

基于金字塔变换算法优化的遥感图像融合

牛颖超^{1,2}, 周忠发^{1,2}, 谢雅婷^{1,2}, 崔亮³

¹贵州师范大学喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001;

²贵州省遥感中心, 贵州 贵阳 550001;

³贵州北斗空间信息技术有限公司, 贵州 贵阳 550001

摘要 为了弥补金字塔变换算法分解时数据冗余较大、融合结果不理想的缺点,提出基于金字塔变换算法优化的遥感图像融合新算法。该算法运用金字塔分解构建金字塔序列,并根据先验知识赋予相应的权重系数,通过反复迭代重建遥感图像,再利用班德文克隆选择算法优化选择,在迭代可承受的范围内,自适应地修改选择权重系数,寻求和估计合适的融合参数来优化融合效果,从而避免金字塔变换算法的经验选择。为了突出本文算法的优点,实验运用金字塔变换法、遗传算法优化金字塔变换法和粒子群算法优化金字塔变换法进行比较,从视觉效果和数理统计两个方面分析评价融合质量。实验结果表明,本文算法更符合人类的视觉感知,有利于图像的分析 and 信息的提取。

关键词 遥感; 金字塔变换; 班德文克隆选择算法; 算法优化; 图像融合

中图分类号 TP751 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.012801

Remote Sensing Image Fusion Based on Pyramid Transform Algorithm Optimization

Niu Yingchao^{1,2}, Zhou Zhongfa^{1,2}, Xie Yating^{1,2}, Cui Liang³

¹School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China;

²Remote Sensing Center of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China;

³Space Information Technology Company of Guizhou Beidou, Guiyang, Guizhou 550001, China

Abstract To make up the shortcomings that data redundancy is large and the fusion result is not ideal when pyramid transform algorithm decomposes, a new algorithm of remote sensing image fusion optimized by pyramid transform algorithm is proposed. The proposed algorithm uses pyramid decomposition to build pyramid sequence. According to the relevant weight coefficient given by prior knowledge, the remote sensing image is reconstructed by iterating. Then through optimization selection of Baldwinian clonal selection algorithm, within the acceptable scope of iteration, the weight coefficient is adaptively modified and chose, and the suitable fusion parameter is sought and estimated to optimize fusion effects so as to avoid empirical selection of pyramid transform algorithm. In order to highlight the algorithmic merits, experiment applies pyramid transform optimization, pyramid transform optimization via genetic algorithm, and pyramid transform optimization via particle swarm optimization algorithm to make a comparison. Fusion quality is analyzed and evaluated from the two aspects of visual effect and mathematical statistics. Experimental result indicates that this arithmetic fusion result by the proposed method is consistent with human visual perception, and conducive to image analysis and information extraction.

Key words remote sensing; pyramid transform; Baldwinian clonal selection algorithm; algorithm optimization; image fusion

OCIS codes 280.4750; 100.2000; 100.4994

收稿日期: 2016-08-08; **收到修改稿日期:** 2016-09-21; **网络出版日期:** 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(41661088)、贵州省科技攻关项目(黔科合 GY 字[2015]3001)、贵州省重大应用基础研究项目(黔科合 JZ 字[2014]200201)

作者简介: 牛颖超(1992—),女,硕士研究生,主要从事地理信息系统与遥感方面的研究。E-mail: dfnycnrx@163.com

导师简介: 周忠发(1969—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事地理信息系统与遥感方面的研究。

E-mail: fa6897@163.com

1 引言

随着遥感技术的迅猛发展,越来越多的具有高时间和高空间分辨率的图像数据得到广泛应用。为了更好地使用这些图像数据,有效地提取信息,图像融合技术随之诞生。图像融合是一种重要的综合处理技术,利用成像传感器不同的成像方式、运用数学模型对多幅源图像进行处理,实现多源图像之间的信息互补,从而生成一个更全面、准确、稳定的新遥感图像,提高图像判读的准确性和可靠性^[1-2]。图像融合技术在地理信息系统、资源探测、军事侦察、生物医学和机器视觉等领域应用广泛,通常分为像素级融合、特征级融合和决策级融合。级别越低,包含的信息越丰富,但融合算法的难度也越大。像素级融合是目前应用最广泛的一种融合技术,可以实现更好的融合效果,提供更真实的图像信息^[3]。常用的像素级融合有加权平均融合法^[4]、主成分分析(PCA)法^[5]、小波变换法^[6]、金字塔变换法^[7]和假彩色融合法^[8]等,本文提出了基于金字塔变换算法优化的一种新的像素级融合方法,并对其进行了研究。

