

文章编号: 1007-4619(2006)03-0339-06

# 多时相遥感图像相对辐射校正

张鹏强, 余旭初, 刘 智, 李建胜, 万 刚

(信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

**摘 要:** 相对辐射校正是多时相遥感图像处理和分析的前提。本文分析了几种常规的相对辐射校正方法的优缺点, 然后在此基础上提出了一种基于小波变换的遥感图像相对辐射校正方法。该方法对源图像小波变换域的低频成分实施辐射变换, 并保持高频成分不变, 重构的图像具有保持高频信息的特性, 因而能够较好地保留源图像中由于地物变化引起的辐射差异。

**关键词:** 多时相遥感图像; 辐射校正; 灰度分布; 辐射特性; 小波变换

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A

## A Study on Relative Radiometric Correction of Multitemporal Remote Sensing Images

ZHANG Peng-qiang YU Xu-chu LIU Zhi LI Jian-sheng WAN Gang

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Henan, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract** The relative radiometric correction is the first step of processing and analyzing of multitemporal remote sensing images. In this paper, a new method based on wavelet transform is proposed on the basis of a through study on the three traditional ones. This new method was implemented by doing relative radiometric correction only on the low frequency component of wavelet transform domain of the source image, and just remaining the high frequency components unchanged. The reconstructed image has the characteristic of keeping the high frequency information, so the radiometric diversities in the source image due to ground changes are reserved.

**Key words:** multitemporal remote sensing images; radiometric correction; gray level distribution; radiometric characteristic; wavelet transform

## 1 引 言

经过几十年的机载和星载遥感对地观测, 人们已经积累了大量的关于地球表面的遥感图像数据。这些不同传感器获取的多源遥感图像, 除了具有不同的几何和辐射特性外, 还具有不同的时相特性。对时相特性的研究使得遥感技术提供了最可行的地表变化监测方法<sup>[1, 2]</sup>。在过去的十几年中, 科学家

和工程技术人员在多时相遥感图像处理和分析技术上作了大量的研究<sup>[3]</sup>, 取得的成果已广泛应用于环境监测、农业调查、城市研究、森林监测、地图修测、运动估计等诸多方面<sup>[3-5]</sup>。但是, 由于在不同季节、不同时间成像时, 受不同的大气条件、光照条件、地表起伏、土壤湿度、植被气候、传感器成像模型和侧视角等影响, 同一地区所成的影像具有较大的辐射差异<sup>[4, 6]</sup>, 这给多时相图像处理和分析带来了极大的困难。为此, 在诸如变化检测和运动估计等遥感

收稿日期: 2005-03-28; 修订日期: 2005-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40371090)。

作者简介: 张鹏强(1978—), 男, 讲师, 博士生。2000年毕业于解放军信息工程大学航空摄影测量专业, 获学士学位; 2003年获该校摄影测量与遥感专业硕士学位, 并继续攻读博士学位。研究方向为多时相遥感图像处理与分析、目标识别与变化检测等。E-mail: zpq1978@

应用中,需要消除不同时相遥感图像之间的辐射亮度差异。为区别于遥感成像过程中的辐射校正<sup>[7,8]</sup>(或称之为传感器定标),本文消除图像辐射亮度差异这一过程称为相对辐射校正。

相对辐射校正的目的是消除不同时相图像之间的辐射差异。理想的目标是使多时相图像具有相同的辐射特性,即在不同时相的多源遥感图像上,同一地物具有相同的辐射亮度。同时还应考虑在不同时相遥感图像获取期间,地物目标有可能发生变化。在这种情况下,希望未发生变化的地物目标具有相同的辐射亮度,发生变化的地物目标具有不同的辐射亮度,且辐射亮度的差异能够反映地物发生的变化。而目前常规的相对辐射校正处理,或者需要人机交互实现;或者在消除图像之间辐射差异的同时,往往也削弱了地物的变化。为此,本文对常规的相对辐射校正作了改进。从频谱的角度来看,在多时相遥感图像中,辐射亮度的整体差异主要体现在低频成分,而地物发生的变化则大多体现在高频成分。本文的思路是对小波变换域的低频成分实施辐射变换,保持高频成分不变,重构的图像具有保持高频信息的特性,因而能够较好地保留源图像中由于地物变化引起的辐射差异。

