

文章编号: 1002-1582(2004)06-0665-04

## 锚链式水下多光谱辐射计的设计\*

李彩, 柯天存, 曹文熙, 杨跃忠, 卢桂新, 郭超英, 邓崇仁

(中国科学院南海海洋研究所 LED 实验室, 广东 广州 510301)

**摘 要:** 研发了一种向下光谱辐照度和向上光谱辐亮度的锚链式水下多光谱辐射计, 主要用于深层海水的测量。解决了水下光学窗口的污染问题。采用高灵敏度光电探测器与高精度 ADC 相结合的方法探测了深层海水的微弱光信号。电池的使用采用了时钟控制和间断供电方式。通过电感式 Modem 实现了数据的实时传输。

**关 键 词:** 水下光谱辐射计; 下行光谱辐照度; 上行光谱辐亮度; 防污染技术; 水色

**中图分类号:** O432 **文献标识码:** A

### Design of a moored underwater multi-channel radiometer

LI Cai, KE Tian-cun, CAO Wen-xi, YANG Yue-zhong, LU Gui-xin, GUO Chao-yin, DENG Chong-ren  
(LED Laboratory, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** An underwater multi-channel radiometer, which can be moored on the optical buoy for time series observation of downwelling spectral irradiance and upwelling spectral radiance in seawater, is designed. The biofouling on optical window is protected successfully by using an auto-operated mechanical anti-biofouling-blush. High-sensitivity electrophotonic detector and high precision ADC are combined to detect the weak optical signal in deep water. This instrument is powered by self-stored battery and discontinuous power supply mode is used in order to reduce the power consumption. The real time communication between the radiometer and the control center of ocean optical buoy is achieved by using an underwater inductive modem. The instrument has the characteristics of high accuracy, low power consumption and low self-shading error.

**Key words:** underwater spectroradiometer; downwelling spectral irradiance; upwelling spectral radiance; anti-biofouling device; ocean color

## 1 引 言

锚链式水下多光谱辐射计长期工作在水下, 多台辐射计安装在不同的水深位置。鉴于其工作环境和工作周期, 在仪器的设计过程中, 必须考虑以下关键技术: 深层海水中微弱光信号的探测、长时间连续工作所带来的光学窗口污染、仪器的低功耗要求以及数据的实时传输等; 由于仪器工作在海水中, 不可避免的会受到自阴影效应的影响, 所以如何有效的减小自阴影效应引起的数据误差是仪器设计中必须解决的问题。

## 2 观测量

锚链式水下多光谱辐射计主要用来观测下行光谱辐照度  $E_d$  和上行光谱辐亮度  $L_u$ , 同时还必须实时记录所测得的上述光谱量仪器所处的深度、方位角和倾角。仪器的中心波长分别为 412, 443, 490, 520, 565, 620, 643, 670, 683, 705, 765, 865nm。

考虑到当太阳光入射到海水中, 并沿  $(\theta, \phi)$  方向传输时, 辐亮度在沿传输方向  $(\theta, \phi)$  平面内是单

位投影面积单位立体角的辐射通量, 所以

$$L(\theta, \phi) = \frac{d^2\Phi(\theta, \phi)}{dS \cos\theta d\omega}$$

式中,  $dS$  为面元面积;  $d\omega$  为立体角元;  $\theta$  和  $\phi$  分别为天顶角和方位角。下行光谱辐照度的定义是, 当入射到海水中的某一深度时, 水平面上单位面积的向下的辐射通量为

$$E_d(z, \lambda) = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(z, \lambda, \theta, \phi) |\cos\theta| \sin\theta d\theta d\phi$$

在水色遥感应用中, 只有测定了不同深度时的下行光谱辐照度和上行光谱辐亮度, 才可以透过数据处理获得离水辐亮度、遥感反射率及其它参数。

## 3 光学系统

### 3.1 工作原理

水下多光谱辐射计硬件总体上包括以下四大模块: (1) 光学探头; (2) 光学窗口的防污染装置; (3) 电子学系统; (4) 实时通信系统。

仪器被设计成为一个独立的自带 CPU 的测量单元, 通过其内部时钟中断来触发 CPU 进行采样控

\* 收稿日期: 2004-01-04 E-mail: liclaire@scsio.ac.cn

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA631010)

