

方向自适应提升小波在遥感图像中的研究

武文波¹⁾ 李涛²⁾ 王琨¹⁾ 秦前清³⁾

¹⁾(北京空间机电研究所, 北京 100076) ²⁾(西北工业大学, 西安 710072) ³⁾(武汉大学, 武汉 430079)

摘要 针对于遥感图像纹理复杂的特点,提出了一种利用自适应方向提升方案的遥感图像压缩编码新方法。传统的提升方法主要在垂直和水平方向上进行,从而降低垂直和水平方向上像素的相关性;与传统的提升方法不同,基于自适应方向提升的方法充分利用了图像其他纹理方向的相关性来进一步提高预测的精度,从而降低高频部分的能量值。该算法首先利用自适应方向提升的方法对遥感图像进行多尺度快速整数小波变换,然后采用子带位平面编码算法来实现遥感图像的高效压缩编码。实验结果表明,对一般遥感图像,该算法在高倍率压缩的情况下要优于目前的JPEG2000算法。

关键词 遥感图像 自适应方向提升 整数小波 子带位平面编码 JPEG2000

中图法分类号: TP751 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)04-664-06

Research on Remote Sensing Image Compression Using Orientation-adaptive Lifting Wavelet

WU Wenbo¹⁾, LI Tao²⁾, WANG Kun¹⁾, QIN Qianqing³⁾

¹⁾(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing, 100076)

²⁾(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072) ³⁾(Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract This paper addresses the problem of image compression in remote sensing applications. Compared with other static images, remote-sensing images are characterized with complex textures and weak local correlation. Most of current wavelet-based algorithms of image compression have not taken this into account, in which the predictions are always performed in the horizontal or vertical directions. In order to further improve coding efficiency, an efficient remote sensing image coding algorithm based on orientation-adaptive lifting wavelet (OALW) is proposed. First, the OALW is applied to the image at the direction where the pixels have a strong correlation, rather than at the horizontal or vertical orientation. Compression is then achieved by using a subband-bit-plane encoding method. In the experiments, two satellite images are selected to test the performance of the algorithm. Experimental results illustrate that it provides higher performance than JPEG2000 in low-bits compression.

Keywords remote sensing image, orientation adaptive lifting, integer wavelet, sub-band bit-plane coding, JPEG2000

0 引言

近几年来遥感传感技术发展很快,遥感图像在时间、空间和光谱分辨率上都有了显著的提高,相应的数据规模呈几何级数增长,给数据的传输和存储

带来了极大的困难。在这种情况下,采用压缩技术来解决数据传输问题可以取得很好的效果。因此,在保持信号少量失真的前提下,研究高效率的遥感图像压缩算法已成为遥感发展的一项关键技术。

与一般静止图像相比,遥感图像具有局部相关性较弱、纹理复杂、高熵值和低冗余度的特点。对其

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2006AA12Z132)

收稿日期:2008-10-29;改回日期:2009-02-17

第一作者简介:武文波(1979—),男,2007年于武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室获工学博士学位。主要研究方向为遥感图像处理、数据压缩。E-mail: yimeng_wuhu@126.com

进行压缩方法之一是采用基于小波的图像编码算法,如嵌入式零树小波编码 EZW (embedded zero-tree wavelet) 算法^[1],多级树集合分裂 SPIHT (set partitioning in hierarchical trees) 算法^[2],嵌入式零块编码 EZBC (embedded zero block coder) 算法^[3],以及改进的 JPEG2000 算法^[4]。近几年来,为了更好地表现图像的纹理特征,相继提出了一些新的多尺度几何分析方法,如 Ridgelet, Bandlet, Curvelet 和 Contourlet 变换^[5-6]等,这些变换都采用了一些方向敏感性更高的变换基,从而更适合于图像的纹理特征处理。另外,从图像的纹理几何特征出发,结合数学形态学方法,提出了形态小波的编码方法^[7]。本文针对遥感图像纹理复杂的特点,设计了一种基于方向提升的快速整数小波编码算法(OALW),该算法利用图像纹理空间方向特性,对方向自适应预测,进一步降低高频部分的能量,提高压缩的性能,实际实验测试表明,该方法比传统的提升方法可以取得更好的压缩效果。