## 2 常规相对辐射校正方法

### 2.1 直方图匹配

通常在几何配准后的多时相遥感图像上,发生变化的地物目标占全部地物的比例较小。所以经过辐射校正的多时相图像应该具有相似的灰度直方图分布。然而,直方图相似,并不说明图像具有一致的辐射特性。但是,对于配准后的同一地区的遥感图像而言,它们是同一模式的映射(忽略地物的变化),图像内部像点辐射亮度之间具有相关关系,那么如果直方图相似,它们的辐射特性也就相近。

直方图匹配<sup>[9,10]</sup>能够有效地将源图像  $A_r$  的直方图分布调整为与参考图像  $A_f$  的直方图相似。该方法的优点是能够自动快速地完成图像辐射校正,其缺点是直方图匹配这一非线性操作在一定程度上破坏了源图像  $A_r$  中地物的辐射特性。

### 2.2 基于统计量的校正

从统计量的角度看,辐射特性相同的同一地区的遥感图像,具有相同的灰度概率分布。又由于图像内部的相关性,具有相同灰度分布的图像也具有

相似的辐射特性。相对辐射校正转化为源图像和参考图像灰度概率分布的统计量匹配。若假设图像灰度服从高斯分布,则有:

$$\frac{g_d - \mu_f}{\sigma_f} = \frac{g_r - \mu_r}{\sigma_r} \quad (1)$$

式中,  $g_d$  为源图像校正后的像素灰度值,  $\mu_f$ 、 $\sigma_f$  分别为参考图像的像素均值和标准差,  $g_r$ 、 $\mu_r$ 、 $\sigma_r$  分别为源图像的像素灰度值、均值和标准差。

将(1)式重新排列,得到:

$$g_d = \frac{g_r - \mu_r}{\sigma_r} \times \sigma_f + \mu_f \quad (2)$$

这就是基于统计量的辐射校正的公式<sup>[1]</sup>。它是一个线性变换。该方法也能自动快速地完成图像辐射校正,其缺点是,当图像中存在大量地物变化时,校正效果不够理想。

### 2.3 基于伪不变特征(PIF)的校正

基于伪不变特征的辐射校正是由 Schott 提出的<sup>[11]</sup>。伪不变特征是指反射率基本不随外界条件变化的地面目标。它们的反射系数独立于成像季节或生物气候条件,并有固定的空间位置,例如建筑物、道路和较深的水域等。

基于伪不变特征的辐射校正假定多时相图像上地物的亮度分布为线性函数:

$$g_d = k \times g_r + b \quad (3)$$

式中,  $g_d$  和  $g_r$  的意义同 2.2 节,  $k$ 、 $b$  为参数,由人工选择的伪不变特征点在不同时相图像上的亮度值求出。

基于伪不变特征的辐射校正的优点是不受地物变化的影响,而且不会削弱图像之间的地物变化;缺点是需要人工选取伪不变特征点,且校正结果依赖于特征点。

## 3 基于小波变换的校正

小波分析是近年来成功应用于信号处理的最有力的工具之一<sup>[9,10]</sup>。直观地看,小波分析的优点在于可以将信号分解为多尺度下的低频和高频成分,这样就可以分别对信号的低频和高频成分施加相应的操作,然后重构信号,获得所需的处理结果。在多时相遥感图像中,辐射亮度的整体差异主要体现在低频成分,而地物发生的变化则大多体现在高频成分。辐射校正的理想目标是在保持地物变化的前提下,尽量消除图像间的辐射差异。为了实现这一目标,本文将小

波分析引入多时相遥感图像辐射校正,首先对参考图像和源图像分别实施小波变换,然后保持源图像的高频成分不变,对低频成分实施辐射变换,最后重构源图像,得到辐射校正图像,如图 1 所示。

