

测巴渝山水 绘桑梓宏图

——重庆市2013—2015年度
优秀测绘论文集

CE BAYU SHANSHUI
» HUI SANGZI HONGTU

CHONGQINGSHI 2013—2015 NIANDU YOUXIU CEHUI LUNWENJI

主编 ● 楚 恒

西南交通大学出版社

测巴渝山水 绘桑梓宏图

——重庆市2013—2015年度
优秀测绘论文集

主编○楚 恒

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

测巴渝山水 绘桑梓宏图: 重庆市 2013—2015 年度
优秀测绘论文集 / 楚恒主编. —成都: 西南交通大学
出版社, 2017.1
ISBN 978-7-5643-5143-4

I. ①测… II. ①楚… III. ①测绘学—文集 IV.
①P2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 283944 号

测巴渝山水 绘桑梓宏图

——重庆市 2013—2015 年度优秀测绘论文集

主编 楚 恒

责 任 编 辑 杨 勇

封 面 设 计 何东琳设计工作室

出 版 发 行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发 行 部 电 话 028-87600564 028-87600533

邮 政 编 码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印 刷 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成 品 尺 寸 185 mm × 260 mm

印 张 13.5

字 数 337 千

版 次 2017 年 1 月第 1 版

印 次 2017 年 1 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-5143-4

定 价 56.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

测绘是伴随人类在认识和改造世界的实践活动中发展起来的一门古老科学。据考证，公元前四千多年，古埃及就开始出现针对尼罗河泛滥后的耕地重新划界的测绘活动；公元前两千多年，我国也产生了早期的测绘活动，并出现了原始的地图。测绘学应用了数学、天文学、物理学、地学等科学，解决了人类对自然空间的正确认识和准确表达的问题，既是严谨求实的自然科学，也是人类文明的文化象征。千百年来，人类进步与测绘发展一直如影随形。如战争时期因军事侦查的需要发展起来的航空摄影测量学，和平时期因建设需要发展起来的工程测量学和地理信息系统等。至今为止，除测绘学科外尚未发现任何一项自然科学和人类社会发展如此结合紧密。

改革开放以来，随着我国综合国力的不断提高，测绘科技从模拟测绘发展到数字化测绘，再由数字化测绘发展到信息化测绘，实现了跨越式发展和历史性飞跃。近十年来，IT技术和高新测绘科技的结合，使高精度快速定位、智能化地图制图、海量数据处理、大数据挖掘成为可能，并衍生出“数字城市”“智慧城市”等庞大的测绘地理信息产业。测绘地理信息行业拥有广泛的应用前景，已经成为具有强大生命力的朝阳产业。

创新是科技发展的动力，实践是检验创新的标准，论文则是创新和实践活动的总结。无数篇论文记录着无数个创新，记载着无数次有益实践，这些创新思维和实践的积累，将会沿着认识—实践—再认识—再实践的轨道，实现认识的飞跃。论文既是探讨测绘领域问题，进行学术研究的一种手段，又是描述测绘研究成果，实现学术交流的一种工具。它们是建造雄

伟的测绘技术大厦的一块块砖头，为此我们向这些目前并不知名的论文点赞叫好，并向其作者表示鼓励，相信他们只要坚持不懈，不断在实践中总结，不断创新，必将成为测绘行业的栋梁之才。

科学发展，测绘先行，重庆是我国西部唯一的直辖市和国家级中心城市，是长江上游经济和金融中心，是我国重要的现代制造业基地和国家高技术产业基地，是国家统筹城乡综合配套改革试验区和国家西部大开发战略的重点实施地区，是西南地区综合交通枢纽和长江上游航运中心。要规划好、建设好、管理好重庆就必须要进一步搞好测绘保障工作。为实现测绘保障我市“科学发展、富民兴渝”总战略，我们测绘地理信息工作者一定要在社会经济发展大浪潮中，不断改革，创新进取，为将重庆建设成为西部地区测绘地理信息技术高地而努力奋斗。

