

文章编号: 0253-2239(2007)09-1605-6

基于改进的拉普拉斯金字塔变换的图像融合方法*

苗启广 王宝树

(西安电子科技大学计算机学院, 西安 710071)

摘要: 介绍了传统的拉普拉斯变换存在的缺点以及改进的拉普拉斯变换的基本原理和重构方法, 分析了新的重构算法能够在重构时抑制噪声的特点。提出了在图像融合过程中会引入噪声的问题, 并通过实验分析了图像融合过程中引入的噪声情况。使用新的重构算法能够在图像重构过程中, 而不是在系数处理过程中, 有效抑制融合噪声。给出了基于改进的拉普拉斯变换方法进行图像融合的基本架构, 并对变换系数的设置与融合过程的处理进行了详细的介绍。仿真实验的主客观性能比较表明, 基于改进的拉普拉斯变换的图像融合方法比其它几种基于金字塔变换的融合效果要好得多。

关键词: 图像处理; 图像融合; 拉普拉斯金字塔; 重构

中图分类号: TN911.73; TP183 文献标识码: A

Multi-Sensor Image Fusion Based on Improved Laplacian Pyramid Transform

Miao Qiguang Wang Baoshu

(School of Computer Science, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: The shortcoming of the traditional Laplacian pyramid (LP) transform is pointed out, and the principle and reconstruction of the improved Laplacian pyramid transform are introduced. The new reconstruction method can restrain the noise produced in the reconstruction process. The noise in the processing of the image fusion is analyzed theoretically and experimentally. The new reconstruction method can restrain the noise in the reconstruction process rather than in the index processing procedure. The image fusion framework using the improved Laplacian pyramid transform is proposed and the way to determine the coefficients and the fusion procedure are introduced in detail. The subjective and objective indexes of simulation show that the proposed algorithm works better in preserving the edge and texture information than other Laplacian pyramid methods.

Key words: image processing; image fusion; Laplacian pyramid; reconstruction

1 引 言

1983年, Burt和Adelson引入了拉普拉斯金字塔(Laplacian Pyramid, LP)作为图像的多分辨率表示^[1], 但是, Minh N. Do使用框架理论和过采样滤波器组研究了拉普拉斯变换^[2], 发现它并不是最优变换。一般情况下, 在拉普拉斯变换系数处理过程中由于量化或者阈值等操作引入了噪声, 其重构算法不能实现完全精确重构, 即此时的重构算法并不是最优重构算法。Do引入了一种新的重构算法, 较

好地解决了这个问题。在多传感器图像融合中, 由于在不同分解层上进行融合时, 是从两个变换系数中进行选择处理或对邻域的多个系数进行处理, 不可避免地引入较大的噪声, 采用新的重构算法, 能够最大可能地消除噪声对融合效果的影响, 取得较好的融合效果。本文针对图像融合过程中引入的噪声的问题, 以及源图像存在高斯白噪声的情况, 采用改进的拉普拉斯金字塔变换的方法, 进行图像融合, 从而降低了融合系数的噪声, 并同时能够在重构的过

* 国防预研项目和广西青年科学基金(桂科青 0640067)资助课题。

作者简介: 苗启广(1972—), 男, 山东青岛人, 副教授, 博士, 主要从事智能信息处理与模式识别、图像融合和智能图像处理等方面的研究。qgmiao@163.com

收稿日期: 2007-02-07; 收到修改稿日期: 2007-06-14

程中减小源图像中噪声对融合图像的影响,提高了融合图像的清晰度和信噪比。仿真实验的主客观性能比较表明,本文提出的方法比其它几种基于金字塔变换的融合效果好得多。

2 改进的拉普拉斯金字塔变换

基于图像的拉普拉斯金字塔变换的方法是一种很好的多尺度、多分辨力的图像处理方法,可以将图像的重要特征(如边缘等)按照不同的尺度分解到不同的塔型分解层上。拉普拉斯变换一层分解与重构的过程如图 1 所示。但是,Do 使用框架理论和过采样滤波器组研究了拉普拉斯变换^[2],发现当信号

中不存在噪声时,使用该变换可以实现精确重构;但当信号中存在噪声时,该变换的重构算法,并不是最优的。

在图像压缩、图像去噪和图像融合等许多图像处理的应用中^[3~8],都需要进一步处理变换域的系数,在进行图像重构时,使用的是经过处理的变换系数。在系数处理过程中,进行量化或阈值等操作会引入误差。这些误差,可理解为是引入了噪声,此时,使用原来的拉普拉斯重构算法进行图像重构,就不能完全精确重构。Do 提出了一种基于广义伪逆的拉普拉斯重构算法,其结构如图 2 所示。