金字塔变换算法是由 Burt 和 Adelson 提出的,奠定了多尺度、多分辨率图像分解的理论基础^[7]。班德文克隆选择算法是 2010 年由 Gong 等^[9]提出,广泛应用于优化、故障诊断和数据处理等其他领域。本文将两种算法相结合,运用金字塔分解技术按照一定的规则合成金字塔,再通过生成金字塔的逆过程重建图像,然后通过班德文克隆选择算法进行优化,自适应地选择权重系数,找出最优的融合参数,优化融合效果,得到最终的融合图像。实验比较了金字塔变换法、遗传算法(GA)优化金字塔变换法和粒子群算法(PSO)优化金字塔变换法,结果表明,本文算法更有利于提高遥感图像分析和信息的提取,能够达到更好的视觉效果。

2 金字塔的分解与重建

金字塔分解是一个方便、灵活、多尺度的分解技术,需要构建一个高斯金字塔,将图像分解为金字塔分解序列图像。高斯金字塔的生成包含低通滤波和下采样的过程,低通滤波器也是窗口函数,需满足归一化性、对称性、奇偶项性、贡献性等约束条件^[10-11]。窗口函数表示为

$$w = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (1)$$

假设原始图像 G_0 是金字塔结构的最底层或零层, G_l 代表高斯金字塔分解的第 l 层。 G_l 的低通滤波图像可以通过第 G_{l-1} 层图像隔行、隔列采样获得,其第 G_l 层的像素值对应的前一层图像的像素值,计算公式为

$$G_l = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_{l-1}(2i + m, 2j + n), \quad 0 < l \leq N, \quad 0 \leq i < u, \quad 0 \leq j < v, \quad (2)$$

式中 N 是高斯金字塔的总层数, u, v 分别是第 l 层的行数和列数。

然后,将 G_l 图像扩大,得到和 G_{l-1} 一样大的图像 G_l^* , 计算公式为

$$G_l^* = \text{Expand}(G_l), \quad (3)$$

$$G_l^*(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_l' \left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2} \right), \quad 0 < l \leq N, \quad 0 \leq i < u, \quad 0 \leq j < v, \quad (4)$$

式中

$$G_l' \left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2} \right) = \begin{cases} G_l \left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2} \right), & \text{when } \left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2} \right) \text{ is integer coordinaters} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}。 \quad (5)$$

图像的对比度通常定义为 $C = (g - g_b) / g_b = g / g_b - I$, g 为图像某处的灰度值, g_b 为该位置处背景灰度值, I 为单位灰度值, G_l 背景灰度值可以从 G_{l+1}^* 中获得,计算公式为

$$\begin{cases} C_l = \frac{C_l}{C_{l+1}^*}, & 0 \leq l < N \\ C_N = G_N, & l = N \end{cases}。 \quad (6)$$

G_l 为金字塔分解的第 l 层,则(6)式转换为金字塔重建的公式为

$$\begin{cases} G_N = C_N, & l = N \\ C_l = C_l C_{l+1}^*, & 0 \leq l < N \end{cases} \quad (7)$$

根据(7)式金字塔的迭代从顶层 $C_N (C_N, C_{N-1}, \dots, C_0)$ 开始,令 $l = N$,高斯金字塔 $N, N-1, \dots, 0$ 的每一层为 G_N, G_{N-1}, \dots, G_0 ,则原始图像 G_0 被重建^[12]。

通过金字塔分解将原始图像分解为不同分辨率、不同空间频率的一系列分解层进行融合,并且空间频率从下到上依次降低,每一个分解层反映了相应图像的空间频率信息。因此,融合过程是在各空间频率层上分别进行的,这样就可以针对不同分解层的不同频带上的特征与细节,采用不同的融合算法以达到突出特定频带上特征与细节的目的,即有可能将来自不同分解层的图像特征与细节融合在一起。

