基于分段自适应算法的浅海水深遥感反演融合模型研究

张雪纯^{1,2},马 毅^{1,2},张靖宇²,程 洁^{2,3}

(1. 内蒙古师范大学, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 山 东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要:对于水深光学遥感反演研究,虽然已经建立了大量的模型方法,然而对于不同水深段,同一模型的反演精度各异,且采用单一模型进行水深反演得到的整体反演精度未必最佳。为了提高水深光学 遥感反演的整体精度,本文提出一种分段自适应水深反演融合模型,模型在误差估计的基础上,结合 了对数线性模型、对数转换比值模型、改进的对数转换比值模型与多调节因子模型的优势。利用模型 在西沙群岛东岛开展了水深遥感反演实验,从整体反演精度、不同水深段反演精度及逐米水深精度等 角度进行分析,结果表明,分段自适应融合模型的整体精度最高,平均绝对误差为1.09 m,平均相对误 差达到 16.06%;分水深段来看,分段自适应融合模型在多数不同水深段内的反演效果均最好;从逐米 精度来看,分段自适应融合模型在大部分逐米水深段的反演能力均优于其他模型。

关键词:水深光学反演;分段自适应;对数模型
中图分类号:TP79 文献标识码:A 文章编号:1000-3096(2020)06-0001-11
DOI: 10.11759/hykx20191119003

水深是了解海洋环境的一个关键参数,对海岸 研究和海洋工程建设非常重要,也为海上运输和航 行提供重要信息。由于传统的船载水深测量方法存 在不足之处,对于船只无法到达的复杂区域不能适 用,且成本较高、耗时耗力。遥感水深探测因其覆盖 范围广、更新时间快、成本低的优势,逐渐成为一种 弥补传统船载测深的方法。

水深光学遥感技术自 20 世纪 60 年代开始受到 关注,随着一系列地球观测卫星的升空,遥感平台 的多样化和可用遥感数据的富足极大的推进了光学 水深遥感的发展,水深遥感领域出现大量的水深遥 感反演模型[1-2]。理论解析模型因在构建过程中所需 的水体光学参数多,故其应用受到限制^[3],统计模型 利用统计学方法直接建立实测水深值与遥感图像辐 亮度值之间的相关关系,基本没有考虑水深遥感的 物理机制^[4]。半理论半经验模型是理论模型与经验算 法的结合,其中对数线性模型和对数转换比值模型 应用相对广泛, Benny 等^[5]根据水体光反射衰减特性 提出单波段水深反演模型, Lyzenga 等^[6]在此基础上 发展了双波段对数线性模型,并将该模型推广应用 到多个波段^[7-8]。Stumpf 等^[9]在线性反演模型基础上 提出了对数转换比值模型,避免了对数线性模型中 光学遥感器接收到的辐亮度与深水区辐亮度差值为

负的情况。Su等^[10]利用对数转换比值水深反演模型 对摩洛凯岛进行了水深反演实验,结果表明该方法 能大大提高反演效率,且比值模型对于深水区的反 演更具优势。Drakopoulou等^[11]利用线性模型与比值 模型对希腊克里特岛进行水深估计,实验结果表明 两种模型在不同底质水域的反演效果不同。近年来, 许多学者对传统的对数转换比值模型进行了改进, 田震[12]提出将传统对数转换比值模型中分子分母的 相同参数改变为相异的调节因子,可以减少模型反 演过程中自身的束缚,改善反演结果,并应用改进 的对数转换比值模型开展了珊瑚岛礁周边海域水深反 演,结果表明水深反演效果较传统模型有提升。水深探 测精度受环境影响较大,对于近岸极浅水域(<5 m),叶 绿素和悬浮物浓度相对较高且底质复杂,相对误差 常大于 50%, 水深反演精度难以提升, 陈安娜^[13]提 出一种多调节因子的对数转换比值模型,在传统模 型的基础上增加了表征水中浮游植物细胞、无机颗

收稿日期: 2019-11-19; 修回日期: 2020-02-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51839002)

[[]Foundation: the Key Project of Natural Science Foundation, China under Grant, No. 51839002]