作者简介: 李彩(1977-), 女, 甘肃省白银市人, 中国科学院南海海洋研究所 LED 实验室博士研究生, 主要从事海洋光学、海洋环境遥感技术方面的研究。

制。当 CPU 启动时,先根据浮标控制中心接收到的 GPS 时间对光谱辐射计时间进行校准。在采样开始前,CPU 先控制仪器的防污设备和除污设备对光学探头进行清扫,然后等待浮标控制中心发送工作命令。在接收到浮标控制中心发送来的采样命令后,CPU 开始控制上下光学探头,接收下行光谱辐照度和上行光谱辐亮度的光学信号,并将其转换为模拟电信号。模拟信号在光学探头内经一级放大后输入到 ADC 的模拟输入端,经 ADC 内部的再次放大后进行 AD 转换,并将转换结果输出到 CPU 的数据存储器内,等待浮标控制中心发送提取命令。在完成所有浮标控制中心的指令后,CPU 写入下一次中断,并控制时钟结束当前中断(写入的中断时间既可以是仪器固定的 8 个中断时间点,也可以是接收来自浮标控制中心的加密中断点)。关掉所有的电源供电,使整个仪器进入低功耗状态。

### 3.2 光学探头

#### 3.2.1 光学探头的结构

辐射计包括下行辐照度和上行辐亮度两部分。光谱辐照度光学探头由余弦集光器、防水耐压玻璃、窄带滤光片、光电探测器组成;光谱辐亮度光学探头由窗口玻璃、光阑、窄带滤光片和光电探测器组成。图 1 为水下光谱辐照度光学探头结构图。

辐照度和辐亮度的差别在于辐照度光的收集采用  $2\pi$  立体角的余弦集光器,而辐亮度光的收集采用  $10^\circ$  立体角的视场光阑。辐照度中的余弦集光器将向下照度的光转换为漫散射光,余弦集光器采用 Teflon(聚四氟乙烯)作为漫射材料,用石英玻璃作为衬底,不仅具有足够的抗压强度,而且还具有较高的短波透过率。辐亮度光阑的视场为  $10^\circ$ 。在光电探测器与滤光片之间设置视场光阑( $10^\circ$ ),使探测器接收到的光辐射被光阑限制在一定的视场内,对其进行辐亮度定标后便成为辐亮度计。采用 12 个硅探测器,在其光敏面上配置窄带滤光片,排在圆盘基底上构成 12 通道辐射计。

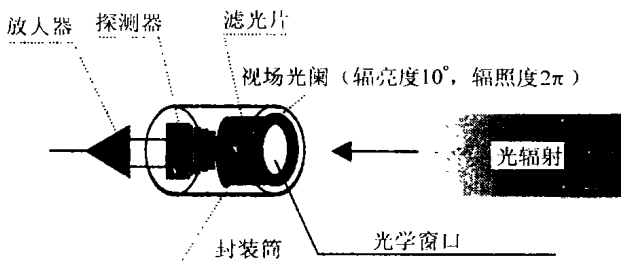


图 1 水下光谱辐照度光学头结构图

#### 3.2.2 通道的光谱响应特性

从严格意义上来讲,在传感器各光谱通道上的

中心波长不是窄带滤光片光谱透过率的中心波长,而是按以下定义的:

$$\lambda_c = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \cdot E(\lambda) \cdot \tau_f(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot \tau_f(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中,  $E(\lambda)$  为入射光谱辐照度;  $R(\lambda)$  为探测器的光谱响应;  $\tau_f(\lambda)$  为窄带滤光片、窗口玻璃和余弦集光器的总透过率;  $\lambda_1, \lambda_2$  是与  $E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \tau_f(\lambda)$  相对应的半值波长。

光谱辐射响应  $E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \tau_f(\lambda)$  的光谱曲线最高值一半处的波长距离为通道带宽  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 。根据光谱通道的响应特性和昼光光谱 D65 及海水光谱分布(近似 12000K 黑体辐射)的计算结果可见,环境辐射的光谱分布对中心波长的影响不超过 1nm。所以在实际设计中将窄带滤光片的中心波长定为该通道的中心波长。

下行光谱辐射辐照度和上行光谱辐亮度各有 12 个波段,各波段窄带滤光片的光谱响应曲线如图 2 所示,波段的半峰值宽度为  $10 \pm 2\text{nm}$ ,中心波长偏差不得超过 2nm,符合

