



论 文

乌苏里江水深遥感反演

庞治国*, 李琳, 潘世兵

中国水利水电科学研究院遥感中心, 北京 100048

* 通信作者. E-mail: pangzg@iwhr.com

收稿日期: 2011-06-03; 接受日期: 2011-07-28

摘要 文中在分析卫星遥感测深机理的基础上, 利用 SVC HR-1024 高光谱成像仪确定了可见光反演水深的最佳波段, 通过对 HJ 星 CCD 数据各波段反射率、波段比值组合对水体、水深的敏感性分析, 建立了适合于乌苏里江的单波段对数水深反演模型, 从而快速获取乌苏里江河道地形信息, 并探测了河道深泓线, 整体精度达到 80% 以上. 遥感反演水深可快速探测河道深泓线的方法, 为乌苏里江河势演变研究提供了新的思路.

关键词 乌苏里江 水深反演 遥感

1 引言

水深测量研究最早开始于 20 世纪 60 年代中后期, 目前已成功应用于大范围海域的水深制图、江湖海岸地形演变分析、航道开挖与疏浚等领域. 随着对遥感水深认识的深入及计算机技术、空间遥测技术的发展, 遥感水深逐步由定性分析发展为定量计算. Dirks^[1] 提出了利用卫星遥感图像进行海岸地区水深制图; Mgengel 等^[2] 利用卫星 TM 图像对荷兰近海岸水域进行了多时相水深探测图, 并取得了令人满意的效果; Tripathi 等^[3] 应用印度 IRS-1D LISS-III 卫星数据提取印度卡基纳达海湾水深值, 并进行水深制图, 也获得较好的效果; Ping^[4] 建立了卫片密度和海水深度之间的数学关系; Dang 等^[5] 对多波段水深遥感进行研究, 并应用于我国南海岛礁的水深计算, 对浅海水深地形研究有很好的应用价值; 其他学者大多针对特定区域特征对模型和方法作了不同程度的改良或改进^[6,7]. 由于水深遥感反演的影响因素众多, 具有非线性特点, 因此近年来有学者将人工神经网络 (artificial neural networks, ANN) 应用于水深反演中. 如 Sandidge 等^[8] 利用水深信息与高光谱 (可见光/近红外) 遥感辐亮度之间的相关性建立了 BP(back propagation) 人工神经网络模型, 并用于美国佛罗里达州海域水深的研究, 并认为在利用遥感图像反演水深信息方面人工神经网络方法优于传统的统计方法. Ji 等^[9] 在底层反射模型的基础上又提出了一种水体散射遥感测深模型. 总的来说, 对于流速相对缓慢的清澈水体, 卫星图像的光谱值和水深之间存在良好的相关性, 多光谱遥感反演水深的精度在 70%—90% 之间, 探测水深在 30 m 以内, 可以为常规测量提供重要的施工参考^[10]; 对于流速快、浑浊的水体, 如何消除水体悬浮物对入射光产生的后向散射影响成为水深遥感精度的关键.

乌苏里江是黑龙江一级支流, 也是中俄两国界河. 河道全长 890 km, 河道两岸河滩宽阔, 坡降小, 大部分河段在 1/20000 左右. 在枯水季节, 河流水流平稳, 泥沙含量少, 江水清澈, 适于水深遥感应用.

本文运用环境减灾卫星遥感数据, 通过对典型江段的水深波谱试验选取最佳水深反演波段, 并建立水深反演数值模型, 探测河道深泓线, 为河势演变研究提供一种途径, 为保持河势稳定的工程或非工程规划与设计提供依据, 保护两岸人民的利益.

2 遥感测深机理

卫星传感器所接收的光辐射主要有 3 部分: 水—气界面的反射辐射、水体的后向散射辐射和水底的反射辐射. 其中水底反射辐射能量经过水层到达传感器的光辐射能量, 除与水底反射的程度有关, 还与辐射能量通过水体的衰减程度有关.