金字塔变换法的图像融合是选择一个最大值、一个最小值和一个平均值,根据经验转换为权重系数,使用逻辑序列方法选择相应的金字塔分解序列,按照一定的原则得到不同的权重序列,但融合的结果并不理想。能量法也可以选择相应的金字塔分解序列通过计算得到局部能量金字塔序列,但方法过于繁琐。

目前,图像融合的研究重点是优化融合方法,融合方法的优化一般是利用图像的相似性匹配和图像的概率信息模型构建图像的某些特征,并在迭代可承受的范围,自适应地修改选择权重和传感器特性,寻找和估计合适的融合参数来实现融合效果的优化^[13],常用的优化算法有 GA^[14]、PSO^[15]、蚁群算法(ACO)^[16]、班德文克隆选择算法^[9]等,本文选用班德文克隆选择算法对金字塔变换法进行优化,以达到图像融合优化的目的。

3 班德文克隆选择算法优化融合系数

班德文克隆选择算法本质上是达尔文式的选择和变异的过程,其原理是通过采用交叉、变异等遗传算子和相应的群体控制机制实现的^[17-18]。将班德文学习引入人工免疫系统,经验班德文克隆选择算法是一种可以用来解决优化问题的有效的、良好的算法^[19]。运用班德文克隆选择算法优化算法比传统的优化算法有更显著的效果。班德文克隆选择算法的主要流程如下:

- 1) 初始化:随机产生初始抗体群 $A(0)$;
- 2) 评估抗体:计算抗体群 $A(n)$ 中抗体的适应度函数值;
- 3) 克隆增殖:对抗体群 $A(n)$ 中的抗体进行克隆增殖操作得到抗体群 $C(n)$;
- 4) 班德文学习:对抗体群 $C(n)$ 中的抗体进行班德文学习操作得到抗体群 $B(n)$;
- 5) 超变异:对抗体群 $B(n)$ 中的抗体进行超变异操作得到抗体群 $M(n)$;
- 6) 评估抗体:计算抗体群 $M(n)$ 中的适应度函数值;
- 7) 克隆选择:对抗体群 $M(n)$ 和 $A(n)$ 进行克隆操作,得到抗体群 $A(n+1)$;
- 8) 终止条件判断:如果满足终止条件,解码抗体群 $A(n+1)$ 中自适应函数值最高的抗体作为算法的输出结果,终止算法;否则,令 $n = n+1$,转到第 3) 步。

本文选用班德文克隆选择算法对金字塔变换法进行优化,融合遥感图像。首先用金字塔分解原始图像,构建高斯金字塔序列,然后运用班德文克隆选择算法进行优化,通过班德文克隆选择算法优化选择,自适应地调整最优融合系数,从而避免经验选择,流程图如图 1 所示,详细步骤如下。

1) 初始化:假设迭代数量为 $i (i = 1, 2, 3, \dots, i)$,每层图像的权重系数为 $n \times n (s = n \times n)$,初始化抗体群为 $K_B(0) = \{K_1(0), K_2(0), \dots, K_s(0)\}$,设 $j = (1, 2, \dots, s)$ 则 $K_j(i) = (K_{j1}^i, K_{j2}^i, \dots, K_{js}^i)$ 。

2) 计算适应度函数 $f_{A,B}(x)$:计算每个抗体群 $K(0)$ 的自适应函数值,计算公式为

$$T_{M_j} = K_j(0) \cdot M_1 + [1 - K_j(0)] \cdot M_2, \quad (8)$$

$$f_{A,B}[K_j(0)] = E_1[N_1(T_{M_j})] + G_A[N_1(T_{M_j})] + D_{ST}[N_1(T_{M_j})], \quad (9)$$

式中 M_1 和 M_2 分别表示金字塔分解的两个原始图像顶部的子带系数, T_{M_j} 是 $K_j(0)$ 的融合权重, $N_1(x)$ 表示金字塔的重建, E_1, G_A, D_{ST} 分别表示信息熵(IE)、平均梯度(AG)和标准偏差(STD),为评价图像质量的指标。