重庆市测绘地理信息局

局长： 

2016.9.20

资源三号卫星影像的融合方法研究及评价	周 群 楚 恒 罗再谦	1
基于多波束测量数据的航道可通航性分析	黎 力 李 振 蒋宇雯	8
基于小波理论的桥梁变形监测数据处理与分析	石 频 李忠仁 刘 娜	14
港澳大桥沉管预制端钢壳安装测量技术	何元甲 田远福 王爱民	22
基于 LIDAR 的 3D 产品制作方法及其精度评定	何 静 何忠焕	30
温泉大道边坡稳定性评价与形变监测预报分析研究	李宏博 史先琦 陈复中	38
大型建筑结构长期安全健康监测系统设计	祝小龙 向泽军 谢征海 周成涛 周忠发 张 晋	47
山地地区高分卫星影像正射纠正研究	罗 鼎 袁 超 胡 艳	54
面向智慧城市的物联网服务平台设计与应用	张 溪 王 伟 黄递全	63
激光扫描技术在重庆罗汉寺文物保护工程中的应用	黄承亮	68
GM (1, 1) 模型在基坑监测中的应用	陈朝刚 邓 科 傅光彩	73
基于重庆市 GNSS 综合服务系统的北斗增强系统建设	夏定辉 肖 勇 吴 寒	78
重庆似大地水准面精化建设与成果的应用分析	肖 勇 夏定辉 吴 寒	84
基于 FME Server 的地理国情信息整合发布技术研究	张 溪 朱 熙 谢艾伶	90
面向地理国情普查的快速 DOM 生产方法	魏永强 齐东兰	96
SAR 卫星遥感制图空间分辨率与成图比例尺关系分析	丁洪富 黎 力	101
重庆市国土资源 GNSS 网络信息系统基准站网数据质量分析关键技术研究	马泽忠 杨 凯	107
CPⅢ 技术在变形监测中的应用	岳仁宾 张 恒 李 超	113
构建独立坐标系与 CGCS2000 坐标系转换关系的研究	刘万华 叶水全	119
不同行业建筑工程面积测量要求的分析	杨本廷	124

智慧城市时空信息云平台建设初探	李 林	129
基于成对约束半监督降维的高光谱遥感影像特征提取	钱 进 罗 鼎	135
基于 AMSR-E 数据反演华北平原冬小麦单散射反照率	吴凤敏 柴琳娜 张立新 蒋玲梅 杨俊涛	147
遥感影像拼接缝消除算法改进研究	付云洁	164
模拟 InSAR 干涉图的方法研究	于晓歆	170
基于 CASS 数据的基础地理信息数据建库技术研究	李巍巍 许庆领 何 静	177
CQGNIS 系统基准站数据处理与稳定性分析	刘 科 马泽忠 胡渝清 孔庆勇 杨洪黔	184
结构光视觉系统误差分析与参数优化	刘俸材 李爱迪 马泽忠	189
基于投影仪和摄像机的结构光视觉标定方法	刘俸材 李爱迪 马泽忠	197
附 重庆市优秀测绘地理信息学术论文录		206
编后记		208

资源三号卫星影像的融合方法研究及评价

周 群^{1,2} 楚 恒² 罗再谦¹

(1. 重庆数字城市科技有限公司, 重庆 400020; 2. 重庆市勘测院, 重庆 400020)

摘 要 利用 FIHS、GIHS、IHS 与 DWT 相结合、IHS 与 SWT 相结合 4 种遥感影像融合方法, 对我国资源三号卫星重庆市两江新区某区域的多光谱影像与全色影像进行融合, 与 ERDAS Imagine 中较好成像效果的 HPF 方法进行对比, 并且采用主观评价和客观评价指标对其进行评价。结果表明, 在运算速率要求较高时采用 GIHS 方法效果最佳。在成像效果要求较高时采用 IHS 与 SWT 相结合方法效果最佳。

关键词 资源三号卫星 影像融合 GIHS IHS + SWT 质量评价

1 引 言

资源三号 (Resources Satellite-3) 测绘卫星是我国首颗民用高分辨率光学传输型立体测图卫星^[1], 卫星集测绘和资源调查功能于一体。于北京时间 2012 年 1 月 9 日 11 时 17 分, 在太原卫星发射中心由“长征四号乙”运载火箭成功发射升空。装载 2.1 m 分辨率正视全色 CCD 相机、3.5 m 分辨率的前后视相机和分辨率为 5.8 m 的多光谱相机, 能够提供丰富的三维几何信息, 实时将图像数据传回地面。与现有的资源类遥感卫星相比, 资源三号测绘卫星图像分辨率高、图像几何精度和目标定位精度较高, 其具有的 1:5 万比例尺的立体测图能力在国际上有很强的竞争力, 对追赶国际卫星遥感技术具有十分重要的意义。

