY-1C/D) exhibit relatively high consistency with MODIS and VIIRS products, which indicates the satisfactory capability of COCTS (HY-1C/D) for quantitative remote sensing as shown in Fig. 9.

Conclusions Quantitative space remote sensing requires remote sensing instruments with accurate detection bands and low polarization sensitivity to reduce the effects of atmospheric absorption and scattering, and optical thin films play a key role. The technology of multichannel integrated band-pass filters on the single substrate can effectively reduce stray light and inter-channel crosstalk light, thus becoming the development direction of band-pass filters for quantitative remote sensing. To obtain the precise spectral response of the instrument, the influence of beam angle distribution on the spectral properties of band-pass filters should be fully considered in the design and fabrication processes. To reduce the polarization sensitivity of the instrument based on optical coating, we need to pay attention to the polarization regulation of each optical thin film and the complementary polarization characteristics of different components. The application of advanced optical thin film technology in COCTS (HY-1C/D) guarantees high-quality quantitative ocean color remote sensing and imaging, and the products of COCTS (HY-1C/D) show satisfactory performance.

Key words oceanic optics; Chinese ocean color and temperature scanner; quantitative remote sensing; optical film; multichannel integrated band-pass filter; polarization sensitivity