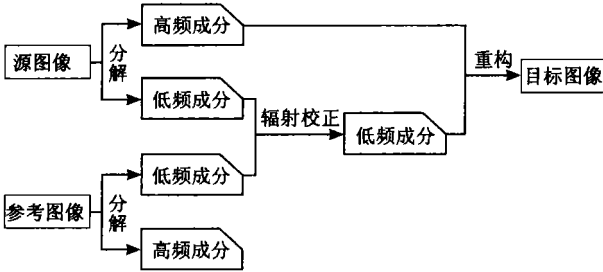


图 1 基于小波变换的辐射校正方法

Fig 1 The radiometric correction method based on wavelet transform

由于重构的图像具有保持高频信息的特性,因而能够较好地保留源图像中由于地物变化引起的辐射差异;而低频成分的辐射校正则消除了图像间的

辐射差异。其中低频成分的辐射校正原则上可选用上述三种辐射校正方法中的任一种,但在实践中,由于直方图匹配的方法对地物的辐射特性破坏较大,基于 PIF 的校正法需要在低频图像上采集伪不变特征,而基于统计量的方法则能够满足精度和自动化的需求。故本文采用基于统计量的校正方法。

## 4 实验结果和分析

### 4.1 实验数据

利用本文所述的方法对台湾地区的两幅不同时相的遥感图像作了辐射校正处理。它们分别于 1995-12-11 和 2000-08-10 由 Landsat5 的 TM10 和 Landsat7 的 ETM+ 获取,均为第 5 波段数据。图像像素分辨率  $30\text{m} \times 30\text{m}$ ,实验数据为从原始图像中裁剪出一块小区域,经过几何配准后,每幅尺寸均为  $324\text{像素} \times 353\text{像素}$  (图 2)。实验区域为一块沿海地区的居民区。