作者简介:张雪纯(1995-),女,内蒙古包头人,硕士研究生,主要从 事海洋遥感与应用研究,E-mail:zxc_apparate@163.com;马毅(1973-), 男,通信作者,研究员,主要从事海岛海岸带遥感与应用研究, E-mail:mayimail@fio.org.cn

粒物、底质等干扰因素的可调因子,并对不同浊度的 水体进行了水深反演实验,结果表明新模型在 0~5 m 浅水深段反演精度有明显提高。

由于不同模型在不同水深段内的反演能力不同, 模型精度存在差异,且采用单一模型进行水深反演 得到的整体反演精度未必最佳。因此,为进一步提高 水深遥感反演的整体精度,本文结合对数线性模型、 Stumpf 对数转换比值模型、改进的对数转换比值模 型与多调节因子模型,提出一种水深遥感分段自适 应融合模型,利用 WorldView-2 影像对东岛进行了 水深反演实验,分别从模型整体反演精度、不同水深 段反演精度、不同水深分段方式与逐米水深反演精 度几个角度对比了不同模型的反演结果。

1 数据与方法

1.1 研究区与数据

本文的研究区域为中国西沙群岛的东岛周边海域,东岛在永兴岛东南约 50 km,面积约为 1.7 km², 是西沙群岛中的第二大岛,位于北纬 16°39′—16°41′、 东经 112°43′—112°45′之间。岛呈长方形,长约 2.4 km、宽约 1 km,平均海拔 4~5 m,是上升礁和珊瑚贝 壳沙体复合组成的岛屿,周围有沙堤环绕,岛中部 地势低洼。属于热带海洋气候,终年高温多雨,是中 国水热条件最优越的地区之一。

数据采用 WorldView-2 影像,见图 1。影像包含四个多光谱波段,分别为蓝波段(450~510 nm)、绿波段(510~580 nm)、红波段(630~690 nm)和近红外波段







(770~895 nm), 分辨率 2 m, 成像日期为 2012 年 9 月 20 日。在 863 项目的支持下, 实测水深数据在 2011 年 通过单波束测深仪测量获得,并已校正到理论深度 基准面,本文实验范围为 0~20 m 水深区。

1.2 数据预处理

1.2.1 辐射定标

将影像上无量纲的灰度值(DN 值)转换为具有 实际意义的辐亮度值的过程称为辐射定标,对于 WorldView-2影像,转换公式如下:

$$L(\lambda_i) = \frac{\text{absCalFactor}_i \times \text{DN}_i}{\Delta \lambda_i}, \qquad (1)$$

式中, $L(\lambda_i)$ 为第 *i* 波段的辐亮度值,单位为 W/(m²·sr·µm); absCalFactor_{*i*}为第 *i* 波段的绝对定标 系数; DN_{*i*}为第 *i* 波段图像像元灰度值; $\Delta\lambda_i$ 为第 *i* 波 段的等效波段宽度。

1.2.2 大气校正

大气的衰减作用对不同波长的光是有选择性的,因而大气对不同波段影像的影响是不同的,大气校 正可以去除大气散射、气溶胶等的影响,尽可能还原 地表真实反射率。本文采用 ENVI 中的 FLAASH 模 块对影像进行大气校正。

1.2.3 潮汐校正

采集水深实测数据的时间与获取遥感影像的时间并不相同,若不经过处理直接利用实测水深数据参与计算会导致误差的产生,为使水深反演的结果 更精确,需要对水深实测数据进行潮汐校正。潮汐校 正是将实测水深数据校正为影像获取时刻的瞬时水 深,某时刻的水深等于实测水深加上该时刻的潮高, 经查询潮汐表得到影像获取时潮高为 0.81 m。

1.3 模型方法

1.3.1 不同波段光谱与水深关系

为探究 WorldView-2 影像不同波段光谱与水深 间的关系,绘制控制点的四个多光谱波段光谱值与 水深值的散点图,见图 2。从图中发现蓝波段与绿波 段的光谱值随水深值的增加而减小,水深值增加至 15 m 以上时,蓝、绿波段的光谱值趋于平稳。红波 段的光谱值在水深范围 0~5 m 时随水深的增加而减 小,水深增加至 5 m 以上时,红波段的光谱值趋于平 稳。而近红外波段的光谱值与水深值关系不明显,光 谱值在不同水深范围内大致相同,呈平稳趋势。根据 以上分析,蓝、绿、红波段的光谱值与水深值间关系 研究论文 • Linn → ARTICLE