资源三号卫星传感器的全色波段为 450 ~ 800 nm, 多光谱波段中蓝色波段为 450 ~ 520 nm, 绿色波段为 520 ~ 590 nm, 红色波段为 630 ~ 690 nm, 近红外波段为 770 ~ 890 nm。

本文以资源三号卫星遥感数据为研究对象, 利用 FIHS、GIHS、IHS 与 DWT 结合, IHS 与 SWT 结合等遥感影像融合方法, 对重庆市两江新区某地方影像数据进行了融合, 与 ERDAS Imagine 中较好成像效果的 HPF 方法进行对比, 采用主观评价与客观评价相结合的方法对融合结果做出评价。

2 融合方法

受到技术的限制, 大多数的卫星平台同时搭载多光谱 (Multispectral, MS) 波段传感器和全色 (Panchromatic, PAN) 波段传感器, 但只能获取低分辨率度光谱影像或者高分辨率全色影像。为了便于对遥感影像的应用, 我们采用的方法将低分辨率多光谱影像与高分辨率全

色影像进行融合, 获得同时具有丰富光谱信息和高分辨率的影像。本文主要采用的融合方式属于像素级多光谱影像与全色遥感影像的融合——全色锐化 (Pansharpening)。

目前流行的全色锐化方法主要划分为成分替换 (Component Substitution, CS) 和多分辨率分析 (Multi-Resolution Analysis, MRA) 两个类型^[2-3]。而全色锐化方法研究也表现出两个趋势: 一是对已有的成分替换方法进行综合分析给出该类融合方法的通用表达式, 并以通用表达式为基础设计新的融合方法, 例如 FIHS 和 GIHS; 二是将成分替换方法与多分辨率分析方法相结合, 得到具有更好性能的混合型融合方法, 例如将 IHS 变换和 DWT (离散小波) 结合起来, 将 IHS 变换和 SWT (静态小波) 结合起来。

2.1 FIHS 方法和 GIHS 方法

IHS 融合方法, 以 IHS 颜色空间变换为基础。将 RGB 颜色空间中用三原色表示的彩色图像, 转换为 IHS 颜色空间中用亮度 (Intensity, I)、色度 (Hue, H) 以及饱和度 (Saturation, S) 表示的彩色图像, 然后用具有更高空间分辨率的全色图像来替换亮度图像 I, 并进行 IHS 逆变换回到 RGB 颜色空间, 最终得到分辨率增强的彩色图像。Tu^[4]等在 2001 年通过对 IHS 变换的矩阵计算过程进行简化提出一种快速 IHS 融合方法, 成为 FIHS 方法。FIHS 方法只是对 IHS 融合方法的简化, 用 $\delta = I' - I = Pan^M - I$ 表示全色图像的空间细节信息, 则有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I + \delta \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \\ \delta \\ \delta \end{bmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

即只需要计算亮度图像以及空间细节图像, 然后将空间细节与原多光谱图像相加, 就能得到融合结果图像。FIHS 方法的表达式如下:

$$I = (R + G + B) / 3 \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \\ \delta \\ \delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

原始的 IHS 融合方法, 只能用于解决三波段多光谱图像与全色图像的融合问题。基于 FIHS 方法的表达式, 则可以通过扩展亮度的定义, 来实现更多波段多光谱图像的全色锐化。对于包含了蓝光、绿光、红光以及近红外光四个波段的多光谱图像, Tu^[4]等提出采用如下的亮度定义来进行全色锐化:

$$I = (R + G + B + NIR) / 4 \quad (4)$$

其中 NIR 表示近红外波段的多光谱图像。基于这种改进型 IHS 融合方法称为 GIHS 方法。

2.2 IHS 与小波相结合方法

多光谱图像的颜色空间变换与多尺度分解两种操作是可以并存的,在原理上没有重叠或抵触,而且具有互补性。事实上,目前许多较成熟的基于多分辨率分析的融合方法,也都是以成分替换方法为基础而实现的^[5]。成分替换方法结合多分辨率分析的基本思路,就是在颜色空间变换之后,在变换域内对待替换的主元成分和全色图像进行基于多分辨率分析的融合,相当于对成分替换方法变换域内融合规则的进一步细化^[6,7]。本文采取与 IHS 与 DWT 相结合与 IHS 与 SWT 相结合的方法。其中 DWT 方法小波基采用 coin8,分解层数为 3 层。SWT 方法小波基采用 coin3,分解层数为 3 层^[8]。