1 压缩编码方案

1.1 小波提升方案

传统小波变换从函数空间剖分信号的频率特性方面出发建立起小波变换和滤波器组之间的关系,其伸缩参数和平移参数在实数域上连续变化,因此小波变换依赖于某一多项式的因式分解。与此不同的是,构造第2代小波的提升方案(Lifting Scheme)不再利用 Fourier 变换,而从信号的空域特性出发同时兼顾频率特性构造小波滤波器实现信号的实时分解。任何有限冲击响应滤波器(FIR)都可以分解为若干提升与对偶提升来实现。

对图像进行2维提升小波变换^[8],传统方法是分别在图像的水平方向和垂直方向进行1维提升小波变换。以5/3小波为例,其分析滤波器

$$h(z) = -\frac{1}{8}z^{-2} + \frac{1}{4}z^{-1} + \frac{3}{4} + \frac{1}{4}z - \frac{1}{8}z^{-2} \quad (1)$$

$$g(z) = \frac{1}{4}z^{-2} - \frac{1}{2}z^{-1} + \frac{1}{4} \quad (2)$$

其多相矩阵为

$$P(z) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{8}z^{-1} + \frac{3}{4} + \frac{1}{8}z & \frac{1}{4} + \frac{1}{4}z^{-1} \\ -\frac{1}{2}z - \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过因式分解,可得:

$$P(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{4} + \frac{1}{4}z^{-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2}z - \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

5/3 双正交小波的正变换可以用下列提升步骤实现:

分离

$$s_{j-1,k} = s_{j,2k}, d_{j-1,k} = s_{j,2k+1} \quad (5)$$

式中, s 为低频信号部分, d 为高频信号部分, j 为分解的层数, k 为像素的位置。

预测(对偶提升)

$$d_{j-1,k} = d_{j-1,k} - \frac{1}{2}(s_{j-1,k} + s_{j-1,k+1}) \quad (6)$$

更新(原始提升)

$$s_{j-1,k} = s_{j-1,k} + \frac{1}{4}(d_{j-1,k} + d_{j-1,k-1}) \quad (7)$$

反变换只需将以上各步反过来,并将输入和输出对换。

$$s_{j-1,k} = s_{j-1,k} - \frac{1}{4}(d_{j-1,k} + d_{j-1,k+1}) \quad (8)$$

$$d_{j-1,k} = d_{j-1,k} + \frac{1}{2}(s_{j-1,k} + s_{j-1,k-1}) \quad (9)$$

$$s_{j,2k} = s_{j-1,k}, s_{j,2k+1} = d_{j-1,k} \quad (10)$$

5/3 双正交小波其提升过程非常简单,可以通过整数的移位和加减操作实现,无需其他的计算。不仅保持了传统小波函数的所有特性,而且实现起来更加灵活、方便。从分析滤波器可以直接得到综合滤波器,所有运算都是即地的(in-place),无需分配额外的内存,而且可以并行计算,效率更高。

1.2 基于自适应方向提升的方案

以上是1维提升方案。然而上述传统的提升方案在对图像进行变换(水平方向或垂直方向)时,主要利用图像水平或垂直方向上像素的相关性,没有考虑像素在其他方向(45°或135°)的相关性。在垂直方向上,对图1所示的像素,传统提升过程用像素 $x[m-1,2n]$ 和 $x[m+1,2n]$ 来预测像素 $x[m,2n]$ 的值 $\hat{x}[m,2n]$ 。显然,这对于垂直走向纹理来说,预测结果是比较准确的,然而,这对于倾斜方向的纹理,预测的精度就比较差^[9]。为了进一步提高预测的精度,改善预测对方向的自适应性,采用如下方法来自适应预测纹理方向:

$$\Delta_0 = |x[m-1,2n] - x[m+1,2n]| \quad (11)$$

$$\Delta_{45} = |x[m-1,2n-1] - x[m+1,2n+1]| \quad (12)$$

$$\Delta_{135} = |x[m+1,2n-1] - x[m-1,2n+1]| \quad (13)$$

$x[m-1, 2n-1]$	$x[m-1, 2n]$	$x[m-1, 2n+1]$
$x[m, 2n-1]$	$x[m, 2n]$	$x[m, 2n+1]$
$x[m+1, 2n-1]$	$x[m+1, 2n]$	$x[m+1, 2n+1]$

