

# 基于卫星遥感数据反演的光学隐蔽深度估计算法

朱海荣<sup>1\*\*</sup>, 朱海<sup>1\*</sup>, 蔡鹏<sup>1</sup>, 李惟羽<sup>1</sup>, 施英妮<sup>2,3</sup>, 刘金涛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>海军潜艇学院, 山东 青岛 266000;

<sup>2</sup>中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094;

<sup>3</sup>中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266000

**摘要** 为采用卫星遥感数据反演的方法获取水下潜行器的光学隐蔽深度, 实现时间和空间上大范围、大尺度的测量, 为水下航行器搭载的光学隐蔽深度测量装置提供新的校验途径, 提出了一种基于准分析算法的光学隐蔽深度卫星反演方法。根据光学隐蔽深度模型, 使用 Aqua-MODIS 以及 Terra-MODIS 卫星的日网格化遥感反射比数据, 先对数据进行预处理, 完成遥感反射比数据的质量控制和 Aqua、Terra 卫星数据的交叉校准, 再根据准分析算法和 Doron 算法建立卫星反演光学隐蔽深度模型, 制作特定海区光学隐蔽深度融合产品。在模型中输入 443, 488, 555 nm 波段的遥感反射比数据, 数据等级为 L3m, 空间分辨率为 4 km, 数据的经度范围为 100°E~125°E, 纬度范围为 10°N~38°N。结果表明: 基于准分析算法的光学隐蔽深度卫星反演技术路径可行, 开拓了光学隐蔽深度获取的新方式, 为水下光学隐蔽深度测量装置提供了校验方法, 并为水下光学隐蔽深度相关探测与反探测等军事应用提供了重要的理论支撑。

**关键词** 遥感; 光学隐蔽深度; 准分析算法; 卫星反演; 辐照度

中图分类号 TJ67; U666.16

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.080104

## Optical Concealment Depth Estimation Algorithm Based on Satellite Remote Sensing Data

Zhu Hairong<sup>1\*\*</sup>, Zhu Hai<sup>1\*</sup>, Cai Peng<sup>1</sup>, Li Weiyu<sup>1</sup>, Shi Yingni<sup>2</sup>, Liu Jintao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Navy Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266000, China;

<sup>2</sup>Chinese People's Liberation Army Unit 61741, Beijing 100094, China;

<sup>3</sup>College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266000, China

**Abstract** In order to obtain the optical concealment depth of underwater submersible by satellite remote sensing data inversion and realize large scale measurement in time and space, we propose an optical concealment depth remote sensing inversion method based on the quasi analytical algorithm (QAA). At the same time, it is a new way for underwater vehicle equipped with the optical concealment depth measuring device. According to the optical depth concealment model, Aqua-MODIS and Terra-MODIS satellite remote sensing reflectance data is used on the grid. After preprocessing the data, the remote sensing reflectance cross calibration data quality control is completed, and the Terra and Aqua satellite data is cross-corrected. According to quasi analytical algorithm and Doron algorithm, the optical concealment depth remote sensing inversion model is established. The optical depth concealment fusion product for specific sea area is made. Three bands remote sensing reflectance data of 443 nm, 488 nm, and 555 nm is inputted for the model. The data level is L3m, and spatial resolution is 4 km. The longitude range of data is from 100°E to 125°E, and the latitude range is from 10°N to 38°N. The results show that, based on quasi analytical algorithm, optical concealment depth remote sensing inversion technology is a feasible path. A new method to obtain optical depth concealment is developed. The method provides a calibration method for underwater vehicle equipped with the optical concealment depth measuring device, and it also provides important technical support for underwater optical depth detection and anti-detection and other military applications.

**Key words** remote sensing; optical concealment depth; quasi analytical algorithm; satellite retrieval; irradiance

**OCIS codes** 040.1880; 230.0040

收稿日期: 2018-03-02; 修回日期: 2018-03-05; 录用日期: 2018-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61573040)

\* E-mail: henlongjoy@163.com; \*\* E-mail: 846770081@qq.com

# 1 引言

我国有漫长的海岸线,且近海区域水深较浅,保卫海洋权利,实现近海防御和远海防卫,需要大力发展水下安全相关技术。据路透社报道,美国无人水下航行器能执行多种特种任务,部署简单,一次运行时间可长达4~6个月,并可全天候工作。该航行器依靠浮囊使尾部的天线伸出海面来完成数据发送、接收任务指令,其体积小、机动灵活、隐蔽性高,在我国南海频繁出现,这严重危害了我国海洋利益,严重威胁到国家军事安全。

