

ICS 07.040

CCS A 77

团 体 标 准

T/CI 328—2024

被动光学卫星遥感浅水水下地形反演技术 规范

Technical specification for shallow water bathymetry using passive optical satellite
remote sensing

2024 - 04 - 15 发布

2024 - 04 - 15 实施

中国国际科技促进会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号与缩略语	2
5 基本要求	2
6 技术流程	2
7 数据准备与处理	3
7.1 卫星遥感影像筛选	3
7.2 遥感影像处理	3
8 水下地形反演方法	5
8.1 非线性光谱优化法	5
8.2 基于波谱匹配的查找表法	5
9 成果质量检查	6
9.1 精度评价	6
9.2 水下地形反演产品质量检查	6
10 成果整理与上交	6
10.1 成果提交要求	6
10.2 成果提交内容	6
附录 A（资料性） 非线性光谱优化法	7
参考文献	9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由南京大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：南京大学、武汉大学、中国人民解放军战略支援部队信息工程大学、同济大学、中山大学、厦门大学、哈尔滨工业大学、中国地质大学（武汉）、广西大学、桂林理工大学、上海海洋大学、海南师范大学、天津师范大学、南京信息工程大学、中国科学院空天信息创新研究院、中国科学院南海海洋研究所、自然资源部第一海洋研究所、自然资源部第二海洋研究所、自然资源部第三海洋研究所、自然资源部国土卫星遥感应用中心、浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院)、中国四维测绘技术有限公司。

本文件主要起草人：程亮、楚森森、李满春、毛志华、邓孺孺、谷延锋、邱振戈、陈本清、刘焱雄、唐世林、杨必胜、王成、刘春、王程、邢帅、周国清、王力哲、史永忠、黄荣永、涂兵、谌颂、季辰、庄启智、吴洁、李国元、栾奎峰、朱卫东、郭继发、吴忠强。

被动光学卫星遥感浅水水下地形反演技术规范

1 范围

本文件规定了被动光学卫星遥感浅水水下地形反演的基本要求、数据准备、数据处理、反演算法、精度评价、质量控制等内容。

本文件适用于采用被动光学卫星遥感对不超过1倍塞氏盘可见深度的大洋水体进行的水下地形反演作业。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 12319 中国海图图式
- GB/T 13989 国家基本比例尺地形图分幅和编号
- GB/T 14911 测绘基本术语
- GB/T 14950 摄影测量与遥感术语
- GB/T 15968 遥感影像平面图制作规范
- GB/T 18316 数字测绘成果质量检查与验收
- GB/T 20257 国家基本比例尺地图图式
- GB/T 24356 测绘成果质量检查与验收
- GB/T 32067 海洋要素图式图例及符号
- GB/T 50228 工程测量基本术语标准

3 术语和定义

GB/T 14911、GB/T 14950与GB/T 50228中界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

被动光学卫星遥感 passive optical satellite remote sensing

不接触物体本身，卫星传感器被动接收目标物的可见光-近红外电磁波信息，经处理、分析后，识别目标物、揭示其几何、物理特征和相互关系及其变化规律的现代科学技术。

3.2

大洋水体 oceanic waters

水体其固有光学参数的变化主要由浮游植物及其附属物的变化决定的大洋开阔水体。

3.3

理论最低潮面 the lowest normal low water

我国海图深度基准面的具体实现形式，为理论上可能出现的潮汐最低水位，其高度从当地平均海平面起算。

[来源: GB/T 17501—2017, 3.6]

3.4

平均海平面 mean sea level

高程等于海洋水位观测结果平均值的平静的理想海面，按观测时长可分为日平均、月平均、年平均和多年平均海平面。

[来源: GB/T 39624—2020, 3.6]

3.5

塞氏盘深度 secchi disk depth

采用塞氏盘测量水体透明度的一种常用方法，该深度表示可见光在水体中的透射深度。

3.6

深度基准面 depth datum

海洋测量中深度的起算面，是海图、水深图及各种水深资料所载深度的起算面。

[来源: GB/T 17501-2017, 3.5]

