

海洋水色成像光谱仪实验系统性能评价

李晓宁

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 本文对海洋水色成像光谱仪实验系统的光谱性能、辐射性能、空间分辨率及数据处理等方面进行了研究并做出了相应的实验评价。

关键词 海洋水色成像仪; 成像光谱; 光谱分辨率; 辐射定标; 空间分辨率; 彩色编码

1 系统描述

以面阵 CCD 成像光谱方式工作的海洋水色仪, 其光学系统由望远成像和光谱仪两部分组成。地面景物由前置光学望远系统成像后, 经狭缝视场光阑由色散系统分光后成像到 CCD 上, 平行于狭缝的一维探测元提供地面一条线各像元的空间信息, 垂直于狭缝的一维探测元提供光谱信息, 通过飞行器垂直于狭缝方向的运动给出空间的另一维(即 CCD 的连续多场信息)。

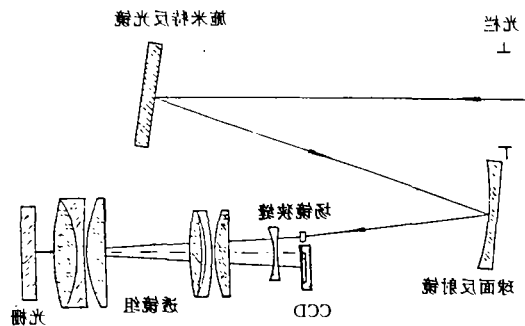


图1 海洋水色成像光谱仪光路图

仪器中安装的是美国仙童公司的 CCD222 面阵探测器, 380×488 象元, 象元中心距离为 $30\mu\text{m}$ (水平) 和 $18\mu\text{m}$ (垂直), 垂直方向对应于空间位置, 水平方向对应光谱谱段。由 CCD 输出的是全视频信号, 经电学系统放大、A/D 变换、编辑(将空间方向 4 个 CCD 象元及光谱方向 4 个 CCD 象元合并输出)后, 得到要记录和显示的信息, 这信息一方面由实时显示单元进行实时

显示,同时由记录单元完成记录工作。记录单元由暂存体和数据磁带机组成,存入数据流磁带机的信息,可由计算机控制以文件的形式取出进行各种处理和运算。

2 光谱分辨率

首先由单色仪和实时显示系统标定了中心波长和光谱采样间隔,然后研究海色仪的光谱分辨率。前置望远系统只是用于成像,对光谱分辨没有影响。经过分析,光谱分辨率最主要由入射狭缝宽度、光谱采样间隔和离焦三项因素决定。

首先考虑光学系统是理想的,即不考虑色散光学系统的离焦,只研究入射狭缝与光谱采样间隔的作用。

设 λ' 为探测器焦平面上的光谱坐标, λ 为入射光波长,第 1 谱带的中心波长为 λ_1 。设入射狭缝透过函数为 $A(X_1)=A(\lambda' - \lambda)$; $x_1=\lambda' - \lambda$,探测元响应函数 $D(x_2)=D(\lambda' - \lambda_1)$; $x_2=\lambda' - \lambda_1$,设 $E(\lambda)$ 为入射光光谱辐射功率分布,通过海色仪分光谱成像时,波长为 λ 的狭缝单色像在探测器焦平面上的光能量分布为 $A(\lambda' - \lambda) \cdot E(\lambda)$,探测器焦平面上的光能量分布为狭缝各单色像的叠加,第 i 谱带的探测器象元函数为 $D(\lambda' - \lambda_i)$,则 CCD 各光谱带的输出函数可表示为:

$$\begin{aligned} P(\lambda_i) &= \int D(\lambda' - \lambda_i) \cdot \left[\int^A (\lambda' - \lambda) \cdot E(\lambda) \cdot d\lambda \right] \cdot d\lambda' \\ &= \int E(\lambda) \cdot \left[\int D(\lambda' - \lambda_i) \cdot A(\lambda' - \lambda) \cdot d\lambda' \right] \cdot d\lambda \end{aligned}$$

定义狭缝函数为:

$$\begin{aligned} S(\lambda - \lambda_i) &= \int D(\lambda' - \lambda_i) \cdot A(\lambda' - \lambda) \cdot d\lambda' \\ S(\lambda - \lambda_i) &= D(x_2) \cdot A(x_2 + \lambda_1 - \lambda) \cdot dx_2 \\ &= D(\lambda_1 - \lambda) \cdot A(\lambda_1 - \lambda) \\ &= A(\lambda - \lambda_1) \cdot D(\lambda - \lambda_1) \end{aligned}$$