3) 克隆抗体群:对 $K_B(i-1)$ 进行 OPT_{Bc} 操作获得克隆抗体群 $C_B(i)$,计算公式为

$$C_B(i) = OPT_{Bc}[K_B(i-1)], \quad (10)$$

则

$$[C_1(i), C_2(i), \dots, C_s(i)] = \{\text{OPT}_{\text{Bc}}[K_1(i-1)], \text{OPT}_{\text{Bc}}[K_2(i-1)], \dots, \text{OPT}_{\text{Bc}}[K_s(i-1)]\}. \quad (11)$$

4) 班德文学习:对 $C_B(i)$ 进行 OPT_B 操作获得班德文学习 $B(i)$, 计算公式为

$$B(i) = \text{OPT}_B[C_B(i)], \quad (12)$$

$$b_{jl}^i = \text{OPT}_B(c_{jl}^i) = \begin{cases} c_{jl}^i + a(c_p^i - c_q^i), & \text{if } \text{rand} \leq P_l \\ c_{jl}^i, & \text{else} \end{cases}, \quad (13)$$

式中 b_{jl}^i, c_{jl}^i 分别代表 B 和 C_B 第 i 层迭代在第 j 行, 第 l 列抗体种群中的映射, 当 $f_{A,B}\{T_M[C_p(i)]\} > f_{A,B}\{T_M[C_q(i)]\}$ 时, $C_p(i), C_q(i)$ 随机选择得到 c_p^i, c_q^i , 当 $a > 0$ 时, a 为班德文学习的权重, 当 $P_l \in (0, 1]$ 时, 阈值从 $[0, 1]$ 随机选择。

5) 超变异:对 $B(i)$ 进行超变异操作 OPT_{Bm} 获得 $M_B(i)$, 计算公式为:

$$M_B(i) = \text{OPT}_{\text{Bm}}[B(i)], \quad (14)$$

则

$$[M_1(i), M_2(i), \dots, M_s(i)] = \{\text{OPT}_{\text{Bm}}[B_1(i)], \text{OPT}_{\text{Bm}}[B_2(i)], \dots, \text{OPT}_{\text{Bm}}[B_s(i)]\}. \quad (15)$$

6) 计算适应度函数:同第 2) 步, 获得抗体群 $M_B(i)$ 中的适应度函数值。

7) 克隆选择:通过 OPT_{Bs} 对每个抗体群的第 i 层迭代更新, 则

$$K_j(i) = \text{OPT}_{\text{Bs}}[M_j(i), K_j(i-1)] = \begin{cases} M_j(i), & f_{A,B}[M_j(i)] > f_{A,B}[M_j(i-1)] \\ K_j(i-1), & \text{else} \end{cases}. \quad (16)$$

8) 终止条件判断:如果 $i = L$, 输出自适应函数中最高的抗体 $K(I)$, 进行金字塔重建并融合, 否则 $i = i + 1$, 转到第 3) 步。

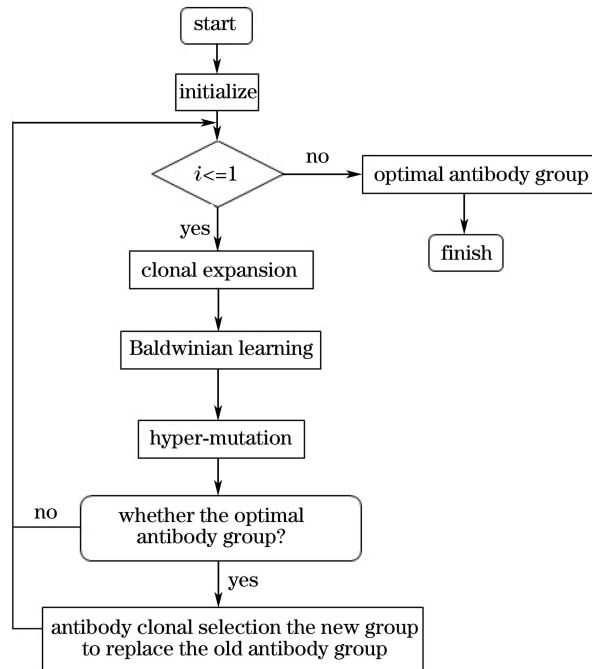


图 1 班德文克隆选择算法优化融合系数流程图

Fig. 1 Flowchart for Baldwinian clonal selection algorithm optimizing coefficients

