

超分辨力图像处理技术进展及在遥感中的应用 *

刘扬阳, 金伟其, 苏秉华, 张楠

(北京理工大学 信息科学技术学院 光电工程系, 北京 100081)

摘要:介绍了超分辨力图像复原处理技术在国内外的进展,着重介绍了基于 Bayes 分析的单幅图像超分辨力算法——基于 Poisson 分布的最大似然法 (PML)、基于 Poisson 分布的最大后验概率法 (PMAP) 和基于 Markov 约束的 Poisson 分布的最大后验概率法 (MPMAP) 以及基于多画幅 MPMAP 超分辨力复原算法,并给出了单幅 MPMAP 法以及多画幅 MPMAP 超分辨力复原算法处理实际遥感图像数据源的结果,表明超分辨力图像处理技术在遥感成像领域具有良好发展和应用前景,有效实现了遥感图像中高频分辨率的复原。

关键词:图像复原; 遥感图像; 超分辨力

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2005)01-0070-04

Progress of super-resolution reconstructing image schemes and application in remote-sensing image*

LIU Yang-yang, JIN Wei-qi, SU Bing-hua, ZHANG Nan

(Department of Optical Engineering, School of Information Science Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 China)

Abstract: The progress of super-resolution reconstructing image schemes is introduced. The PML (Maximum Likelihood based on Poisson)、PMAP (Maximum Afterward Probability based on Poisson) and MPMAP (Markov constraint Maximum Afterward Probability based on Poisson) super-resolution reconstructing image schemes based on the single image of Bayes analysis are specified, as well as the multi-frame MPMAP super-resolution reconstructing scheme, moreover, the processed results of single MPMAP and multiframe MPMAP super-resolution reconstructing scheme are presented aiming at the fact remote-sensing image. It expresses the well developments and applications foreground utilizing super-resolution image processing schemes in remote-sensing imaging field, and accomplishes effectively reconstructing high-frequency in remote-sensing image.

Key words: Image reconstruction; Remote-sensing image; Super-resolution

0 引言

超分辨力图像复原近年来得到迅速发展,并显现出

出广泛的应用前景,它可在复原通频带内图像低频信息的基础上,对截止频率之外的高频信息进行部分复原,使复原图像更加接近原图像。利用超分辨力手段

收稿日期: 2004-02-05; 修订日期: 2004-04-06

* 基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20020007006)

作者简介: 刘扬阳(1976-),女,山东烟台人,博士生,研究方向为图像复原处理。

对遥感图像进行综合复原,现已逐步成为各国研究的热点课题。本文将简单综述超分辨力图像处理技术的发展,重点介绍几种适宜遥感图像处理的超分辨力算法,并通过实际遥感图像给出具体的处理结果。

1 超分辨力图像处理技术的发展

1.1 成像模型及一般图像复原方法

通常,成像系统的成像模型可表示为:

$$g(n_1, n_2) = \{c(x, y)[f(x, y) \otimes h(x, y)]\}_{N \times M} + n(n_1, n_2) \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 为原图像; $h(x, y)$ 为成像过程的点扩散函数; $c(x, y)$ 为离散采样函数; $n(n_1, n_2)$ 为加法噪声; $g(n_1, n_2)$ 为劣化图像; $N \times M$ 表示图像大小; “ \otimes ”为卷积运算。

通常,图像复原就是在已知劣化图像和噪声统计分布的情况下,寻找尽可能逼近原图像 $f(x, y)$ 的逼近图像 $\hat{f}(x, y)$ 。前人经研究提出了许多有效的方法。例如著名的 Wiener 滤波法,可表示为:

$$\hat{F}(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + K} [G(u, v) - N(u, v)] \quad (2)$$

式中 $\hat{F}(u, v)$ 为 $\hat{f}(u, v)$ 的傅里叶变换; 其他各大写参量分别为公式(1)中小写参量的傅里叶变换; K 为复原常数; “*”表示共轭。

如果成像过程是低通滤波器,则传统复原方法同超分辨力图像复原方法相比,恢复截止频率外的图像信息时,前者将不能恢复,后者可以恢复部分图像信息;而在截止频率以内时,前者可能由于低通滤波器数字数值偏低,放大噪声,而后者可抑制噪声。图 1 给出了 MPMAP 超分辨力复原法与 Wiener 滤波复原法的处理结果比较^[1]。图 1(a)~(d) 分别为原图像、退化图像、超分辨力复原及 Wiener 滤波,(e)~(h) 分别为其对应的频谱图像,(i)~(k) 分别为(f)~(h) 与(e) 的频谱相关图。可以看出:Wiener 滤波法所复原出的高频信息基本属于噪声,而超分辨力复原法则对高频图像信息进行实质性恢复。

1.2 图像超分辨力算法的发展

超分辨力图像复原方法最早由 Harris 和 Goodman 于 20 世纪 60 年代提出,并相继提出了线性外推法、叠加正弦模板法等复原方法,但在实际应用中没有获得理想的结果,且被称为“超分辨力的神话”。80

年代末之后,超分辨力图像复原方法的研究取得了突破性的进展,不仅在理论上说明超分辨力存在的可能性,而且提出和发展了许多有实用价值的方法,如 1992 年 A.M.Tekalp 提出的最小均方差复原方法^[2]; 1993 年 S.P.Kim 提出的正则化递归复原方法^[3]; 1989~1997 年 A.M.Tekalp 等提出的凸集投影(Projection Onto Convex Sets, POCS) 图像复原算法^[4]; 1996、1997 年 M.Elad 等人提出的 ML/MLP/ POCS 综合复原方法^[5]; 1997 年 B.C.Tom 等人提出的基于 Bayes 分析的随机统计复原算法^[6]等。