图 1 图像采样数据

Fig. 1 Sample image segment

如果 Δ_0 是 $\Delta_{135}, \Delta_{45}, \Delta_0$ 3 个值中最小的, 那么预测值为

$$\hat{x}[m, 2n] = \frac{1}{2}(x[m-1, 2n] + x[m+1, 2n]) \quad (14)$$

如果 Δ_{135} 是 $\Delta_{135}, \Delta_{45}, \Delta_0$ 3 个值中最小的, 那么预测值为

$$\hat{x}[m, 2n] = \frac{1}{2}(x[m+1, 2n-1] + x[m-1, 2n+1]) \quad (15)$$

如果 Δ_{45} 是 $\Delta_{135}, \Delta_{45}, \Delta_0$ 3 个值中最小的, 那么预测值为

$$\hat{x}[m, 2n] = \frac{1}{2}(x[m-1, 2n-1] + x[m+1, 2n+1]) \quad (16)$$

1.3 整数小波变换

针对以上提升方案, 设计了一种简洁高效的小波分解算法, 该算法不仅速度快, 占用内存也较少。为节省内存, 让原始图像数据的输入指针和小波变换后的系数指针指向同一地址。小波变换采用

Mallat 迭代分解的方式, 每一次分解生成 4 个子带, 这 4 个子带按照 LH, HL 和 HH 的顺序连续地占据内存中原始数据的位置。因此小波变换后, 各个子带的起始地址在内存中排列如图 2 所示。 $pMT[i][j]$ 中存储着第 i 级分解第 j 子带的指针 ($j=0, 1, 2, 3; 0-LL, 1-LH, 2-HL, 3-HH$)。每个子带的宽存储于 $MSize[i][j][0]$, 高存储于 $MSize[i][j][1]$ 。每次分解后, $pMT[i][0]$ 所指向的低频分量总是被进一步分解为 $pMT[i+1][j]$ ($j=0, 1, 2, 3$) 所指向的 4 块。本文进行 5 次小波分解。

从图 3 可以看出, 本文提出的基于自适应方向提升的方法对倾斜方向 (45° 和 135° 方向) 的边缘纹理十分有效, 可以更好地降低高频部分的能量值, 从而进一步提高压缩的性能。

1.4 子带位平面编码

图像经过整数小波分解以后, 将得到 $3N+1$ 个小波子带, N 为分解次数, 小波系数全部用二进制整数表示。因为小波系数均为整数, 所以每个子带内小波系数直接构成若干个比特平面, 如图 4 所示, S 为小波系数的符号位, 0 代表正数, 1 代表负数; 幅度位表示小波系数绝对值的大小, b_N 为最高比特位 (位权值为 2^{N-1}), b_0 为最低比特位 (位权值为 2^0)。各小波系数的第 p 比特位构成了一个位平面, 称为第 p 比特平面, 小波系数的符号位构成的位平面称为符号平面。比特平面的个数由该子带小波系数的最大值决定, 将这些子带内的比特平面称为子带比特平面。

位平面编码^[10]就是在给定的码率下对单个子带中所有比特的最优化选择。为使重建图像的误差最小, 对小波系数按照从高到低的优先次序扫描。任何时刻编码的比特总是当前最重要的比特。图像进行整数小波分解后, 小波系数的取值主要集中在 $(-512, 512)$ 范围内。每个子带取 9 个比特平面 (第 0 平面到第 8 平面), 15 个子带就有 $135(15 \times 9)$ 个