相较近红外波段明显,不同模型中采用不同波段光 谱值参与计算,详细见 1.3.2—1.3.5 节。

1.3.2 水深遥感分段自适应融合模型

由于不同模型在不同水深段内的反演精度存在 差异,为提高模型的整体反演精度,本文提出一种 水深遥感分段自适应融合模型。模型根据稀疏的实 测水深点或小比例尺海图将20m内的浅海水深进行 分段,计算不同模型反演得到的平均绝对误差与平 均相对误差,选取每个水深段内的最优精度的函数。

定义水深函数

$$Z = \begin{cases} F_1 = a_0 + \sum_{i=1}^{N} a_i \ln\left[L\left(\lambda_i\right) - L_{\infty}\left(\lambda_i\right)\right] \\ F_2 = m_0 \frac{\ln\left[nR_w\left(\lambda_i\right)\right]}{\ln\left[nR_w\left(\lambda_i\right)\right]} + m_1 \\ F_3 = m_0 \frac{\ln\left[nR_w\left(\lambda_i\right)\right]}{\ln\left[mR_w\left(\lambda_i\right)\right]} + m_1 \\ F_4 = m_0 \frac{\ln\left[aR_w\left(\lambda_i\right) + b\right]}{\ln\left[cR_w\left(\lambda_i\right) + d\right]} + m_1 \end{cases}$$
(2)

其中 *F*₁为对数线性模型, *F*₂为 Stumpf 对数转换比值 模型, *F*₃为改进的对数转换比值模型, *F*₄为多调节因 子模型,详细见 1.3.3—1.3.5 节。

 $Z = F_j$, min(MAE_{F_i}) =

$$\min\left(\mathsf{MAE}_{F_{1}},\mathsf{MAE}_{F_{2}},\mathsf{MAE}_{F_{3}},\mathsf{MAE}_{F_{4}}\right), j = 1, 2, 3, 4$$

$$0 < 5m \leq Z'_{i} \leq 5(m+1) \leq 10, (m = 0, 1) , (3)$$

$$Z = F_{j}, \min(\mathsf{MRE}_{F_{j}}) =$$

$$\min\left(\mathrm{MRE}_{F_1}, \mathrm{MRE}_{F_2}, \mathrm{MRE}_{F_3}, \mathrm{MRE}_{F_4}\right), j = 1, 2, 3, 4$$

10 < 5m \le Z'_i \le 5(m+1) \le 20, (m = 2, 3) , (4)

其中 MAE 为水深反演的平均绝对误差(Mean Absolute Error), MRE 为平均相对误差(Mean Relative

Error), 表达式如下:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |z_i - z'_i|}{n}, \qquad (5)$$

MRE =
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} |(z_i - z'_i) / z'_i|}{n}$$
, (6)

Z_i 为检查点的水深反演值, Z_i 为检查点的真实水深 值, n 为检查点个数。

即初始划分水深段在 0~10 m 范围内, 按水深反 演的平均绝对误差最小选取最优精度函数; 水深段 在 10~20 m 范围内, 按水深反演的平均相对误差最 小选取最优精度函数。

1.3.3 对数线性模型

多波段对数线性公式如下:

$$Z = a_0 + \sum_{i=1}^{N} a_i \ln \left[L\left(\lambda_i\right) - L_{\infty}\left(\lambda_i\right) \right], \tag{7}$$

式中, a_0 、 a_i 为常系数, $i = 1, \dots, N, N$ 为光谱的波段 数; $L(\lambda_i)$ 为波段 *i* 的辐亮度值; $L_{\infty}(\lambda_i)$ 是波段 *i* 在深 水区辐亮度值, 在影像中选取最接近浅水的深水区 域波段 *i* 的辐亮度值作为 $L_{\infty}(\lambda_i)$ 值^[14], 实验中选取全 部波段参加计算。

1.3.4 对数转换比值模型与改进的转换比值模型

为避免对数线性模型中光学遥感器接收到的辐亮度与深水区辐亮度差值为负的情形, Stumpf 等提出了对数转换比值模型:

$$Z = m_0 \frac{\ln\left[nR_w(\lambda_i)\right]}{\ln\left[nR_w(\lambda_j)\right]} + m_1, \qquad (8)$$

