

## 新颖的频域图像超分辨重建方法

李金宗, 杨学峰, 李冬冬

(哈尔滨工业大学 图象信息技术与工程研究所, 哈尔滨 150001)

(yxf768@163.com)

**摘 要:** 图像频域解混叠超分辨算法要求输入低分辨率图像帧数及其帧间亚像元位移满足一定的条件, 因此限制了其应用范围。利用单帧超分辨技术和再采样函数从每帧输入低分辨率图像产生 16 帧相同分辨率的图像, 再从中挑选满足限制条件的图像帧, 从而消除了原算法要求的两个主要限制条件, 建立了改进的二至多帧输入图像频域解混叠超分辨算法。三组仿真实验结果表明, 该算法消除了输入帧数和帧间亚像元位移的限制条件, 并且可以使峰值信噪比提高 5 dB 左右。

**关键词:** 低分辨率图像; 频域解混叠; 亚像元位移; 欠采样; 再采样函数

**中图分类号:** TN911.7 **文献标志码:** A

## New super-resolution reconstructing algorithm in image frequency domain

LI Jin-zong, YANG Xue-feng, LI Dong-dong

(Institute of Image Information Technology and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** The de-aliasing Super-Resolution (SR) algorithm in image frequency domain demands some limits on frame numbers and sub-pixel shifts between frames of input Lower Resolution (LR) images, which limits the application range of this algorithm. Using single frame super-resolution method and resample function, the authors produced 16 frames images which have the same resolution as input images from each input LR image and then selected images that meet the requirements from these produced images. Therefore, a novel de-aliasing SR algorithm in image frequency domain from two to many frames of input LR images was proposed. Three simulation experimental results indicate that the proposed algorithm removes the limits on frame numbers and sub-pixel shifts between frames and makes the PSNR of SR images to be increased by about 5 dB.

**Key words:** lower resolution image; de-aliasing in frequency domain; sub-pixel shift; under sampling; resample function

## 0 引言

图像分辨率是图像质量的最重要指标之一。在遥感、视觉监控以及各种图像识别的应用中, 都需要高分辨率的图像。但在图像获取过程中, 由于大气干扰、光学系统衍射、散焦等, 使所成的图像分辨率降低; 而模/数转换中的欠采样会产生频谱混叠, 减少图像的纹理信息, 降低图像的实际分辨率。图像超分辨率重建技术为解决这一问题提供了有效途径。图像超分辨技术是在图像复原技术上由一帧或多帧低分辨率图像重建高分辨率图像的进一步操作, 以恢复混叠在较低频率成分中的高频成分, 提高分辨率。

文献[1]中在不考虑噪声和模糊的情况下, 对帧间存在亚像元平移的、欠采样的一组低分辨率图像, 导出了频率混叠公式, 建立了频域解混叠的基本模型。随后, 文献[2-4]中先后引入噪声与模糊等问题, 使得算法在解混叠的同时还能够解模糊和消除噪声污染。

此后, 人们提出了多种超分辨方法, 在空域主要有基于统计理论的最大后验概率 (Maximum A Posteriori, MAP) 估计<sup>[5-7]</sup>以及基于集合论的 POCS 方法<sup>[8-10]</sup>。空域方法与频域方法相比, 一般存储量和计算量都比较大。近年来, 人们又提出了基于学习和模式识别的超分辨方法<sup>[11-12]</sup>以及基于反向

传播神经网络的方法<sup>[13-14]</sup>, 但这些方法需要大量学习样本, 且存在样本学习的可推广性问题。

虽然图像频域解混叠超分辨方法利用先验信息的能力有限, 而且对被处理图像的帧数和亚像元位移等有一定的要求, 但由于具有运算速度远快于空域算法, 在某些需要实时处理的情况下仍具有很好的应用。本文利用频谱扩展与补偿技术和再采样函数消除了对输入低分辨率图像帧数和帧间亚像元位移的限制, 建立了改进的二、三帧至多帧图像频域解混叠超分辨算法。

