doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.05.001

基于耀斑改正的多光谱水深反演方法研究

沈 蔚[1,2],纪 茜[1,2],邱耀炜[1,2],吴忠强[3]

(1.上海海洋大学 海洋科学学院,上海 201306;2.上海市海洋局河口海洋测绘工程技术研究中心,上海 201306;
3.南京大学 地理与海洋科学学院,江苏 南京 210023)

摘 要:利用 WorldView-2 四波段卫星数据和电子海图数据,基于改进的耀斑改正算法和双波段比值算法,反演获得了 3 处典型海域的浅水水深。通过不同海域、不同耀斑条件下水深反演实验,探讨了 RED,NIR 波段在典型四波段水深反演中的作用和影响,发现在双波段比值法水深反演中,引入 RED+NIR 波段进行耀斑改正处理,可以增加珊瑚、海藻等绿色物质覆盖海底的反射率,有效地提高该类海域的水深反演精度。基于耀斑改正的多光谱水深反演方法,适用于中轻度耀斑条件下,水质较清澈的浅海水深反演,可在国内外典型四波段卫星数据水深反演中推广应用。

关键词:WorldView-2;耀斑;水深遥感;双波段比值;四波段

中图分类号:P715.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-2029(2019)05-0001-05

水深作为一个重要的水文要素,是海洋环境的一个重要因子,海洋水深和水下地形的测量对人类的生产生活有着重要的意义。目前,水深测量分为声呐测量与遥感测深两种方法。声呐测深具有高精度、全覆盖的特点,而对于浅水海域,受船只吃水深度和自然天气条件影响,常常无法实施或效率低下。当前技术条件下,通常遥感反演水深能力在 20 m 以浅,且精度远不及声呐测量,但具备大范围同步测量、效率高、经济性好等显著特点,随着卫星和航空载荷分辨率的提高,采样间隔的缩短,卫星遥感水深反演为海洋动态监测和调查提供了可能。

目前,制约水深反演精度的因素主要包括:拍摄延时、耀斑、水体悬浮物质、海底底质、水深控制点、水深反演模型等,其中耀斑普遍存在于海面图像中,且对水深反演精度影响非常大,故耀斑改正成为水深反演成败的关键技术。

本文探讨了 RED,NIR 波段在典型四波段水深反演中的作用和影响,提出了改进的耀斑改正算法,并对 3 处典型浅水海域水深进行了反演实验,结果证明,本文方法能够有效地提高中轻度耀斑条件下水质较清澈海域的水深反演精度,为大范围近海水深遥感反演提供方法参考。

1 多光谱水深遥感方法

1.1 光学遥感反演水深原理

光学遥感水深反演是基于光线对水体的透射原理之上的,其主要信息来源为光学遥感器接收的信号中包含海底对太阳光的反射[1]。多光谱水深遥感的物理基础是水体对太阳辐射吸收和散射而形成的光谱特征量测与分析。

在海洋遥感中,由于风浪等原因,引起太阳光在粗糙海面的菲涅耳反射而产生耀斑。在光学遥感图像中,海面上的海浪在影像上表现为白色耀斑,其像元辐射亮度值出现极大变化,最终影响水深反演的精度[2]。因此,估计和消除太阳耀斑的影响对水下地形等信息的提取非常重要。对于近岸的迎风面产生的波浪,在其周围边缘的耀斑形成的白冠密集而又强烈,甚至导致这部分像元辐亮度难以改正和利用。

收稿日期:2019-04-29
基金项目:上海市科委资助项目(14590502200)
作者简介:沈蔚(1977-),男,博士,教授,研究方向为海洋测绘与遥感。E-mail: wshen@shou.edu.cn

1.2 多光谱遥感水深反演模型

当前,有 3 类常用多光谱水深反演遥感模型:理论解析模型、半经验半理论模型和统计相关模型。其中利用理论模型的简化模式,结合统计数据,建立的半经验半理论的水深反演遥感模型,仅需要少量的实测水深值参与运算,且可保证相当的水深精度,适合在缺少实测资料的情况下进行的水深反演[3]。