式中, m_0 , m_1 , n 为回归系数; $R_w(\lambda_i)$ 与 $R_w(\lambda_j)$ 为相应 波段 λ_i 和 λ_j 的反射率, 实验中选取蓝、绿波段进行 计算。 改进的对数转换比值模型将每个波段的对数调 节因子调整为 2 个,将传统对数转换比值模型中相 同的调节因子改为相异的因子,可以减少模型反演 中自身的束缚,改善反演结果,公式如下:

$$Z = m_0 \frac{\ln\left[nR_w(\lambda_i)\right]}{\ln\left[mR_w(\lambda_j)\right]} + m_1, \qquad (9)$$

式中, m_0 , n, m, m_1 为回归系数; $R_w(\lambda_i)$ 与 $R_w(\lambda_j)$ 为相 应波段 λ_i 和 λ_j 的反射率, 实验中选取蓝、绿波段进 行计算。

1.3.5 多调节因子模型

由于传感器记录的辐射值不仅包括底部水深, 还有叶绿素浓度或悬浮物等因素造成的衰减,近岸 极浅水域(<5 m)中叶绿素和悬浮物浓度相对较高、底 质复杂,水深反演精度难以提升,多调节因子模型 可以很好地解决此类问题,在对数转换比值模型的 基础上增加了水中浮游植物细胞、无机颗粒物、底 质等干扰因素的可调因子,具体公式如下:

$$Z = m_0 \frac{\ln \left\lfloor aR_w(\lambda_i) + b \right\rfloor}{\ln \left\lceil cR_w(\lambda_j) + d \right\rceil} + m_1, \qquad (10)$$

式中, m_0 , a, b, c, d, m_1 为回归系数; $R_w(\lambda_i)$ 与 $R_w(\lambda_j)$ 为 相应波段 λ_i 和 λ_j 的反射率, 实验中选取蓝、绿波段进 行计算。

1.3.6 模型建立

实验中选取空间分布均匀的控制点与检查点, 个数分别为 843 与 845,其分布如图 1 所示。对数线 性模型、对数转换比值模型、改进的对数转换比值 模型与多调节因子模型利用控制点的水深值与水深 点辐亮度值或反射率之间的关系,建立水深反演模

表 2 模型参数表

Tab. 2 Model parameters

型。检查点则用来对水深模型进行精度评价。不同 水深段的控制点与检查点数量如表1所示。

表1 不同水深段水深点数量

 Tab. 1
 Number of water depth points in different water depth sections

水深段	控制点	检查点
0~5 m	166	161
5~10 m	317	312
10~15 m	183	185
15~20 m	177	187

2 结果与分析

2.1 水深反演结果

对数线性模型、对数转换比值模型、改进的对 数转换比值模型与多调节因子模型的参数见表2,水 深遥感分段自适应融合模型根据控制点不同水深段 内精度不同,选取最优精度函数,实验得出控制点 在 0~5 m, 5~10 m, 10~15 m, 15~20 m 水深段内的最 优精度函数分别为多调节因子模型,多调节因子模 型,对数线性模型,对数线性模型。即在实测水深范 围为 0~10 m 时采用多调节因子模型; 10~20 m 范围 内选取对数线性模型。本文得出的分段自适应融合 模型见下式:

$$Z = \begin{cases} m_0 \frac{\ln\left[aR_w(\lambda_i) + b\right]}{\ln\left[cR_w(\lambda_j) + d\right]} + m_1, 0 \le Z'_i \le 10\\ a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \ln\left[L(\lambda_i) - L_\infty(\lambda_i)\right], 10 < Z'_i \le 20 \end{cases}$$
(11)

P						
模型	参数					
对 粉 化 杜 描 刊	a_0	a_1	<i>a</i> ₂	<i>a</i> ₃	a_4	
对奴线性侠型	-2.721	24.243	-26.422	3.485	-0.006	
动粉样拖业店借刑	m_0	п	m_1			
对奴将狭比值候望	50.794	27.58	-49.536			
改进的对数转换比值模型	m_0	п	т	m_1		
	49.935	20.442	23.243	-46.422		
多调节因子模型	m_0	а	b	С	d	m_1
	40.429	36.761	-4.734	24.825	-0.711	-42.270