水下目标的测量与海水透明度<sup>[1-2]</sup>测量有类似之处,早在1865年,Pietro Angelo Secchi首次使用塞氏盘来测量水体的透明度,任尚书等<sup>[3-6]</sup>相继进行了深入研究。光学隐蔽深度是水下航行器光学隐蔽性能的重要参数,本课题组前期工作设计的光学隐蔽深度测量系统及其小型化的测量系统,已经实现了水下搭载对光学隐蔽深度的测量。但这种测量方式只能测量所在海区的的光学隐蔽深度,具有区域局限性,测量范围小,且不能有效实时校准。在已有研究的基础上,本课题组基于准分析算法(QAA)建立了卫星反演水下航行器光学隐蔽深度的新模式,其既可以实现时间和空间上大范围、大尺度的测量,也可以为水下光学隐蔽深度测量装置提供校验,确保了光学隐蔽深度测量系统的性能。

## 2 光学隐蔽深度反演算法

### 2.1 遥感反射比数据的预处理

遥感反射比数据的质量会对光学隐蔽深度的反演结果产生非常重要的影响。卫星运行状态、空间环境、大气辐射特性、海面状态及其他因素都会对卫星遥感反射比数据质量产生影响。所以,在利用卫星遥感反射比数据反演光学隐蔽深度之前,应对卫星遥感反射比数据进行质量控制,去除不正常的的数据,提高反演光学隐蔽深度的准确性。

卫星遥感反射比数据的预处理就是采用识别数据有效性、位置检查、极值检查、空间一致性检查的方法去除野值,以提高反演光学隐蔽深度的准确性与反演质量。根据 Aqua-MODIS、Terra-MODIS 卫星数据头文件中设置的有效数据标识,提取数据的有效部分;检查 Aqua-MODIS、Terra-MODIS 卫星遥感反射比数据是否在正常取值范围内,倘若测量数值超过了  $0.02 \text{ sr}^{-1}$ ,就需要判断该数据是否正常、有效;若无效,则需剔除不正常峰值处的数据,删

掉奇异点,保持遥感反射比数据的空间一致性。

因为各水色卫星传感器的设计、结构、校准设备和算法不同,所以 Aqua-MODIS、Terra-MODIS 卫星遥感反射比数据之间有一定的差异。所以,有必要在卫星数据融合前对数据进行交叉校准,以避免不同传感器的时空特征及结构特点产生的误差影响到光学隐蔽深度的反演。美国国家航空和宇宙航行局(NASA)花费大量时间完成了 Aqua-MODIS 数据的校准及验证工作,确保了 Aqua-MODIS 数据的可靠性。在反演过程中,Aqua-MODIS 是基准传感器,通过筛选相同天扫过相同区域的 Terra-MODIS 卫星传感器的有效数据来完成数据校准,如图 1 所示。

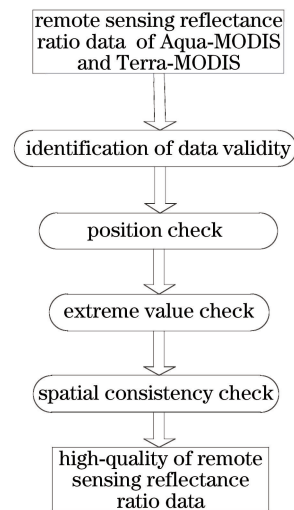


图 1 水色卫星数据质量控制过程

Fig. 1 Data quality control process of water color satellite  
卫星反演获取光学隐蔽深度的流程图如图 2 所示。

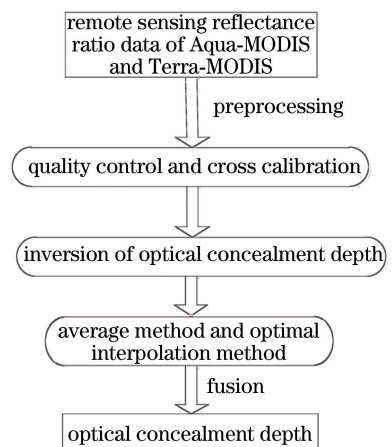


图 2 反演光学隐蔽深度的流程图

Fig. 2 Flowchart for inversion of optical concealment depth

## 2.2 光学隐蔽深度模型

根据建立的光学隐蔽深度模型<sup>[7-8]</sup>,有

$$D = \ln \left[ \left| \frac{r_t E_d - E_u}{E_u} \right| \cdot \gamma \cdot \beta \cdot 10^{2 - (\lg \alpha + 0.5)^{-1}} \cdot \exp(-\mu H) \right] \cdot (c + k \cos \theta)^{-1}, \quad (1)$$