可见光波段的测深原理主要基于光线对水体的透射. 可见光在水体中的衰减系数越小, 则对水体的穿透性越好. 可见光衰减系数决定了光在水体遥感中的可测深度. 不同的水体, 由于所含物质的不同, 在可见光波段有不同的衰减系数.

不同波长的可见光, 对水体具有不同的穿透能力, 有研究表明可见光的蓝绿波段对水体的穿透深度最大, 是遥感测深的最佳波段. 水体浑浊度则是影响光在水中穿透能力的主要因素. 当水体浑浊时, 衰减系数增大, 光线在水中穿透能力减弱; 当水体足够清澈时, 水体衰减系数减小, 太阳光辐射穿透能力增强. 而水体浑浊度增大到一定程度时, 水体中悬浮粒子的后向反射分量就会大于水底的反射分量, 此时传感器无法接收到水底部反射信息. 含沙量越大, 可见光在水中穿透性受到影响越大, 所能探测的深度越小. 传感器接收到的既有悬浮粒子的后向散射, 也有底部反射. 随着水体厚度的增加, 传感器所接受到水底反射光越来越弱, 直到趋于零^[11].

水深遥感模型方法主要包括 3 种: 波浪法、密度法和水体散射模型. 目前对于大范围浅水区实用遥感水深模型主要是密度法中的统计方法模型. 进入水体内的光受到水体及底质的吸收和散射, 随着水深的加大, 光的能量受到水分子、溶解物及水中粒状物吸收以及悬浮颗粒的散射而逐渐衰减, 这种衰减作用可表达为

$$T_r = e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

式中: T_r 为入射辐射量在水深 z 处的分量; α 为光的衰减系数. 考虑底质反射的影响而对该式作了更广义的变换处理, 其表达式为

$$L_E = (e^{-2kz})L_b + (1 - e^{-2kz})L_w, \quad (2)$$

式中: L_E 为水体的辐射量, L_b 为底质上没有上覆水层时的辐射量, L_w 为深水辐射量, k 为水体的有效衰减系数. 因为反射率正比于辐射量, 所以上述水体辐射量可以正规化处理为反射率值, 即

$$R_E = (e^{-2kz})R_b + (1 - e^{-2kz})R_w, \quad (3)$$

式中: R_E 为水体的反射量, R_b 为底质上没有上覆水层时的反射量, R_w 为深水反射率. (3) 式反映出水深的反射率 R_E 与光在水中衰减程度 (水深) 成线性关系, 其模式可概化为

$$Z = a_0 + a_1 \ln(R_E). \quad (4)$$

遥感反射率响应包含了水深、底质成分、水质和大气条件等多因素的贡献. 常用的有单波段反射率理论模式、多光谱反射率的组合估值模式反演水体深度. 当水体清澈, 底质比较均一, 大气条件较好时, 单波段反射率理论模式可以较好地刻画水深的变化; 也有研究表明, 多波段比较模式可以消除底

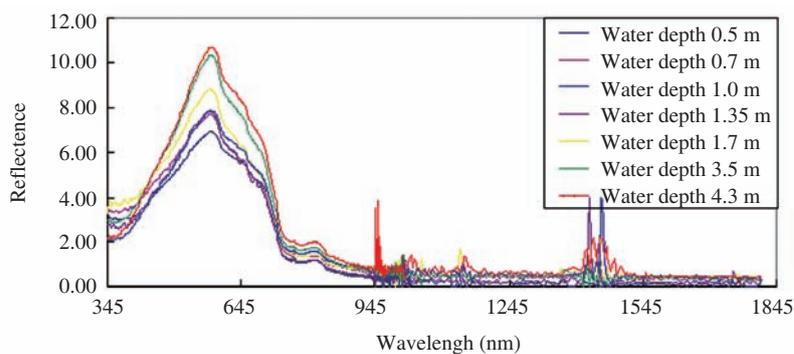


图 1 水深波谱试验数据分析

Figure 1 Data analysis of water depth spectrum test experiment

质物质与水体类型的影响, 对于水体泥沙含量较大地区更加适用. 本研究在选定测深最佳波段的基础上, 分别对单波段模式和双波段比较模式进行了比较分析.