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

实验数据选取江苏省常州市某地区高分二号 0.8 m 分辨率的全色图像和 3.2 m 分辨率的多光谱图像。由于实验采用的 SC 级数据是 RPC 的球面坐标而没有投影信息, 所以融合前要利用 RPC 进行正射校正, 将其转化为 UTM 投影下的平面坐标。然后将高分辨率的全色图像作为基准, 选择边缘点、交叉点等明显的特

征点作为控制点,并使控制点均匀分布,再对多光谱图像进行配准,配准后误差要求控制在 1 pixel 内,从而减少图像位移、畸形等问题,改善图像的视觉效果,提高图像的适用性。本文实验区具有丰富的空间细节信息和多样的纹理类型,包括道路、水体、建筑及植被,融合时金字塔分解的层数是 6,可以满足 4×4 的权重,因此抗体群为 16,权重值的初始化范围为 $0 \sim 1$,迭代次数设置为 20,为了突出本文算法的优点,实验数据分别选取金字塔变换法、GA 优化金字塔变换法、PSO 优化金字塔变换法进行比较。实验在 AMD 2.70 GHz CPU 上运用 Matlab 2015A 编程实现,融合结果如图 2 所示。

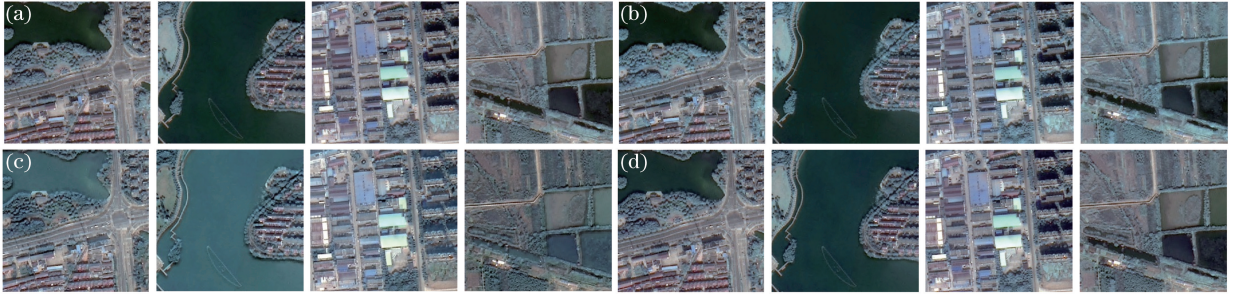


图 2 图像融合结果。(a)金字塔变换法;(b)GA 优化金字塔变换法;(c)PSO 优化金字塔变换法;(d)本文算法
Fig. 2 Image fusion results. (a) Pyramid transform optimization; (b) pyramid transform optimization via GA; (c) pyramid transform optimization via PSO algorithm; (d) proposed algorithm

4.2 结果评价

4.2.1 视觉效果定性评价

视觉效果的定性评价是依据观察者的先验知识,对图像融合前后的纹理、光谱、边缘等特征进行主观判断,观察融合后图像是否发生扭曲、空间分辨率或者色彩的变化^[20]。该方法的优点是简单直观,具有较强的光谱评价能力,所以在评价图像光谱特征方面是无法替代的。但缺点是对观察者依赖性高,主观性强,过程过于繁琐,需要大量的统计和丰富的判读知识,才能得到准确的判断结果,且结果因人而异。

从图 2 可以看出,金字塔变换法融合图像质量最差,虽然空间分辨率有所提高,但视觉上地物边缘有一定的模糊;GA 优化金字塔变换法图像信息相比金字塔变换法融合图像丰富,细节处清晰,地物的颜色与真实地物比较接近;PSO 优化金字塔变换法虽然增加了地物之间的差异,但不符合人眼观察的舒适度,光谱扭曲严重;班德文克隆选择算法优化的融合图像地物信息丰富,目标对象容易分辨,纹理和边缘特征清晰,比较符合人类视觉感知。