式中: $D$ 为光学隐蔽深度; $E_u$ 为海水上行辐照度; $E_d$ 为海水下行辐照度; $r_t$ 为航行器的表面反射率; $k$ 为海水漫衰减系数; $c$ 为海水体积衰减系数; $\gamma$ 为海面反射效应; $\beta$ 为海面折射及波浪效应; $\alpha$ 为目标视角; $\mu$ 为消光系数; $H$ 为观测高度; $\theta$ 为光子流方向与天顶方向之间的夹角。

## 2.3 反演算法

光学隐蔽深度卫星反演通过读取 Aqua-MODIS、Terra-MODIS 卫星遥感反射比数据,使用 QAA 准分析算法计算 490 nm 处的水体吸收系数  $a(490)$ 、后向散射系数  $b_b(490)$ ;根据准分析算法及 Doron 算法计算光学隐蔽深度。

QAA 是 Lee 等<sup>[9]</sup>提出的利用遥感反射比反演海水固有光学特性的算法<sup>[10]</sup>,可以通过水面上的遥感反射比计算得到水体的吸收系数和后向散射系数。以下为水下潜航器光学隐蔽深度卫星的反演步骤:

1) 读取 Aqua-MODIS、Terra-MODIS 卫星海面遥感反射比数据,使用 QAA 计算 490 nm 处的水体吸收系数  $a(490)$  和后向散射系数  $b_b(490)$ ;

2) 根据  $a(490)$  和  $b_b(490)$  计算 490 nm 处的漫衰减系数  $K_d(490)$  和海水总衰减系数  $c(490)$ ;

3) 根据 Doron 算法,通过  $K_d(490) + c(490)$  计算出光垂直慢衰减系数  $K_d(v)$  与光束衰减系数  $c(v)$  之和;

4) 结合阈值对比度  $C_T$  和固有对比度  $C_0$  计算光学隐蔽深度。

光学隐蔽深度卫星反演算法如下:

1) 根据 QAA 算法<sup>[11-13]</sup>选取海面遥感反射比  $R_{rs}(\lambda)$  计算 490 nm 波长的海水吸收系数  $a(490)$  以及后向散射系数  $b_b(490)$ 。在算法中输入 440, 490, 555, 670 nm 波段的遥感反射比数据。

水下遥感反射比的表达式为<sup>[14]</sup>

$$r_{rs} = \frac{R_{rs}}{0.52 + 1.7 \cdot R_{rs}}, \quad (2)$$

并且有

$$r_{rs}(\lambda) = [g_0 + g_1 \cdot u(\lambda)] \cdot u(\lambda), \quad (3)$$

式中: $g_0$ 、 $g_1$  为常数,且

$$u(\lambda) = \frac{-g_0 + [(g_0)^2 + 4 \cdot g_1 \cdot r_{rs}(\lambda)]^{1/2}}{2 \cdot g_1}. \quad (4)$$

海水吸收系数为

$$a(555) = 0.0596 + 0.2 [a(440)_i - 0.01], \quad (5)$$

其中,

$$a(440)_i = \exp(-1.8 - 1.4\rho + 0.2\rho^2), \quad (6)$$

$$\rho = \ln [r_{rs}(440)/r_{rs}(555)], \quad (7)$$

$$\eta = 2.0 \cdot \left\{ 1 - 1.2 \cdot \exp \left[ -0.9 \cdot \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$b_{bp}(555) = \frac{a(555) \cdot u(555)}{1 - u(555)} - b_{bw}(555), \quad (9)$$

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(555) \cdot \left( \frac{555}{\lambda} \right)^\eta, \quad (10)$$

$$a(\lambda) = \frac{[1 - u(\lambda)] \cdot b_b(\lambda)}{u(\lambda)}. \quad (11)$$