## 1 图像频域解混叠算法模型

如果不考虑噪声和模糊, 对帧间存在亚像元平移的、欠采样的一组低分辨率图像, 可以导出由下式表示的频域解混叠的基本模型<sup>[1]</sup>:

$$\mathbf{F}_p = \frac{1}{T_x T_y} \Phi \mathbf{F}^c \quad (1)$$

式中:  $T_x$  和  $T_y$  为低分辨率图像的采样周期;  $\mathbf{F}_p$  是由  $p$  个欠采样图像频谱组成的频谱向量;  $\mathbf{F}^c$  是原连续图像非欠采样的二维限带频谱向量;  $\Phi$  是由  $p$  帧低分辨率图像的亚像元帧间位移构成的矩阵。

考虑加性噪声和模糊后, 成像模型为:

收稿日期: 2009-05-08; 修回日期: 2009-06-25。

**作者简介:** 李金宗 (1940-), 男, 安徽砀山人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 图像处理与模式识别、图像复原与超分辨、空间交会对接; 杨学峰 (1976-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要研究方向: 图像处理与模式识别、图像复原与超分辨; 李冬冬 (1968-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 主要研究方向: 空间交会对接。

$$\mathbf{Z}_p = \Psi_p \mathbf{F}_p^c + \mathbf{N}_p = \Phi_p \mathbf{H}_p \mathbf{F}_p^c + \mathbf{N}_p \quad (2)$$

其中:  $p$  为输入低分辨率图像帧数;  $\mathbf{Z}_p$  是欠采样图像的频谱向量;  $\Phi_p$  为相位关系矢量;  $\mathbf{H}_p$  为模糊函数;  $\mathbf{N}_p$  是噪声项。

根据最小平方误差 (Minimum Squared Error, MSE) 准则, 可以解出:

$$\hat{\mathbf{F}}^{(k)} = (\Psi_k^* \Psi_k)^{-1} (\Psi_k^* \mathbf{Z}_k) \quad (3)$$

经过推导可以得出如下循环迭代算法公式:

$$\hat{\mathbf{F}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{F}}^{(k)} + \mathbf{E}^{(k+1)} \quad (4)$$

$$\mathbf{E}^{(k+1)} = \mathbf{P}(k+1) \bar{\mathbf{Y}}_{k+1} \mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{P}(k) \bar{\mathbf{Y}}_{k+1} [\mathbf{Y}_{k+1}^T \mathbf{P}(k) \bar{\mathbf{Y}}_{k+1} + 1]^{-1} \bar{\mathbf{Y}}_{k+1}^T \hat{\mathbf{F}}^{(k)} \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{P}(k) = (\Psi_k^* \Psi_k)^{-1}$ 。

这样, 就可以利用式(4)和(5)通过循环迭代求解高分辨图像, 迭代初值需要利用式(3)直接求出, 要求一定的帧数即最少四帧。由于迭代公式是利用最小平方误差准则导出的, 因此该算法不但能有效地提高图像的分辨率, 而且同时具有解模糊和抑制噪声的作用, 能提高图像的对比度和信噪比。

## 2 频域解混叠帧数和位移条件限制及其消除

频域解混叠超分辨率算法要求输入图像至少四帧, 如果帧数不够, 原算法是“病态”的。

频域解混叠算法对所用低分辨率图像的帧间平移存在如下两个限制条件<sup>[2]</sup>:

1) 平行于坐标轴  $x$  或  $y$  的帧间平移点数不多于  $2L_x$  或  $2L_y$ ;

