

文章编号 1004-924X(2008)10-2030-08

基于 Contourlet 变换的遥感图像增强算法

陈志刚,尹福昌

(长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:提出了一种基于 Contourlet 变换的空间域和变换域增强相结合的遥感图像增强算法。首先对原图像进行拉普拉斯塔式变换(LP)得到原图像的细节图像,并将它和原图像线性相加实现空间域增强;然后对空间域增强后的图像进行 Contourlet 变换得到不同尺度和不同方向上的变换系数,构造非线性增强函数对变换系数做增强处理,实现变换域增强;最后对增强处理后的变换系数进行 Contourlet 反变换,实现最终的图像增强。实验结果显示:与其他增强算法相比,用本文算法增强后图像的均值可达到 127,信息熵提高了 10%以上,清晰度提高了 7%以上,表明遥感图像得到了更好的增强效果。

关键词:遥感图像;图像增强;Contourlet 变换;拉普拉斯塔式变换;非线性函数

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A

Enhancement of remote sensing image based on Contourlet transform

CHEN Zhi-gang, YIN Fu-chang

(School of Photo-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to enhance the contrast and details of remote sensing image, an algorithm based on Contourlet transform for remote sensing image enhancement both in space domain and transform domain is proposed. Firstly, the linear addition of original image and its details obtained by Laplacian pyramid transform is used to enhance image in space domain. Then, the coefficients in different scales and different directions are obtained by Contourlet transform and a nonlinear function is introduced to modify the coefficients and enhance image in transform domain. Finally, the image enhancement is implemented by reconstructing these coefficients. The experimental results show that the mean value of enhanced image by this algorithm is about 127; the entropy and definition can be increased by 10% and 7% respectively compared with those of other algorithms. So this algorithm can get better effect for remote sensing image enhancement.

Key words: remote sensing; image image enhancement; Contourlet transform; Laplacian pyramid transform; nonlinear function

收稿日期:2008-05-21;修订日期:2008-07-28.

基金项目:总装备部预先研究基金资助项目(No. 404050603)

1 引言

由于遥感传感器获取的遥感图像的灰度范围并不能覆盖遥感传感器所能达到的整个灰度级范围,因此,大多数的遥感图像都存在着视觉对比度差、分辨率低等缺点,这就使得在对遥感图像进行后继分析之前必须对遥感图像进行增强处理。

现有的图像增强技术主要包括基于空间域的和基于变换域的两大类。基于空间域的方法主要包括直接灰度变换、空域滤波和直方图处理等;基于变换域的方法是将图像由时域变换到频域,再通过修正变换域内的系数达到图像增强的目的。代表性的空间域方法有直方图均衡化, PDE^[1]方法和多尺度 Retinex 算法^[2]等;代表性的变换域方法有傅里叶变换的算法,小波变换的算法^[3-4]和基于 Curvelet 变换^[5]的算法等。

在空间域,直方图均衡化是基于图像直方图分布的一种图像增强方法,对于细节较多相对复杂的图像不能达到好的增强效果;基于 PDE 的方法能够增强细节,达到很好的增强效果,但算法复杂而且需要多次的迭代;多尺度 Retinex 算法是一种基于人的视觉的有效增强算法,也能达到良好的增强效果,但是也需要多次的迭代。在变换域,基于傅里叶变换的算法易产生“振铃”现象;以小波分析为代表的多分辨率分析方法在增强图像细节的同时能有效地抑制图像的噪声,且增强区域及增强目标易控制^[6],但是由一维小波张成的二维可分离小波基只具有有限的方向,不能很好地表示图像中的方向信息;Curvelet 变换^[7]和 Contourlet 变换^[8]都能有效地克服小波的这个缺点,但是 Curvelet 变换的冗余度很高,并且对于高阶正则的奇异边缘不能达到最优的非线性逼近,当奇异边缘为非正则的,其逼近性能不如小波;而 Contourlet 变换首先直接在数字域中定义,再将数字域和连续域联系起来,在连续域中讨论逼近性能,因此它的冗余度小,与小波和 Curvelet 相比,能更好地稀疏地表示二维图像^[9]。