3 遥感测深模型

3.1 最佳反演波段的选择

为了精确获得乌苏里江水深遥感反演的最佳波段, 本研究选择乌苏里江典型江段——饶河境江段, 利用 SVC HR-1024 高光谱成像仪进行了现场波谱试验, 测定了不同水深条件下水面波谱特征. 饶河境江段江面宽 500—1000 m, 正常水位下水深 2—5 m, 水体清澈, 江道中浅滩较多, 弯曲系数平均为 1.25, 河道比降为 1/16000—1/20000, 流速平缓, 适合进行水体波谱试验. 试验从饶河岛上游到下游共设 6 个剖面, 每个剖面从国界线至岸边每隔约 60 m 设立一个测点, 共得到 25 个测点, 水深范围在 0.5—4.3 m 之间.

通过试验数据分析可以看出 (图 1), 乌苏里江不同水深处的波谱反射率变化趋势基本一致, 并且在 576.5 nm 处波谱反射比达到最大值.

为了使遥感数据与水深测量试验实现同步, 本研究选取了 2010 年 10 月 27 日 HJ-1A CCD 数据 (空间分辨率为 30 m), 以及乌苏里江航道图.

3.2 模型建立

提取波段反射率前需要对遥感图像进行处理, 首先采用 6S 方法对图像进行大气纠正, 消除卫星传感器辐射信息中包含的大气散射影响, 还原水体辐射的真实性, 随后进行几何精校正. 在提取测点光谱信息时, 尝试使用测点邻近 4 个像元进行双线性插值确定最终的光谱值, 以期提高提取结果的代表性. 最后编程提取 6 个剖面各个测量点位上的相应波段的光谱信息, 并将信息写入各剖面矢量文件属性表.

本研究根据水深遥感机理推导 (4) 式, 为了建立最佳的反演水深模型, 对水深值和对应的遥感影像 B1、B2、B3、B4 各波段反射率、波段比值组合进行相关性分析 (表 1). 结果表明, B3(绿波段) 与水深值相关性最好, 相关系数 R^2 达到 0.775(图 2), 与高光谱成像仪确定的波段相吻合.

表 1 水深值与各波段反射率及波段组合的相关性分析

Table 1 Pertinence of water depth and bands

Factor	B1	B2	B3	B4	B3/B2	B2/B4	B3/B4
R^2	0.177	0.248	0.775	0.220	0.341	0.187	0.003

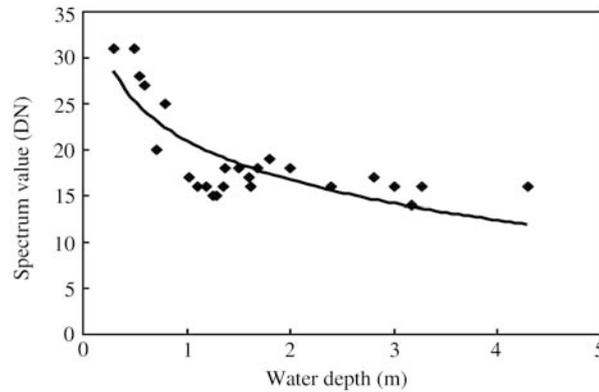


图 2 实测水深与遥感光谱值相关图

Figure 2 Linear regression analysis between water depth and spectrum

因此得到乌苏里江水深反演模型:

$$Z = -6.7812 \ln(R_3) + 20.952, \quad (5)$$

式中, Z 为水深, R_3 为 HJ-1A 第 3 波段反射率.

4 模型应用及精度分析

乌苏里江江岸坍塌严重, 由于缺乏对国境界河两岸河势变化的可靠准确的动态监测技术和国境界河深泓线的准确测量技术, 造成无法客观评价国土的变化, 同时难以对已建界河护岸工程的防护效果进行全面客观地动态地评价. 盲目的护岸不仅引起领土争议问题, 还给双方边界管理及边境地区经济社会稳定发展等带来不利影响.