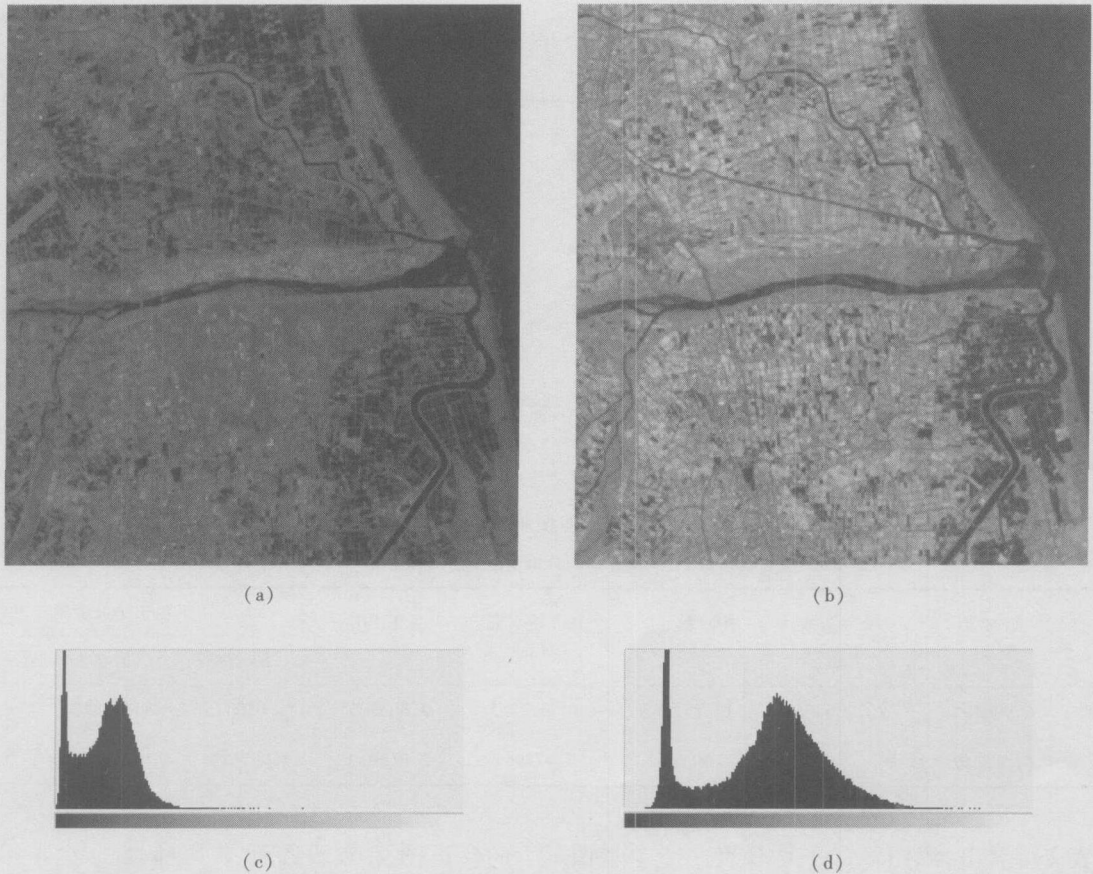


图 2 实验图像及其直方图分布

(a) 1995-12-11; (b) 2000-08-10; (c) (a) 的直方图; (d) (b) 的直方图

从图 2 可以看出,两幅图像的灰度分布存在较大的辐射差异。主要原因有二:一是由于成像季节不同,地面的植被状态发生了变化(如农田);二是由于采用了不同的传感器,地物的辐射响应不同(如水系)。另外,从视觉效果和直方图分布可以看出,图 2(b)的辐射特性优于图 2(a)。

### 4.2 实验结果与分析

由于图 2(b)的辐射特性优于图 2(a),故取

图 2(b)为参考图像,校正图 2(a)的辐射亮度。其中基于 PIF 的校正使用了人工选取的 27 个伪不变特征点(水系、建筑物、道路);基于小波变换的校正只变换到一层小波,小波变换采用 Mallat 分解与重构算法,滤波器是用 Daubechies 的具有有限紧支集的小波基计算得到的<sup>[12,13]</sup>。结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,4 种方法都扩展了图像的灰度分布,使得图 2(a)校正后的图像均具有与图 2(b)大体一致的辐射亮度。具体灰度分布统计情况见表 1。

表 1 实验图像灰度分布比较

Table 1 A comparison of the Gray level distributions of the test images

图像	灰度均值	灰度标准差	灰度中值	灰度范围	灰度集中分布区	
					分布区间	百分比
源图像 2(a)	30.40	17.18	32	[0, 155]	[0, 77]	99.71
参考图像 2(b)	87.58	37.30	93	[12, 222]	[16, 170]	99.29
直方图匹配 3(a)	89.69	34.96	94	[24, 221]	[24, 175]	99.62
基于统计量 3(b)	88.72	35.17	92	[28, 255]	[28, 180]	99.49
基于 PIF 3(e)	78.05	23.88	80	[36, 255]	[36, 144]	99.67
基于小波变换 3(d)	88.57	34.33	92	[22, 255]	[25, 180]	99.62

由图 3 和表 1 的统计数据可看出,直方图匹配、基于统计量的方法和基于小波变换的校正方法,都得到了与参考图像相似的灰度分布。这证明了本文提出的方法具有消除图像间辐射差异的能力。而基于 PIF 的方法虽然得到的图像灰度分布与参考图像有一定差异,但它较好地保持了原始图像的辐射特性。

用平均梯度 G 来表示图像所包含的高频信

息量:

$$G = \frac{1}{(m-1) \times (n-1)} \sum_{x=0}^{m-2} \sum_{y=0}^{n-2} \|G[g(x,y)]\| \quad (4)$$

式中, m, n 表示图像的宽和高,  $\|G[g(x,y)]\| \approx$

$\sqrt{[g(x,y) - g(x+1,y)]^2 + [g(x,y) - g(x,y+1)]^2}$  表示像点 (x, y) 处的边缘强度。平均梯度越大,图像所包含的高频信息量越丰富。表 2 为图像的平均梯度比较。

表 2 实验图像平均梯度比较

Table 2 A comparison of the average gradients of the test images

	源图像 2(a)	参考图像 2(b)	直方图匹配 3(a)	基于统计量 3(b)	基于 PIF 3(e)	基于小波变换		
						一层小波	二层小波	三层小波
平均梯度	6.990404	12.736804	13.852867	14.412365	9.803323	11.030015	8.881112	7.738052
与源图像之差			6.862463	7.421961	2.812919	4.039611	1.890708	0.747648