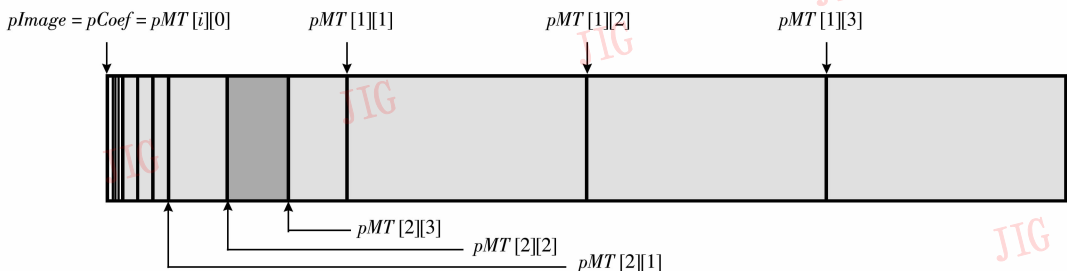


图 2 快速小波分解数据结构

Fig. 2 Decomposition structure of fast wavelet transform

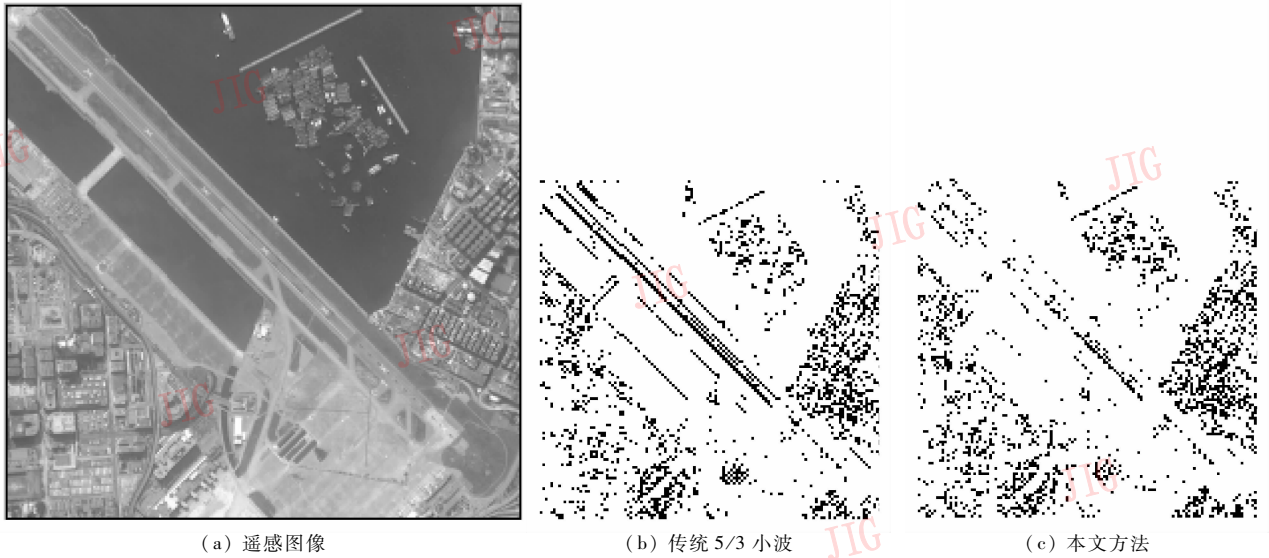


图 3 遥感图像及其 HH_2 子带小波系数(大于阈值 40)

Fig. 3 To illustrate the image and wavelet coefficients of HH_2 subband

		符号平面		第 5 比特平面						
		S	b_N	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0	
小波系数	C_0	0	0	...	1	0	1	1	0	0
	C_1	0	1	...	0	1	1	0	1	0
	C_2	1	1	...	0	1	1	0	0	1
	C_3	0	0	...	1	0	0	0	1	1
	C_4	1	0	...	0	1	0	1	0	1

图 4 小波系数的位平面表示

Fig. 4 The bit-plane of wavlet coefficients

不同的子带比特平面,对这 135 个子带比特平面按照上述方法得到的顺序进行编码;对于高于第 8 平面的比特平面直接按照光栅的顺序,在整个系数平面内从上到下、从左到右逐行编码。