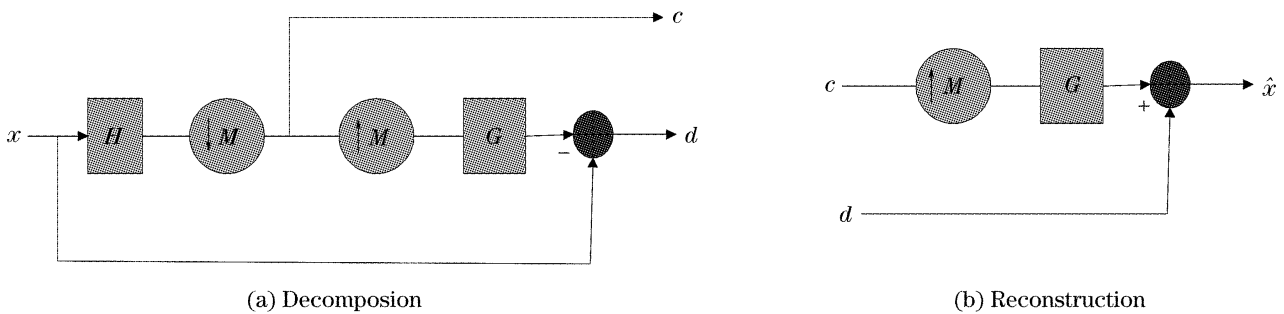


图 1 一层拉普拉斯金字塔变换。(a) 分解过程, (b) 重构过程

Fig. 1 Laplacian pyramid transform. (a) Decomposition, (b) reconstruction

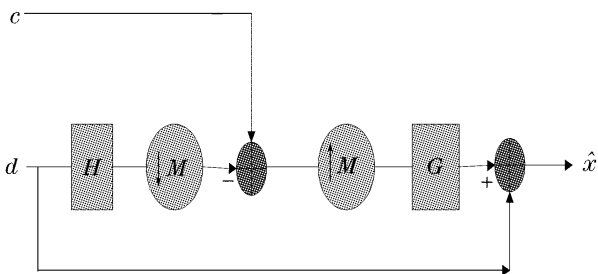


图 2 与图 1(b)对应的新拉普拉斯重构结构

Fig. 2 New Laplacian pyramid reconstruction corresponding to Fig. 1(b)

使用广义伪逆的重构方法,可以将重构平方误差降低一半,并且将重构均方误差降低三分之二^[2]。

图 1(b)中的重构算法如(1)式所示,记做 REC1:

$$\hat{x}_1 = Gc + d. \quad (1)$$

图 2 所示的新的重构算法如(2)式所示,记做 REC2:

$$\hat{x}_2 = Gc + (I - GH)d. \quad (2)$$

这两种重构算法的差异主要在对差异信号 d 的处理上。REC1 方法是直接将差异信号 d 加上,而 REC2 方法是将差异信号 d 的投影加到重构信号中,当拉普拉斯变换的系数里面存在噪声时,

REC2 方法消除了部分误差的影响,故 REC2 的性能要优于 REC1。文献[2]对此进行了详细的研究和证明。图 2 所示的广义伪逆重构方法与拉普拉斯分解的结构是对称的,并且与拉普拉斯分解的时间复杂度相同,REC2 的时间复杂度约为 REC1 的两倍,而不是指数关系,因此,总的时间复杂度变化不大。

3 基于改进的拉普拉斯变换的图像融合方法

3.1 基于拉普拉斯变换的图像融合的基本框架

基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合基本框架如图 3 所示。这里以两幅图像的融合为例,对于多幅图像的融合方法可由此类推。设 A、B 为两幅已配准的原始图像,F 为融合后的图像,融合的基本步骤如下:

- 1) 对每一幅源图像分别进行拉普拉斯分解,建立各图像的拉普拉斯金字塔;
- 2) 对图像金字塔各分解层分别进行融合处理,不同层可采用不同融合算子进行融合处理,最终得到融合后图像的拉普拉斯金字塔;
- 3) 对融合后所得到的拉普拉斯金字塔进行逆