3.7

耀斑校正 flare correction

消除或减弱卫星遥感影像中由太阳光经水面反射和折射形成的水面耀斑现象。

4 符号与缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

NDWI: 归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index)

NIR: 近红外波段 (Near Infrared)

RMSE: 均方根误差 (Root Mean Square Error)

MRE: 平均相对误差 (Mean Relative Error)

5 基本要求

- 5.1 大地基准应采用 CGCS2000。在采用依法批准的相对独立坐标系统时，应与 CGCS2000 建立联系。
- 5.2 高程基准应采用 1985 国家高程基准，在远离大陆的岛、礁，其高程基准可采用当地平均海平面。
- 5.3 深度基准面应采用理论最低潮面，在远离大陆的岛、礁，其深度基准面可采用当地平均海平面。
- 5.4 表示海域的图式符号应符合 GB 12319 和 GB/T 32067 的要求。
- 5.5 时间基准应采用公元纪年。
- 5.6 成果的生产、分发和使用应符合保密的相关规定。

6 技术流程

被动光学卫星遥感浅水水下地形反演技术流程主要包括卫星遥感影像筛选、遥感影像处理、水下地形反演、精度检验与评价等内容。具体流程见图1。

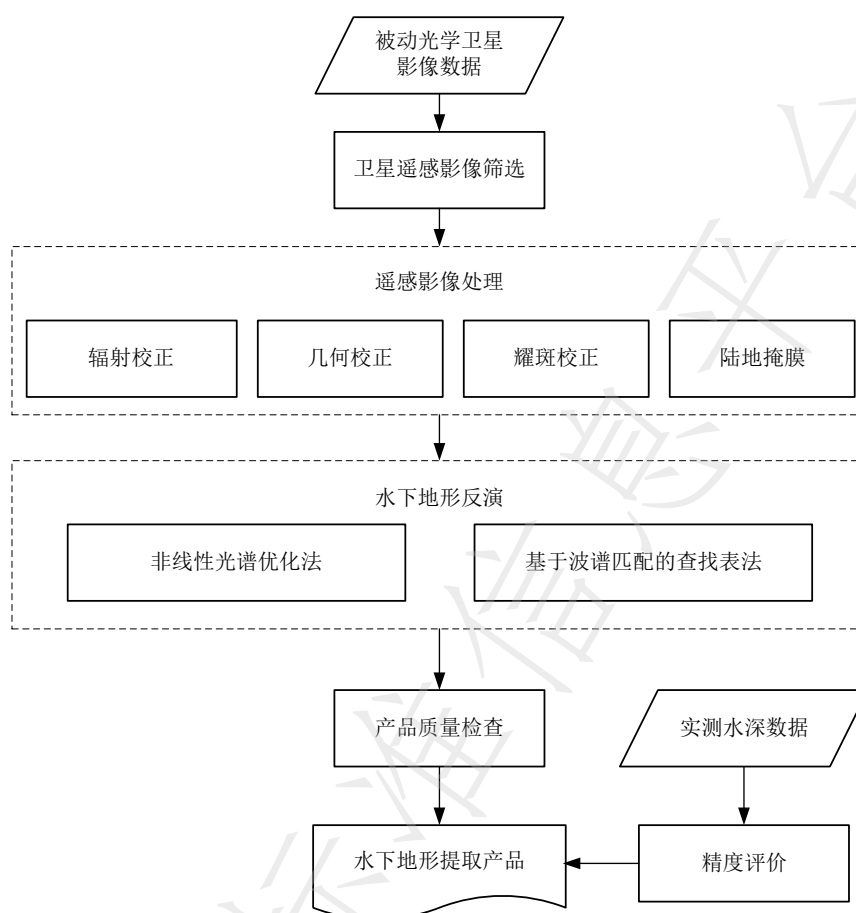


图1 被动光学卫星遥感浅水水下地形反演流程图

7 数据准备与处理

7.1 卫星遥感影像筛选

7.1.1 空间分辨率

选择覆盖反演区域的中高分辨率影像数据。

注：在一般情况下，空间分辨率优于30m更有利于水下地形卫星遥感提取。

7.1.2 影像时相

选择与测量任务需求时间相近的、成像质量好的、覆盖反演区域的一期卫星遥感影像。

7.1.3 影像波段

使用高光谱或多光谱卫星遥感影像，需包含红（630-690 nm）、绿（520-590 nm）、蓝（450-520 nm）等可见光波段和近红外波段（770-890 nm）。