当前,基于半经验半理论模型的多光谱水深反演方法主要有“线性法”和“比值法”,两种方法均是建立在光在水体中传播的衰减原理之上 ,即光在水中的穿透能力主要是由其波长决定的。Stumpf 等[4]发展的“比值法”模型的数学方程为:

$$Z=m_1\frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))}-m_0 \tag{1}$$

式中:Z 代表水深;m_1 为根据不同水深可变的比例系数;n 为保证比率正确值的一个常数;R_w 为表观反射率;m_0 为 0 m 补偿水深值。

1.3 多光谱遥感水深反演技术流程

本文技术流程如图 1 所示。首先进行影像预处理和水深控制点的提取,包括几何校正、大气校正、耀斑等噪声去除、水陆分离、云掩膜和潮汐校正等过程;其次,通过水深反演比值模型,计算得到相对水深,基于相对水深和实测水深之间进行相关性分析,求得对应的拟合参数和拟合方程;最后在此基础上计算绝对水深,并利用水深控制点评估反演精度[5]。

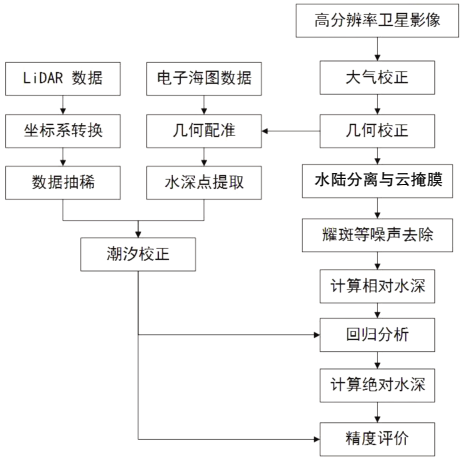


图 1 水深遥感反演技术流程

2 耀斑改正算法

2.1 耀斑改正研究现状

近年来,国内外学者做了许多这方面的研究,大部分研究是基于在近红外波段离水反射率在水中可以忽略不计假设之上,这就意味着进入传感器中的近红外波段传输信号几乎全为大气散射和海表面镜面反射,又因为波长对菲涅尔散射的影响很小,所以耀斑产生的信号在近红外和可见光波段的影响是一致的,可以用近红外波段来消除可见光波段的耀斑。最初的算法是基于像素的,其假设近红外的光谱辐射率为 0,从每个波段中减去近红外波段的影响以抵消耀斑效应[6-8]。后来的方法中用非 0 值的离水反射率来代替运算,并将此应用到浅水或者浑浊的水体中,以消除耀斑的影响。Hochberg 等[9]根据 Mustard 等[6]的理论,用近红外波段辐亮度最大值、最小值衡量近红外波段的空间变化范围,进而建立可见光和近红外波段的联系,以此来消除耀斑。Philpot[10]用 AVIRIS 数据做同样的实验,但是需要在影像的不同区域挑选一些黑暗像元和明亮的像元对比进行拟合运算,以适应大气条件变化。除了这些基于像素的耀斑改正方法之外,还有一些基于数据区域运算的方法(如 Hedley 等[11]),这些方法的共同之处就是应用数学统计来消除耀斑的影响。

在国内,中低分辨率海洋水色遥感的耀斑改正算法被提出来并得到广泛应用,而高分辨率遥感水深反演中出现较少。李龙龙等[12]用 Hedley 的方法对太阳耀斑的去除方法进行了探讨,其中 NIR1 用来估算 Blue,Green,Red 波段内太阳耀斑的成分,NIR2 用来估算 Coastal,Yellow,Red-edge 波段内太阳耀斑的成分,耀斑改正后结果应用到 WorldView-2 遥感影像反演浅海水深过程中,一定程度上提高了水深的反演精度。