金字塔变换(即图像重构), 所得到的重构图像就是融合图像。

由图 3 可见, 图像拉普拉斯分解的目的是将原始图像分解到不同的空间频带上, 对具有不同空间分辨率的不同分解层, 分别采用不同的融合算子进

行融合处理, 这样可有效地将来自不同图像的特征或细节融合在一起。基于拉普拉斯变换的图像融合是在不同的空间频带上进行融合处理的, 能获得与人的视觉特性^[9]更为接近的融合效果。

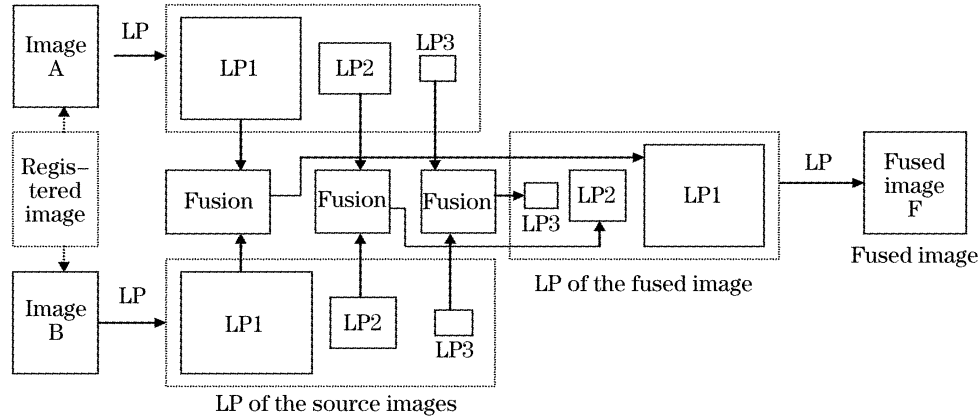


图 3 基于拉普拉斯变换的图像融合框架

Fig. 3 Fusion framework based on the Laplacian transform

3.2 图像融合过程中的系数变化分析

由图 3 可知, 一旦根据需要选择了某种融合的基本方法, 如改进的拉普拉斯金字塔变换方法, 则后面图像融合的关键所在就是融合过程的处理, 也就是说, 如何对拉普拉斯金字塔的变换系数进行融合处理。在许多研究金字塔变换进行图像融合的文献中, 采用了系数选大、系数选小、系数加权平均等方法对系数进行处理, 以期得到好的融合图像。但是, 在对变换系数处理的过程中, 无论采用何种方法, 都不能完全保持原始图像场景的原有特性。实际上, 在系数处理过程中, 相对原始图像而言, 等价于在系数部分引入了噪声。如果能够采取一些方法对系数的噪声进行一定的抑制, 将会得到更好的重构融合图像。实际上, 一些文献中采用的融合策略中, 使用一致性校验、局部邻域系数处理等方法来处理, 也从一定程度上抑制了融合系数所引入的噪声, 从而能够尽可能保持图像的原有特性, 使融合后图像的效

果更佳。

图 4(a)、图 4(b)所示为两幅不同焦点的图像 A、B, 图 4(c)是通过裁剪得到的原始清晰图像 C。对三幅图像分别做拉普拉斯金字塔分解, 得到系数 C_A 、 C_B 和 C_C 。对图像 A、B 的分解系数 C_A 、 C_B , 采用最高层系数取平均、其余各层系数绝对值取大的融合策略进行融合, 得到融合图像的拉普拉斯金字塔分解系数 C_F 。

融合图像的拉普拉斯分解系数 C_F 越接近于清晰图像的分解系数 C_C , 表示图像的融合效果越好。记 C_D 为融合图像与原始清晰图像的系数之间的差异, 即 $C_D = C_C - C_F$ 。即 C_D 为由于融合而引入的噪声, C_D 的分布如图 4(d)所示, 其均值为 $7.15 \times 10^{-7} \approx 0$ 。由图 4(d)及均值可见, 该差异近似为均值为零的白噪声。所以, 使用改进的拉普拉斯变换的重构算法 REC2, 在重构过程中(而不是在融合系数的处理层面上), 可以一定程度上抑制噪声的影响, 取得比原