利用本研究建立的水深遥感反演模型对 2010 年 10 月 27 日过境的环境减灾卫星数据进行河道水深反演模拟, 得到乌苏里江从松阿察河口至抚远入黑龙江汇合口的河道水深等值线图, 并根据水深等值线获得乌苏里江深泓线图 (图 3).

水深遥感定量反演的精度往往受限于实测资料的缺乏. 有学者在长江口水深探测研究中将航道图数据作为实测水深值与遥感反演模型计算结果进行比较, 精度分析表明反演误差平均不超过 2 m^[12]. 本研究在验证反演模型的精度时, 分别在松阿察河口、饶河岛下游、基亚河口选取三个剖面, 将提取的水深数据与航道图数据进行比较, 结果表明误差小于 0.5 m 的点达到 70% 以上, 误差小于 1.0 m 的点达到 85%.

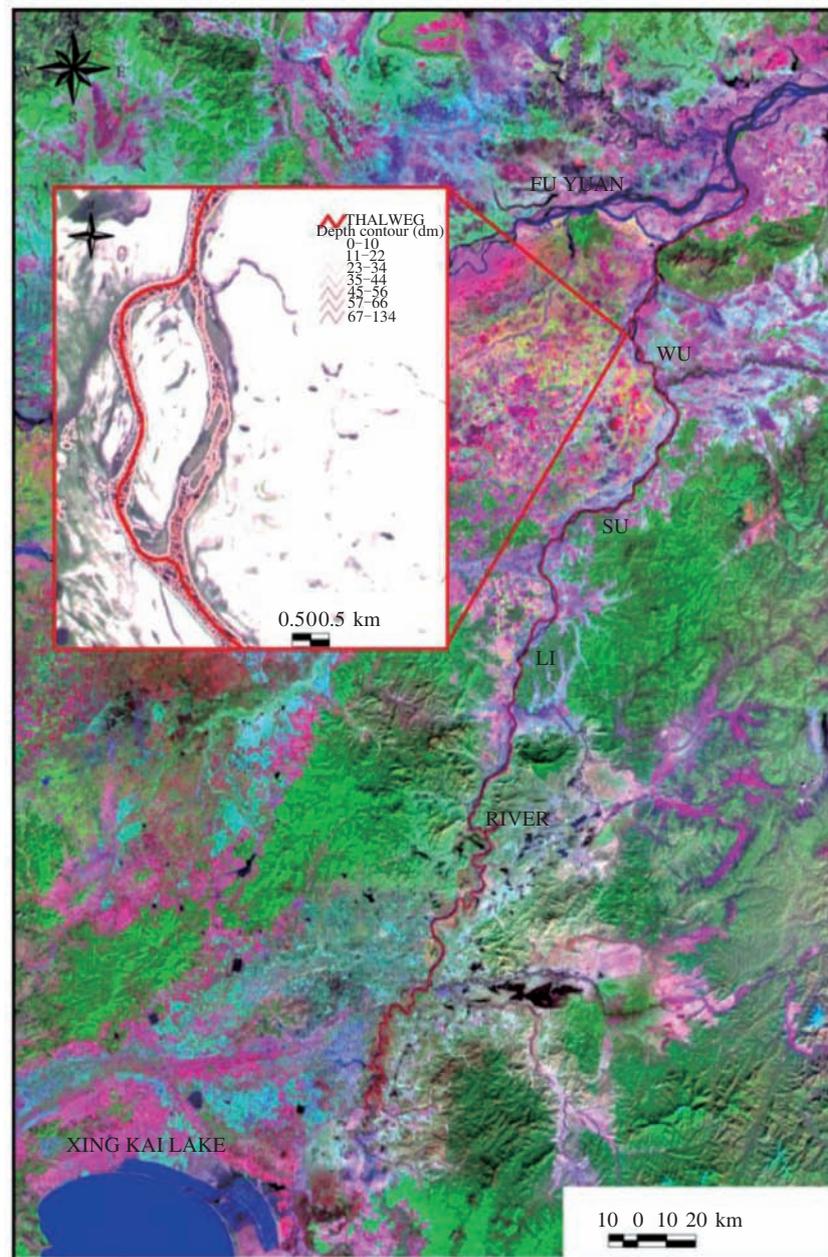


图 3 2010 年 10 月 27 日河道水深遥感反演等值线图

Figure 3 Map of river water depth contour extraction by remote sensing on 27 Oct. 2010