即为入射狭缝函数与探测器象元函数的相关。它表示波长为 λ 的单色辐射在中心波长为 λ_1 的谱带上的相对光谱透过率,即表示光谱仪的光谱通带特性。

当入射狭缝函数与探测器象元函数具有对称形式时,上述结果可化为卷积:

$$P(\lambda_i) = E(\lambda_i) * A(\lambda_i) * D(\lambda_i)$$

若设入射狭缝函数和象元函数为矩形门函数,则狭缝函数 $S(x)$ 为梯形分布,其半值宽度由入射狭缝函数和象元函数中较宽的决定的。

当考虑色散系统离焦时,光谱输出函数计算中还应考虑光学系统线扩散函数卷积项:

$$P(\lambda_i) = E(\lambda_i) * A(\lambda_i) * LSF_0(\lambda_i) * D(\lambda_i)$$

则定义仪器光谱函数为:

$$C(\lambda_i) = A(\lambda_i) * D(\lambda_i) * LSF_0(\lambda_i) = S(\lambda_i) * LSF_0(\lambda_i)$$

当离焦较大时其形状由梯形过渡到高斯型,由上式得:

$$P(\lambda_i) = E(\lambda_i) * C(\lambda_i)$$

若输入 $Y(\lambda)$ 为一波长为 λ_0 的单色光 $\delta(\lambda - \lambda_0)$,则有:

$$P(\lambda_i, \lambda_0) = \int \delta(\lambda - \lambda_0) \cdot C(\lambda - \lambda_i) \cdot d\lambda = C(\lambda_0 - \lambda_i)$$

即某一谱段的光谱函数为仪器这个谱段对不同波长入射单色光的输出值。

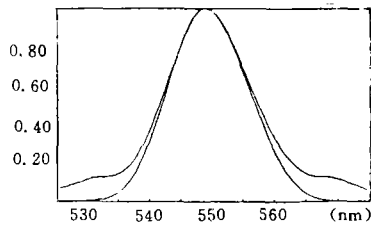


图2 仪器光谱函数

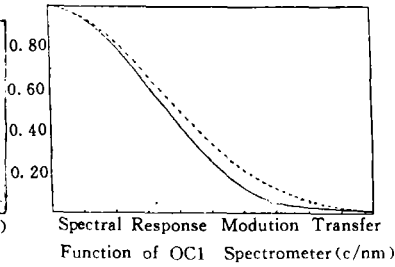


图3 光谱调制传递函数

实验中用溴钨灯、单色仪、CA5300 图像采集卡、及 BF-386 微机组成的系统对几个有代表性的谱带的光谱函数进行了测量。得到的第 49 谱带结果如图 2 所示。

对光谱输出函数付氏变换,则有:

$$FT^{-1}[P(\lambda)] = FT^{-1}[E(\lambda)] \cdot FT^{-1}[C(\lambda)]$$

$FT^{-1}[E(\lambda)]$ 和 $FT^{-1}[P(\lambda)]$ 分别为海色仪输入和输出光谱曲线的空间频谱, $FT^{-1}[C(\lambda)]$ 则为仪器在光谱维对不同空间频率的响应,它定量地说明了海色仪对光谱曲线变化的响应程度,代表了谱带分辨能力。定义光谱传递函数 $SFT(f) = FT^{-1}[C(\lambda)]$

则海色仪 光谱响应调制传递函数 SMFT(f)为:

$$SMET(f) = \sqrt{re[STF(F)]^2 + im[STF(f)]^2}$$

当 f 大于某值 f_m 时, $SMTF(f)$ 下必降到很小,超过 f_m 的光谱曲线的高频成份变得不可分辨,则 $\Delta\lambda = 1/f_m$ 即为光谱分辨率极限。

对一波为 λ_0 的单色光 $E(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_0)$,有:

$$SMET(f) = FT^{-1}[C(\lambda)] = FT^{-1}[P(\lambda_0 - \lambda, \lambda_0)]$$

即光谱传递函数可由仪器对一波长为 λ_0 的单色光的输出值的付氏变换得到。

实验中用汞灯 546.1nm 的特征发射谱线测定海色仪的光谱调制传递函数。得到的结果如图 3 所示,若当调制度小于 10% 时不可分辨,则海色仪的光谱分辨率极限为 7.6nm。