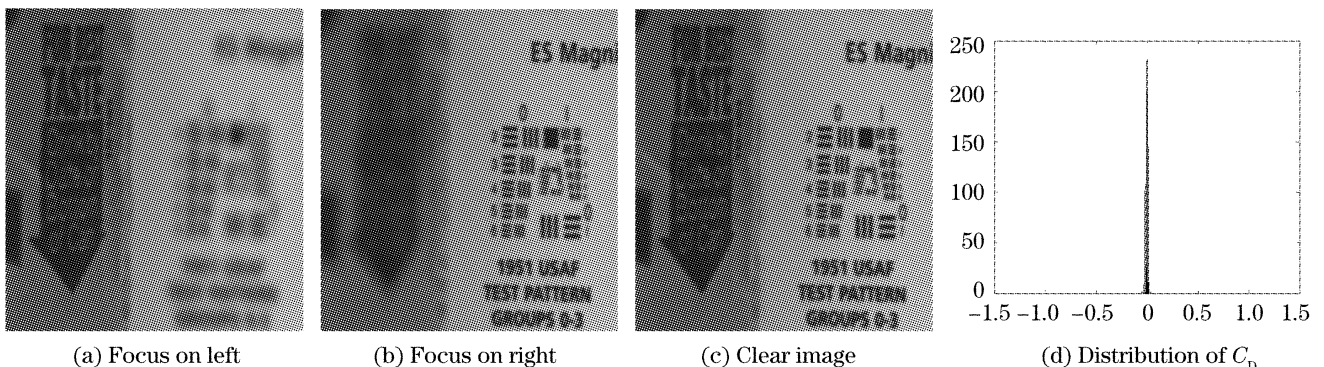


图 4 多聚焦图像及系数差异图

Fig. 4 Multifocus images and the difference of coefficients

算法更好的融合效果。

4 图像融合实验与分析

为了说明基于改进的拉普拉斯金字塔方法的有效性,下面给出了多聚焦图像和不同波段遥感图像两组图像融合的实验。所采用的融合规则均为:最高层系数取平均、其余各层系数绝对值取大。

4.1 多聚焦图像融合实验

多聚焦图像融合是针对不同聚焦点图像进行的融合,这儿给出了两个实验,一个是针对图 5(a)和图 5(b)所示的图像进行的融合,另外一个实验所用的图像分别是图 5(a)和图 5(b)的一部分,如图 4(a)和图 4(b)所示。

4.1.1 多聚焦全图图像的融合实验

图 5(a)和图 5(b)分别是聚焦在左边和右边的两幅图像,对这两幅图像进行融合,分别采用基于改进的拉普拉斯金字塔方法、拉普拉斯金字塔方法、衬比度金字塔方法、比率金字塔方法和梯度金字塔方法,实验结果图像如图 5(c)~图 5(g)所示。从图中可以看出,五种方法都能够较好地将两幅多聚焦图像融合成一幅左边和右边均清晰的融合图像。仔细观察五种方法的融合图像可以看出,基于改进的拉普拉斯金字塔方法、拉普拉斯金字塔方法和衬比度金字塔方法的融合效果,要比比率金字塔方法和梯度金字塔方法的融合效果好,后两幅融合图像的右边部分明显有点虚。