2) 利用吸收系数  $a(490)$  和后向散射系数  $b_b(490)$  估算漫射衰减系数  $K_d(490)$ <sup>[13]</sup>:

$$K_d(490) = (1 + 0.005 \cdot \theta_s) \cdot a(490) + 4.18 \cdot \{1 - 0.52 \cdot \exp[-10.8 \cdot a(490)]\} \cdot b_b(490), \quad (12)$$

式中: $\theta_s$  为太阳高度角。海水衰减系数  $c(490)$  为 490 nm 吸收系数  $a(490)$  与散射系数  $b(490)$  的和:

$$c(490) = a(490) + b(490). \quad (13)$$

散射系数  $b(490)$  的表达式为

$$b_b = 0.0012002 + 0.005085 \cdot b + 0.0032065 \cdot b^2. \quad (14)$$

3) 根据 Doron 算法<sup>[15]</sup>,光垂直漫衰减系数  $K_d(v)$  与光束衰减系数  $c(v)$  之和可通过  $K_d(490) + c(490)$  估算:

$$P(x) = 0.0989x^2 + 0.8879x - 0.0467, \quad (15)$$

其中,

$$x = K_d(490) + c(490), \quad (16)$$

$$P(x) = K_d(v) + c(v). \quad (17)$$

4) 将以上参数代入光学隐蔽深度公式可反演出光学隐蔽深度,反演过程如图 3 所示。

## 3 实验与结果

光学隐蔽深度测量装置有 21 个光学测量通道和深度传感器,其中光学通道的中心波长分别为 395, 408, 445, 465, 490, 510, 520, 532, 555, 560, 565, 589, 622, 670, 687, 700, 709, 766, 780, 850, 662 nm, 带宽 10 nm。测量 21 个波段的海水的上行辐照度、下行辐照度,并依据光学隐蔽深度模型<sup>[1-2]</sup>及文献[1-2]中的计算方法,计算海水的漫衰减系数。光学隐蔽深度测量装置的外直径 100 mm,长 180 mm,

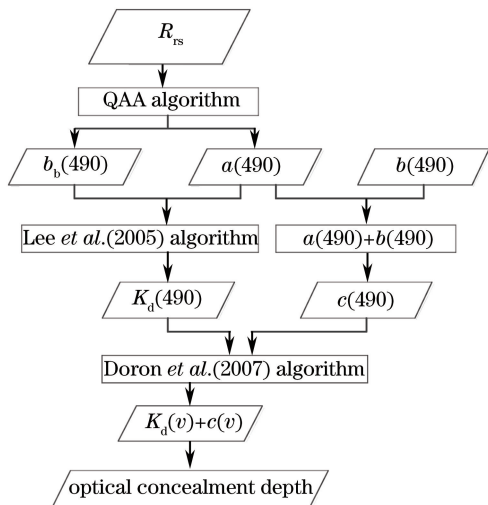


图 3 光学隐蔽深度卫星反演算法流程图

Fig. 3 Flow chart of satellite inversion algorithm for optical concealment depth

如图 4 所示。



图 4 光学隐蔽深度测量装置

Fig. 4 Measuring device for optical concealment depth

2015 年 11 月 22 日,在青岛民用码头使用光学隐蔽深度测量装置对光学隐蔽深度进行了海上测量,测量过程中探测装置使用缆绳吊放,潜模吊放在测量装置正下方 0.75 m 处,测量装置通过测量该区域的海水上行辐照度、下行辐照度、海水漫衰减系数等数据,完成潜航器模型的光学隐蔽深度解算。

海水上行、下行辐照度测量如图 5、6 所示。



图 5 测量海水上行辐照度

Fig. 5 Seawater upward irradiance measurement



图 6 测量海水下行辐照度

Fig. 6 Seawater downwelling irradiance measurement  
中心波长分别为 395, 445, 490, 532, 555, 670 nm 的测量通道测得的海水下行辐照度、海水上行辐照度如图 7、8 所示。

