

利用 STK 辅助分析选取遥感图像

朱素娟, 关泽群, 王斌, 倪翠

(同济大学测量与国土信息系, 上海 200092)

摘要: 在选择遥感图像做具体的图像处理时, 往往具有盲目性。针对这一问题, 本文用 STK 模拟出 2002 年和 2004 年同一天, 卫星拍摄上海地区遥感图像的空间过程, 然后从图像库中选出模拟的对应时刻的图像, 分别进行融合处理, 并对融合效果进行评价。同时利用 STK 选择出的图像来确定加权系数对融合结果的影响。

关键词: 图像模拟; 图像选择; STK; 图像融合

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.04.018

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)116-0090-06

Selection of Remote Sensing Images Under the Aided Analysis in STK

ZHU Su-juan, GUAN Ze-qun, WANG Bin, NI Cui

(Department of Surveying and Geomatics, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: When we choose the remote sensing images and do some specific image processing, we usually are with blindness. In response to this problem, this paper simulated the spatial process which satellites photographed Shanghai using STK in the same day of 2002 and 2004, and then we choose the images corresponding to the time we simulated from the image library. After that, we fused the images, and then evaluated the results. At the same time, using images selected by STK, the effect of weighting coefficients for the fusion results is determined.

Key words: image simulation; image selection; STK; image fusion

1 引言

随着遥感技术的迅猛发展和新型传感器的不断涌现, 人类获取遥感图像数据的能力不断提高, 在同一地区往往可以获得大量的不同尺度、不同光谱、不同相的多源图像数据信息。这些遥感图像数据在时间、空间和光谱方面差异很大, 各种传感器提供的遥感图像数据又各有特点。经过大量的研究分析后, 人们发现这些来自不同传感器的图像数据既有互补性, 又存在很大的冗余。为了有效地利用这些多源图像信息, 许多研究集中在如何将这些多源海量数据尽可能地作为一个整体来综合利用, 以便提取更有价值的信息, 这样多源遥感图像数据融合就应运而生^[1-2]。

多传感图像融合技术最早是被应用于遥感图像

的分析和处理中。1970年, Daily 等人首先把雷达图像和 Landsat-MSS 图像的复合图像应用于地质解释, 其处理过程可以看作最简单的图形融合^[3]。80年代中后期, 图像融合技术开始引起了人们的关注, 陆续有人将图像融合技术用于多光谱图像的分析 and 处理。90年代以后, 图像融合技术的研究呈不断上升趋势, 应用的领域也遍及遥感图像处理、可见光图像处理、红外图像处理、医学图像处理等。尤其是近几年, 多传感器图像融合技术已成为计算机视觉、自动目标识别、机器人、军事应用等领域的热点问题。随着多颗遥感雷达卫星 JERS-1、ERS-1、RadarSat 等的发射升空, 图像融合技术成为遥感图像处理和分析中的研究热点之一。

Satellite Tool Kit(STK) 卫星工具软件是航天工业领先的商品化分析软件, 它可以快速方便地分

收稿日期: 2010-07-14 修订日期: 2010-09-17

作者简介: 朱素娟(1986-), 同济大学测量系硕士研究生, 研究方向为摄影测量与遥感。

E-mail: zhuj61314@163.com

析复杂的陆、海、空、天任务,并提供易于理解的图表和文本形式的分析结果,用于确定最佳解决方案。它支持航天任务周期的全过程,包括政策、概念、需求、设计、制造、测试、发射、运行和应用。STK 提供分析引擎用于计算数据,并可显示多种形式的二维地图,显示卫星和其他对象如飞机、地面车辆、目标等。另外,STK 还有三维可视化模块,为 STK 和其他附加模块提供领先的三维显示环境^[4-5]。

本文利用 STK 较强的分析能力,模拟出两颗卫星在 2002 年 5 月 5 日和 2004 年 5 月 5 日分别在上海上空拍摄遥感图像的场景,并生成卫星在相应的时间内与上海地区的可见性数据报告。然后,从图像库中选择出对应时间的图像,分别进行基于小波的 HIS 融合处理,再分析彩色和全色图像的融合质量。根据不同的融合质量的评价标准,选择出对应标准相对更好的图像,以便于后续的图像处理、制图和解译等工作,具体选择哪个标准取决于用图像来做什么后续工作。