7.1.4 影像质量

卫星影像质量应符合以下要求：

- a) 影像层次丰富、色彩清晰、色调均匀、反差适中；
- b) 影像无传感器条带噪声，主要工作区无明显环境噪声。

7.2 遥感影像处理

7.2.1 辐射校正

辐射校正包括辐射定标和大气校正。

7.2.1.1 辐射定标

7.2.1.1.1 将图像的像元亮度值转换为绝对辐射亮度。

7.2.1.1.2 波段 λ 的辐射亮度应依据以下计算公式计算：

$$L_{\lambda} = k \cdot DN + c \dots\dots\dots (1)$$

式中：

L_{λ} ——波段 λ 的辐射亮度值；

k ——增益；

DN ——像元亮度值；

c ——偏移。

7.2.1.2 大气校正

将辐射亮度或者表观反射率转换为地表反射率，消除大气散射、吸收、反射引起的误差。

7.2.2 几何校正

遥感影像几何校正符合以下要求：

- 应在影像上选取明显清晰、便于识别和相对固定的点位标志作为控制点；
- 控制点在影像上均匀分布；
- 依据情况可采用高次多项式等方法对影像进行几何精校正。

7.2.3 耀斑校正

7.2.3.1 遥感影像耀斑校正应采用以下步骤：

- 在经过大气校正的影像上，选取一个或多个包含不同程度耀斑的典型区域，确定近红外波段的最低值；
- 对选取区域内的像元，以近红外波段为 X 轴，以可见光波段为 Y 轴进行统计回归分析，确定斜率；
- 根据耀斑校正公式获取整幅影像耀斑校正后的像元值。

7.2.3.2 耀斑校正算法应采用以下计算公式：

$$R_{wb}(\lambda) = R(\lambda) - b(\lambda)[R(NIR) - R_{min}(NIR)] \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$R_{wb}(\lambda)$ ——波段 λ 耀斑校正后的地表反射率值；

$R(\lambda)$ ——波段 λ 耀斑校正前的地表反射率值；

$b(\lambda)$ ——斜率；

$R(NIR)$ ——近红外波段地表反射率值。

7.2.4 陆地掩膜

7.2.4.1 使用 $NDWI$ 提取遥感影像水体，将陆地进行掩膜处理。 $NDWI$ 的计算使用绿波段（ $Green$ ）和近红外波段（ NIR ）。

7.2.4.2 $NDWI$ 值计算公式如下：

$$NDWI = \frac{R_{Green} - R_{NIR}}{R_{Green} + R_{NIR}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

R_{Green} ——绿波段地表反射率值；

R_{NIR} ——近红外波段地表反射率值。

7.2.5 质量要求

遥感影像处理后，数据质量应符合GB/T 15968的要求。

7.2.6 分幅和编号

影像分幅和编号应符合GB/T 13989的要求。

8 水下地形反演方法

8.1 非线性光谱优化法

8.1.1 基于辐射传输方程的半解析模型，采用非线性光谱优化法求解浅海水深及海水固有光学参数。

8.1.2 应采用覆盖可见光近红外波长的高光谱遥感影像，如采用多光谱遥感影像，需包含蓝光、绿光、红光、近红外等波段。

8.1.3 非线性光谱优化法应采用下列基本流程：

a) 根据光的辐射传输机理，遥感反射比 $r_{rs}(\lambda)$ 可表述为：

$$r_{rs}(\lambda) = f[a(\lambda), b_b(\lambda), \rho(\lambda), H, \theta_w, \theta_v, \varphi] \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$r_{rs}(\lambda)$ ——遥感反射比；