对数线性模型、对数转换比值模型、改进的对 数转换比值模型、多调节因子模型与分段自适应融 合模型的水深反演结果如图 3 所示,其中分段自适应融合模型[图 3(e)]的水深反演结果图是依据实测

4



水深控制点划分水深范围后再将不同模型拼接而成, 控制点划分的水深范围见图 3(f)。利用实测水深点构 建的水深 DEM 见图 3(g)。根据图 3 中显示的不同模 型水深反演结果,可以发现从沿岸到开阔水域所有模 型的反演结果大致相同,均符合实测水深点构建的水 深 DEM 与控制点划分的水深分区范围。岛礁盘上水 深范围大致为 0~5m,东北方向分布范围较西南方向 分布范围更大;水深范围 5~10 m 大致分布于距岛 0.5~2 km 的西北侧与东南侧;而 10~20 m 水深范围较 小,在图中右下角水深较深,大致为18~20 m。注意到 岛的西南位置有一处港池,对数转换比值模型、改进 的对数转换比值模型、多调节因子模型与分段自适应 融合模型对此处的反演效果均较好,但对数线性模型 [图 3(a)]低估港池水深,该模型在 0~5 m 水深处的反 演效果与其余几种模型有明显差异,且在最外围西北 方向至东北方向水深 10~20 m 处,对数线性模型的水 深反演结果与对数转换比值模型、改进的对数转换比 值模型和多调节因子模型相比较更深。





2.2 模型整体反演精度比较

绘制检查点在不同模型得出的水深反演值与水 深实测值的散点图,见图 4。水深反演值与水深实测 值散点图直观地显示出每个检查点的水深反演值与 水深实测值的偏离情况,点越接近图中的 1:1 直线 说明偏离程度越小,水深反演值也就越接近实测值, 反之,点距离直线越远偏离程度越大。整体来看,分 段自适应融合模型的反演效果最好,在每个水深段 内的检查点都接近于 1:1 直线,偏离程度较其他 几种模型最小。对数线性模型的偏离程度相对较小, 10~20 m 水深段内反演效果优于其余模型,但在 0~ 5 m水深段内多数点偏离 1:1 直线,与上节中水深 反演结果图的分析一致。对数转换比值模型、改进 的对数转换比值模型与多调节因子模型的偏离程度 相近,在 0~10 m 水深段内,三种模型的反演效果较 好,特别是多调节因子模型,检查点均接近于图中 的 1:1 直线;但在 10~20 m 的水深段内,三种模型 的部分点水深值被低估,散点的偏离程度大于对数 线性模型。水深反演值与水深实测值的散点图显示, 对于水深中等至较深区域(10~20 m),所有模型的反 演效果均有下降,尤其是 15~20 m 水深段,散点的偏 离程度相对较大。



图 4 不同模型水深反演值与水深实测值散点图 Fig. 4 Scatter diagrams of the water depth inversion and measured values of different models

分别计算不同模型的平均绝对误差与平均相对 误差,见表 3。通过对五种不同模型的精度评价,发 现整体反演效果最好的是分段自适应融合模型,平 均绝对误差(MAE)为 1.09 m,与对数线性模型相比 降低 0.15 m,平均相对误差(MRE)为 16.06%,较对 数线性模型降低 4.75%。其次是多调节因子模型, MAE 为 1.21 m, MRE 为 17.68%。第三是改进的对数 转换比值模型,MAE 为 1.22 m, MRE 为 18.44%,改 进的对数转换比值模型与多调节因子模型的整体水 深反演精度接近,平均绝对误差相差 0.01 m,平均 相对误差相差 0.76%,均优于传统的对数线性模型 与对数转换比值模型。

表 3 不同模型的平均绝对误差与平均相对误差

Tab. 3 Mean absolute and relative errors of different models

- - - - - - - - - - - - - -	平均绝对误	平均相对误差
侠空	差(MAE)/m	(MRE) /%
分段自适应融合模型	1.09	16.06
对数线性模型	1.24	20.81
对数转换比值模型	1.23	18.72
改进的对数转换比值模型	1.22	18.44
多调节因子模型	1.21	17.68