遥感图像融合过程中会使用到一些参数,如多波段图像与全色图像对应的加权系数,这个参数可以通过多个区域和多个时相的图像来估计。但直接获取这些图像不仅很困难,费用高,而且很难得到影响图像形成过程的运行参数。STK 与 Matlab 相结合,为模拟遥感图像提供了方便,可以很好地解决实验图像缺乏的问题。不过,本文目前只是利用 STK 从已有图像库中获得不同区域和时相的图像,并借此探讨融合中某些参数的分布规律。

2 遥感图像融合及融合中的参数

2.1 遥感图像融合

图像融合的算法有很多,有主分量变换,比值变换,基于 HIS 变换的等等。HIS 变化的原理是把 R, G, B 三个分量的多光谱图像经过正变换后,得到彩色图像的 I, H, S 三个分量,用高分辨率图像与亮度进行直方图匹配,并用拉伸后的高分辨率图像取代 I 分量,根据新的 I 和 H, S 进行反变换,即可以得到高分辨率的彩色图像。但是这种融合的效果并不能保证原始多光谱图像的光谱特性^[6]。HIS 变换和小波变换相结合,就可以克服这种缺陷,使得融合图像既能获得高分辨率,又能保持原来光谱的光谱特性,这就是基于小波的 HIS 融合算法。

用基于小波的 HIS 融合算法的具体步骤是:

①将高分辨率全色图像和多光谱图像配准。②将

多光谱图像进行 RGB-HIS 变换,得到 I, H, S 三个分量。③将高分辨率全色图像进行线性拉伸,使得拉伸后的图像方差和均值与 HIS 空间中的 I 分量一致。④对拉伸后的高分辨率图像和 I 分量图像分别按小波变换进行分解,得到高分辨率多尺度图像和 I 分量多尺度图像。⑤将高分辨率多尺度图像与 HIS 空间中的 I 分量进行叠加,得到新的多尺度图像。⑥对新的多尺度图像进行小波变换,得到新的亮度分量。⑦将新的亮度分量与 H, S 进行逆变换,即可以得到融合后的 RGB 图像。

多尺度分析中小波基的选择将直接影响融合结果,不同的小波基分析同一个问题产生的结果有时差异很大。在实际选取小波基函数时,必须结合应用问题的特点和数据的要求。

2.2 融合参数的确定

大多数资源卫星上同时搭载有全色和多光谱传感器。理想情况下,各个多光谱波段较好地分离且恰好与全色波段覆盖相同的光谱范围。理论上全色波段的辐射能量等于各多光谱波段的辐射能量之和。然而,传感器的实际光谱响应并非如此,传感器记录的辐射能量是入瞳处的辐射能量与传感器的光谱响应共同作用的结果,即:

$$L_k = L \int(\lambda) R_k(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中, λ 为波长, L_k 为 k 波段记录的辐射亮度值, $L(\lambda)$ 为入瞳处的辐射能量, $R_k(\lambda)$ 为在波长 λ 处的光谱响应。因此,以 Landsat 为例,其全色和多光谱波段满足如下关系:

$$Pan = w_G G + w_R R + w_{NIR} NIR + (other) \quad (2)$$

式中, Pan , G , R , NIR 分别对应全色、绿、红、近红外波段的辐射值; w_G , w_R , w_{NIR} 分别为相应波段的加权系数。进一步推广,全色波段与其光谱范围覆盖下的多光谱波段近似满足线性关系:

$$Pan = \sum w_i MS_i + (other) \quad (3)$$

式中, MS_i 为全色波段光谱范围覆盖下的多光谱波段, w_i 为相应波段的加权系数。

对于传统的 IHS 方法而言,I 分量等于参与融合的 3 个多光谱波段的平均。根据上面的分析,全色波段与其光谱范围覆盖下的多光谱波段近似满足线性关系。因此,无论参与融合的波段为哪些多光谱波段,均利用全色波段光谱范围覆盖下的多光谱波段来构造 I 分量,且根据各波段的光谱响应不同采用不同的加权系数,即有:

$$I = \sum_i w_i MS_i \quad (4)$$

式中, MS_i 和 w_i 的意义同上。

加权系数 w_i 的确定至关重要, 可以通过对全色与多光谱传感器的光谱响应函数进行线性回归, 得到适用于辐射值的系数; 或者依据全色与多光谱传感器的光谱响应曲线覆盖的面积求得系数。然而, 实际应用中获得的遥感影像往往受到卫星工作状态、大气效应、成像误差等因素的影响, 直接依据光谱响应函数得到的系数并不适用于所有影像, 特别是受大气影响严重的影像。而通过多个区域和多个时相的影像来估计能够更好地确定融合过程中所遇到的这个加权系数^[7]。但直接获取这些图像不仅很困难, 费用也很高。STK 与 Matlab 相结合, 为模拟遥感图像提供了方便, 可以很好地解决实验图像缺乏的问题。当然, 也可以利用 STK 从已有图像库中获得不同区域和时相的图像, 然后对选择出的图像做相应的处理并借此探讨此参数对融合效果的影响, 本文的工作主要在此。

3 STK 仿真模拟

图像融合操作需要选择原始图像, 从图像库中选择原始图像有一定盲目性。利用 STK 模拟出卫星拍摄图像的过程, 可以给出具体某天卫星在地面上方几次可见, 如果知道某天某个时间段的天气不好可能对拍摄的图像造成很大的影响, 选择的时候可以选这个时间段。两幅图像都选相对应的接近的时间段(类似的大气状况)和天气状况较好的时间段, 就有利于后面的融合等图像处理工作。

另外, 如前文所说, 利用 STK 从已有图像库中获得不同区域和时相的图像, 可借此探讨融合参数对融合结果的影响。以下是两个利用 STK 选择图像的例子。

3.1 STK 模拟 2002 年 5 月 5 日卫星拍摄

3.1.1 模拟 Landsat 和 SPOT 卫星轨迹

本文以上海市地面接收站接收的 Landsat 卫星的 TM 图像和 SPOT 卫星的 HRV 图像为例实现 STK 的仿真分析功能。此实验模拟的是 2002 年 5 月 5 日的卫星拍摄轨迹。首先建立新场景, 随后从 STK 的数据库中添加卫星对象 Landsat 和 SPOT, 并在卫星上分别加载传感器 TM 和 HRV。然后从数据库中添加城市 shanghai。因为上海市很大, 周围环境比较复杂, 所以本文并没有考虑 shanghai 对象中加入观测角等约束条件。

3.1.2 卫星与上海地区的地面站可见性

对于地面接收站而言, 只有当卫星进入地面站

的可见范围时, 才可以实现卫星与地面站之间的通讯, 从而达到接收卫星数据的目的。使用 STK 可以方便地分析对象之间的可见情况。

本次实验中对地面对象 shanghai 使用 access 功能即可建立起卫星与 shanghai 之间的可见性连接并生成报告, 如表 1 和表 2 所示。

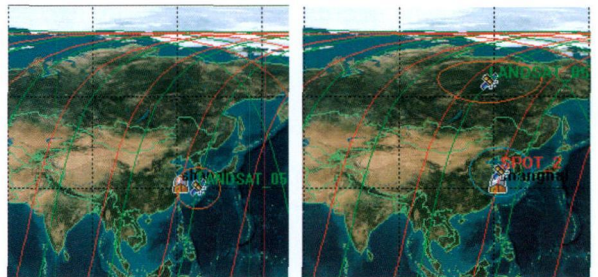
表 1 上海和 Landsat 卫星的可见性报告

Facility-shanghai-To-Satellite-LANDSAT_05: Access Summary Report				
shanghai-To-LANDSAT_05				
Access	Start Time (UTC)	Stop Time (UTC)	Duration (sec)	
1	5 May 2002 01:13:59.26	5 May 2002 01:27:45.60	826.345	
2	5 May 2002 02:52:28.02	5 May 2002 03:03:58.34	690.316	