3 辐射定标

海色仪在空间对海洋的测量,反映了海洋表面的光谱的光谱辐射特性,但海色仪记录的输出数据,并不直接是光谱辐射量值,需要进行辐射定标来确定海色仪的输出信号数据与光谱辐射量值之间的关系。

海色仪第 i 光谱带第 j 个像的输出信号响应可表示为:

$$X_i(\lambda) = K_N(\alpha_i) \cdot (\cos^2 \alpha_i / 4N^2) [E_D(\lambda_i) \rho_i(\lambda_i) \tau_a(\lambda_i) + E_f(\lambda_i) + \pi L_A(\lambda_i)] \tau_0(\lambda_i) r_i(\lambda_i) g_i(\lambda_i) \Delta\lambda$$

式中 N 为光学系统 F 数; $N = f' / D$; $E_D(\lambda_i)$ 为太阳直射光和天空光辐射在地面上的光谱辐照度; $\rho_i(\lambda_i)$ 为地面目标第 j 元的反射比;或 $L_i = 1/\pi E_D(\lambda_i) \rho_i \lambda_i$ 地面目标第 j 元的光谱辐亮度; $\tau_a(\lambda_i)$ 大气的透过率; $L_A(\lambda_i)$ 大气程辐射度; $\tau_0(\lambda_i)$ 所有光学系统的透过率(包括光栅效率); α_i 光学系统光轴与第 i 个谱带第 j 个像元的夹角; $\Delta\lambda$ 光谱带宽。设面阵探测器第 j 个像元、第 i 个谱

元的光谱响应率为 $R_i(\lambda_i)$, 电学系统的增益为 $g_i(\lambda_i)$; 系统由于各种因素引起的仪器内部杂散光在像谱平面上产生的附加辐照度 $E_i(\lambda_i)$ 、渐晕参量 $K_N(\alpha_i)$ 。

将上式定义为海色仪的成像辐射响应函数。海色仪最终提供给用户的光谱图像数据是海洋表面光谱辐亮度 $L_i(\lambda_i)$ 或 $\rho_i(\lambda_i)$ 分布图。通过海洋水色成像光谱仪测得的输出信号数据 $X_i(x_i)$, 若获得地同目标(海洋表面)的光谱特性 $\rho_i(\lambda)$ 或 $L_i(\lambda_i) = 1/\pi E_D(\lambda_i) \rho_i \lambda_i$, 则需要从上面辐射响应函数反演而得。一般都采用光谱辐射定标的方法来确定光谱辐射响应函数。

$K_N(\alpha_i)$ 、 $\cos\alpha_i$ 、 N 、 $\tau_o(\lambda_i)$ 、 $R_i(\lambda_i)$ 、 $g_i(\lambda_i)$ 、 $\Delta\lambda$, 都是同海色仪的仪器有关的参数, 定义仪器函数 $S_i(\lambda_i)$

$$S_i(\lambda) = K_N(\alpha_i) \cdot (\cos^2\alpha_i/4N^2)\tau_o(\lambda)R_i(\lambda)g_i(\lambda)\Delta\lambda$$

杂散光引起的附加照度 $E_i(\lambda_i)$ 通过仪器上消除杂光的措施减少, 利用地面标准辐射实验场进行的在轨辐射定标可以进行大气修正, 此外还需要用大气模型进行理论计算来补充。

海色仪需要在搭载卫星前对仪器系统进行辐射定标。这时由于标准辐射源是距离海色仪不远, 所以相当于没有经过大气, 即 $\tau_A(\lambda_i) = 1; I_A(\lambda_i) = 0$, 辐射响应函数中未包括大气参数: $x_i(\lambda_i) = S_i(\lambda_i)L'_i(\lambda_i)$, 这时 $L'_i(\lambda_i)$ 可由实验室的标准辐亮度辐射源获得。