由表 2 可看出,源图像的平均梯度小于参考图像,这是因为源图像的灰度分布比参考图像集中。辐射校正后的图像平均梯度都大于源图像,这是由于辐射校正扩展了源图像的灰度分布区间的缘故。从表 2 最后一行可看出,基于 PIF 和基于小波变换

的校正图像与源图像平均梯度的差异相对较小(2.812919 和 4.039611),但是小波变换的层数越高,与源图像的平均梯度差异越小。这证实了基于小波变换的辐射校正方法保持源图像高频信息的能力。

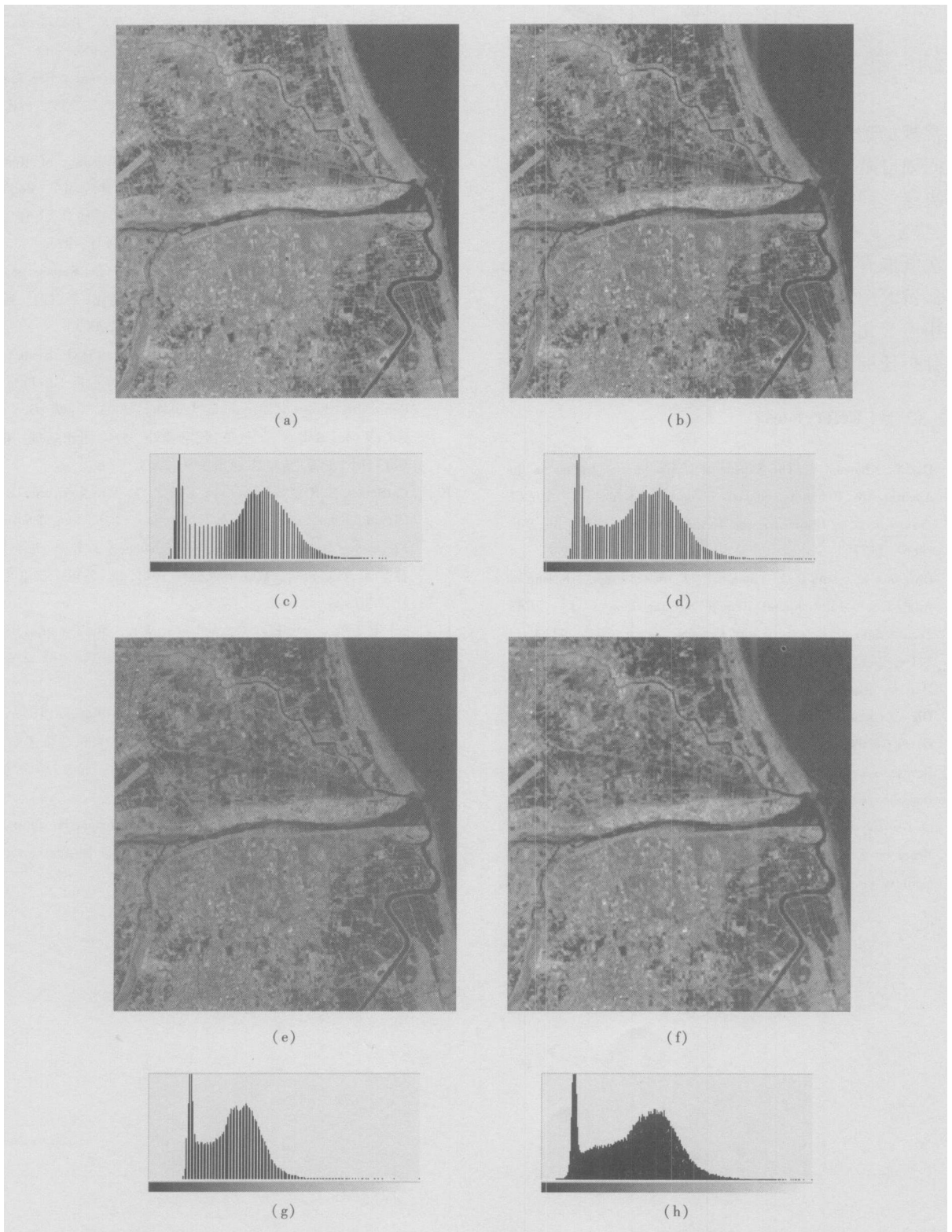


图 3 实验图像 2(a)辐射校正结果

(a) 直方图匹配结果; (b) 基于统计量的校正结果; (c) (a)的直方图; (d) (b)的直方图;  
 (e) 基于伪不变特征的校正结果; (f) 基于小波变换的校正结果; (g) (e)的直方图; (h) (f)的直方图