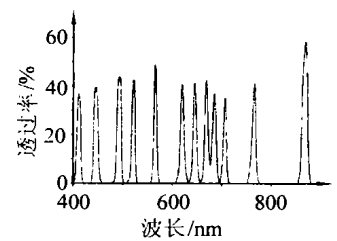


图 2 各分立通道光谱曲线

水色遥感现场光辐射测量的要求。

#### 3.2.3 自阴影效应的控制

水下光场分布是由海水的固有光学参数决定的,光学仪器的存在将对其周围的光场分布产生干扰,导致测得的辐射值与真值不相等,这种影响称为仪器的自阴影效应。自阴影效应引起的百分误差  $\epsilon$ 、传感器的外径  $r$ 、测量时的太阳天顶角  $\theta_{0\omega}$  和海水的吸收系数  $\alpha$  的关系可以通过式(2)近似地估算<sup>[5]</sup>:

$$\epsilon = 1 - \exp\left(-\frac{2a \cdot r}{\tan\theta_{0\omega}}\right) \quad (2)$$

百分误差  $\epsilon$  随水体吸收系数  $\alpha$  与仪器外形半径的乘积的增大而增大。要使自阴影效应的误差减小,传感器的直径必须严格限制,这就要求传感器尽可能小型化。设计中尽可能的选用小的贴片元器件,以便降低仪器的功耗,减小仪器的体积。最终的设计结果是:光学探头的直径为 42mm,仪器的总高度为 60cm。所以有效地减小了仪器的自阴影效应<sup>[4]</sup>。

#### 3.2.4 深层海水中微弱光信号的探测<sup>[6]</sup>

由于经几十米深的海水水体衰减后的辐射较弱, 所以光谱辐射计的设计采用了分立多通道技术。探测器采用日本滨松公司的高灵敏度探测器, 其光谱响应范围为 190 ~ 1100nm, 峰值响应波长为 960nm, 探测器内部封装了预放大器。在典型的大气条件下, 真光层光谱辐照度约为 0.007 ~ 0.015mW/cm<sup>2</sup>·nm, 而该探测器的响应度可以达到 1V/nW。因此, 采用它完全可以探测到真光层的辐照度。设计中选用了 24 位高精度 ADC, 该 ADC 内部自带可编程增益放大器, 在选择外部放大并进行“粗调”以后再通过 ADC 内部增益放大并进行“细调”, 可以根据需要对输入的模拟量选择合适的放大倍数, 这就更进一步确保了真光层的微弱信号能够被有效的检测到。从大量的室内实验数据可计算出仪器的变异系数最大不超过 0.04%。

#### 4 光学窗口的防污染技术

仪器长时间在海水中连续工作, 非常容易受污染, 在光学传感器窗口上面容易附着一些微生物或其它有机物(油类)和无机物(泥沙)<sup>[1]</sup>。同样, 无脊椎动物的幼体附着并生长在光学传感器的玻璃窗口上面也是一个普遍存在的污染问题。光辐射测量对上述这些污染十分敏感, 窗口受污染后的测量误差无法估计, 污染严重时, 甚至无法进行测量。为了防止和除去上述污染所造成的测量误差, 在仪器的设计中, 在光学窗口上方安装一个带有清洁刷的保护盖。该保护盖是由铜板制成, 清洁刷采用柔软的楔型橡皮。一方面由于铜板在水中的氧化, 所以在高浓度下会变得有毒, 从而可干涉细胞膜上酶的产生, 进而阻止细胞的分裂, 可对细菌、浮游植物和无脊椎动物造成一定的毒性, 可抑制藻类、细菌等的生长<sup>[2]</sup>。另一方面, 铜板与光学窗口之间的间隙极小, 可以保证非测量期间光学窗口处于“黑暗”状态, 从而可破坏生物的生长环境。由于保护盖上的清洁刷在每次光谱辐射计开始工作时可先对光学窗口清洁若干次, 所以即使在仪器的非工作期内光学窗口上附着的少许污染也可以通过清洁刷清洗干净。