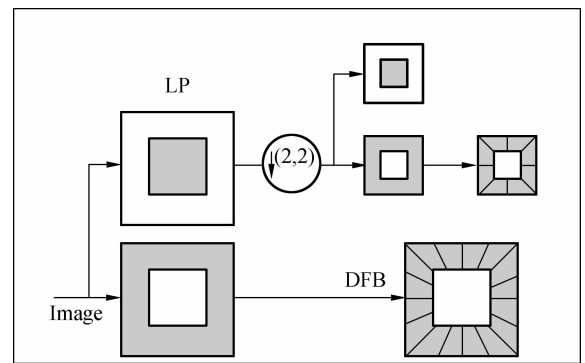
由于遥感图像本身的特点,遥感图像的细节信息没有普通自然图像的细节那样突出和饱满,所以在对遥感图像做增强处理时,需要比普通的自然图像增加更多的图像细节,才能达到良好的增强效果。基于这个原因,本文提出了一种空间

域和变换域相结合的遥感图像的增强算法,即利用拉普拉斯塔式变换(LP)^[10]得到图像的细节,采用线性叠加的方法实现空间域增强,然后再对空间域增强后的图像进行 Contourlet 变换,对得到的变换系数实现变换域的增强。因为 Contourlet 变换包含拉普拉斯塔式变换(Laplacian Pyramid, LP),所以可认为此种空间域和变换域相结合的遥感图像的增强方法是统一基于 Contourlet 变换的。

2 相关原理及算法分析

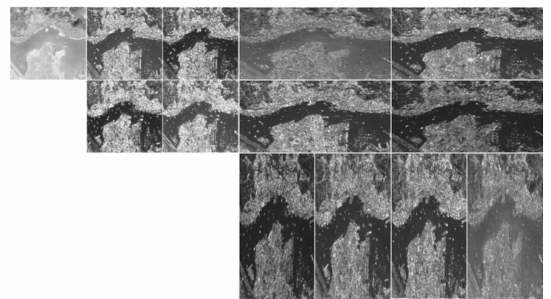
2.1 Contourlet 变换

Contourlet 作为解决小波变换角分辨问题而产生的一种新的图像多尺度几何分析工具,具有充分捕获图像中的高维奇异性信息的优良性能^[8]。它是由一种双滤波器组结构来实现的:对图像进行拉普拉斯塔式分解(LP)以捕获点状奇



(a) Contourlet 变换的结构

(a) Structure of Contourlet transform



(b) 遥感图像的 3 层 Contourlet 分解变换

(b) 3-level Contourlet decomposition of remote sensing image

图 1 Contourlet 变换的结构和分解变换
Fig. 1 Structure and decomposition of Contourlet transform

异性,然后由方向滤波器组(DFB)将分布在同方向上的不连续点连接成周线结构(Contour Segment),最终以类似于周线结构来逼近原图像,这也是被称为 Contourlet 的原因。如图 1 所示(a)为 Contourlet 变换的结构;(b)为遥感图像 3 层的 Contourlet 分解变换。

2.2 Contourlet 空间域增强

Contourlet 变换选用 Burt 和 Adelson^[10]于 1983 年提出的拉普拉斯塔式滤波器结构(LP)对图像进行多分辨率分解来捕捉奇异点。LP 分解首先产生原始信号的一个低通采样逼近及原始图像与低通预测图像之间的一个差值图像,对得到的低通图像继续分解得到下一层的低通图像和差值图像,如此逐步滤波得到图像的多分辨率分解。其中第一个差值图像就是原始图像的细节图像。因此将差值图像和原始图像线性叠加和线性拉伸后就能够使原始图像的细节得到增加,从而达到图像增强的目的,可用下列公式表示:

$$I_e = [((I + k \cdot I_d) - i_{\min}) / (i_{\max} - i_{\min})] \cdot C, \quad (1)$$

其中, I_e 为增强后的图像; I 为原始图像; I_d 为差



(a) 原图像

(a) Original image



(b) 细节图像

(b) Detail image



(c) LP 变换增强后的图像

(c) Enhanced image by LP transform

图 2 基于 LP 变换的遥感图像空间域增强

Fig. 2 Remote sensing image enhancement by LP transform in space domain

值图像即细节图像; k 是细节图像的增益系数; i_{\min} 和 i_{\max} 分别为原始图像 I 的灰度最小值和最大值; C 是拉伸强度常数,它的取值范围是: $i_{\max} \leq C \leq 255$ 。如图 2 所示,(a)为原始遥感图像;(b)为原始遥感图像的细节图像;(c)为空间域 LP 增强后的图像。