海洋科学 / 2020 年 / 第 44 卷 / 第 6 期

2.3 水深段精度分析

通过对水深反演值与水深实测值散点图的分析, 发现不同模型在不同水深段内的精度有所不同,为 分析不同深度下模型的反演效果,将水深实测数据 分为四个不同的水深段,分别为 0~5 m、5~10 m、 10~15 m 和 15~20 m, 并计算各自的平均绝对误差与 平均相对误差,见表4与图5。表4显示在0~5m水 深段内,分段自适应融合模型的精度最好,平均绝对 误差为 0.79 m, 比对数线性模型降低 0.42 m; 平均相 对误差为 39.52%、低于对数线性模型约 19个百分点。 在 5~10 m 水深段内, 分段自适应融合模型的精度依 然最佳, 平均绝对误差为 0.98 m, 比对数线性模型降 低 0.19 m; 平均相对误差为 12.37%, 低于对数线性模 型 3 个百分点。但在 10~15 m 水深段内, 对数线性模 型的精度最好, MAE 为 1.12 m, MRE 为 9.03%, 分段 自适应融合模型与对数线性模型精度接近,平均绝对 误差与平均相对误差分别相差 0.04 m 与 0.43%。在 15~20 m 水深段内, 分段自适应融合模型的反演精度 与对数线性模型一致,平均绝对误差分别为 1.51 m, 平均相对误差为 8.49%。从图 5 中可以看出,随着水 深值的增加,几种模型的平均绝对误差呈上升趋势, 但平均相对误差均有下降,分段自适应融合模型在四 个水深段内的精度大部分为最优或接近最优。

表 4 不同模型分水深段精度评价

Tab. 4 Accuracy evaluation of different models in different water depth sections

模型	指标	0~5 m	5~10 m	10~15 m	15~20 m			
고난 米뉴 사람 사타 서부 프네	MAE/m	1.21	1.17	1.12	1.51			
州奴 线 [[侯室	MRE/%	58.75	15.56	9.03	8.49			
对数转换比值	MAE/m	0.93	1.06	1.29	1.73			
模型	MRE/%	48.07	13.88	10.2	9.94			
改进的对数转	MAE/m	0.92	1.03	1.31	1.74			
换比值模型	MRE/%	47.29	13.41	10.32	10.02			
多调节因子	MAE/m	0.88	0.99	1.33	1.78			
模型	MRE/%	42.83	12.93	10.43	10.25			
分段自适应融	MAE/m	0.79	0.98	1.16	1.51			
合模型	MRE/%	39.52	12.37	9.46	8.49			



图 5 不同模型分水深段精度评价图 Fig. 5 Accuracy evaluation of different models in different water depth sections

2.4 不同水深分段方式精度比较

上节中根据四个水深段 0~5 m、5~10 m、10~15 m、 15~20 m分别对不同模型进行精度分析,现对 0~20 m 水深范围用不同的方式进行分段。表 5 为不同模型 在 0~10 m、0~15 m、5~15 m、5~20 m 与 10~20 m 的 平均绝对误差与平均相对误差。由表 5 可知,在 0~ 10 m、0~15 m、5~15 m 与 5~20 m 水深段内,本文提 出的分段自适应融合模型反演能力均最强,精度最 优,在 10~20 m水深段内,分段自适应融合模型与精 度最好的对数线性模型误差接近,平均绝对误差仅 相差 0.02 m,平均相对误差 0.22%。在 0~10 m 水 深段内,分段自适应融合模型 MAE 为 0.93 m, MRE 为 22.65%,较对数线性模型降低约 9 个百分点;在 0~15 m 水深段内,分段自适应融合模型的 MAE 为 0.98 m,分别比对数线性模型与对数转换比值模型 降低 0.19 m、0.11 m,平均相对误差为 18.76%,较对数线性模型与对数转换比值模型降低 6.05%、3%;在 5~15 m、5~20 m 水深段内,分段自适应融合模型的 MAE 分别为 1.04 m、1.16 m, MRE 分别为 11.29%、10.55%;综合这五个不同的水深段来看,分段自适应融合模型的反演能力强,在不同水深情况下反演 精度较好。