2.3 HPF 方法

HPF 方法实现遥感影像融合的基本原理较为简单。对于遥感影像来说,高频和低频分量分别包含图像的空间结构和光谱信息。该方法是把高分辨全色影像进行傅里叶变换从空间域转换到频率域,然后在频率域内对处理的图像进行高通滤波,获取图像的高频成分,将高频部分融合到多光谱图像中,最后获取融合图像。

3 融合质量评价

对融合得到的结果进行评价是非常重要的一个步骤。所采用的评价方法根据不同的要求,具体的应用场合往往需要对不同的方面做出评价,通常而言,评价方法可以分为两类:主观评价和客观评价。

主观评价主要依靠人眼进行主观评估,并从应用目的角度出发,而应用目的不同,所需要突出的地物相关特征也不同。通过主观评价可以快速地对出图像质量的好坏。

由于融合图像的主观评价的随意性和波动性太大,标准不统一,因人而异,必须有一个客观的评价因子来进行较为客观的评价。本节实验中用到的客观评价标准有相对平均光谱误差 (*RASE*)、相对全局维数综合误差 (*ERGAS*) 以及相关系数 (*CC*、*SCC*)、平均梯度 (*AG*)。

3.1 相对平均光谱误差 (*RASE*)

其中, M 为原始多光谱影像的 N 个光谱波段的平均辐射值, $RMSE$ 为均方误差。

$$RASE = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RMSE^2(i)} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [F(x_i, y_i) - G(x_i, y_i)]^2} \quad (6)$$

3.2 相对全局维数综合误差 (*ERGAS*)

其中, h 和 l 分别表示参与融合的全色图像与多光谱图像各自的分辨率, N 为参与融合多

光谱图像的波段数， M_i 为参加融合处理的每个光谱波段的平均辐射值， $RMSE(i)$ 是第*i*个波段的融合结果图像相对于参考图像像元值的均方根误差。

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{RMSE^2(i)}{M_i^2}} \tag{7}$$

3.3 相关系数 (CC)

反映影像融合结果影像与原始多光谱影像之间在光谱特征上的相似性。其相似度越高，则表示融合后的影像对多光谱影像的光谱特征保持度越高。用来反映*R*和*F*之间的相关程度，若相关系数越大，说明融合质量越好。定义如下：

$$Corr(R,F) = \frac{\sum_{i,j} [R(i,j) - \bar{R}] \times [F(i,j) - \bar{F}]}{\sqrt{\sum_{i,j} [(R(i,j) - \bar{R})^2] \sum_{i,j} [(F(i,j) - \bar{F})^2]}} \tag{8}$$

3.4 空间相关系数 (SCC)

通过计算全色波段图像与融合后的多光谱图像之间的相关系数确定，相关程度越高，表明越多的纹理信息被融合到相应波段中。在计算空间相关系数时，首先利用拉普拉斯滤波器，即

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

对多光谱融合影像与全色影像分辨进行高通滤波，然后再分别计算高通滤波后的全色影像与多光谱融合影像各个波段之间的相关系数。

3.5 平均梯度 (AG)

可敏感地反映图像对微小细节反差表达的能力，因此可用来评价图像的清晰程度。一般来说，平均梯度越大，图像就越清晰。其中 $\Delta xF(x,y)$ 、 $\Delta yF(x,y)$ 分别为影像*F(x,y)*沿*x*和*y*方向的差分。

$$\nabla \bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\Delta xF^2(x,y) + \Delta yF^2(x,y)} \tag{10}$$

4 试验结果及评价

影像融合的目的是在尽量减少原始影像数据相关信息损失的前提下，提高影像的可判断性，即融合后的影像兼具全色影像的高空间分辨率和多光谱数据丰富的色彩信息。因此，对于融合影像的质量，可以从影像的空间分辨能力与光谱信息两个方面考虑。本次试验通过主观评价和客观评价对试验结果进行分析。