2.3 Contourlet 变换域增强

由于 Contourlet 能比小波和 Curvelet 更好地稀疏表示自然图像,更好地捕捉图像的轮廓,且 Contourlet 系数是变换域中图像的高频部分即图像的细节,所以可以构造一个非线性函数增强 Contourlet 系数,以达到增强图像的目的。

针对 Contourlet 系数通过构造一个非线性函数 y_g 和 Contourlet 系数相乘来改变需要重构的 Contourlet 系数^[4-5]。由于噪声的存在,在下列等式中定义噪声的标准差为 σ 。

$$y_g(x, \sigma) = \begin{cases} \left(\frac{x}{\alpha\sigma}\right)^g & x < \alpha\sigma \\ \frac{x - \alpha\sigma}{\alpha\sigma} \cdot \left(\frac{t}{\alpha\sigma}\right)^q + \frac{2\alpha\sigma - x}{\alpha\sigma} & \sigma \leq x \leq 2\alpha\sigma \\ \left(\frac{t}{x}\right)^q & 2\alpha\sigma \leq x \leq t \\ \left(\frac{t}{x}\right)^s & x \geq t \end{cases}, \quad (2)$$

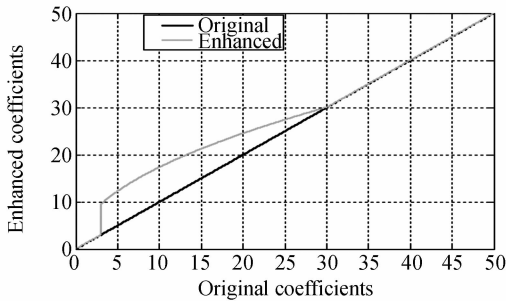
其中, g 表示低频区域去噪非线性程度,当选择合适的 g 值,可以消除图像中低频区域的高频噪声; q 表示增强的非线性程度; s 表示动态压缩范围,通过使用非 0 的 s 参数可以在增强图像中微

弱边缘同时使具有强对比度的边缘变得柔和; α 是标准化参数;值得说明的是,自变量 x 并不是 Contourlet 系数的实际值,而是图像在该位置上的梯度值,也就是说如果把图像某位置的各方向上的 Contourlet 系数看作在此方向上的矢量的话, x 就是此方向上各个矢量和的大小^[4-5],所以 $x \geq 0$; t 是临界点参数,即比 t 值小的数被放大,显然 t 的值是由像素值决定的,可以从下面的两个方法中得到:

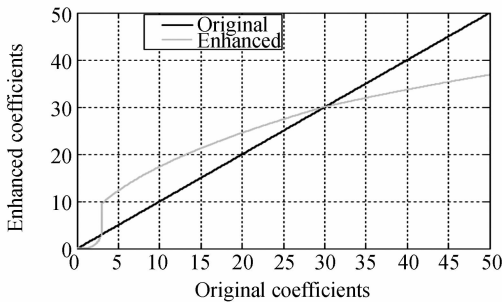
(1) $t = F_i \sigma$, 这里 σ 是噪声标准差, F_i 是一个附加的参数,它的值取决于 x 的值,而 x 的值取决于各方向上的 Contourlet 系数,因此比较容易设定。例如: $\alpha = 4$ 并且 $F_i = 10$ 则 x 在 4 和 40 之间的 Contourlet 系数被放大。

(2) $t = lM_\alpha$, 这里 $0 < l < 1$, M_α 是图像 Contourlet 分解后相应子带系数的最大值。如果 $l = 0.5$, $\alpha = 4$ 则 x 在 4σ 和 $0.5M_\alpha$ 的 Contourlet 系数值被放大。