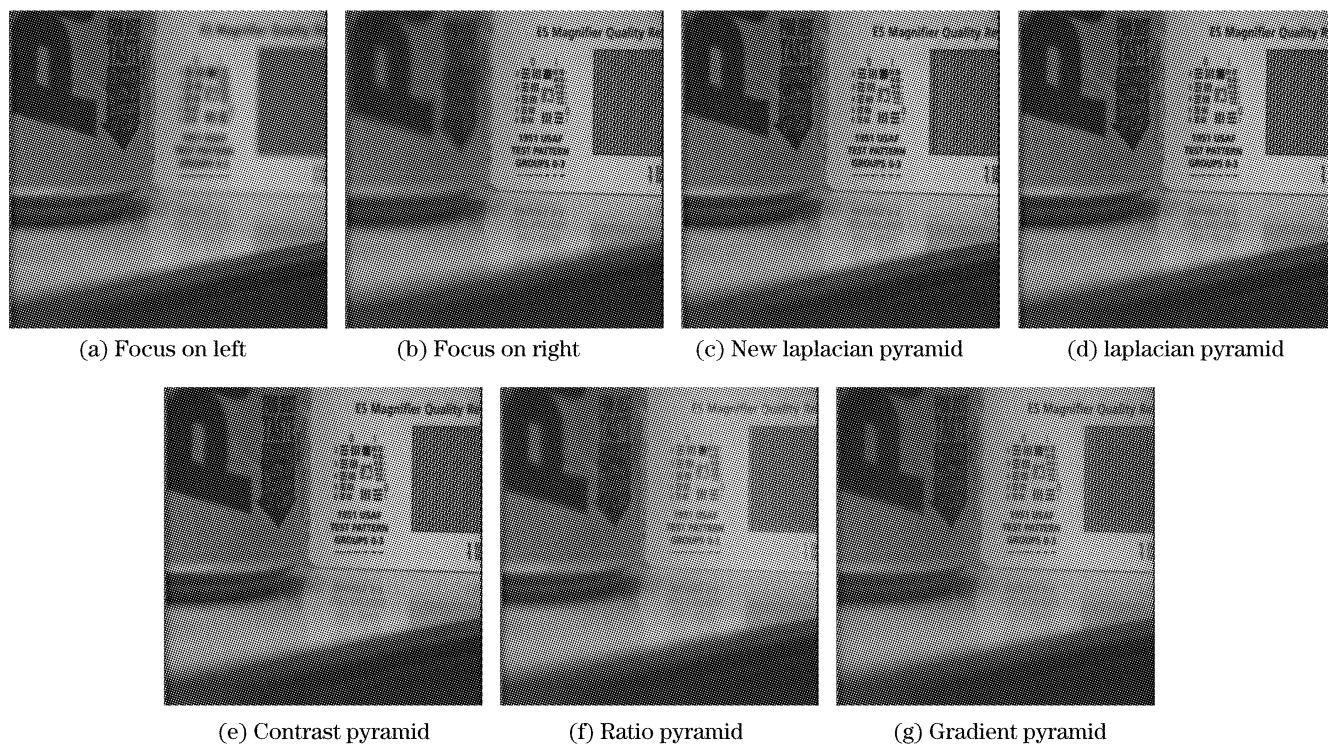


图 5 多聚焦图像的融合

Fig. 5 Fusion of multifocus images

本实验融合图像的客观性能指标如表 1 所示,由表 1 可见,基于改进的拉普拉斯方法的清晰度和熵值最大^[10,11]、平均交叉熵(MCE)和均方根交叉熵(RCE)^[12]最小。这表示从客观性能指标上看,该方法优于其它几种方法,这与融合图像的主观分析一致。

表 1 多聚焦图像融合实验的客观性能指标

Table 1 Objective indexes of the fusion of multifocus images

	Sharpness	Entropy	MCE	RCE
New Laplacian	8.0464	7.1266	0.0367	0.0370
Laplacian	7.0404	7.1155	0.0381	0.0402
Contrast pyramid	7.0346	7.1208	0.0368	0.0380
Ratio pyramid	5.0579	7.1065	0.0738	0.0787
Gradient pyramid	5.6343	7.0557	0.0644	0.0645

4.1.2 多聚焦部分图像的融合

图 4(a)、图 4(b)分别是图 5(a)、图 5(b)的上半

部分,实验中,在两幅参与融合的源图像中添加了零均值的高斯白噪声,方差为 0.0001,如图 6(a)、

图 6(b)所示。融合实验采用的方法同上一个实验，融合结果分别如图 6(c)、图 6(d)所示。融合效果的主观比较和图 5 的实验比较情况类似。由于可以通过裁剪得到标准全局清晰参考图像，这里采用均方误差、峰值信噪比(PSNR)、平均交叉熵和均方根交叉熵作为客观性能评价指标，如表 2 所示。从表中

可以看出，基于改进拉普拉斯融合方法的均方误差、平均交叉熵和均方根交叉熵较小，峰值信噪比较大，这说明该方法的融合效果比原拉普拉斯方法要好，而且，由峰值信噪比可以看出，新方法在抑制噪声方面也明显比原方法要好。