1.5 熵编码

小波变换后图像的相关性被极大地降低,算术编码用于比特平面编码中每一比特的编码,其基本思想是用 $[0, 1]$ 内的一个小的子区间来表示整个输入数据序列。研究表明,小波变换后系数之间仍存在一定的相关,根据这一特点,采用上下文相关熵编码器比一般的熵编码器效果更好。MQ 算法^[10]是专门用于二进制数据压缩的算术编码算法,该算法能够在编码过程中快速跟踪信源统计特性的变化,不用乘除等复杂运算,具有很快的编码速度和很高的压缩效率。图 5 为 MQ 算术编码器的框图。图中 CX(Context)是邻近像素的信息,用于对比特 B 进行

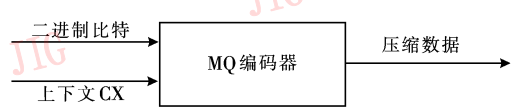


图 5 MQ 算术编码器

Fig. 5 MQ encoder structure

估计。然后编码器根据估计出的条件概率 $P(B|CX)$ 对比特 B 进行编码。

MQ 算法实现时耗时较多,是提高编码速度的瓶颈。为了提高编码的速度,本文采用一种改进的 MQ 编码算法^[11],对 JPEG2000 中的 MQ 编码流程进行分析和优化,减小了算法的复杂度,进一步提高了编码的速度。

2 实验结果与分析

为了验证上述算法的效果,设计了几个实验对一

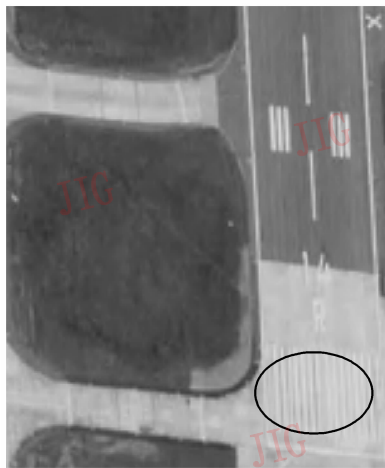
般光学遥感图像进行了测试。测试图像为 SPOT5 卫星遥感图像、QUICKBIRD 遥感图像。表 1 是压缩性能(峰值信噪比)的比较,对于中低倍率的压缩,本文算法跟 JPEG2000 相差无几,但对于高倍率的压缩,本文算法效果要优于 JPEG2000;表 2 是压缩时间的比较,由于采用了整数提升方案和改进的 MQ 算法,本文算法在压缩速度上要明显优于 JPEG2000。

遥感图像一个显著特点就是纹理丰富,而纹理对图像的解译分析具有非常重要的意义。图 6 是本文算法和 JPEG2000 算法压缩后的纹理分析,在相同的压缩倍率下,本文算法从目视效果上纹理特征要明显好于 JPEG2000 压缩。

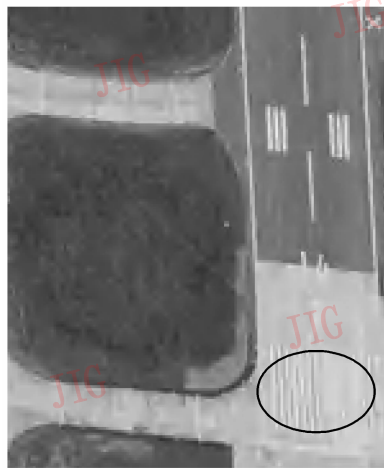
表 1 压缩性能(峰值信噪比)比较

Tab.1 Performance compare of compression

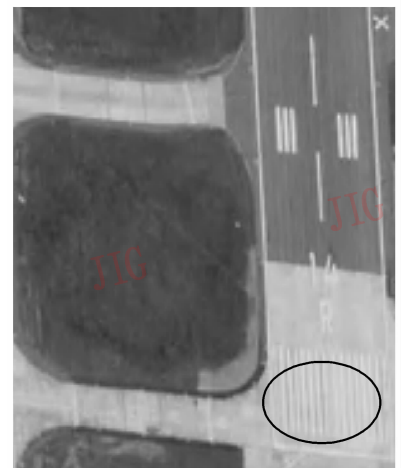
算法	雅典(SPOT5)图像				香港(quickbird)图像				/dB
	4	8	16	32	4	8	16	32	
OALW	29.15	22.49	19.61	17.13	49.15	42.75	38.32	34.51	
JPEG2000	29.39	22.74	19.20	16.97	49.38	42.96	38.24	34.34	