4.1 主观评价

如图 1 所示，从视觉效果上可以看出，5 种融合后影像的空间分辨率有明显的提高，更加清晰，更容易判读。首先对比一下 FIHS 和 GIHS 方法，两种方法空间信息增强方面效果都非常好，但 FIHS 颜色失真较大，特别是绿地，颜色整体偏淡，而一些蓝色建筑颜色偏重，也就是说在保持光谱信息能力方面存在一定的缺陷。GIHS 相比 FIHS 来说，在纹理信息方面基本上没有弱化，颜色保真有了很大的提高，IHS + DWT 和 IHS + SWT 从目视效果来看均达到了良好的效果。不论是从融合影像的空间分辨能力，还是从光谱信息保持能力，都验证了我们融合方法的正确性。HPF 方法在光谱保持性方面效果要好于 FIHS 方法和 GIHS 方法，但是整体颜色偏重，清晰度也略低于以上 4 种方法。



图 1 原始全色图像



图 2 原始多光谱图像



HPF 方法



图 3 FIHS 方法图



图 4 GIHS 方法



图 5 IHS 与 DWT 相结合



图 6 IHS 与 SWT 相结合

4.2 客观评价

在本次试验中，通过计算影像的 *RASE*、*ERGAS*、*CC*、*SCC* 和 *AG* 这 5 个参数来比较、分析各融合方法对空间信息的增强及光谱信息的保持能力。各个参数的统计值见表 1。我们首先分析一下 FIHS 和 GIHS。在光谱保持性方面，由于 GIHS 方法加入了近红外波

段,使之与多光谱影像相关性增强,效果明显优于 FIHS,在清晰度方面 *SCC* 和 *AG* 的值都比较接近于 FIHS 方法。也验证了我们目视得到的结果,GIHS 在稍微降低清晰度的同时大大提高了光谱保真度。对于两种混合型融化方法 IHS + SWT 以及 IHS + DWT,从各项数据来看,我们得到的结果都比较类似,清晰度和 GIHS 得到的结果不相上下,在光谱保真度方法较前两种方法都有了很大的提升,并且 IHS + DWT 方法的结果要优于 IHS + DWT 方法。这与目视效果达到一致。HPF 融合方法结果在光谱行方面高于 FIHS 方法,清晰度和以上方法有所差距。

表 1 图像融合评价参数统计

融合方法	<i>RASE</i> (理想值: 0)	<i>ERGAS</i> (理想值: 0)	<i>CC</i> (理想值: 1)	<i>SCC</i> (理想值: 1)	<i>AG</i> (越大越好)	运算时间 (单位: s)
HPF	0.232 5	0.643 0	0.940 5	0.870 3	7.330 9	0.159 2
FIHS	0.234 2	0.650 1	0.789 8	0.990 0	10.805 2	0.628 7
GIHS	0.178 2	0.494 9	0.871 4	0.981 4	9.865 9	0.630 9
IHS + DWT	0.117 9	0.327 4	0.947 9	0.963 8	9.833 9	1.113 2
IHS + SWT	0.115 1	0.319 5	0.952 1	0.971 5	9.682 8	1.413 6

从融合图像质量客观评价中可以看出,各种方法都有其优劣。如果纯粹的希望得到既清晰光谱性又好, IHS + SWT 方法较为合适,随之带来的是运算量巨大。如果在希望能保证速度的同时得到成像较好的影像, GIHS 方法较为合适。在对图像质量要求不高时, HPF 方法它的速度是无可比拟的。

5 结束语

本文选取四种代表方法对我国首颗高精度民用立体测绘卫星资源三号测绘卫星重庆市两江新区某区域全色与多光谱影像进行融合,并与 HPF 方法进行对比研究。通过研究得出对于运算速度和影像质量的需求的不同,所采取的方法也不同。要想两者兼得,融合方法的研究不能仅停留在算法的组合和复加上,而是将侧重理论体系和统一框架的研究上^[9-10]。目前面向分类、变化监测、目标识别的融合研究还不足,未来将进一步针对具体的数据源、结合遥感技术进行更为广泛的融合研究,突出应用目的性和特殊性。

参考文献

[1] LI DEREN. China's First Civilian Three-line-array Stereo Mapping Satellite: ZY-3[J]. Acta Geotactic et Cartographical Sonica, 2012, 41 (3): 317-322.