在定标实验中, 海色仪的输出信号由图像卡采集。实验中用的是美国 SRL-HL397 光谱辐亮度标准灯。从 $0.3-1.1\mu\text{m}$ 光谱范围是由美国 NBS 标定的, 其色温为 2846K。标定时加置滤光片来消除光栅的二级光谱, 用该滤光片的光谱透过率 $\tau_F(\lambda)$ 修正了辐亮度标准灯的数据, 即: $L'(\lambda) = L_A(\lambda)\tau_F(\lambda)$, 这样对海色仪光谱范围 $0.55-1.1\mu\text{m}$ 进行了辐射定标。

由于美国的标准灯色温较低, 亮度也较暗, 在 $0.4-0.55\mu\text{m}$ 光谱范围海色仪响应输出很弱, 无法标定。这一波段的光谱标定是这样进行的。用标准灯标定小积分球光源, 色温大约为 3000K, 然后用这个光源定标海色仪。这样, 获得了光谱范围 $0.4-1.1\mu\text{m}$ 对探测器部分像元的光谱辐射定标。结果如图 4 所示。

最后又利用大积分球, 进行了探测器所有探测元光谱和空间均匀性测量。据此数据便可得

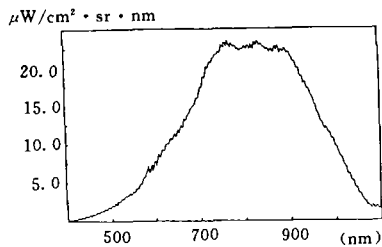


图 4 光谱辐射响应函数(0.4-1.1 μm)

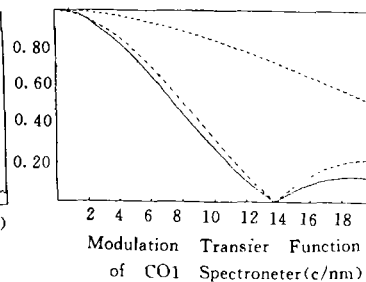


图 5 系统传递函数

到所有探测元的光谱辐射定标。在整个光谱范围内, 空间不均匀度小于 5%。

4 空间分辨率

海色仪可被近似描述为线性空间不变系统, 设光学系统、探测器、电系统的点扩散函数分别为 $PSF_o(x, y)$ 、 $PSF_d(x, y)$ 、 $PSF_e(x, y)$, 系统总的点扩散函数 $PSF(x, y)$ 为三者的卷积: PSF

$(x, y) = \text{PSF}_o(x, y) * \text{PSF}_d(x, y) * \text{PSF}_e(x, y)$, 则系统的传递函数 $\text{TF}(u, v) = \text{OTF}(u, v) \cdot \text{DTF}(u, v) \cdot \text{ETF}(u, v)$ 为光学系统、探测器、电系统传递函数的乘积。

设系统点扩散函数 $\text{PSF}(x, y)$ 可分解为垂直轨道方向和沿轨道方向线扩散函数的乘积^[1]。 $\text{PSF}(x, y) = \text{LSF}_x(x) \cdot \text{LSF}_y(y)$ 则系统的传递函数 $\text{TF}(u, v) = \text{TF}_x(u) \cdot \text{TF}_y(v)$ 为垂直轨道方向和沿轨道方向传递函数的乘积。

前置光学系统为反射式 schmidt 望远镜, 摄谱仪部分采用复消色差的 Littrow 光栅系统的, 其总的调制传递函数可由高斯曲线的似:

$$T(v) \exp[-(v \cdot a)^2] \quad a = 0.0372 \text{mm/circle}.$$

设一入射光在 CCD 像面上的亮度分布为单频率的正弦光栅: $E(x, y) = 1 + \cos[2\pi(u_0x + v_0y)]$ 。若 CCD 一个感光象元沿 x 方向宽度为 a , y 方向为 b , x 方向象元间中心距为 c , y 方向象元间中心距为 d , 若设 CCD 单象元响应为一矩形窗函数: $R(x, y) = \text{Rect}(x/a) \cdot \text{Rect}(y/b)$, 则中心位于 $x=mc, y=nd$ 的第 (m, n) 个象元的输出值为:

$$\begin{aligned} X(m, n) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(x, y) \cdot \text{Rect}[x - mc/a] \cdot \text{Rect}[(y - nd)/b] \cdot dx \cdot dy \\ &= \int_{y=nd-b/2}^{y=nd+b/2} \left[1 + \cos[2\pi(u_0x + v_0x)] \right] \cdot dx \cdot dy \\ &= a \cdot b \cdot \{1 + \cos[2\pi(u_0kd + v_0x)] \cdot \text{sinc}(u_0a) \cdot \text{sinc}(v_0b)\} \\ &= a \cdot b \cdot E(x) \cdot \text{sinc}(u_0a) \cdot \text{sinc}(v_0b) \end{aligned}$$