2) 对称于直线  $y = x$  的具有标准化平移  $(\frac{\delta_{xk}}{T_x}, \frac{\delta_{yk}}{T_y})$  的点个数不多于  $q$ , 而  $q$  的取值为:

$$q = \begin{cases} \frac{(2L_y)(4L_x - 2L_y - 1)}{2}, & L_x \geq L_y \\ \frac{(2L_x)(4L_y - 2L_x - 1)}{2}, & L_x < L_y \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $L_x$  和  $L_y$  为满足  $|\mathbf{F}^c(u, v)| = 0, |u| > L_x \omega_x, |v| > L_y \omega_y$  的最小正整数, 式中  $\mathbf{F}^c(u, v)$  是原始图像二维连续频谱。

在实际应用中, 一般取  $L_x = L_y = 1$ , 因此输入图像帧间位移的限制变为: 平行于坐标轴  $x(y)$  和对称于线  $y = x$  的帧间平移点对数均不能多于 2。

为了消除算法对输入帧数和位移条件的限制, 采用本文提出的基于频谱扩展与补偿算法的单帧超分辨率和再采样函数<sup>[15]</sup>。该单帧超分辨率算法可以自适应地对频谱混叠程度进行判别, 然后对混叠到高频中的低频成分进行抑制并补偿到相应的高频成分处。为了能正确地描述光学成像系统的实际采样过程, 必须确定合适的再采样函数, 以使采样后的像素点值反映相邻几个点的加权平均和。经过分析认为, 在光学成像系统采样过程当中, 高斯函数的形式更加逼近真实的采样过程, 这在我们的仿真实验中也得到了验证, 因此本文采用高斯再采样函数<sup>[15]</sup>。

假设只有两帧输入图像, 则首先利用频谱扩展与补偿算法执行单帧超分辨, 然后利用模拟成像模型确定的再采样函数对得到的两帧高分辨率图像再采样, 可以得到两个低分辨率序列图像, 其分辨率等级与输入的真实图像相同, 而帧数远远大于四帧, 实验中达到  $2 \times 16 = 32$  帧。可以将不满足位移限制条件的图像剔除掉, 从中选择亚像素平移满足限制条件的图像, 而其帧数还可以大于 4, 实际达到 16 帧。

## 3 改进的频域解混叠超分辨率算法

对于真实的多帧图像, 必须进行配准以计算各帧相对参考帧的位移参数。配准精度对结果有一定影响, 为了得到高精度的配准参数, 这里采用文献[16]提出的频域配准算法。该算法配准精度小于 0.02 像素, 满足频域解混叠算法的要求。综上所述, 基于两帧输入图像改进的频域解混叠超分辨率算法步骤如下:

1) 对输入的低分辨率执行高精度图像配准算法, 得到帧间亚像素位移配准参数;

2) 对输入的低分辨率图像分别执行单帧图像变换与补偿扩展单帧超分辨率算法, 得到两帧高分辨率图像;

3) 对所得到的单帧高分辨图像, 分别执行再采样操作, 共得到 32 帧相同分辨率等级的图像;

4) 从经上述处理得到的低分辨率图像中选出满足位移关系的四帧, 执行频域解混叠的基本算法, 其输出图像用作循环迭代的初始值;

5) 利用经过上述处理得到的其余满足位移关系的低分辨率图像进行频域解混叠循环迭代算法, 得到频域解混叠超分辨率算法结果。

可以看出, 该算法很容易推广到三帧和更多帧。由于该算法在频域执行迭代更新是在各个频谱点独立进行的, 因而具有内在的并行特性, 适合于并行处理。

## 4 实验结果分析

为了便于考查所建立的算法效果, 本文设计了三组仿真实验。按照成像模型, 对一幅高分辨图像进行加模糊和 1/2 倍下采样的退化过程, 模糊函数取方差为 2 的高斯模糊。共得到四幅低分辨率图像, 任取其中的两幅用作算法输入。处理结果如图 1~3 所示, 其中: 图(a)为原始高分辨率图像; 图(b)为算法输入的其中一帧经双线性插值后的图像; 图(c)为本文算法输出结果图像。