(a) 原始图像



(b) JPEG2000 压缩(32倍)



(c) OALW 算法(32倍)

图 6 压缩图像纹理分析

Fig.6 Texture analysis of compression images

3 结论

遥感数据压缩是遥感研究领域内的一个重要课题。本文从遥感图像的纹理特性出发,提出了一种遥感图像快速编码算法,实现了遥感图像的高效率压缩。实验结果表明,对一般遥感图像,该算法在高倍率压缩的情况下要优于目前的 JPEG2000 算法。

表 2 压缩时间比较

Tab.2 Comparisons of runtime

算法	雅典(SPOT5)图像				香港(quickbird)图像				/s
	4	8	16	32	4	8	16	32	
OALW	1.85	1.33	1.04	0.96	0.85	0.63	0.52	0.61	
JPEG2000	1.94	1.41	1.10	1.02	0.98	0.71	0.58	0.67	

对于压缩重建图像的质量评价一直是图像压缩领域的一个重要研究课题。遥感图像经过压缩(无损压缩)会产生灰度值的失真,但由于这种失真对遥感图像质量的影响并不是很确定,因此只有这种失真对于遥感图像解译不会产生明显影响才是可以接受的。目前对遥感图像的质量评价还没有一个统一的标准,仇彤博士做了大量的实验^[12]表明:在一定的压缩范围内(如不超过 30 倍),图像小波压缩对内定向和相对定向的影响并不是很大,而且对数字高程模型的精度也在可以接受的范围内。笔者在文献[13]中也对遥感图像压缩的质量进行了探讨,研究表明遥感图像的适度压缩不会对图像质量造成太大的影响。

由于遥感图像的复杂性和具有海量数据的特点,该算法虽距离实用还有一定的距离,但却为遥感图像压缩提供了一个新的研究思路。

参考文献(References)

- [1] Shapiro J. Embedded image coding using zero-trees of wavelet coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(11): 3445-3462.

- [2] Said A, Pearlman W A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. IEEE Transactions on Circuits and System, 1996, 6(3): 243-250.
- [3] Hsiang S T, Woods J W. Embedded image coding using zeroblocks of subband/wavelet coefficients and context modeling [DB/OL]. [2008-10-20]. <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [4] Liang Zhiwei, Ma Xudong, Dai Xianzhong. Improved JPEG2000 algorithm using a novel 97 wavelet [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(5): 853-857. [梁志伟, 马旭东, 戴先中. 一种新 97 小波改进的 JPEG2000 算法 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(5): 853-857.]
- [5] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [6] Belbachir N, Gobel P. The contourlet transform for image compression [DB/OL]. [2008-10-21]. <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [7] Lazzaroni F, Leonardi R. High-performance embedded morphological wavelet coding [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(10): 293-295.
- [8] Guoze A, Antonini M, Barlaud M, et al. Design of signal-adapted multidimensional lifting scheme for lossy coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(12): 1589-1602.
- [9] Gerek O N, Cetin A E. A 2-D orientation-adaptive prediction filter in lifting structures for image coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(1): 106-111.
- [10] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(7): 1158-1170.
- [11] Xiong Chengyi, Hou Jianhua, Gao Zhirong, et al. Efficient fast algorithm for MQ arithmetic coder [DB/OL]. [2008-10-20]. <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [12] Qiu Tong. Wavelet-based Image Compression in Digital photogrammetry [D]. Wuhan: Wuhan University, 1997. [仇彤. 小波理论及小波图像压缩在数字摄影测量中的应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 1997.]
- [13] Ma Guorui, Wu Wenbo, Qin Qianqing. Evaluating methods for compression quality of remote sensing image [J]. Remote Sensing Information, 2004, (3): 48-52. [马国锐, 武文波, 秦前清. 遥感图像压缩质量评价方法 [J]. 遥感信息, 2004, (3): 48-52.]