图 3 所示为不同参数下的增强系数和原始系数曲线的对比。



(a) $t=30, \alpha=3, q=0.5, s=0, g=0$



(b) $t=30, \alpha=3, q=0.5, s=0.6, g=3$

图 3 增强后的系数和原系数的对比

Fig. 3 Comparison of enhanced coefficients and original coefficients

2.4 算法分析

因为遥感图像的实际空间分辨率比普通的自然图像的分辨率低,图像细节不够突出,所以一般的增强算法都不能达到良好的增强效果。本文采用了两次细节增强的方法来增强遥感图像:首先应用 LP 变换得到图像的细节并和原图像线性相加,同时又采用了线性拉伸的方法避免了相加后的图像出现严重的锐化现象;其次构造非线性增强函数,在 Contourlet 变换域以增强变换系数的方法间接地对图像进行了第二次细节增强,增强函数的自变量并不是变换域中的某一个系数,而是图像在该位置上的梯度值的大小,也就是说增强函数并没有改变图像某点的方向,只是改变了该点方向上的值的大小;对于彩色图像的增强,增强函数的自变量则是颜色梯度的大小^[4-5]。具体的算法步骤如下:

Step1: 输入原始遥感图像, 求出 i_{\min} 和 i_{\max} , 确定参数 k 和 C , 同时估算图像的噪声标准差 σ ^[11]。

Step2: LP 变换, 得到细节图像, 按式(1), 实现空间域增强。

Step3: 确定参数 g, q, s 和 α 。

Step4: Contourlet 分解变换, 如果分解层为 k , 每层有方向子带数 $J = 2^l$, 则第 l 个方向子带的第 k 个系数表示为 $C_{l,k}$, 其中 $l = 1, 2, \dots, J$ 。

Step5: 计算噪声标准差 σ_j 和 M_j 。

Step6: 求出图像在 k 位置上的梯度值大小为 $G_{j,k}$ 即:

$$G_{j,k} = \sqrt{C_{1,k}^2 + C_{2,k}^2 + \dots + C_{J,k}^2} \quad (3)$$

Step7: 将变换系数 $C_{l,k}$ 与 $y_\alpha(G_{j,k}, \sigma)$ 相乘, 得到增强后的变换系数, 并与低频子带一起进行 Contourlet 反变换, 实现遥感图像的增强。

以上是全色遥感图像的增强算法步骤, 当遥感图像为彩色时, 如果图像的色彩空间为 RGB, 需要进行色彩空间的转换, 在这里转换成 CIE-Luv 色彩空间^[4], 之后将 L 通道按上述步骤执行。 u 和 v 通道则是从 Step3 开始执行, 但这时增强函数的自变量是各个通道 $G_{j,k}$ 的平方和再开方的值, 即:

$$G_{j,k} = \sqrt{(G_{j,k}^L)^2 + (G_{j,k}^u)^2 + (G_{j,k}^v)^2} \quad (4)$$

执行完 Step7 后, 再由 Luv 空间转换到 RGB 空间。

3 实验结果

3.1 图像增强的评价方法

对图像增强效果的评价可以从定性和定量两方面进行。定性主要依靠图像的视觉效果进行评价,具有主观性。如何用定量的方法评价增强效果的好坏目前并没有统一的标准,在此选用反映图像亮度的参数均值和反映图像细节信息的参数信息熵和清晰度来对增强后的遥感图像进行评价^[12]。设 x_{out} 为增强后的结果图像, (M, N) 为图像大小,则:

(1) 均值 μ 的表达式为:

$$\mu = \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M x_{out}(m, n). \quad (5)$$

对于一幅图像来说,均值反映了图像的平均亮度。如果均值适中(灰度值 128 在附近),则表明视觉效果良好。

(2) 信息熵:令图像的灰度级集合为 $\{d_0, d_1, \dots, d_{L-1}\}$, 其对应的概率表示为 $\{p_0, p_1, \dots, p_{L-1}\}$, L 为灰度级总数。对于灰度范围 $\{0, 1, \dots, L-1\}$ 的图像直方图,其熵 H 定义为:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \ln(p_i). \quad (6)$$

熵值越大,反映了图像携带的信息量越多,因此信息熵是衡量图像信息丰富程度的一个有效指标。

(3) 清晰度(Def):

$$\text{Def} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{(\Delta I_x(m, n))^2 + (\Delta I_y(m, n))^2}, \quad (7)$$