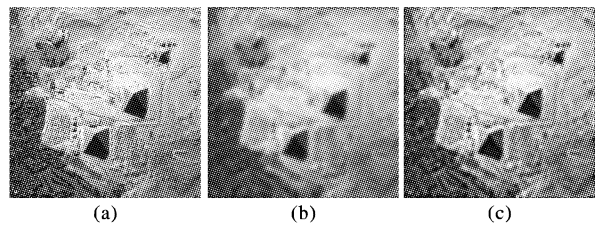


图 1 第 1 组实验结果

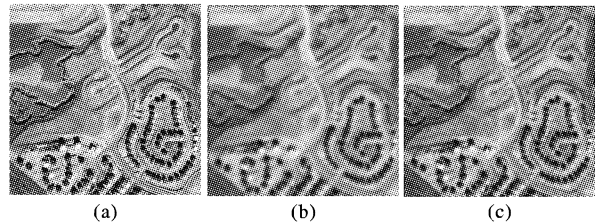


图 2 第 2 组实验结果

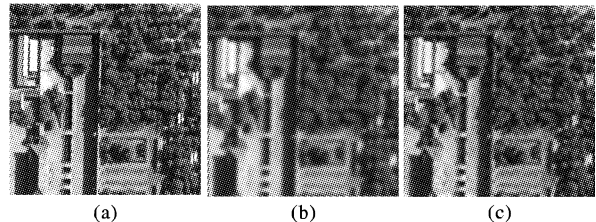


图 3 第 3 组实验结果

可以看出,结果图像比输入图像有很大改善,分辨率、对比度和清晰度都有明显提高。表 1 列出了峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)的计算结果,该算法可以使 PSNR 提高 5 dB 左右,表明该算法是有效的。

表 1 两帧输入图像频域解混叠前后的 PSNR dB

实验组次	PSNR		
	输入图像	输出图像	提高值
第 1 组	15.7649	21.2908	5.5259
第 2 组	16.5016	21.8544	5.3528
第 3 组	16.2239	21.2073	4.9834

## 5 结语

本文在原来的图像频域解混叠算法基础上,利用单帧图像频谱扩展与补偿单帧超分辨率算法、再采样函数消除了原算法的主要限制条件,建立了改进的二帧至多帧图像频域解混叠超分辨率算法。提高了算法的适应性和效果,扩大了算法的使用范围。该算法具有内在并行特性,适合并行处理。

### 参考文献:

- [1] TSAI R, HUANG T. Multi-frame image restoration and registration [C]// *Advances in Computer Vision and Image Processing*. Greenwich: JAI Press, 1984, 1: 317–339.
- [2] KIM S P, BOSE N K, VALENZUELA H M. Recursive reconstruction of high-resolution image from noisy under-sampled multi-frames [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing*, 1990, 38(6): 1013–1027.
- [3] KIM S, SU WEN-YU. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multi-frame images [C]// *ICASSP-91: 1991 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Washington, DC: IEEE Press, 1991: 2977–2980.
- [4] KIM S, SU WEN-YU. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multiframe images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, 2(4): 534–539.
- [5] FARSIU S, ROBINSON M D, ELAD M, *et al.* Fast and robust multi-frame super resolution [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(10): 1327–1344.