表 2 上海和 SPOT 卫星的可见性报告

Facility-shanghai-To-Satellite-SPOT_2: Access Summary Report				
shanghai-To-SPOT_2				
Access	Start Time (UTC)	Stop Time (UTC)	Duration (sec)	
1	5 May 2002 01:05:17.67	5 May 2002 01:15:32.96	615.290	
2	5 May 2002 02:43:22.82	5 May 2002 02:58:49.75	926.921	
3	5 May 2002 04:25:10.60	5 May 2002 04:35:44.31	633.714	

从表中可以看出, Landsat 卫星与上海地区在 5 月 5 日这一天有两次可见, 而 SPOT 卫星与上海地区在 5 月 5 日有三次可见。地面站和卫星之间的连接建立后, STK 可以用二维图形直观的显示对象之间的连接情况, 如图 1, 绿色代表 Landsat 卫星的运行轨迹, 此卫星上搭载 TM 传感器; 红色代表 SPOT 卫星的运行轨迹, 此卫星上搭载 HRV 传感器(本文所有图中的轨迹颜色代表的含义相同), 在图中也标显出了上海地区的地面站位置。



上海与 Landsat 卫星可见 上海与 SPOT 卫星可见
图 1 上海与 Landsat 和 SPOT 卫星可见时的二维图

从图 1 中, 可以看到, 两颗卫星在分别经过上海上空进行拍摄时候的空间状态。

3.2 STK 模拟 2004 年 5 月 5 日卫星拍摄

3.2.1 模拟 Landsat 和 SPOT 卫星轨迹

此实验模拟的是 2004 年 5 月 5 日这一天卫星的拍摄轨迹, 其他条件和上面实验相同。

3.2.2 卫星与上海地区的地面站可见性

这次的实验中, 同样对地面对象 shanghai 使用 access 功能建立起卫星与它之间的可见性连接并生成报告, 如表 3 和表 4 所示。

表3 上海和 Landsat 卫星的可见性报告

Facility-shanghai-To-Satellite-LANDSAT_05-Sensor-TM: Access Summary Report			
shanghai-To-TM			
Access	Start Time (UTCG)	Stop Time (UTCG)	Duration (sec)
1	5 May 2004 02:21:59.83	5 May 2004 02:25:07.59	187.757

表4 上海和 Spot 卫星的可见性报告

Facility-shanghai-To-Satellite-SPOT_2-Sensor-HRV: Access Summary Report			
shanghai-To-HRV			
Access	Start Time (UTCG)	Stop Time (UTCG)	Duration (sec)
1	5 May 2004 02:54:59.94	5 May 2004 02:59:13.37	253.430

从表中可以看出, Landsat 和 SPOT 卫星在 5 月 5 日这一天都只有一次与上海地面接收站可见, 同样的, 卫星和地面站之间的连接建立后, STK 可以用二维图形直观地显示对象之间的连接情况, 如图 2 所示。通过图 1 和图 2 的比较也可以看出 2004 年和 2002 年的同一天, 相同卫星的运行轨迹也是完全不同的, 这也就直接导致了相同卫星在不同年的同一天与上海上空可见次数和时间的不同。

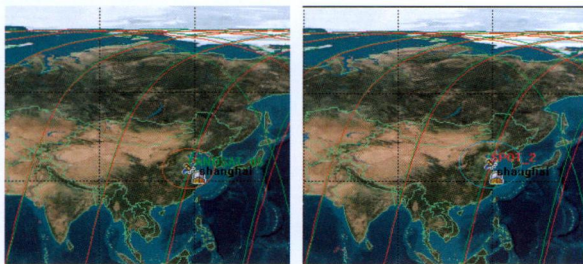


图2 上海地区与 Landsat 和 SPOT 卫星可见时的二维图

4 融合实验及其参数分析

本章节分两个大的步骤:

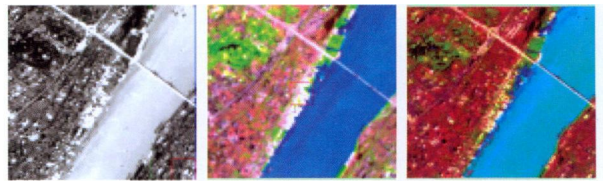
首先, 进行融合实验并对融合结果进行评价。编制 VC++ 程序, 采用基于小波的 HIS 融合算法, 利用若干个指标对融合结果进行评价。其中小波基均采用双正交 Laplacian 5/7 小波, 并进行 3 层小波分解, 小波分解后的两幅图像低频子带采用加权平均的融合方法, 其权值均取 0.5。

其次, 进行融合参数分析。利用 STK 选择的图像研究加权系数 w_i 对融合结果的影响。

4.1 融合实验

第一组实验: 首先, 从图像库中选取前面 STK 确定出来的 2002 年 5 月 5 日 2:43, 上海地区 SPOT 全色影像图和同一天 2:52 同一地区 Landsat 的多光谱影像图, 如图 3 的 (a) 和 (b) 所示; 然后先做

几何处理和相关的辐射处理, 再对这两幅图像进行融合, 运用基于小波的 HIS 融合算法得到图 (c) 的结果:



(a) 02 年全色图像 (b) 02 年多光谱图像 (c) 融合后图像

图3 2002 年图像融合处理结果对比

第二组实验: 同第一组试验一样, 先从图像库中选取 STK 确定出来的 2004 年 5 月 5 日 2:54, 上海地区 SPOT 的全色影像图和同一天 2:21 同一地区 Landsat 的多光谱影像图, 如图 4 的 (a) 和 (b) 所示(两颗卫星这一天重复过境上海地区, 选择它们重复过境上海上空时, 时间最接近的两幅影像), 对它们做和第一组实验相同的处理后得到图 (c) 的结果:



(a) 04 年全色图像 (b) 04 年多光谱图像 (c) 融合后图像

图4 2004 年图像融合处理结果对比

4.2 融合结果的评估

4.2.1 评定标准

判断某一种图像融合算法是否满足要求的方法可分为二类: 一类是主观判决, 观察者根据事先规定的评定的尺度、自己的经验或参照一组标准图像对被评价的图像做出质量判断。这种判断方式会由于个人视觉上的差异, 以及心理因素的影响而得到不同的结果, 并且观察者的知识背景、专业技能等等都可能对图像融合结果的评价产生影响甚至偏差, 因此只有建立在大量统计基础上的主观判决结果才具有说服力; 另一类是客观判决, 建立量化评价公式, 可以大大提高判决的准确性和速度, 同时采用多种量化判决可以弥补各自方法上的缺陷, 得到更准确的结论。但是客观评价如果没有考虑人眼的视觉特性, 有时判断结果可能会与视觉上的感受略有不同。

基于小波的 HIS 融合算法具有特殊性, 它不仅要求提高融合影像的空间分辨率, 而且要求尽可能保持原始影像的光谱特性, 因此, 对于这类融合效

果的评价,应综合考虑空间细节信息的增强和光谱信息的保持。所以,一般应综合利用3类统计参数来分析与评价:第一类反映空间细节信息,如熵、方差和清晰度;第二类反映亮度信息,如均值;第三类反映光谱信息,如扭曲程度和偏差指数。下面简要介绍各种参数的定义及其物理含义:

①熵

图像熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标,图像熵的定义为^[8]:

$$E = - \sum_{g=0}^{L-1} p(g) \log_2 p(g) \quad (5)$$

其中 E 表示图像的熵, L 表示图像的总的灰度级数, $p(g)$ 表示灰度值为 g 的像素与图像总的像素的比值。融合后图像的熵的大小反映了融合图像包含的信息量的多少,熵越大,说明融合后的图像上的信息量增加的越多。