Fig 3 The results of radiometric correction of the test image 2(a)

(a) The result of histogram matching (b) The result of statistical quantities method; (c) The histogram of (a);  
 (d) The histogram of (b); (e) The result of invariant method; (f) The result of wavelet transform method;  
 (g) The histogram of (e); (h) The histogram of (f)

## 5 结 论

常规的遥感图像相对辐射校正方法,在消除图像之间辐射差异的同时,往往也削弱了地物的变化。为解决这一问题,本文对常规的相对辐射校正作了改进,提出了一种基于小波变换的辐射校正方法。该方法既能有效地消除图像间的整体辐射差异,又能够保留源图像中由于地物变化引起的辐射差异,可应用于变化检测和运动估计等多时相遥感图像处理和分析任务中。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Dai X, Khorram S. The Effects of Image Misregistration on the Accuracy of Remotely Sensed Change Detection [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, **36**(9): 1566—1577.
- [ 2 ] Bruzzone L, Smits P C, Tilton J C. Foreword—Special Issue on Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, **41**(11): 2419—2422.
- [ 3 ] Hall O, Hay G J. A Multiscale Object-specific Approach to Digital Change Detection [ J ]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2003, **4**: 311—327.
- [ 4 ] Bruzzone L, Prieto D F. Automatic Analysis of the Difference Image for Unsupervised Change Detection [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, **38**(5): 1171—1182.
- [ 5 ] Bruzzone L, Prieto D F. An Adaptive Semiparametric and Context-based Approach to Unsupervised Change Detection in Multitemporal Remote-sensing Images [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, **11**(4): 452—466.
- [ 6 ] Li D, Sui H, Xiao P. Automatic Change Detection of Geo-spatial Data from Imagery [ A ]. IAPRS [ C ]. Vol. XXXIV, Part 2, Commission II Xi'an, 2002.
- [ 7 ] Remote Sensing Seminar. A Detailed Explanation of Remote Sensing (Translated by Liu Y W, He X H) [ M ]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1993. [ [日]遥感研究会. 遥感精解 (刘勇卫, 贺雪鸿译) [ M ]. 北京: 测绘出版社, 1993. ]
- [ 8 ] Zhu S L, Zhang Z M. Acquisition and Analysis of Remote Images [ M ]. Beijing: Science Press, 2000. [朱述龙, 张占睦. 遥感图像获取与分析 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2000. ]
- [ 9 ] Gonzalez R C, Woods R E. Translated by Ruan Q Q, Ruan Y Z. Digital Image Processing. Second Edition [ M ]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. [ [美] Gonzalez R C, Woods R E 著, 阮秋琦, 阮宇智译. 数字图像处理 (第二版) [ M ]. 北京: 电子工业出版社, 2003. ]
- [ 10 ] Castleman K R. Translated by Zhu Z G, Lin X Y, Shi D J. Digital Image Processing [ M ]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. [ [美] Castleman K R 著, 朱志刚, 林学闯, 石定机译. 数字图像处理 [ M ]. 北京: 电子工业出版社, 2002. ]
- [ 11 ] Schott J R, Salvaggio C, Volchok W J. Radiometric Scene Normalization Using Pseudo-invariant Features [ J ]. Remote Sensing Environ, 1988, **26**: 1—16.
- [ 12 ] Zhu S L, Geng Z X. The Applications of Wavelet Theory in Image Processing [ M ]. Beijing: PLA Press, 1999. [朱述龙, 耿则勋. 小波理论在图像处理中的应用 [ M ]. 北京: 解放军出版社, 1999. ]
- [ 13 ] Daubechies I. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets [ J ]. Communication on Pure and Applied Mathematics, 1988, **41**(7): 909—996.