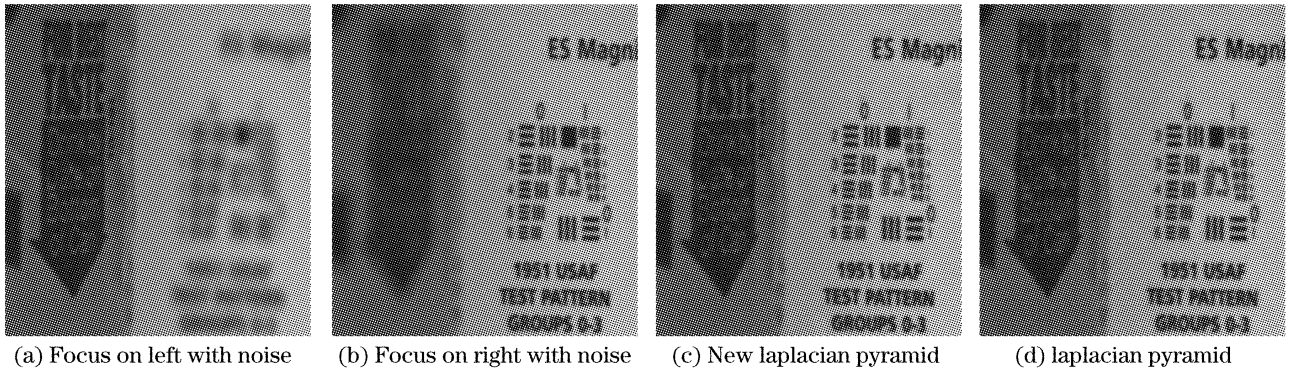


图 6 加噪的多聚焦部分图像融合

Fig. 6 Fusion of the multifocus images with noise

表 2 加噪的多聚焦部分图像融合客观性能指标

Table 2 Objective indexes of the fusion of the multifocus images with noise

	MSE	PSNR	MCE	RCE
New Laplacian	7.2966	39.4996	0.0818	0.0835
Laplacian	10.4476	37.9407	0.1008	0.1023

4.2 不同波段遥感图像融合实验

图 7(a)、图 7(b)是两幅不同波段的大地遥感图像，由于传感器的物理性能不同，因此视觉范围中的某些大地特征在其中一幅源图像中存在，而在另一

幅图像中不存在或不明显，从而两个波段的图像具有特征互补性。从图 7(c)所示的改进的拉普拉斯方法融合图像中可以看出，该融合图像是一幅特征丰富、清晰的图像。图 7(d)、图 7(f)是分别采用拉