2.2 常用耀斑改正算法

在 Hochberg 等提出的理论中,其假设首先是水对近红外波段来说是不透明的,所以在这个波段没有水体散射和水底反射的信号;其次,可见光波段的太阳耀斑像元与近红外的亮度值呈线性相关。在此基础上,使用近红外波段的信息从可见光波段中去除遥感信号中的太阳耀斑部分,去除耀斑效应。然而,此方法依据整幅影像上独立的两个点来求取参数,运算时存在很大的不确定性,作为改进,Hedley 等在影像上选择样本区内的点,以近红外波段的亮度为 X 轴,可见光波段的亮度为 Y 轴,对每一个可见光波段的所有像元进行线性回归,计算其线性关系。求得波段 i 线性回归的斜率 b_i,耀斑去除公式为:

$$R_i'=R_i-b_i(R_{NIR}-Min_{NIR}) \quad (2)$$

式中:R_i'是波段 i 纠正太阳耀斑后的亮度;R_{NIR}是 NIR 波段像元亮度值;Min_{NIR}是没有太阳耀斑的像元亮度值,这里用回归样本点中最小的 NIR 值来估计或是研究区域中最小的像元值。

3　基于耀斑改正的多光谱水深反演方法

3.1　算法设计

对于水气界面,由于海中气泡和风浪破碎对光的后向散射具有较强的作用,容易引起耀斑,严重影响海底特性的视觉识别,导致浅海水深反演产生较大误差。对于水体而言,其不仅受浮游植物的影响,而且受黄色物质和其它悬浮物质的影响。对于水底而言,珊瑚岛礁海域海底以含叶绿素较多的珊瑚和水草为主,大陆岛海域以泥沙质底质为主,火山岛底质以岩石为主。由于叶绿素在 400~500 nm 和 670 nm 附近都有吸收峰,当叶绿素密度较高时水体光谱反射率曲线在这两处出现峰值,同时,含藻类等叶绿素最显著的光谱特征是在 685~715 nm 范围出现反射峰[13]。对于有机分子和黄色物质等悬浮物,已有的研究表明 490 nm,550 nm 和 670 nm 波段附近是悬浮物浓度的敏感波段[14],而 490 nm 和 670 nm 波段又分别位于叶绿素的吸收峰和反射峰上,为对叶绿素比较敏感的两个波段。

综合考虑以上几种因素,本文改进了 Hedley 等人耀斑去除的算法,引入 RED+NIR,得到耀斑改正公式(3),并利用蓝绿波段比值法(式(1))对珊瑚岛、大陆岛、火山岛海域的水深进行了实验和分析。

$$R_i'=R_i-b_i(R_{(RED+NIR)}-Min_{(RED+NIR)}) \quad (3)$$

式中:$R_{(RED+NIR)}$为 RED+NIR 运算后像元亮度值;$Min_{(RED+NIR)}$代表 RED+NIR 运算后波段中没有太阳耀斑的像元亮度值,本文直接用 RED+NIR 运算后影像的最小的像元亮度值。

3.2　实验数据

本次水深反演实验使用四波段的 WorldView-2 多光谱数据,即 Blue(450~510 nm),Green(510~580 nm),Red(630~690 nm),NIR1(770~895 nm),其空间分辨率为 2 m。实验选取了 3 处不同类型海域,相关数据见表 1。

海南琼州海域和南海德奎岛水深点来自海图提取,南海甘泉岛水深点来自机载 LiDAR 数据,潮汐数据来自附近港口潮汐表。每个实验海区取 30 个水深点参与反演运算,取 50 个水深点作精度评价。