$a(\lambda)$ ——吸收系数；

$b_b(\lambda)$ ——后向散射系数；

$\rho(\lambda)$ ——底质反射率；

H ——水深；

θ_w ——太阳天顶角；

θ_v ——天底观测角；

φ ——太阳视场方位角。

b) 未知数 $[a(\lambda), b_b(\lambda), \rho(\lambda), H]$ 参数化后，遥感反射比方程组可改写为仅有 5 个未知量的方程组，见公式(5)：

$$r_{rs}(\lambda) = f[P, G, X, B, H] \dots\dots\dots (5)$$

式中：

P ——浮游植物色素的吸收系数；

G ——有色可溶有机物和碎屑的吸收系数；

X ——颗粒物后向散射系数；

B ——底质反射率；

H ——水深。

c) 使用非线性光谱优化法解算方程。在解算过程中，模型调整 5 个变量 (P, G, X, B, H) 的数值，使目标误差函数达到最小值，从而获取最优解。目标误差函数的计算，应根据使用影像调整波长范围。

$$error = \frac{[\sum_1^n (r_{rs}(\lambda_i) - \hat{r}_{rs}(\lambda_i))^2]^{0.5}}{\sum_1^n r_{rs}(\lambda_i)} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$r_{rs}(\lambda_i)$ ——遥感反射比；

$\hat{r}_{rs}(\lambda_i)$ ——方程组模型计算的遥感反射比。

详细解算公式见附录A。

8.2 基于波谱匹配的查找表法

8.2.1 基于辐射传输方程的半解析模型，采用基于波谱匹配的查找表法求解浅海水深及海水固有光学参数。

8.2.2 应采用覆盖可见光近红外波长的高光谱遥感影像。

8.2.3 基本流程包含建立水体遥感反射率波谱库、查找表和波谱匹配等三个步骤，应符合以下要求：

a) 利用基于水体辐射传输方程的水体仿真模型（如 Hydrolight）模拟不同成分、底质和水深的水体的遥感反射率，建立水体遥感反射率波谱库。水体仿真模型输入包括水体各组分的浓度、吸收和散射特性、风驱动的海面状态（Monte Carlo 模拟）、入射在海表面的太阳直接辐射和天空光漫射辐射分布和水体底部边界条件等；

b) 基于仿真的水体遥感反射率波谱库构建“遥感反射率光谱-水深”查找表；

- c) 逐点将高光谱遥感影像预处理后的遥感反射率检索“遥感反射率光谱-水深”查找表，波谱匹配水体反射率的查找表项（通常以最小二乘误差最小为匹配准则）。该项对应的水深即所求水深，对应的水体成分特性和底质性质也即遥感反演的水体属性参数。

9 成果质量检查

9.1 精度评价

9.1.1 应利用实测水深数据，对水下地形反演结果进行精度评价。定量评价指标使用*RMSE*和*MRE*。

9.1.2 精度评价应采用以下公式：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{n}} \dots\dots\dots (7)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|H_i - \hat{H}_i|}{H_i} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