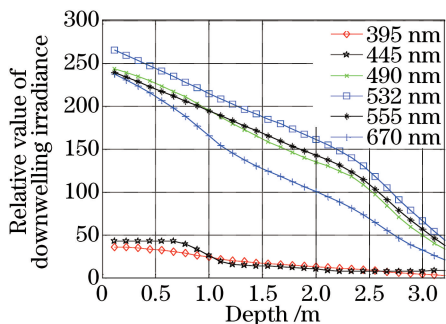


图 7 下行辐照度测量值

Fig. 7 Measured downwelling irradiance

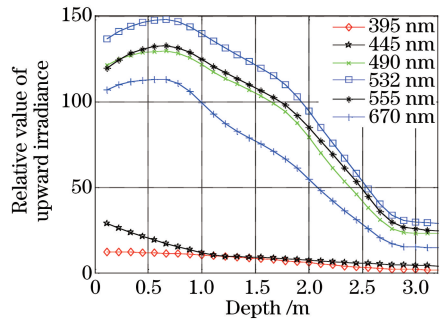


图 8 上行辐照度测量值

Fig. 8 Measured upward irradiance

中心波长分别为 445, 490, 555, 670 nm 的测量通道测得的海水漫衰减系数如图 9 所示。

解算得到良好天气条件下,特征长度为 0.7 m、表面反射率为 0.02 的水下潜模光学隐蔽深度结果如表 1 所示。

表 1 潜模的光学隐蔽深度测量值

Table 1 Measured optical concealment depth of latent mode

Central wavelength / nm	Attenuation coefficient of seawater / m <sup>-1</sup>	Optical concealment depth / m
445	0.3236	3.892
490	0.3186	3.654
555	0.3255	3.608

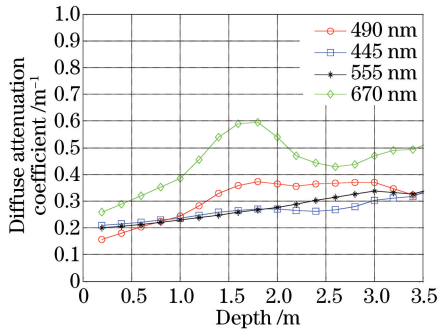


图9 海水漫衰减系数

Fig. 9 Diffuse attenuation coefficient of seawater

从表1中可以看到,在此次测量范围内的可见光波段,测试海域中该水下潜模的光学隐蔽深度为3.8 m。使用 Aqua-MODIS 以及 Terra-MODIS 卫星在2015年11月22日443,488,555 nm波段的日网格化遥感反射比数据及月平均数据,数据等级为L3m,空间分辨率为4 km,对数据进行预处理后反演得到光学隐蔽深度融合图,如图10~12所示。

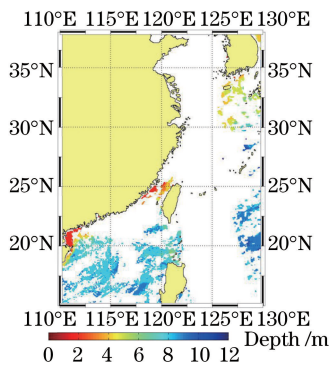


图10 Aqua日数据反演的光学隐蔽深度

Fig. 10 Optical concealment depth obtained by Aqua diurnal data

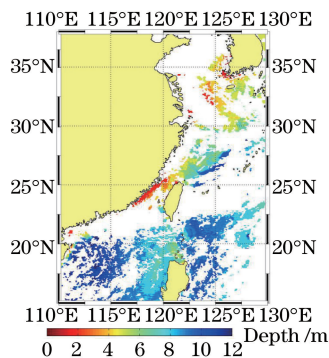


图11 Terra日数据反演光学隐蔽深度

Fig. 11 Optical concealment depth obtained by Terra diurnal data

从图10~12中可以看到光学隐蔽深度卫星反演数值的海域分布情况,沿岸海区的光学隐蔽深度

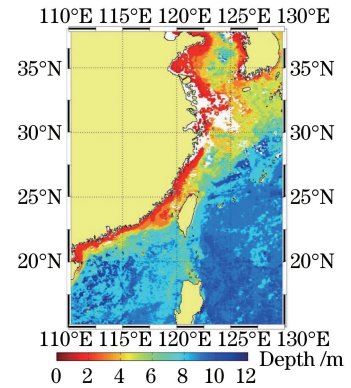


图12 Aqua、Terra月平均融合图

Fig. 12 Diagram of monthly mean fusion of Aqua and Terra 较小,大洋深度处的光学隐蔽深度较大,这与海水的衰减系数密切相关。近岸海水比较浑浊,海水物质成分较多,海水衰减系数较大,因此光在海水中的衰减大,反演的光学隐蔽深度较小,说明潜模在较浅深度下就能保持可见光隐蔽性。大洋深处的海水污染少,海水清洁,海水的衰减系数较小,反演的光学隐蔽深度较大,因此,潜模需要潜入较深的深度才能保持可见光隐蔽性。由于本实验在近岸进行,没有对应位置的遥感反射比数据,因此该位置的光学隐蔽深度反演值暂时空缺,需要进一步验证卫星反演光学隐蔽深度的可行性。