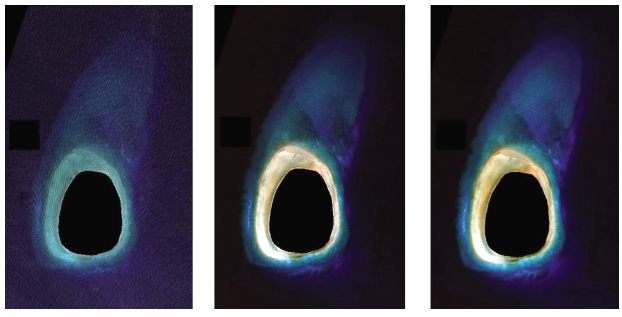
表 1　实验数据

多光谱影像	岛礁类型	时间	影像质量	验证数据	潮汐改正/m
甘泉岛	珊瑚岛	2014-04-02(03:33:31)	中度耀斑	SHOALS-000LiDAR	0.77
海南琼州	大陆岛	2012-02-24(03:26:35)	轻度耀斑	S-57 标准海图	1.05
德奎岛	火山岛	2013-04-18(02:44:50)	轻度耀斑	Navionics 海图	0.79

3.3　耀斑改正实验

为了减少耀斑除去过程中陆地部分对红外、红波段的影响,同时为后续更有效地提取水深信息,同时为增加海水区域影像的可视化效果,通过水陆分离剔除了卫星影像中的陆地部分。

以西沙甘泉岛为例,对经过几何校正、大气校正后的 WorldView-2 四波段图像进行耀斑改正,耀斑改正运算前后的效果如图 2 所示,(a)为未改正,(b)为式(2)改正,(c)为式(3)改正。通过对比发现,经改正后图像的耀斑基本消除,图像的对比度大大提高,进而提高水下地物识别能力和比值法水深反演能力。



(a) 耀斑改正前图像　(b) NIR 波段改正图像　(c) RED+NIR 波段改正图像

图 2　甘泉岛耀斑改正运算前后对比图

3.4　水深反演与精度评价

本文利用 Stumpf 等人发展的“比值法”模型(见式(1)),计算比值,并对比值进行处理,剔除由于影像 0 值引起的计算结果错误,得到相对水深值。在获取相对水深后,将相对水深值 X 作为自变量,真实水深值 Y 作为因变量,采用一元线性回归进行计算,求得拟合参数和拟合方程式,并且以此进一步

计算浅水区域(通常 20 m 以浅)的绝对水深。

反演水深精度评价中,将反演水深与检查点水深比对,采用平均相对误差来评价反演精度:

$$\delta=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta Z_i/Z_i)}{n} \tag{4}$$

式中:$\Delta Z_i=|Z_i-Y_i|$,Z_i 和 Y_i 分别为第 i 个检查点的水深和反演水深;n 为检查点的数量。表 2 所示为 3 个实验区域不同方法反演的平均相对误差。

表 2 实验区域的平均相对误差

实验区域	平均相对误差/%		
	未做改正	式(2)方法改正	式(3)方法改正
甘泉岛	35.81	51.49	17.18
海南琼州海域	63.24	76.53	77.21
德奎岛	18.66	18.69	17.29

根据表 2 的实验结果,可以得到以下结论:

(1) 对于甘泉岛所处珊瑚礁海域,水体透明度较好,底部珊瑚礁对红波段较敏感,基于本文改进的耀斑改正算法,视觉上提高了图像识别能力,并大大提高了比值法水深反演的精度。

(2) 对于大陆沿岸的琼州海域,水中悬浮物质较多,反演误差整体偏大,两种耀斑改正方法都增加了反演误差,说明比值模型不适合该类水域,影响水深反演精度的主要因素是水质和透明度。

(3) 对于远离大陆的火山岛德奎岛,水质很好,拍摄瞬间风浪不大,耀斑影响较小,故本方法并未显著提供水深反演精度。

4 总 结

本文以研究多光谱遥感水深反演机理为基础,以典型的四波段高分辨率卫星影像耀斑改正为切入点,综合考虑水体信息,以比值水深反演模型为基础,设计了基于耀斑改正的多光谱水深反演方法。

选择代表性的 3 类海域,对本文方法进行实验,其结果表明:蓝绿波段比值法具有一定水深反演能力,而本文所述基于耀斑改正的多光谱水深反演方法在有中轻度耀斑影响,海底有一定绿色物质覆盖的的岛礁海域进行水深反演时,相比传统方法精度明显提高,可获得更好的水深反演结果。