其中的 $\text{sinc}(v_0a) \cdot \text{sinc}(v_0b)$ 反映了 CCD 光敏元对景物的积分作用, 故可定义为积分调制传递函数。

$$\begin{aligned} D(u, v) &= \text{sinc}(va) \cdot \text{sinc}(vb) \\ &= \sin(\pi va) / (\pi va) \cdot \sin(\pi vb) / (\pi vb) \end{aligned}$$

上式可解为: $D(u, v) = D(u) \cdot D(v)$ 其中 $D(u) = \sin(\pi va) / (\pi va)$; $D(v) = \sin(\pi vb) / (\pi vb)$ 分别为平行 wv 方向和垂直狭缝方向的探测器积分传函。

海色仪中所用的 CCD222 在平行狭缝方向 $a = 0.018 \text{mm}$; 四个象元合并后 $a = 0.072 \text{mm}$; 垂直狭缝方向 $b = 0.030 \times 4 = 0.12 \text{mm}$ 。在各自的 Nyquist 频率上的调制传函都为:

$$\sin(\pi/2) / (\pi/2) = 0.637.$$

此外, 在电荷沿器件转移时, 还存在转移损失效应, 由此引起的调制传递函数的退化^[2]:

$$A_{out}/A_{in} = \exp[-n\epsilon(1 - \cos(2\pi f/f_c))])$$

ϵ 为单次转移的损失率, n 为转移次数, f_c 为时钟频率, f 为与信号空间频率相对应的时间频率。取 $\epsilon = 0.0001$; $n = (380 + 488) / 2$; 系统 $f_c = 7,159 \text{MHz}$; $f_{NV} = f_c / 2$; 此时 $A_{out}/A_{in} = 0.958$ 。由此可见, 转移损失效应引起的调制传递函数的退化很小。CCD 的调制传递函数主要由积分调制传递函数决定。

由 CCD 输出的脉冲信号被电学系统前置放大后经滤波电路化为连续量, 再经 A/D 转换重新采样后变为数字量输出, 电学系统的传递函数主要由滤波电路的频带特性和 A/D 转换的采样频率决定, 滤波电路的带宽为 3MHz , 对应 CCD 像面上的空间频率不 13.99c/mm , 实时采集系统 A/D 转换的采样频率为 7MHz , 对应 CCD 像面上的空间频率为 27.97c/mm , CA53 图象采集卡 A/D 转换的采样频率为 10MHz , 对应 CCD 像面上的空间频率为 39.98c/mm , 滤波电路的带宽和 A/D 转换频率的一半都高于 5c/mm 左右的系统 Nyquist 频率, 因此可认为电

学部分对系统传函数的影响较小。

若 CCD 的采样周期与飞行速度不匹配,将发生采样过度或不足,设象元沿 x 方向宽度为 a , y 方向为 b ,速度为 v_0 , B_s 为 b 在地面上的投影,像面上的像的移动速度为 v_i 。

若 T_s 为 CCD 采样周期,则定义“推扫”重叠率为象元在地面上的投影线度与飞行器在一个采样周期内移动的距离之比^[8]:

$$\xi = B_s/v_0/T_s = b/v_i/T_s$$

由此引起的调制传递函数退化为:

$$R(v) = [\sin(\pi \cdot b/\xi \cdot v)/(\pi \cdot b/\xi \cdot v)]^2$$

当推扫重叠率 $\xi = \infty$ 时,即飞行器静止不动,海色仪凝视地面时, $R(v) = 1$, CCD 传函将不退化,但这样没有实际意义。当 $\xi = 1$ 时,即地面象元刚好邻接, $R(v) = [D(v)]^2$,即为积分传函的平方,当 v 增大时 CCD 传函将有较大退化, $v = V_{Nv}$ 时, $R(V_{Nv}) = 0.406$ 。因此,为了提高分辨率,应适当地增加推扫重叠率。推扫重叠率对垂直轨道方向没有影响。

此外,大气抖动对传函有较小的影响。

当象面离开焦点时,MTF 将会降低。设离焦可用对具有均匀圆盘的理想图象卷积模型表征,由离焦引起的传递函数退化为^[4]:

$D_0(u) = 2J_1(\alpha\delta u)/(\alpha\delta u)$ $\alpha = \pi/N$ N 为前置光学系统的 f 数; δ 为离焦量。当 δ 较小时可作如下近似: $D_0(u) = 2J_1(\alpha\delta u)/\alpha\delta u = \sin(\alpha\delta u)/\alpha\delta u$

在海色仪中: $\alpha = 1.57$; $u = 5c/mm$ 时。离焦 0.1mm 时,离焦传函 D_0 为 0.90;离焦 0.2mm 时, D_0 为 0.64。

由以上的分析可以看出,海色仪工作中垂直轨道方向和沿轨道方向(即推扫方向)的传递函数是不同的,需分别加以分析。在垂直轨道方向其传函主要由海色仪的光学系统传函和探测器传函决定。在沿轨道方向除了光学系统和探测器传函外,由于推扫将明显降低海色仪的空间分辨率。

由于飞行实验尚未进行,因此只在实验室内测量了海色仪的系统传递函数。本文中以刀口后加置平行光管以模拟无穷远目标对海色仪成像。为保证刀口处光照均匀性,实验中用积分球作为光源。信号经图像卡采集,由微机完成采集控制和数据处理。沿空间维对像微分,得到系统的线扩散函数。再对它进行付氏变换,并对零空间频率进行数据规一化处理,就得到系统的传递函数。系统调制传递函数理论值为 0.637,二者的乘积为 0.596,实测的 MTF 为 0.58。

为了验证刀口法测得 MTF 数据的正确性,实验中还用点源法进行了测量。得到的系统 MTF 与刀口法得到的值基本一致,但由于点源法信号输出较弱,所以测量精确度较低。

为了得到系统的离焦传递函数,使刀口离开平行光管前焦面,由此引起的离焦等价于刀口位置不变而系统发生离焦。测得的离焦曲线与理论计算得到的曲线如图 6 所示。

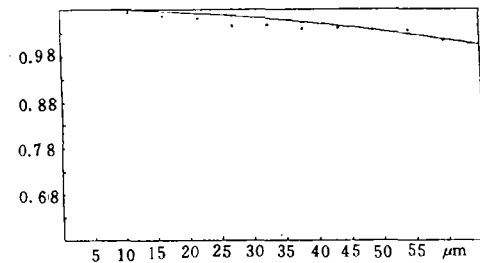


图 6 离焦传递函数

5 光谱图像的真彩色显示

为了综合考察海色仪的光谱质量,同时也作对海色仪数据采集和处理的研究,利用测得的光谱图像进行了真彩色显示。

由图像象元的光谱分布可以根据色度学理论计算出每一象元的颜色值,在 1931 CIE XYZ 标准色度学系统中,标准观察者光谱三刺激值为 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 。光谱功率分布为 $p(\lambda)$ 的颜色光在此系统中的三刺激值为:

$$X = K \cdot \int P(\lambda) \cdot x(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Y = K \cdot \int P(\lambda) \cdot y(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Z = K \cdot \int P(\lambda) \cdot z(\lambda) \cdot d\lambda$$

原则上可以在 R、G、B 分别可控的彩色监视器上再现图像每个象元的真实颜色。但由于显示系统视频存储器及颜色属性控制器存储量的有限,在一帧图像中可以同时显示的颜色数受到限制。为了再现整幅彩色图像,对图像颜色统计优化后进行了分区压缩,用颜色编码的方法实现了彩色图像显示,复现效果良好。

图像处理硬件系统包括 CA5300 图像采集卡, BF-386 微机 and 一台彩色监视器。CA5300 采集卡含有四份图像帧存储体,并接受由 PC 主机送出的视频查找表数值。视频查表由三份 (R, G, B) 256 × 3bit 快速存储器构成,对于帧存体中灰度级为 0—255 的白图像,利用图像视频查找表的填写,可以将其 256 个灰级信号转换成 256 种颜色显示。图像的显示颜色可以从 16M (256 × 256 × 256) 种颜色中任选出最多 256 种同时显示,由于图像最多可有 4096 (64 × 64) 种颜色,因此,必须将颜色空间中的图象颜色点优化分类成 256 组或更少,每组的颜色值用一个最佳值代表,使总的颜色复现误差最小。