- [6] ZIBETTI M V W, BAZÁN F S V, MAYER J. Determining the regularization parameters for super-resolution problems [J]. *Signal Processing*, 2008, 88(12): 2890–2901.
- [7] EL-YAMANY N A, PAPAMICHALIS P E. An adaptive M-estimation framework for robust image super-resolution without regularization [J]. *Visual Communications and Image Processing*, 2008, 6822(2): 68221D.1–68221D.12.
- [8] PATTI A J, ALTUNBASAK Y. Artifact reduction for set theoretic super resolution image reconstruction with edge adaptive constraints and higher-order interpolants [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(1): 179–186.
- [9] LIEW A W-C, YAN H, LAW N-F. POCS-based blocking artifacts suppression using a smoothness constraint set with explicit region modeling [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(6): 795–800.
- [10] XIAO CHUANG-BAI, YU JING, SU KAI-NA. Gibbs artifact reduction for POCS super-resolution image reconstruction [J]. *Frontiers of Computer Science in China*, 2008, 2(1): 87–93.
- [11] FREEMAN W T, JONES T R, PASZTOR E C. Example-based super-resolution [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, 22(2): 56–65.
- [12] FREEMAN W T, PASZTOR E C, CARMICHAEL O T. Learning low-level vision [C]// *ICCV: IEEE International Conference on Computer Vision*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 1999: 1182–1189.
- [13] LU Y, INAMURA M, VALDES M D C. Super-resolution of the under-sampled and sub-pixel shifted image sequence by a neural network [J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 2004, 14(1): 8–15.
- [14] ANASTASSOPOULOS V. Fusion and super-resolution in multispectral data using neural networks for improved RGB representation [J]. *Imaging Science Journal*, 2004, 53(2): 83–94.
- [15] 李金宗. 卫星图像复原及超分辨率方法研究技术总结报告[R], 2005: 61–84.
- [16] 黄婧, 李金宗, 黄建明, 等. 基于一种优化的配准算法的图像超分辨率重建[J]. *计算机应用*, 2006, 26(Z2): 109–112.

(上接第 2938 页)

## 4 结语

3GPP SAE 认证与密钥协商协议是基于 SAE Release 8 标准的系统安全机制中一个非常关键的安全标准协议。本文在对比分析 UMTS 认证与密钥协商协议的基础上,详细研究了 3GPP SAE 认证与密钥协商协议,指出了新协议中已经解决的问题和仍然存在的安全缺陷。然后针对 SAE 系统中仍然存在的用户身份泄露问题、认证向量易被截获,以及长期共享密钥  $K$  和不支持数据签名的问题,提出了一种基于公钥体制的改进的 3GPP SAE 认证与密钥协商协议。最后对改进的协议进行安全和效率分析,结果表明在不改变原 3GPP SAE 安全体系结构的基础上,改进协议可以有效克服原协议中用户身份泄露、认证向量易被截获、长期共享密钥  $K$  和不支持数据签名的问题,并且不会显著增加系统的性能开销。接下来的研究工作中,将利用形式化验证的方法进一步证明公钥体制认证与密钥协商协议的安全性,并就其应用于下一代移动通信网中的可能性做深入研究。

### 参考文献:

- [1] 3GPP. TS 33.102 V8.0.0, 3rd generation partnership project; technical specification group services and system aspects; 3G secur-

ity; security architecture (Release 8) [S]. 2008.

- [2] 3GPP. TR 33.909 V1.0.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group SA; 3G security, Report on evaluation of 3GPP standards confidentiality and integrity algorithms [S]. 2008.
- [3] ZHANG MU-XIANG, FANG YU-GUANG. Security analysis and enhancements of 3GPP authentication and key agreement protocol [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(2): 734–742.
- [4] 谭利平, 李方伟. 移动通信系统中的认证与密钥协商协议[J]. *计算机应用*, 2007, 27(6): 1343–1344.
- [5] 郑宇, 何大可, 梅其详. 基于自验证公钥的 3G 移动通信系统认证方案[J]. *计算机学报*, 2005, 28(8): 1327–1332.
- [6] 刘东苏, 韦宝典, 王新梅. 改进的 3G 认证与密钥分配协议[J]. *通信学报*, 2002, 23(5): 119–122.
- [7] 3GPP. TS 33.401 V8.1.1, 3rd generation partnership project; technical specification group services and system aspects; 3GPP system architecture evolution (SAE); security architecture (Release 8) [S]. 2008.
- [8] JUANG W-S, WU J-L. Efficient 3GPP authentication and key agreement with robust user privacy protection [C]// *WCNC 2007: Proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Washington, DC: IEEE Press, 2007: 2720–2725.