多光谱遥感,以四波段影像最为经典,国内外 QuickBird、Sentinel-2A、资源三号、高分一号、二号等遥感数据皆提供四波段影像,对其水深反演方法的研究,有利于未来大规模利用国产数据,如“资源三号”、“高分一号”、“高分二号”等遥感数据进行大范围近海水深调查和环境调查工作。

未来,提出创新性的水深反演方法,不断减小水深反演中的各类误差影响,是遥感水深反演研究的主要工作。

参考文献:

[1] 吴忠强,沈蔚,郭晓雷,等.基于 World-view-2 多光谱卫星数据的浅水水深遥感反演[J].海洋测绘,2016,36(05):75-78.

[2] 陈琛,马毅,张靖宇.GF-1 WFV 图像经验模分解的光谱保真性与水深遥感探测[J].海洋学报,2018,40(04):51-60.

[3] 梁士英.利用 TM 数据反演浅海水深方法研究[D]. 青岛:山东科技大学,2012.

[4] Stumpf R P, Sinclair M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types [J].Limnology & Oceanography,2003, 48(1): 547-556.

[5] 张磊,牟献友,冀鸿兰,等.基于多波段遥感数据的库区水深反演研究[J].水利学报,2018,49(05):639-647.

[6] Mustard J F,Staid M I, Fripp W J. A semi-analytical approach to the calibration of AVIRIS data to reflectance over water: Application in a temperate estuary[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75: 335-349.

[7] Lee Z, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization[J]. Applied Optics,1999, 38(18): 3831-3843.

[8] Carder K L, Steward R G. A remote-sensing reflectance model of a red-tide dinoflagellate off west Florida[J]. Limnology & Oceanography, 1985, 30(2): 286-298.

[9] Hochberg E J, Andrefouet S,Tyler M R. Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41(7): 1724-1729.

[10] Philpot W. Estimating atmospheric transmission and surface reflectance from a Glint-Contaminated spectral image [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(2): 448-457.

[11] Hedley J D, Harborne A R, Mumby P J. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos[J]. International Journal of Remote Sensing,2005, 26(10): 2107-2112.
[12] 李龙龙,刘建强,邹斌. 基于 WorldView-2 遥感影像反演浅海水深过程中太阳耀斑的去除方法[J].海洋预报,2015(01): 53-57.
[13] 张振兴,郝燕玲.卫星遥感多光谱浅海水深反演法[J].中国航海, 2012(01): 13-18.
[14] 周博天,刘湘南,吴伶,等.基于水色遥感的香港海域黄色物质浓度反演模型[J].海洋环境科学,2013,32(01):115-119+124.

Study on the Multispectral Depth Inversion Method Based on the Glint Remove Correction

SHEN Wei[1,2], JI Qian[1,2], QIU Yao-wei[1,2], WU Zhong-qiang[3]

1. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*;
2. *Estuarine and Oceanographic Mapping Engineering Research Center of Shanghai Municipal Ocean Bureau, Shanghai* 201306, *China*;
3. *School of Geographic and Oceanographic Sciences,Nanjing University,Nanjing* 210023, *Jiangsu Province, China*

Abstract:Taking the WorldView-2 four-band satellite data and electronic chart data as sources, researchers obtained the shallow water depth of three typical sea areas based on modified flare correction model and dual-bands ratio model. By conducting the bathymetry experiments under different seas and different flare conditions, this paper discusses the role and influence of RED band and NIR in typical four-band water depth inversion. It is found that the reflectivity of green matters, such as corals and seaweeds, can be increased to cover the seabed, and the water depth inversion accuracy of such sea areas can be effectively improved by introducing RED+NIR bands for flare correction in dual-band ratio bathymetry. The multi-spectral water depth inversion method based on flare correction is suitable for deep inversion of water quality with clear light seawater under moderate and light flare conditions, and can be popularized and applied in water depth inversion of typical four-band satellite data both at home and abroad.

Key words:WorldView-2; glint; water depth remote sensing; dual band ratio; four bands