软件设计的中心思想是将整幅图像颜色优化。分类成 256 组,每组的象元赋以同样的码值 (0—255 间的一个值),颜色用优化得到的最佳值与此码值对应,显示时,将每一象元的彩色码值代替其灰度值写入帧存体,并用与码值相对应的 256 组 (R_i, G_i, B_i) 颜色代替表值填写图象彩色视找表,完成彩色编码图像显示。

由于 CIE1931-XYZ 色度图的不均匀性给图像颜色的优化分区和色差计算带来不便,因此将所有颜色值转化到“CIE1976 L*U*V* 均匀颜色空间,”L*U*V* 系统。

与 XYZ 系统的转换方程为:

$$L^* = 116 \cdot (Y/Y_0)^{1/8} - 16$$

$$u^* = 13 \cdot L^* \cdot (u' - u_0')$$

$$v^* = 13 \cdot L^* \cdot (v' - v_0')$$

$$u' = 4X/(X + 15Y + 3Z)$$

$$v' = 9Y/(X + 15Y + 3Z)$$

U_{ii}' V_{ii} 为 D65 的色度坐标。由此得到图象每个象元的颜色值 (L_{ii}, U_{ii}, V_{ii})。

计算色差的公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}$$

本文中所提出的优化编码方法为分别按 U、V、L 逐维优化分区,在分区的同时进行彩色

编码。首先在 $L \cdot U \cdot V$ 空间中将图像颜色点沿 U 方向优化为 8 个区域,得到界面 S_0, S_1, \dots, S_8 及代表值 u_1, u_2, \dots, u_8 后,将数据按 $[S_0, S_1], [S_1, S_2], \dots, [S_7, S_8]$ 区间分为 8 组,分别对每一组数据按上述同样方法沿 V 方向分为 8 组,共得到 64 组数据及 v_1, v_2, \dots, v_{64} ,再将 64 组数据沿 L 方向优化在 4 个区域,共得到 256 组数据及 L_1, L_2, \dots, L_{256} 。将得到的 256 组 (U_i, V_i, L_i) 由 (6-7) 逆变换到 XYZ 系统:

再将其变换到 RGB 系统:

$$\begin{bmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.065 & -1.384 & -0.476 \\ -0.969 & 1.876 & 0.042 \\ 0.068 & -0.229 & 1.070 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}$$

得到用于显示的 256 组 (R_i, G_i, B_i) 。

彩色编码是与优化分区同时进行的,若一象元 A_{ij} 的颜色点 (U_{ij}, V_{ij}, L_{ij}) 在分区的过程中被分在 U 方向的 l 区域, V 方向的 m 区域, L 方向的 n 区域,则将其编码为:

$$\text{CODE}(A_{ij}) = (n-1) \times 64 + (m-1) \times 8 + (l-1)$$

在彩色图像显示时,将每一象元彩色码值代替其灰度值写入帧存体,并用与码值相对应的 256 组 (R_i, G_i, B_i) 颜色代表值填写图像彩色视找表,实现真彩色图像显示。

6 结 论

本文对海洋水色成像光谱仪实验系统的光谱性能、辐射性能、空间分辨率及数据处理等方面进行了初步的研究和评价。其性能基本上达到了设计要求。

更加完善的研究和测量方法有待于在将来的工作中完成。海色仪的性能需要长期多次测试,在轨机上辐射定标需要在海色仪上安装辐射定标系统,并有待于在将来的飞行实验中进行。此外,在 CCD 性能测试、仪器硬件、数据记录与存贮处理等方面都需要进一步的研究和探索。

参 考 文 献

- [1] Brian L. Markham, The Landsat Sensors' Spatial Responses, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23 (6)
- [2] C. H. 塞甘 M. F. 汤普塞,《电荷转换器件》. 科学出版社
- [3] 堪炎新,张守一, CCD 推扫相机飞行方向 MTF 分析与最佳重迭取样系数选取. 红外研究, 1987, 6: 6401-406

Evaluation of Ocean Color Imaging Spectrometer Experimental System (OCISES) Performance

Li Xiaoning

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

The experimental investigation of spectral and radiation performance, spatial resolution of OCISES are presented in this paper. Imaging spectral data processing by color coding method are discussed.

Key words: Ocean color imager, Spectral resolution, Radiation calibration, Color code.