式中:

$$\Delta I_x(m, n) = x_{out}(m, n) - x_{out}(m-1, n), \quad (8)$$

$$\Delta I_y(m, n) = x_{out}(m, n) - x_{out}(m, n-1). \quad (12)$$

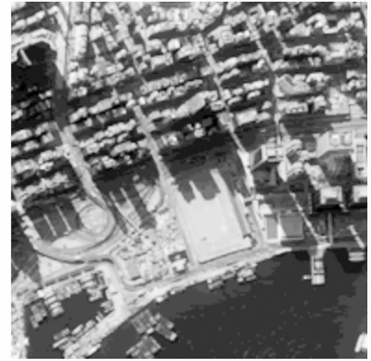
清晰度可以反映出图像中的微小细节反差和纹理变换特征。清晰度值越大,说明对应的图像越清晰。

3.2 全色遥感图像的增强

截取某城市全色遥感图像的一部分,像素分辨率为 (192×192) ,如图 4(a)所示。在这里选择图像增强方法中几种常用的方法:直方图均衡化,多尺度 Retinex,小波变换和本文所提到的 LP 变换等方法和本文所论述的基于 Contourlet 的方

法的增强效果做了对比,如图 4 所示。

在图 4(b)中可以看出,直方图均衡化对于遥感图像的增强效果不是很好;而图 4(d)多尺度 Retinex 方法的应用能够达到良好的视觉效果,但是想达到最佳的增强效果则需要多次的迭代,



(a) 原图像

(a) Original image



(b) 直方图均衡化

(b) Histogram equalization

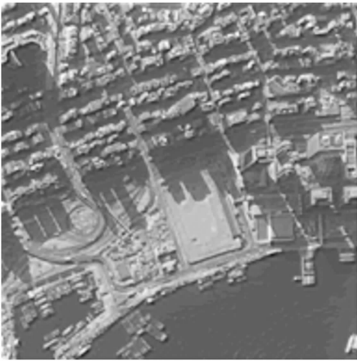


(c) 小波变换

(c) Wavelet transform



(d) 多尺度 Retinex
(d) Multiscale Retinex



(e) 拉普拉斯塔式变换
(e) Laplacian pyramid transform(LP)



(f) 本文方法
(f) Proposed method

图 4 全色遥感图像增强效果对比

Fig. 4 Enhancement results of panchromatic remote sensing image with different approaches

达到图 4(d)的效果需要迭代 80 次,而且图像的细节部分丢失;图 4(c)小波变换域的增强和图 4

(f)本文的算法,选择相同的分解尺度和参数,但后者分解的方向子带多于小波,可以看出效果的不同;图 4(e)LP 算法增强了图像的细节,而建立在 LP 基础上的 Contourlet 变换域增强不但增强了遥感图像的细节,而且对比度要好于 LP。应用以上算法得到图像增强评价指标参数如表 1 所示。

表 1 全色遥感图像增强后的均值,信息熵和清晰度

Tab. 1 Mean values, entropies and definitions of enhanced panchromatic remote sensing images

	直方图 均衡化	多尺度 Retinex	小波	LP 变换	本文方法
均值	140	125	94	101	126
信息熵	2.8	5.0	5.2	4.8	5.8
清晰度	24	28	42	30	45

3.3 彩色遥感图像的增强

还是截取某城市的高空间分辨率彩色遥感影像图的一部分,如图 5(a)所示,这里列出了空间域和变换域两种典型的彩色图像增强算法,即多尺度 Retinex 和小波算法,与本文算法的增强效果做了对比,如图 5 所示。



(a) 原图像
(a) Original image



(b) 多尺度 Retinex
(b) Multiscale Retinex



(c) 小波算法
(c) Wavelet algorithm



(d) 本文方法
(d) Proposed method

图 5 彩色遥感图像增强效果对比

Fig. 5 Enhancement results of color remote sensing image with different approaches

多尺度 Retinex 算法达到图 5(b) 的效果需要迭代 300 次,图 5(c) 小波的方法的参数和本文算法相同,可以看出针对彩色遥感图像,本文研究

的算法能达到比其它两种算法更好的增强效果,3 种算法增强后图像的 RGB 各个通道的均值,信息熵和清晰度如表 2 所示。

表 2 彩色遥感图像增强后的均值,信息熵和清晰度

Tab. 2 Mean value, entropy and definition of enhanced color remote sensing image

	多尺度 Retinex			小波			本文方法		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
均值	102	95	90	86	78	78	127	119	103
信息熵	5.2	5.1	5.1	5.2	5.2	5.2	5.3	5.2	5.2
清晰度	29	28	28	35	34	34	36	35	35