H_i ——实测水深值；

\hat{H}_i ——反演水深值；

n ——实测水深样本数量。

9.1.3 在0~10m水深范围内，*RMSE*应小于2m；在10~20m水深范围内，*MRE*应小于20%。

9.2 水下地形反演产品质量检查

9.2.1 检查因船舶、养殖箱等水面设施遮挡水下光学信号造成提取结果异常的区域，掩膜消除。

9.2.2 检查成果图色彩选择是否合理、易读。

9.2.3 产品质量检查与验收符合 GB/T 24356 和 GB/T 18316 的要求。

9.2.4 地图注记、图式及图廓等具体要素符合 GB/T 20257 中的要求。

10 成果整理与上交

10.1 成果提交要求

作业流程、技术资料 and 成果数据应完整，内容真实、表述准确。

10.2 成果提交内容

成果提交内容主要包括：

- a) 水下地形成果图；
- b) 精度评价及技术总结；
- c) 其他相关资料。

附录 A
(资料性)
非线性光谱优化法

A.1 非线性光谱优化法

被动光学遥感影像预处理后，将水面以上的遥感反射比 R_{rs} 转换为次水表面遥感反射比 r_{rs} ，转换式如下：

$$r_{rs} = \frac{R_{rs}}{0.52 + 1.7R_{rs}} \dots\dots\dots (A.1)$$

根据光学浅水中单次及准单次散射理论以及单一辐射传输过程，次水表面遥感反射比 r_{rs} 计算公式可近似表达见公式 A.2~A.8：

$$r_{rs} = r_{rs}^{dp} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{\cos(\theta_w)} + \frac{D_u^c}{\cos(\theta_v)}\right)KH\right) \right] + \frac{1}{\pi} \rho \exp\left(-\left(\frac{1}{\cos(\theta_w)} + \frac{D_u^B}{\cos(\theta_v)}\right)KH\right) \dots\dots\dots (A.2)$$

$$D_u^c = 1.03(1 + 2.4\mu)^{0.5} \dots\dots\dots (A.3)$$

$$D_u^B = 1.04(1 + 5.4\mu)^{0.5} \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\mu = b_b / (a + b_b) \dots\dots\dots (A.5)$$

$$k = a + b_b \dots\dots\dots (A.6)$$

$$b_b = b_{bw} + b_{bp} \dots\dots\dots (A.7)$$

$$a = a_w + a_{phy} + a_{dg} \dots\dots\dots (A.8)$$

式中：

r_{rs}^{dp} ——光学深水遥感反射比；

θ_w ——次水表面太阳天顶角；

θ_v ——次水表面天底观测角；

D_u^c ——水体散射的光程延长系数；

D_u^B ——底质散射的光程延长系数；

K ——衰减系数；

H ——水深；

ρ ——底质反射率；

b_b ——后向散射系数；

b_{bw} ——纯海水后向散射系数；

b_{bp} ——颗粒物后向散射系数；

a ——吸收系数；

a_w ——纯海水吸收系数；

a_{dg} ——有色可溶有机物和碎屑的吸收系数；

a_{phy} ——浮游植物色素吸收系数。

次水表面遥感反射比 r_{rs} 表达式中，右边第一项代表水深为无限深时水体的贡献，第二项代表来自海底的贡献。其中，来自光学深水区的次水表面遥感反射比 r_{rs}^{dp} 表示为：

$$r_{rs}^{dp} = g\mu \dots\dots\dots (A.9)$$

$$g = g_0 + g_1\mu^{g_2} \dots\dots\dots (A.10)$$

其中，若 $g_0 = 0.084$ ； $g_1 = 0.170$ ； $g_2 = 1$ 。则公式 A.9 表示为：

$$r_{rs}^{dp} = (0.084 + 0.170\mu)\mu \dots\dots\dots (A.11)$$

若有 n 个相互独立的光谱通道，表达式为：

$$r_{rs}(\lambda) = f[a_w(\lambda), b_b(\lambda), \rho(\lambda), H, \theta_w, \theta_v, \varphi] \dots\dots\dots (A.12)$$

也可表示为以下方程组：

$$r_{rs}(\lambda_1) = f[a_w(\lambda_1), b_{bw}(\lambda_1), a_{phy}(\lambda_1), a_{dg}(\lambda_1), b_{bp}(\lambda_1), \rho(\lambda_1), H]$$

$$r_{rs}(\lambda_2) = f[a_w(\lambda_2), b_{bw}(\lambda_2), a_{phy}(\lambda_2), a_{dg}(\lambda_2), b_{bp}(\lambda_2), \rho(\lambda_2), H]$$

...