[2] AIAZZI B, BARONTI S, LOTTI F. A comparison between global and context-adaptive pan sharpening of multispectral images[J]. Geoscience and Remote Sensing letters, IEEE, 2009, 6 (2): 302-306.

- [3] JAEWAN C, JUNHO Y, ANJIN C. Hybrid Pan sharpening Algorithm for High Spatial Resolution Satellite Imagery to Improve Spatial Quality[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2013, 10 (3): 490-494.
- [4] TU T M, HUANG P S, HUNG C L, et al. A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2004, 1 (4): 309-312.
- [5] SHAH V P, YOUNAN N H, KING R L. An efficient pan sharpening method via a combined adaptive PCA approach and contourlets[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 2008, 46 (5): 1323-1335
- [6] 薛坚, 于盛林, 王红萍. 一种基于提升小波变换和 IHS 变换的图像融合方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14 (2): 340-345.
- [7] GONG JIANZHOU, LIU YANSUI, XIA BEICHENG. Response of Fusion Images to Wavelet Decomposition Levels of Integration of Wavelet Transform and IHS with Multiple Sources Remotely Sensed Data[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15 (8): 1269-1270.
- [8] CHU HENG, CHEN HUAGANG. A New Remote Sensing Image Fusion Algorithm in the Decimated Wavelet Domain [J]. Opto-Electronic Engineering Feb, 2009, 36 (2): 91-95.
- [9] DOU WEN, CHEN YUNHAO, HE HUIMING. Theoretical Framework of Optical Remotely Sensed Image Fusion [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38 (2): 131-137.
- [10] YANG JINGHUI, ZHANG JIXIAN, LI HAITAO. Generalized Model for Remotely Sensed Data Pixel level Fusion and its Implementation Technology [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14 (4): 604-614.

第一作者简介 周群, 研究生, 现在主要从事遥感影像融合、影像分类的技术与应用研究工作。

基于多波束测量数据的航道可通航性分析^①

黎力^{1, 2, 3} 李振⁴ 蒋宇雯¹

(1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 重庆市国土资源和房屋勘测规划院, 重庆 400020;
3. 国家遥感应用工程技术研究中心重庆研究中心, 重庆 400020;
4. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘 要 基于多波束测量数据快速构建高分辨率高精度航道水下地形, 然后根据流体力学模型和原胞自动机算法反演航道水位面, 最后利用航道水位、通航条件和通航尺度等综合条件分析了航道的可通航性。利用以上方法, 基于多波束测量数据和航道水文动态监测数据提高了航道可通航性分析的效率。

关键词 多波束 水下地形 水位面 航道可通航性

1 引 言

航道可通航性检测对于航道管理、航道通航安全起着至关重要的作用。传统的航道通航安全分析, 使用的测深数据大多为单波束测量数据, 所得到的航道水下地形精度不高, 并且人工地进行分析判断, 不利于及时进行航道通航的调整调度。针对传统航道通航性分析的不足, 本文提出了利用高精度、高密度和全覆盖的多波束测量数据^[1], 采用计算机自动进行航道可通航性分析, 从而得到实时的、高精度的检测结果。

本文从多波束测深数据出发, 快速构建高精度的航道水下地形, 然后基于流体力学模型和原胞自动机算法反演航道水位面, 最终利用航道水位、通航条件和通航尺度等综合条件对航道可通航性进行评价, 并且基于多波束测量数据对提出的方法进行了分析验证。

2 利用多波束数据构建高精度航道水下地形

在建立高精度航道水下地形时, 充分考虑多波束测量数据的海量特征以及航道的带状分布特征和高精度要求, 采用分块的方法, 基于每块地形数据单独构建 DEM, 最后将分块建立的 DEM 合并成一个 DEM。具体构建方法如下。