4 结 论

根据遥感图像本身的特点,为了更好地增强遥感图像对比度和图像的细节,本文介绍了 Contourlet 变换的基本原理;以及基于 Contourlet 变换的空间域增强图像细节和变换域增强图像对比度的理论;最后给出基于 Contourlet 变换的空间域和变换域增强相结合的遥感图像增强算法。从实验的结果可以看出,应用本文算法的全色遥感图像的增强视觉效果更好,均值可达到 127,信息熵比空间域增强算法高出 14%~50%,比变换域小波为代表的算法高 10%左右;而清晰度比空间域算法高出 30%~47%,比变换域小波算法高出 7%左右。结果表明,本文算法在遥感图像的增强中能够得到令人满意的效果,证明了算法的有效性。

参考文献:

- [1] 朱立新, 欧阳晓丽, 夏德深. 基于伪线性方向扩散方程的指纹图像增强[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(6): 806-811.
ZHU L X, OUYANG X L, XIA D SH. Fingerprint image enhancement by pseudo-linear directional diffusion PDE [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2006, 19(6): 806-811. (in Chinese)
- [2] 王彦臣, 李树杰, 黄廉卿. 基于多尺度 Retinex 的数字 X 光图像增强方法研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 70-76.
WANG Y CH, LI SH J, HUANG L Q. Enhancement of radiography based multiscale Retinex [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 70-76. (in Chinese)
- [3] 陈升来, 黄廉卿, 郭静. 基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3): 498-502.
CHEN SH L, HUANG L Q, GUO J. Image processing based on integral lifting scheme and its implementation by DSP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 498-502. (in Chinese)
- [4] VELDE K V. Multi-scale color image enhancement [C]. *Proc. Int. Conf. Image Processing*, 1999, 3: 584-587.
- [5] STARCK J L, MURTAGH M, CANDÈS E J, et al.. Gray and color image contrast enhancement by the Curvelet

transform[J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2003,12 (6):706-717.

- [6] 张强,郭宝龙.应用第二代 Curvelet 变换的遥感图像融合[J]. *光学精密工程*,2007,15(7):1130-1136.
ZHANG Q, GUO B L. Fusion of remote sensing images based on the second generation Curvelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1130-1136. (in Chinese)
- [7] CANDES E J, DONOHO D L. Curvelets—a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges [C]. *Curves and Surfaces*, Nashville,2000;105-120.
- [8] DO M N, VRTTERLI M. The contourlet transform; an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. on Image processing*, 2005,14(12):2091-2106.
- [9] DO M N. *Directional multiresolution image representations*[D]. Lausanne; Ph. D. dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [10] BURT P J, ADELSON E H. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1983, 31(4):532-540.
- [11] STARCK J L, CANDES E J, DONOHO D L. The Curvelet transform for image denoising[J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2002,11 (6), 670-684.
- [12] 洗广铭,王知行,黄鲲.紧支撑二维小波多尺度融合图像效果评价[J]. *计算机工程与设计*,2006,27(15):2740-2743.
XIAN G M, WANG ZH Y, HUANG K. Objective effect evaluation of image fusion based on 2-D compact supported wavelet [J]. *Computer Engineering and Design*, 2006, 27(15):2740-2743. (in Chinese)

作者简介:陈志刚(1970—)男,吉林长春人,博士研究生,主要从事图像处理、模式识别和光信息传输等方面的研究。

Email:chenzhigang2009@yahoo.com.cn

导师简介:尹福昌(1940—)男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要研究方向为光信息传输及处理技术。Email:chen.file

@yahoo.com.cn

● 下期预告

船体变形测量的新技术应用研究

李 岩^{1,2}, 张尧禹¹, 岳俊华^{1,2,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 吉林建筑工程学院, 吉林 长春 130021)

提出了一种基于图像网络传输技术的船体变形测量系统设计方法,并对该方法进行了理论和实际应用验证。文章对船体变形测量系统进行了介绍,对分布处理式变形测量系统与集中处理式变形测量系统的特点进行了对比,指出了新型变形测量系统的技术优势,并对其时间性能进行了分析,论证了该系统在技术上的可行性。该变形测量系统对于 16 路测量传感器的实际一次采集处理时间少于 15 ms,能够满足船体变形测量系统的数据采集需求。