5 结语

本研究利用高光谱成像仪对乌苏里江进行了水面波谱试验,发现在波长为 576.5 nm 处水体反射比达到最大值,佐证了绿波段为水深反演的最佳波段.通过遥感数据各波段波谱反射率与实测水深相关性分析,建立了适合于乌苏里江特点的水深遥感反演模型,通过与航道数据比较表明模型模拟精度较好.

乌苏里江河道宽阔, 坡降较小, 水流平稳, 江水清澈, 适用于进行水深遥感研究. 如将多期的遥感水深反演结果比较, 就可动态监测河道深泓线的变化, 这不仅为河势演变提供了新的方法, 也为界河防护工程的实施提供了科学的依据.

参考文献

- 1 Dirks A. Shallow sea-floor reflectance and water depth derived by unmixing multispectral imagery. *Photogramm Eng Rem S*, 1987, 59: 221–228
- 2 Mgengel V, Spitzer R J. Application of remote sensing data to mapping of shallow sea-floor near by Netherlands. *Int J Remote Sens*, 1991, 7: 473–479
- 3 Tripathi, Rao A M. Bathymetric mapping in Kakinada bay, India, using IRS-1D LISS-III data. *Int J Remote Sens*, 2002, 23: 1013–1025
- 4 Ping Z L. A study on the relationship between satellite image density and water depth. *Remote Sens Inf*, 1982, (4): 47–51
- 5 Dang F X, Ding Q. A technique for extracting water depth information from multispectral scanner data in the south China Sea. *Marine Sci Bull*, 2003, 22: 55–59
- 6 Chen M, Li S H, Kong Q F. Fathoming method by satellite remote sensing for the Yangtze River estuary water body. *Hydro-Sci Eng*, 2003, (2): 61–64
- 7 Sun T, Pang Z G, Pan S B, et al. Study on water depth in Ertan Reservoir area based on ETM remote sensing images. *Geogr Geo-Inf Sci*, 2010, 26: 64–66
- 8 Sandidge J C, Holyer R J. Coastal bathymetry from hyperspectral observations of water radiance. *Remote Sens Environ*, 1998, 65: 341–352
- 9 Ji W, Civco D L, Kennard W C. Satellite remote bathymetry: a new mechanism for modelling. *Photogramm Eng Rem S*, 1992, 58: 545–549
- 10 Ye M, Li R D, Xu G P. Some research advances and methods on water depth monitoring by multispectral images. *World Sci-Tech R D*, 2007, 29: 76–79
- 11 Huang J Z, You Y M. Experiment of water depth surveying in the Nantong section of the Yangtze River. *Adv Water Sci*, 2002, 13: 235–238
- 12 Xu S, Zhang Y, Wang Y J, et al. Application of multi-spectral imagery to water depth extraction in the Changjiang River estuary. *J Mar Sci*, 2006, 24: 83–90

Water depth retrieval for the Wusuli River based on remote sensing

PANG ZhiGuo*, LI Lin & PAN ShiBing

Remote sensing center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

*E-mail: pangzg@iwhr.com

Abstract Based on analyses of theoretical models of the fathoming method by using satellite remote sensing, we determined the most suitable spectral band for water depth retrieval using the SVC HR-1024 spectroradiometer. A water depth remote sensing model for the Wusuli River was established and its accuracy improved by analyzing the sensitivity to water of different bands of the HJ-1a CCD camera output. Our results show that the acquisition of water depth from remote sensing could supply a new and more rapid way for obtaining the talweg, river terrain information and information on river pattern change for the Wusuli River.

Keywords Wusuli River, water depth retrieval, remote sensing