$$r_{rs}(\lambda_n) = f[a_{\omega}(\lambda_n), b_{b\omega}(\lambda_n), a_{phy}(\lambda_n), a_{dg}(\lambda_n), b_{bp}(\lambda_n), \rho(\lambda_n), H] \dots\dots\dots (A. 13)$$

其中： $a_{\omega}(\lambda), b_{b\omega}(\lambda)$ 为已知量，因此，对于每一个 $r_{rs}(\lambda_n)$ 光谱，有 4 个与光谱有关的未知量 $a_{phy}(\lambda), a_{dg}(\lambda), b_{bp}(\lambda), \rho(\lambda)$ 和 1 个与光谱无关的未知量 H ，对于 n 个方程，则有 $4n+1$ 个未知量需要被求解。为从数学上解决这个问题，需要引入下列经验参数化模型以减少未知量，见公式(A. 14) ~ (A. 17)。

$$a_{phy}(\lambda) = [a_0(\lambda) + a_1(\lambda) \ln(P)]P \dots\dots\dots (A. 14)$$

式中：

P ——波长 440nm 处的浮游植物色素吸收系数， $P = a_{phy}(440)$ ；

$a_0(\lambda)$ ——经验系数；

$a_1(\lambda)$ ——经验系数。

$$a_{dg}(\lambda) = G e^{-S(\lambda-400)} \dots\dots\dots (A. 15)$$

式中：

G ——波长 440nm 处的有色可溶有机物和碎屑的吸收系数， $G = a_{dg}(440)$ ；

S ——光谱斜率， $S = 0.015 \text{nm}^{-1}$ 为经验系数，取值 0.011-0.021 nm^{-1} 。

$$b_{bp}(\lambda) = X(550/\lambda)^Y \dots\dots\dots (A. 16)$$

式中：

X ——波长 550nm 处的颗粒物后向散射系数， $X = b_{bp}(550)$ ；

Y ——光谱斜率，取值为 0.5，为经验系数。

$$\rho(\lambda) = B\rho^+ \dots\dots\dots (A. 17)$$

式中：

B ——550nm 处的底质反射率；

ρ^+ ——归一化 550nm 底质反射率。

半解析模型引入参数化模型后，遥感反射比方程组能改写为仅有 5 个未知量的方程组，见公式(A. 18)：

$$\begin{aligned} r_{rs}(\lambda_1) &= f[a_{\omega}(\lambda_1), b_{b\omega}(\lambda_1), P, G, X, B, H] \\ r_{rs}(\lambda_2) &= f[a_{\omega}(\lambda_2), b_{b\omega}(\lambda_2), P, G, X, B, H] \dots\dots\dots (A. 18) \\ &\dots \\ r_{rs}(\lambda_n) &= f[a_{\omega}(\lambda_n), b_{b\omega}(\lambda_n), P, G, X, B, H] \end{aligned}$$

式中：

P ——浮游植物色素的吸收系数；

G ——有色可溶有机物和碎屑的吸收系数；

X ——颗粒物后向散射系数；

B ——底质反射率；

H ——水深。

使用非线性优化算法解算方程。在解算过程中，模型调整 5 个变量(P, G, X, B, H)的数值，使目标误差函数达最小值，从而获取最优解。目标误差函数的计算，应根据使用影像调整波段范围，见公式(A. 19)。

$$error = \frac{[\sum_1^n (r_{rs}(\lambda_i) - \hat{r}_{rs}(\lambda_i))^2]^{0.5}}{\sum_1^n r_{rs}(\lambda_i)} \dots\dots\dots (A. 19)$$

式中：

$r_{rs}(\lambda_i)$ ——遥感反射比；

$\hat{r}_{rs}(\lambda_i)$ ——方程组模型计算的遥感反射比。

若采用多光谱影像，先将求解的 \hat{r}_{rs} 通过波谱响应函数转换成多光谱影像的蓝光、绿光、红光、近红外波段遥感反射比。

参 考 文 献

- [1] GB/T 17501 海洋工程地形测量规范
-

全国团体标准信息平台