研究论文・』 → ARTICLE

表 5 不同水深分段方式精度评价

Tab.	5	Accuracy	evaluation	of	different	water	depth	segment	ations

模型	指标	0~10 m	0~15 m	5~15 m	5~20 m	10~20 m
고는 싸는 산는 사는 구류 고대	MAE/m	1.19	1.17	1.15	1.25	1.31
对奴线住候室	MRE/%	30.11	24.17	13.13	11.9	8.76
对数转换比值模型	MAE/m	1.02	1.09	1.15	1.3	1.51
	MRE/%	25.4	21.12	12.51	11.83	10.07
改进的对数转换比值模型	MAE/m	0.99	1.08	1.13	1.29	1.52
	MRE/%	24.82	20.73	12.26	11.67	10.17
多调节因子模型	MAE/m	0.95	1.06	1.12	1.29	1.55
	MRE/%	23.34	19.7	12	11.54	10.34
分段自适应融合模型	MAE/m	0.91	0.98	1.04	1.16	1.33
	MRE/%	21.52	18.12	11.29	10.55	8.98

2.5 逐米水深精度分析

为了进一步分析不同模型在不同水深段的反演 效果,分别计算逐米水深的平均绝对误差与平均相 对误差,并绘制折线图,见图 6。水深为 0~9 m、 11~12 m范围时,10个逐米水深段内分段自适应融合 模型反演效果最好,平均绝对误差与平均相对误差 均最低。在水深 9~11 m两个逐米水深段内,分段自 适应融合模型的反演精度次于多调节因子模型与改 进的对数转换比值模型。在 12~13 m水深范围内,对 数线性模型的精度最好,平均绝对误差与平均相对 误差最低,分段自适应融合模型与对数线性模型误 差接近。水深为13~18 m 这5个逐米水深段内时,分 段自适应融合模型的反演精度与对数线性模型一致, 平均绝对误差与平均相对误差均最低。18~20 m 时, 改进的对数转换比值模型反演精度优于其他模型。

根据逐米水深段的精度分析结果可知,分段自适应融合模型稳定性较高,在大多数逐米水深段内的反演能力较强,精度均最佳,仅在少部分逐米水深段(9~11 m、12~13 m、18~20 m),模型的反演精度略逊于其他模型。



海洋科学 / 2020 年 / 第 44 卷 / 第 6 期



图 6 逐米水深精度评价 Fig. 6 Accuracy evaluation of the per meter water depth

3 结论与讨论

本文利用 WorldView-2 卫星 4 波段影像,采用本 文提出的水深遥感分段自适应融合模型,与传统的 对数线性模型、Stumpf 对数转换比值模型,和近年 来提出的改进的对数转换比值模型与多调节因子模 型,以东岛为例分别开展了水深反演实验,并从不 同角度对这几种模型进行精度对比分析。结果表明:

1) 从整体上看,分段自适应融合模型的反演能力最强,水深反演值与水深实测值散点图的散点偏离程度最小;且分段自适应融合模型的反演精度最佳,平均绝对误差为1.09 m,平均相对误差为16.06%,均低于其余模型。

2) 以 5 m 为间隔分水深段来看,在 0~5 m、5~ 10 m、与 15~20 m水深段内分段自适应融合模型的 反演精度均最好,平均绝对误差与平均相对误差最 低。在 10~15 m水深段内,分段自适应融合模型的误 差也与精度最好的对数线性模型接近。按不同水深 分段方式来看,分段自适应融合模型在大部分水深 段的反演精度依然最高,表明以 5 m 为间隔取最优 精度函数的模型设置较为合理,同样也说明分段自 适应融合模型适用于地形起伏较小、水深变化均匀 海域的浅海水深反演研究。

3) 根据逐米水深精度比较结果,分段自适应 融合模型在绝大多数逐米水深范围内的反演能力 较强,但在少部分水深范围内(9~11 m、12~13 m、 18~20 m),分段自适应融合模型的反演精度略逊于 其他模型。

分段自适应融合模型利用实测数据的水深分布, 以 5 m 为水深间隔进行分段,进而选取最优精度函 数。所以,对于水深数据较少或稀疏分布的研究区域, 该模型的使用范围受到限制,在今后的研究中还需 对模型进行完善,使模型的反演精度更佳,应用范 围更广泛。

参考文献:

 赵洪臣. 基于 WorldView-2 的多级决策的光学遥感水 深反演方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
 Zhao Hongchen. Water depth inversion method of optical remote sensing using multilevel decision-making scheme based on WorldView-2 image[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.