图 3 所示为光学传感器及其光学窗口防污、除污装置的硬件结构示意图。该防污、除污装置主要是由直流驱动马达、减速齿轮、马达转轴、用于支撑保护盖的支撑臂、铜质的保护盖、固定在保护盖一侧的橡皮清洁刷、两个定位传感器及其相应的电子学控制电路组成。驱动马达与外壳之间用钢板固连。保护盖支撑臂的一端固定在驱动马达的转轴上, 马达转轴通过马达外壳的上盖深入水中。

在电子学系统中, 有一根控制驱动马达转动的

控制线与马达相连, CPU 可以通过它来控制驱动马达工作, 固定在支撑臂上的保护盖在驱动马达的驱动下, 跟随马达转轴逆时针转动; 两个定位传感器的核心任务是用来探测保护盖当前所处的位置。每个定位传感器均有一状态线与电子学系统中的 CPU 单元相连, 用来传输传感器的状态信息, 以便更加准确地控制防污装置。每次开机时, 由保护盖携带的清

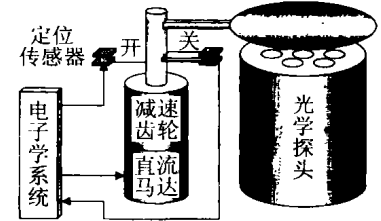


图 3 光学窗口防污染装置硬件结构图

洁刷先清洁光学窗口  $N$  次, 然后停在与光学窗口成 180° 的位置, 在光学探头工作结束以后, 保护盖又会在驱动马达的带动下转回到光学窗口的正上方。在向下光谱辐照度光学窗口和向上辐亮度光学窗口上各安装一个这样的装置, 用于保持各自光学窗口的清洁和干净。

#### 5 电子学部分

硬件电路的主要组成如图 4 所示。主要由 CPU 板、A/D 转换板以及电池组三个部分组成。

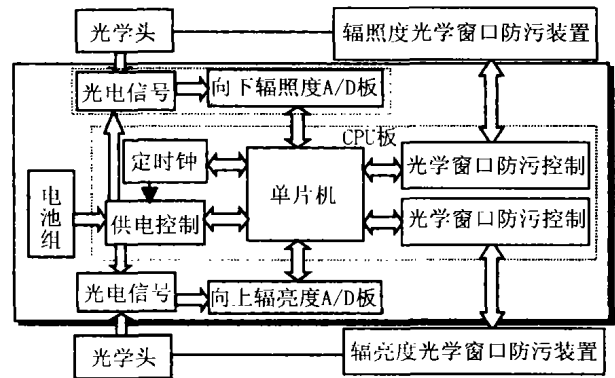


图 4 辐照度仪电子学部分结构框图

##### 5.1 CPU 板的主要组成及工作原理

CPU 板作为整个光谱辐射计的控制中心, 分别控制仪器的数据采集、传输和窗口的防污、除污以及仪器的供电和通讯。在它上面使用了一个高速、高集成度、低功耗的单片机。在单片机内部自带 12 位 ADC, 可以完成仪器的深度、方位角、倾角的测量, 同时还可以通过它来监控供电电池的电量, 以便使仪器更加可靠的工作。CPU 板根据浮标控制中心发送来的指令选择当前要做的工作(控制 AD 板采样、控制防污装置清洁光学窗口、将 AD 结果传给浮标控制中心等)。在做完浮标控制中心指定的所有工作后, CPU 板自主控制驱动马达, 将防污装置的保护盖转回到光学窗口上方, 关断系统的所有电源

(除时钟电源外)。CPU 板上的时钟中断既可以是 CPU 板自定的 8 个定点中断时间,也可以是浮标控制系统根据需要给定的加密中断时间。在 CPU 每次开始工作前,先接收浮标控制中心送来的 GPS 时间,以使用它校准仪器的当前时间。值得一提的是,在做完当天最后一次采样后,CPU 板会主动向板上时钟写入暗电流测量点,对仪器进行一次暗电流校准,该暗电流数据将作为第二天仪器测量的校准数据,这样就可以保证仪器测量的准确性。

### 5.2 A/D 转换板

A/D 转换板主要是将光电探测器探测到的经预放大的光电信号转换为数字信号,其核心是一高精度、宽动态范围、 $\Delta$ - $\Sigma$ 型 8 通道 24 位 ADC。它的典型功耗小于 1mW,非常适合高精度、低功耗的要求。该器件内部具有可编程增益放大器。设计中可以根据输入海水光信号的强弱选择合适的放大增益,以便对模拟信号进行放大。