4.2.2 数理统计的质量评价

数理统计的评价方法是利用数学公式对融合图像进行客观的分析,图像的质量以数字的形式来表达,说明图像的融合效果。其优点是不受主观因素的影响,耗时少;缺点是图像较为复杂,利用简单的公式分析会出现误差,并忽略了人的视觉效果^[21-22]。目前数理统计的质量评价指标一般从图像信息量的大小、亮度和光谱的扭曲程度等几个方面评价,因此本文采用灰度平均值(MGL)、标准差(SD)、平均梯度、信息熵、相关系数(CC)、相对整体维数综合误差(ERGAS)6 个指标对图像进行定量的评价。

1) 灰度平均值

灰度平均值即均值,反映出图像的亮度信息。若灰度值接近 128,即均值适中,则视觉效果比较好。计算公式为

$$M_{GL} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N F(x, y), \quad (17)$$

式中 $M \times N$ 为像素的总数, $F(x, y)$ 为像素的亮度值。

2) 标准差

标准差表示灰度均值的离散程度,反映出图像融合前后的反差变化。标准差越大,融合图像灰度级分布越零散,反差也越大,能够得到丰富的信息。反之,标准差越小,图像反差也越小,色调均匀单一。计算公式为

$$D_s = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [F(x, y) - A]^2}, \quad (18)$$

式中 x 表示图像的高, y 表示图像的宽, A 是亮度均值。

3) 平均梯度

平均梯度反映出图像灰度平均变化率的大小, 是评价图像清晰度的指标, 具有表达图像细节的能力。即平均梯度越大, 则图像越清晰, 反之亦然。计算公式为

$$G_A = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{(M-1)(N-1)} \sqrt{\frac{[\Delta F_x(x, y)/\Delta x]^2 + [\Delta F_y(x, y)/\Delta y]^2}{2}}, \quad (19)$$

式中 $\Delta F_x(x, y)$, $\Delta F_y(x, y)$ 分别表示融合图像 $F(x, y)$ 在 x 和 y 方向上的一阶差分。

4) 信息熵

信息熵是表示融合图像包含平均信息量的大小, 可以衡量信息的丰富程度。在不考虑噪音等因素的条件下, 熵值越大, 图像融合的信息量越丰富。计算公式为

$$E_1 = - \sum_{i=0}^{255} P_i \lg P_i, \quad (20)$$

式中 P_i 为像素灰度值为 i 的像素出现的概率。

5) 相关系数

相关系数反映了两幅图像的相似程度, 即图像融合前后光谱特征的保持度。相关系数越大, 光谱特征的保持度越好, 融合图像的效果越好。计算公式为

$$E_{CC} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(x_i, y_i) - f] [A(x_i, y_i) - a]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [F(x_i, y_i) - f]^2 [A(x_i, y_i) - a]^2}}, \quad (21)$$

式中 f 表示为融合图像的均值, a 表示为源图像的均值。

6) 相对整体维数综合误差

$$E_{RGAS} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{R_{RMSE}^2(i)}{M^2(i)} \right]}, \quad (22)$$

式中 h 是全色图像的空间分辨率, l 是多光谱图像的空间分辨率, N 是融合图像的波段数目, $M(i)$ 表示参考图像的第 i 个波段的均值。 $R_{RMSE}(i)$ 表示原始多光谱图像和融合图像第 i 个波段之间的均方误差。 E_{RGAS} 越小, 表明融合图像的光谱质量越高, 光谱保持能力越强^[23]。

不同融合方法评价指标统计值如表 1 所示, a 为道路, b 为水体, c 为建筑, d 为植被。

表 1 不同融合方法评价指标统计值

Table 1 Statistics of evaluation index by different fusion methods

Fusion method	Experiment	MGL	SD	AG	IE	CC	ERGAS
Pyramid transform optimization	a	99.76	14.64	6.28	5.14	0.79	3.16
	b	101.34	22.65	7.33	5.25	0.93	2.21
	c	85.11	16.69	6.58	4.37	0.81	3.02
	d	89.53	18.73	7.41	5.39	0.87	2.05
Pyramid transform optimization via GA	a	83.69	75.82	7.58	6.25	0.89	1.98
	b	102.77	61.91	7.79	6.06	0.95	2.73
	c	101.98	51.37	7.71	6.27	0.94	2.70
	d	102.36	64.74	7.96	6.47	0.97	1.29
Pyramid transform optimization	a	38.72	49.74	8.06	5.94	0.81	3.74
	b	77.07	59.95	7.73	5.37	0.90	3.59
	c	45.71	31.57	6.69	5.83	0.84	3.41