## 4 结 论

建立了通过卫星反演光学隐蔽深度的新方式,使用 Aqua-MODIS 以及 Terra-MODIS 卫星遥感反射比数据,在对数据进行预处理后,利用 QAA 和 Doron 算法完成光学隐蔽深度参数的解算,并依据光学隐蔽深度模型最终反演得到潜模在经度范围100°E~125°E、纬度范围10°N~38°N海区中的光学隐蔽深度。

采用卫星反演光学隐蔽深度可在时间和空间上大范围、大尺度地获取光学隐蔽深度,克服海上测量的时间和空间局限性,也可为测量装置的海上测量提供校验辅助。基于准分析算法的光学隐蔽深度卫星反演,也为水下光学隐蔽深度相关探测与反探测等军事应用提供了重要的理论支撑。但本实验没有完成估计算法精度的计算,精度的研究还需要在远海进行实验。目前由于课题安排及海上条件、实际条件限制,暂时还没有进行远海实验,只在码头使用装置进行测量,不足以说明卫星数据反演结果的可靠性,只是提出了使用卫星数据反演的估计方法,还需要进行进一步的实际验证。

## 参 考 文 献

- [1] Xue Y H, Xiong X J. Distribution features and seasonal variability of the transparency in offshore waters of China [J]. *Advances in Marine Science*, 2015, 33(1): 38-44.  
薛宇欢, 熊学军. 中国近海海水透明度分布特征与季节变化[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(1): 38-44.
- [2] Xia G H, Yu Y D, Xiong Y. Study on a new method of measurement of seawater transparency[J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(3): 316-319.  
夏光辉, 余义德, 熊英. 一种海水透明度测量新方法的研究与实现[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(3): 316-319.
- [3] Ren S S, Zhou S D. Comparison analysis and developing trend of four methods for the seawater transparency field measurement [J]. *Ocean Development and Management*, 2017, 34(3): 99-104.  
任尚书, 周树道. 四种海水透明度现场测量方法的对比分析及发展趋势研究[J]. *海洋开发与管理*, 2017, 34(3): 99-104.
- [4] Gong J, Qin L L, Song D W. Research on the method of measuring the transparency in the sea using optical instrument [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(1): 182-185.  
宫建, 秦亮亮, 宋大伟. 光学仪器测量海水透明度方法研究[J]. *舰船电子工程*, 2009, 29(1): 182-185.
- [5] Yang Y Z, Cao W X, Sun Z H, *et al.* Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 102-107.  
杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华, 等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 102-107.
- [6] Liu J T, Chen W B. Feasibility study of laser communications from satellite to submerged platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(10): 1441-1446.  
刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下目标通信可行性研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(10): 1441-1446.
- [7] Zhu H R, Zhu H, Liu J T, *et al.* Measurement system for optical concealment depth of underwater vehicle[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 2778-2784.  
朱海荣, 朱海, 刘金涛, 等. 水下航行器光学隐蔽深度测量系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 2778-2784.
- [8] Zhu H R, Cai P, Zhu H, *et al.* Miniaturization design of optical concealment depth measuring system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 726-731.  
朱海荣, 蔡鹏, 朱海, 等. 光学隐蔽深度测量系统的小型化设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 726-731.
- [9] Lee Z P, Carder K L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 361-368.
- [10] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationship between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(2): 417-427.
- [11] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [12] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: C02016.
- [13] Lee Z P, Darecki M, Carder K L, *et al.* Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: an evaluation of remote sensing methods [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: C02017.
- [14] Preisendorfer R W. Secchi disk science: visual optics of natural waters [J]. *Limnology & Oceanography*, 1986, 31(5): 909-926.
- [15] Doron M, Babin M, Hembise O, *et al.* Ocean transparency from space: validation of algorithms estimating secchi depth using MERIS, MODIS and SeaWiFS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 2986-3001.