2.1 数据分块

采用地形适应性好的四叉树分块方法对多波束水深数据进行分块存储。给定数据分块后

^① 项目来源: 国家重点基础研究发展计划资助, 项目号 2010CB731800

每一数据块允许包含的最大点数，然后对水深点覆盖的范围进行不断的四分，直到所有分块后的数据块中的点数都小于或等于限定点数为止。分块算法思想如图 1 所示。

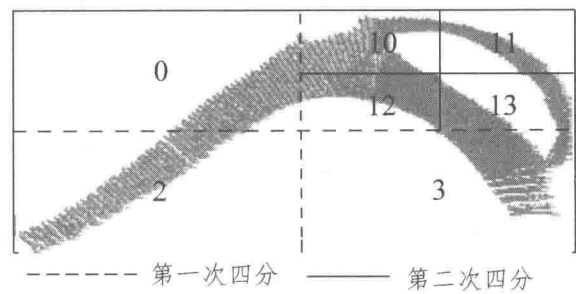


图 1 四叉树分块算法思想

2.2 生成分块航道水下地形

针对航道水下地形的复杂性和危险水深等特殊特征的存在，采用一种基于 TIN 内插生成格网 DEM 数据的方法，保证水下地形的地貌特征完好和内插后格网的精度。首先采用完整的凸闭包插入算法构建 TIN，然后使用动态距离加权的内插方法对格网点进行高质量内插。

2.3 DEM 拼接

建立分块 DEM 后，利用块之间的重叠区域将 DEM 分块拼接成一个整体连续无缝的 DEM，最终得到高精度的航道水下地形。

3 基于流体力学模型反演航道水位面

为了反演真实的航道水位面，采用基于水力学的水流计算模型得到详细的水流信息，然后利用广度优先搜索算法获得水流演进范围，并采用原胞自动机算法模拟航道水流的方向和速度，实现完整的航道水位面反演。

3.1 基于水力学水流计算模型演进水流

区域之间存在水位差使得水会往低处流动，从而产生水流演进，最终达到水位平衡状态。具体做法是首先用数值方法直接求解二维浅水方程^[2]：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + 0.5gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{ox} - S_{fx}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2 + 0.5gh^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = gh(S_{oy} - S_{fy}) \tag{3}$$

其中, h 为水深, u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速, S_{ax} 、 S_{ay} 、 S_{fx} 、 S_{fy} 分别为 x 、 y 方向的河床斜率和摩擦阻力。

然后引入动力学中的上风格式对上述浅水方程进行分解, 再采用水动力学离散方法对浅水方程进行离散, 求解离散方程以得到非结构网格上各离散点的数值。最终获得航道水下地形各网格节点处的水深、水位和 x 、 y 方向上的水流信息。

3.2 基于广度优先搜索航道边界

将整个地形当作一张无向图, 通过在图上进行连通性分析找到在某一特定水位条件下的地形图的最大连通构件, 从而得到水流演进范围。

具体做法是将三维地形投影到二维平面上, 则地形高程成为二维平面格网的附属高度信息。采用广度优先搜索算法 (Breadth First Search, BFS), 以待判断网格是否与已经淹没的网格相邻和网格的平均高程是否低于设定的水位作为边界搜索的判断条件对无向图进行搜索, 从而得到航道边界。

3.3 基于原胞自动机算法模拟航道水流流向及流速

在水流演进 CA 模型^[3]中使用 Manning 方程来计算每个原胞上的水流速度, 公式如下: 已知当前原胞的水流深度 $depth$ 、原胞的水面坡度 S 以及地表粗糙度系数 n , 则速度 vel 为:

$$vel = \frac{depth^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (4)$$

水流穿过原胞代表的地表空间所需时间 T_i 为

$$T_i = W / V \quad (5)$$

以 D8 水流单流向判断算法为基础构建水流演进 CA 模型局部规则^[4], 判断水流方向。

$$f: S_i^{t+1} = f[(S_i^t, S_N^t), A] \quad (6)$$

其中, (S_i^t, S_N^t) 为时刻 t 时中心原胞和邻域原胞核心状态的组合, A 为中心原胞及其邻域原胞辅助状态的组合, f 为原胞自动机的局部演化规则。

输入原胞辅助状态变量 (DEM、地表摩擦系数等), 通过 Manning 方程实时计算出原胞的核心状态即可得到航道水位反演^[5]。

4 航道可通航性检测

主要基于通航水位、通航条件 (例如通航尺度、水流条件、气象条件等)、船舶尺度与通航尺度等条件对航道可通航性进行分析。

首先, 根据所得的高精度航道水下地形得到航道中心线, 从而生成等距、垂直于河道中心线的航道横断面。然后, 根据反演所得的航道水位面与航道横断面相交得到航道的宽度 B_1 :