续表 1

Fusion method	Experiment	MGL	SD	AG	IE	CC	ERGAS
via PSO	d	101.26	39.71	7.46	6.19	0.85	3.76
algorithm	a	110.01	78.45	8.36	6.89	0.93	1.19
Proposed	b	119.34	65.63	8.31	6.75	0.98	1.13
algorithm	c	115.19	69.11	8.72	6.71	0.91	1.15
	d	98.47	78.89	8.23	6.81	0.96	1.25

由表 1 可以看出,将本文算法运用于图像融合具有良好的效果。金字塔变换法 SD、AG、IE 值最小,所以融合后图像信息量损失最大,在实验区 a、c 中地物边缘模糊,细节处理方面差强人意;GA 优化金字塔变换法实验区 h 中 CC 值最大,说明图像便于区分不同的植被,所以 GA 优化金字塔变换法适用于实验区 h 地物融合,其余指标虽然优于金字塔变换法、PSO 优化金字塔变换法,但相比本文算法较差;PSO 优化金字塔变换法 MGL 偏差大,ERGAS 值也最大,说明融合后图像视觉效果差,光谱扭曲严重,地物色调整体失真,不符合人类视觉感知;本文算法 MGL 值最接近 128,SD、AG、IE 值最大,ERGAS 值最小,而且 CC 结果平均值最大,表明该算法图像融合后地物之间的反差大、信息量丰富,在实验区 a、c 中地物边缘、纹理特征突出,实验区 d 地物区分明显,尤其融合实验区 b 水体,内部的船只与水体的边界尤为清晰,并且能够较好地保留光谱信息。

5 结 论

提出了基于金字塔算法优化的遥感图像融合方法,该方法运用金字塔分解充分挖掘和选择性地识别图像中的信息,使其与人类的视觉感官系统特性相匹配,然后利用班德文克隆选择算法优化,自适应地调整最优融合系数,避免经验选择,加快算法的收敛。为了验证该方法的有效性,实验选取金字塔变换法、GA 优化金字塔变换法、PSO 优化金字塔变换法进行比较,从视觉效果和数理统计两个方面分析评价融合质量。实验结果表明,本文算法更有利于提高遥感图像分析和信息的提取,为图像的后续处理如图像分割、分类和目标地物的识别奠定了良好的基础。