 [2] 马毅,张杰,张靖宇,等. 浅海水深光学遥感进展[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(3): 331-351.
 Ma Yi, Zhang Jie, Zhang Jingyu, et al. Progress in shallow water depth mapping from optical remote

sensing[J]. Advances in Marine Science, 2018, 36(3): 331-351.

- [3] Figueiredo I N, Pinto L, Goncalves G. A modified Lyzenga's model for multispectral bathymetry using Tikhonov regularization[J]. IEEE Geoscience and Remote sensing Letters, 2016, 13(1): 53-57.
- [4] 李丽. 基于 WorldView-2 数据的西沙群岛遥感水深反 演——以赵述岛和南岛为例[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(4): 170-175.

Li Li. Remote sensing bathymetric inversion for the Xisha Islands based on WorldView-2 data: A case study of Zhaoshu Island and South Island[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2016, 28(4): 170-175.

- [5] Benny A H, Dawson G J. Satellite imagery as an aid to bathymetric charting in the Red Sea[J]. The Cartographic Journal, 1983, 20(1): 5-16.
- [6] Lyzenga D R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features[J]. Applied Optics, 1978, 17(3): 379-383.
- [7] Papedes J M, Spero R E. Water depth mapping from passive remote sensing data under a generalized ratio assumption[J]. Applied Optics, 1983, 22: 1134-1135.
- [8] Lyzenga D R, Malinas N P, Tanis F J. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote

Sensing, 2006, 44(8): 2251-2259.

- [9] Stumpf R P, Holderied K, Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types[J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(1): 547-556.
- [10] Su H, Liu H, Heyman W D. Automated derivation of bathymetric information from multi-spectral satellite imagery using a non-linear inversion model[J]. Marine Geodesy, 2008, 31(4): 281-298.
- [11] Drakopoulou P, Kapsimalis V, Parcharidis I, et al. Retrieval of nearshore bathymetry in the Gulf of Chania, NW Crete, Greece, from WorldView-2 multispectral imagery[C]//Sixth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2018). International Society for Optics and Photonics, 2018, 10773: 107730W.
- [12] 田震. 浅海水深多/高光谱遥感模型与水深地形图制 作技术研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2015.
 Tian Zhen. Study of bathymetry inversion models using multispectral or hyperspectral data and bathyorographical mapping technology[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2015.
- [13] 陈安娜. 适用于复杂环境的水深光学遥感新模型研究[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2019.
 Chen Anna. Research on novel model of optical remote sensing bathymetry for complex situations[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2019.
- [14] Chen B, Yang Y, Xu D, et al. A dual band algorithm for shallow water depth retrieval from high spatial resolution imagery with no ground truth[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 151: 1-13.



Research on the remote sensing inversion fusion model of shallow water depth based on the piecewise adaptive algorithm

ZHANG Xue-chun^{1, 2}, MA Yi^{1, 2*}, ZHANG Jing-yu², CHENG Jie^{2, 3}

(1. Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010010, China; 2. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Received: Nov. 19, 2019 **Key words:** water depth optical inversion; piecewise adaptation; logarithmic model

Abstract: Although numerous models and methods have been established for water depth inversion by optical remote sensing, the accuracy of the same model is different for different water depths. Moreover, the overall inversion accuracy obtained by using a single model for depth inversion may not be the best. To improve the overall accuracy of bathymetric optical remote sensing inversion, a piecewise adaptive depth inversion fusion model is proposed. On the basis of error estimation, the model combines the advantages of the log linear, log conversion ratio, improved log conversion ratio, and multiple adjustment factor models. The proposed model is used to conduct remote sensing inversion accuracy, inversion accuracy of different water depth sections, and per meter water depth accuracy, results show that the overall accuracy of the proposed model is the highest, with the mean absolute error of 1.09m and the mean relative error of 16.06%. In addition, the inversion results of the adaptive fusion model in most of the per meter water depth accuracy, the inversion capability of the piecewise adaptive fusion model in most water depth sections is better than that of other models.

(本文编辑:康亦兼)