②标准差

标准差反映了图像灰度相对于灰度平均值的离散情况。在某种程度上,标准差也可用于图像反差的大小。若标准差大,则图像灰度级分布分散,图像的反差大,可以看出更多的信息;相反,则看不出太多的信息。标准差定义为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f(i,j) - \bar{f})^2} \quad (6)$$

其中, $f(i,j)$ 表示图像中第 i 行,第 j 列像素的灰度值, \bar{f} 为图像的平均灰度值, M 和 N 分别为图像像素的行列数。

③清晰度

图像清晰度采用梯度法来衡量,图像的梯度计算为:

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum \sqrt{(\nabla I_x^2 + \nabla I_y^2)/2} \quad (7)$$

其中, ∇I 与 ∇I 分别为 x 与 y 方向上的差分, n 为图像的大小,如果 \bar{g} 越大,则图像的清晰度越高,融合会有效地改善图像的清晰度。

④均值

图像均值是指像素灰度平均值,对人眼反映为平均亮度。其定义为:

$$\bar{f} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(x_i, y_j)}{M \times N} \quad (8)$$

其中, $f(i,j)$ 表示图像中第 i 行,第 j 列像素的灰度值, M 和 N 分别为图像像素的行列数。

在评价多光谱图像融合前后的光谱变化时,可

用图像均值来衡量。对于强调光谱保持来说,融合前后的图像均值最好保持不变。

(5) 扭曲程度

图像光谱扭曲程度直接反映了多光谱图像的光谱失真程度,光谱扭曲定义为:

$$D = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j |V'_{i,j} - V_{i,j}| \quad (9)$$

其中, n 为图像的大小, $V'_{i,j}$, $V_{i,j}$ 分别为融合后和原图像上 (i,j) 点的灰度值。

(6) 偏差指数

偏差指数用来比较融合图像的低分辨率多光谱影像的偏离程度。经下式计算,即:

$$D_{index} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|I(i,j) - I'(i,j)|}{I(i,j)} \quad (10)$$

其中, I 和 I' 分别代表融合前的强度值和融合后的强度值。

4.2.2 实验结果评价

通过编制 VC++ 程序,采用基于小波的 HIS 融合算法,实现了采用熵,均值,标准差和清晰度等这几个判定准则来客观评价上述融合结果,程序的运行结果如图 5 和图 6 所示。

Image	熵	均值	标准差	清晰度	扭曲程度	偏差指数
彩色...	5.690	91.379	42.754	2.713		
全色...	7.355	148.785	51.815	10.830		
Wavl...	6.903	88.736	54.165	6.293	25.412	0.284

图 5 2002 年的图像融合后结果评定

Image	熵	均值	标准差	清晰度	扭曲程度	偏差指数
彩色...	7.305	82.870	61.826	22.155		
全色...	7.084	111.535	71.335	53.371		
Wavl...	7.406	86.336	69.047	51.279	75.096	5.220

图 6 2004 年的图像融合后结果评定

通过上面的实验以及实验后的结果评价,熵、均值、标准差和清晰度等客观评价准则的比较,可以看出选取的两组图像经过融合之后综合了原来两幅图像的优点,信息量更加丰富,灰度等级也更分散,能够得到更多的信息。但是两组实验之间比较可以看出,第二组实验融合后的熵比原来的两幅图像都大,说明信息量更加丰富,第一组实验融合后的均值更小,即融合后图像的亮度信息更少,不利于光谱保持。这样,就可以根据自己处理图像的具体用途来

选择是用 2002 年的两幅图像还是用 2004 年的图像。例如,要做图像的解译工作,需要所选图像的信息量很丰富并且分辨率也高,这样就可以选择第二组图像融合的结果;若强调光谱保持的时候,也是用第二组图像更合适。可见,先用 STK 模拟出两个时间卫星拍摄图像的过程,这样就给出了选择图像的具体时间方向,有利于后面融合工作等其他图像处理工作的顺利进行。否则,在最初选择要融合图像的时候太过盲目,可能会随便选择某个时间的图像,对后续工作造成影响。