6 致 谢

感谢中科天启遥感科技有限公司数据的支持,贵州北斗空间信息技术有限公司的帮助,中国科学院遥感与数字地球研究所任应超老师的悉心指导以及翟天林同学提供的宝贵建议。

参 考 文 献

- [1] Zhu Kang, He Xinguang. Selective remote sensing image fusion method based on the local feature of contourlet coefficients[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 021001.
朱 康, 贺新光. 基于 Contourlet 系数局部特征的选择性遥感图像融合算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 021001.
- [2] Li Huihui, Guo Lei, Liu Hang. Research on image fusion based on the second generation curvelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 657-662.
李晖晖, 郭 雷, 刘 航. 基于二代 curvelet 变换的图像融合研究[J]. 光学学报, 2006, 26(5): 657-662.
- [3] Zhou Yuren, Geng Aihui, Wang Ying, *et al.* Contrast enhanced fusion of infrared and visible images[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0909001.
周渝人, 耿爱辉, 王 莹, 等. 基于对比度增强的红外与可见光图像融合[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0909001.
- [4] Lin Zhilei, Yan Luming. Best fusion method hyperspectral and panchromatic imagery based on Earth Observing-1 satellite[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(8): 2365-2370.
林志垒, 晏路明. 地球观测 1 号高光谱与全色图像融合的最佳方法[J]. 计算机应用, 2014, 34(8): 2365-2370.
- [5] Turhan-Sayan G. Real time electromagnetic target classification using a novel feature extraction technique with PCA-based fusion[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(2): 766-776.
- [6] Xin Yanan, Deng Lei. An improved remote sensing image fusion method based on wavelet transform[J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 021001.
- 辛亚楠, 邓磊. 基于小波变换的遥感图像融合方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 021001.
- [7] Zhu Ruihui, Wan Min, Fan Guobin. An image fuse method based on pyramid transform[J]. Computer Simulation, 2007, 24(12): 178-180.
- 朱瑞辉, 万敏, 范国滨. 基于金字塔变换的图像融合方法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12): 178-180.
- [8] Yang Jun, Zhao Zhongming. Remote sensing image fusion method based on HIS transform and intensity modulation[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(4): 195-197.
- 杨俊, 赵忠明. 基于 HIS 变换和亮度调节的遥感图像融合方法[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(4): 195-197.
- [9] Gong M, Jiao L, Zhang L. Baldwinian learning in clonal selection algorithm for optimization[J]. Information Sciences, 2010, 180(8): 1218-1236.
- [10] Jin H, Jiao L, Liu F, *et al.* Fusion of infrared and visual images based on contrast pyramid directional filter banks using clonal selection optimizing[J]. Optical Engineering, 2008, 47(2): 027002.
- [11] Zhang Xinman, Han Jiuqiang. Image fusion of multiscale contrast pyramid-based vision feature and its performance evaluation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(4): 380-383.
- 张新曼, 韩九强. 基于视觉特性的多尺度对比度塔图像融合及性能评价[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(4): 380-383.
- [12] Liu Guixi, Yang Wanhai. A multiscale contrast-pyramid-based image fusion scheme and its performance evaluation[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(11): 1336-1342.
- 李贵喜, 杨万海. 基于多尺度对比度塔的图像融合方法及性能评价[J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1336-1342.
- [13] Raghavendra R, Dorizzi B, Rao A, *et al.* Particle swarm optimization based fusion of near infrared and visible images for improved face verification[J]. Pattern Recognition, 2011, 44(2): 401-411.
- [14] Peng Kai. Remote sensing image fusion method based on genetic algorithm[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- 彭开. 基于遗传算法的遥感图像融合方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [15] Chen Yongyuan, Zhang Feiyan, Zhang Bin, *et al.* Remote sensing image fusion based on data assimilation and particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(10): 2509-2513.
- 陈荣元, 张飞艳, 张斌, 等. 基于数据同化和粒子群优化算法的遥感影像融合[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2509-2513.
- [16] Dai Chenyang. Remote sensing image classification based on ant colony algorithm[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2011.
- 代晨阳. 基于蚁群算法的遥感影像分类研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2011.
- [17] Turney P. How to shift bias: Lessons from the baldwin effect[J]. Evolutionary Computation, 2002, 4(3): 271-295.
- [18] Zhang Minhui, Gao Xiaoling, Yang Jian. Function optimization based on immune clone with Baldwinian efficiency and periodically mutation[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(32): 51-53.
- 张敏辉, 高晓玲, 杨剑. 结合 Baldwinian 效应和周期变异的免疫函数优化[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(32): 51-53.
- [19] Yang Neng. Based on clonal selection algorithm of fuzzy clustering class German study[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- 杨能. 基于班德文克隆选择算法的模糊聚类研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [20] Huang W, Jing Z. Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(4): 493-500.
- [21] Han Bing, Zhao Yindi. An improved smoothing filter-based intensity modulation algorithm for hyperspectral image fusion[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(5): 44-47.
- 韩冰, 赵银娣. 一种改进的 SFIM 高光谱图像融合算法[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 44-47.
- [22] Zhang Yongrong, Zhou Zhongfa, Ma Shibing. Based on the star of CBERS-02B Star HR image of multi-source remote sensing data fusion research[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(8): 11-14.
- 张勇荣, 周忠发, 马士彬. 基于 CBERS-02B 星 HR 图像的多源遥感数据融合研究[J]. 测绘通报, 2012(8): 11-14.
- [23] Yang Chao, Yang Bin, Huang Guoyu. Remote sensing image fusion based on multispectral image super-resolution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021001.
- 杨超, 杨斌, 黄国玉. 基于多光谱图像超分辨率处理的遥感图像融合[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 021001.