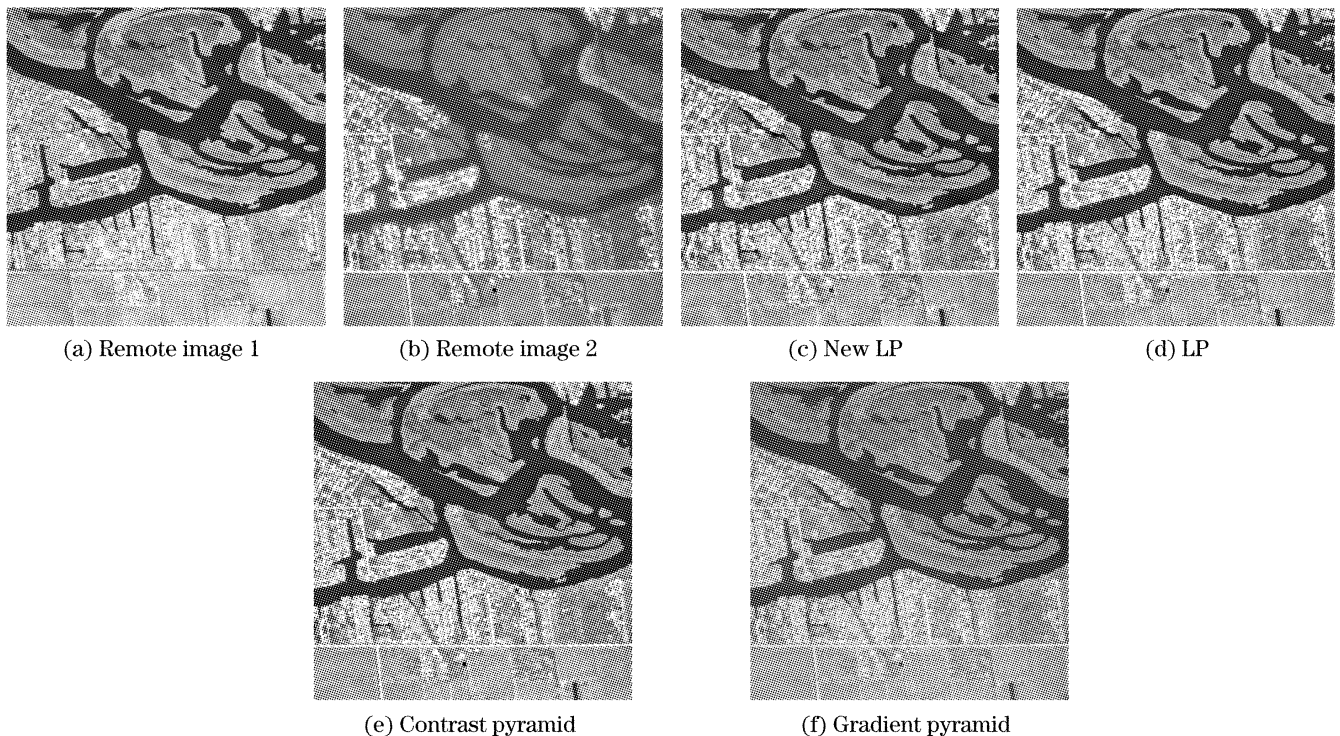


图 7 不同波段遥感图像的融合

Fig. 7 Fusion of the remote images with different bands

普拉斯金字塔、衬比度金字塔和梯度金字塔方法的融合图像。

表 3 是融合图像的客观性能指标,从这些指标中可以看出,改进的拉普拉斯金字塔方法的清晰度

最高、熵最大,平均交叉熵和均方根交叉熵最小。由此可见,改进的拉普拉斯方法的融合效果与其它几种金字塔变换方法的融合效果相比是最好的。

表 3 不同波段遥感图像融合图像客观性能指标

Table 3 Objective indexes of the fusion of remote images with different bands

	Sharpness	entropy	MCE	RCE
New Laplacian	21.3430	7.4735	3.0401	3.1986
Laplacian	21.2295	7.3686	3.1153	3.3232
Contrast pyramid	20.7019	7.2367	3.0938	3.3159
Gradient pyramid	18.0201	7.1856	3.4529	3.4597

5 结 论

本文简单介绍了 Do 等提出的基于框架理论分析的新的拉普拉斯金字塔重构算法,分析了传统拉普拉斯金字塔变换在系数处理过程中有噪声时不能精确重构的问题,并讨论了图像融合时不可避免地引进系数噪声的问题。采用这种新的改进重构算法,较大程度上降低了系数噪声对重构融合图像的影响,提高了融合效果。通过大量的仿真实验,并与其他几种金字塔变换图像融合方法进行了主客观比较分析,结果表明采用改进的拉普拉斯金字塔变换的方法能够有效提高融合效果,也证明了利用改进的拉普拉斯金字塔变换进行图像融合的可性和正确性。

参 考 文 献

- 1 P. J. Burt, E. H. Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1983, **31**(4): 532~540
- 2 Minh N. Do, Martin Vetterli. Framing pyramids[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, **51**(9): 2329~2342
- 3 E. H. Adelson, P. J. Burt. Image data compression with Laplacian pyramid[C]. *Proc. of the Pattern Recognition and Information Processing Conference*, Dallas, 1981. 218~223

- 4 E. H. Adelson, E. Simoncelli, R. Hingorani. Orthogonal pyramid transforms for image coding[C]. *Proc. SPIE*, 1987, **845**: 50~58
- 5 E. H. Adelson, C. H. Adelson, J. R. Bergen *et al.*. Pyramid methods in image processing[J]. *RCA Engineer*, 1984, **29**(6): 33~41
- 6 J. M. Ogden, E. H. Adelson, J. R. Bergen *et al.*. Pyramid-based computer graphic[J]. *RCA Engineer*, 1985, **30**(5): 4~15
- 7 P. J. Burt. Smart sensing within a pyramid vision machine[C]. *Proc. IEEE*, 1988, **76**(8): 1006~1015
- 8 P. J. Burd, E. H. Adelson. A multiresolution spline with application to image mosaics[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1983, **2**(4): 217~236
- 9 F. W. Campbell, J. G. Robson. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings[J]. *J. Physiology*, 1968, **197**(3): 551~556
- 10 Maio Qiguang. *Research on Multi-Sensor Image Fusion Methods* [D]. Xi'an: Xidian University, 2005, 12: 13~14
苗启广. 多传感器图形融合方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005, 12: 13~14
- 11 Miao Qiguang, Wang Baoshu. Multi-focus images fusion based on non-negative matrix factorization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 755~759 (in Chinese)
苗启广, 王宝树. 基于非负矩阵分解的多聚焦图像融合研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 755~759
- 12 Wu Yan, Yang Wanhai. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 671~676 (in Chinese)
吴 艳, 杨万海. 基于小波分解和进化策略的图像融合方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 671~676