由于仪器上行辐亮度和下行辐照度各测 12 个波段,故共有 24 个波段的光信号需要检测。为了控制方便和协调设计,采用四片 ADC 来实现上述功能。通过 CPU 板上的单片机的控制实现了光电信号的采样和转换,在每个 ADC 上完成了 6 个波段的测量。当采样点到来时,仪器的 A/D 板在完成初始化工作后等待 CPU 发送采样命令,CPU 板在接收到浮标总体控制系统的采样指令后就会发送相应的控制命令给 A/D 板,A/D 板根据 CPU 的指令依次采集下行辐照度和上行辐亮度的光学信号,采样结果先传入单片机内部的 RAM,在单片机内部完成平均和校正。

### 5.3 电池组以及电源管理

所设计的仪器在海水中可采用自主供电方式长时间连续工作。为了提高电池的有效使用率,减小仪器的体积,在设计中,可通过两个途径来达到仪器低功耗的要求:首先在选择元器件时要严格控制其功耗,尽可能的选择同类产品中低功耗的器件;其次,对电源的使用要进行合理的控制。由于浮标在海内连续工作三个月,每天工作 8 次,每次工作约 5min,因此,浮标的工作时间远小于不工作的时间。为了省电,不工作时需关闭电源,工作时需接通电源,这可以通过 CPU 板上的时钟芯片的定时中断来实现上述控制。

## 6 实时通信系统

由于浮标长时间的连续工作在海水中,数据的实时传输是非常必要的。通常,浮标控制系统与真光层辐照度仪之间的数据和指令通信采用直接电缆

法和声学通道法。上述两种方法前者不易改动且不可靠,后者通信速率慢、费用大、误码率高。为了克服这两种方法的缺点,设计中采用了一种适用于水下-海面通信的水下感应式调制解调器,有效的解决了水下真光层辐射计与浮标控制中心之间的实时数据传输问题。

感应式调制解调器的工作原理是:把经过绝缘处理后的钢缆穿过感应器环,钢缆的两端金属直接与海水接触,形成环型导线,通过电磁感应,便可实现海面主 Modem 与水下从 Modem 的通讯。

## 7 结 论

所研制的浮标水下多光谱辐射计主要用于水下真光层下行光谱辐照度  $E_d$ 、上行光谱辐亮度  $L_u$  的剖面测量。通过实测出的水体光辐射数据,可推导出离水辐亮度、光谱反射率、漫射衰减系数等水体光学参数,可估算出海洋光合作用及其初级生产量,可满足水色卫星遥感现场光辐射测量技术、海洋光谱分析和生物-光学算法开发的需要。仪器的设计具有以下特点:

(1) 采用保护盖和清洁刷相结合的方式有效的解决了长期工作在海水中光学仪器窗口的污染问题;

(2) 仪器采用分立通道结构,使用高集成度、贴片芯片,具有体积小、阴影误差小等特点;

(3) 采用高灵敏度光电探测器与高精度 ADC 相结合的方法有效的解决了真光层微弱信号检测难的问题;

(4) 所有器件的选取遵循稳定、低功耗的原则,系统采用时钟控制间断供电方式,可高效率的使用供电电池;

(5) 采用电感式水下通讯 Modem,解决了数据实时传输的难题;

(6) 由于该装置具有体积小、功耗低、安装方便,所以它不仅可以配合海洋光学浮标来测量水下光谱辐射特性,而且还可以单独作为湖泊、河流等水下光谱辐射特性的测量。

### 参考文献:

- [1] McLean S, Schofield B, Zibordi G, et al. Field evaluation of anti-biofouling compounds on optical instrumentation[J]. Proceedings of SPIE, 1996. 2963:868—881.
- [2] Moore K D, O Mongain E, Plunkett S, et al. In situ marine spectral radiometer using frame addition techniques and its calibration [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 2048:153—165.
- [3] Mobley C D. Light and water: Radiative transfer in natural waters [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [4] Gordon H R, Ding K Y. Self-shading of in-water optical instruments[J]. Limnol Oceanogr, 1992, 37:491—500.
- [5] 吴廷芳,曹文熙. 水下光谱辐射测量的阴影效应及其校正方法研究[J]. 海洋学报, 2003, 25(1):42—51.
- [6] 曾庆勇. 微弱信号检测(第二版)[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002.