4.3 融合参数的分析

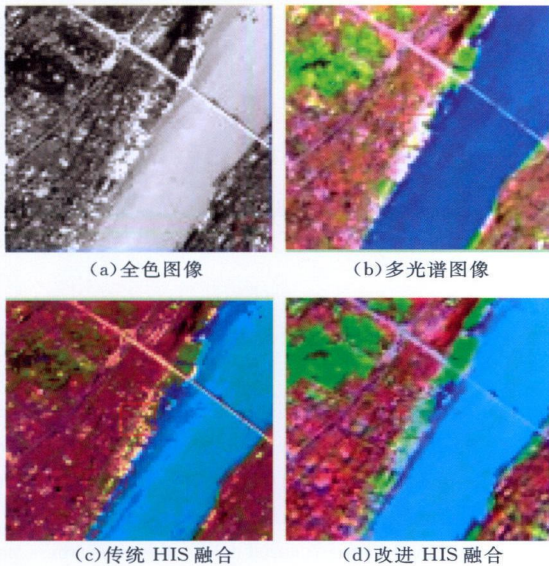


图 7 改变 w_i 的融合结果对比

这里所做的实验主要是用 ERDAS 软件对 STK 选择出来的 2002 年的上海地区的图像做两次融合。第一次采用传统的 HIS 融合法,即融合中 I

分量等于参与融合的 3 个多光谱波段的平均, w_i 的值是 1/3, 1/3, 1/3; 第二次利用公式(4)所确定的 I 分量代替传统的 I 分量,即改变 w_i 的值进行融合,因这里只是探讨 w_i 的改变对融合结果的影响,设定 w_i 分别为 1/4, 3/8 和 3/8, 结果如图 7。从目视效果来看,传统的融合结果存在较为明显的色彩畸变,光谱信息损失较大。改变 w_i 之后的融合结果与它有显著的差异和改善,也就是说加权系数的不同对结果会产生很大的影响。

5 结束语

本文的实验表明,用 STK 模拟卫星轨迹,可以直观地给出不同传感器在同一天对同一块地区进行摄影的二维和三维图,可以帮助选取质量好的遥感图像,便于之后的遥感图像的处理和类似融合等方面的应用。

本文中模拟卫星的过程中并没有考虑光照条件的影响,STK 可以在对象之间添加几何约束条件,如传感器可视范围、地面站最小仰角、探测距离等,也可以在 shanghai 对象中加入最小观测角等约束条件。

在对融合图像性能评估过程中,不同的评价参数对图像性能评估的侧重点不同,而且对于不同类型的图像,同一评价参数在融合图像性能中所起的作用也不同^[9]。后续研究将考虑采用其他参数,如空间频率,交叉熵,联合熵和交互信息量等对融合结果进行评价。另外,利用 STK 与 Matlab 相结合的技术,可以为模拟遥感图像提供方便,很好地解决图像缺乏的问题,更好地对融合过程中使用到的一些参数进行估计。

参考文献

- [1] David L. Hall, J. Lina. An introduction to multisensor data fusion[C]//Proceedings of The IEEE, 1997, 85(1): 6- 23.
- [2] C Pohl, J L Van Genderen. Multi-sensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications[J]. Int J Remote Sensing, 1998, 19(5): 823- 854.
- [3] Jorge Nenez, Xavier Otazu, Octave Fors, et al. Multi-resolution based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. IEEE Trans on Geo-science and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1204- 1211.
- [4] 杨颖, 王琦. STK 在计算机仿真中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 1- 14, 36- 47, 93- 99.
- [5] 张彩娟. STK 及其在卫星系统仿真中的应用[J]. 无线电通信技术, 2007(4): 45- 61.
- [6] 孙家柄. 遥感原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 162- 167.
- [7] 徐佳, 关泽群, 何秀凤, 胡俊伟. 基于传感器光谱特性的全色与多光谱图像融合[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 97- 102.
- [8] 陈鹰. 遥感图像的数字摄影测量[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003: 347.
- [9] 王海晖. 采用交互信息量评价遥感图像融合结果的方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(12): 32- 33.