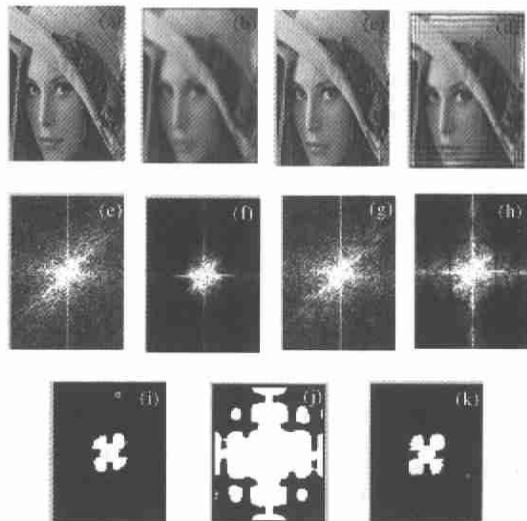


图 1 超分辨力与一般复原图像的比较

Fig.1 Comparison of the super-resolution with normal reconstructing image

我国在超分辨力图像处理算法研究方面与国外尚有较大的差距,北京遥感信息研究所创立了“参照系数学模型法”^[7],中国科学院遥感应用研究所以空间域迭代方法和频域解混叠方法研究为主^[8]。北京理工大学在超分辨力图像复原算法研究方面取得重要进展,提出了基于 Markov 约束的 Poisson 最大似然法(MPML)和 Poisson 最大后验概率法(MPMAP)、POCS-MPMAP 合成法以及基于 MLP 人工神经网络的超分辨力图像复原方法等,计算机模拟仿真取得了明显的超分辨力复原效果^[1,9]。

1.3 几种典型的超分辨力图像复原算法

超分辨力图像复原算法大致可分为基于单幅图像和基于多幅序列图像两类。

(1) 基于单画幅超分辨力图像复原算法^[8]

建立在非线性随机统计复原 Bayes 分析法基础

上的单幅图像超分辨力复原算法的关键是确定已知 f 时图像为 g 的概率 $P(g|f)$ 和 f 的先验概率 $P(f)$ 的分布, $P(g|f)$ 和 $P(f)$ 的分布取决于图像的统计模型。常用的图像统计模型有 Gaussian、Poisson、Markov 和 Gibbs 模型。

1) Poisson-MAP(PMAP) 算法

$$f^{(n+1)}(x,y) = f^{(n)}(x,y) \exp \left[\left(\frac{g(x,y)}{h(x,y) \otimes f^{(n)}(x,y)} - I \right) \oplus h(x,y) \right] \quad (3)$$

式中 \oplus 表示相关运算。

2) Poisson-ML(PML) 算法

$$f^{(n+1)}(x,y) = f^{(n)}(x,y) \exp \left[\left(\frac{g(x,y)}{h(x,y) \otimes f^{(n)}(x,y)} \right) \oplus h(x,y) \right] \quad (4)$$

3) 假设图像 f 不仅服从 Poisson 分布, 同时也服从 Markov 分布, 则在 Bayes 分析框架下, 可以得到 Markov 约束下的 PMAP (MPMAP) 算法和 PML (MPML) 算法^[3]。MPMAP 的迭代公式为:

$$f_y^{(n+1)}(x,y) = f_y^{(n)} \exp \left\{ \beta \left[\left(\frac{g_y}{(h_y \otimes f_y^{(n)})} - 1 \right) \oplus h_y - \alpha \frac{\partial}{\partial f_y^{(n)}} U(f_y) \right] \right\} \quad (5)$$

式中 $U(f)$ 为 Gibbs 分布的能量函数; α 为 Lagrange 乘子, 被称为正则化参数; β 为步长因子, 用于控制算法的收敛性和速度。

Bayes 复原法的复原过程考虑了物体的先验信息, 适用于线性和非线性成像模型, 其解具有唯一性, 特别是基于 Poisson 分布的算法具有很强的超分辨力复原能力, 其中 PMAP 算法考虑了更多的先验知识, 图像复原效果好于 PML 算法。MPMAP 算法明显优于 PMAP 算法, 特别对于噪声较大的图像也能取得很好的复原效果。

(2) 基于多画幅和多传感的 MPMAP 超分辨力图像复原算法^[10]

假设对同一目标图像的 K 幅欠采样图像相互独立且彼此位移为亚像素, 则 $g_k (k=0, 1, \dots, K-1)$ 图像的成像方程为:

$$g_k(n_1, n_2) = \{c(n_1, n_2)[f(m_1, m_2) \otimes h_k(m_1, m_2)]_{M_1 \times M_2}\}_{N_1 \times N_2} + n_k(n_1, n_2) \quad (6)$$

采用最大后验估计, 考虑先验概率分布 $P(f)$, 与

MPMAP 法相似, 可得到基于多画幅和多传感器的 MAMAP 超分辨力图像复原方法:

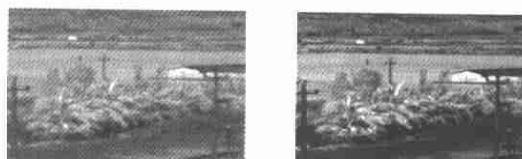
$$f_{M_1 M_2}^{n+1} = f_{M_1 M_2}^n \exp \left\{ \beta \left[\left(\frac{g_k}{(f_{M_1 M_2}^n \otimes h_k)_{N_1 N_2}} - 1 \right) \oplus h_k - \alpha \frac{\partial}{\partial f_{M_1 M_2}^n} U(f_{M_1 M_2}^n) \right] \right\} \quad (7)$$

从劣化的 $N_1 \times N_2$ 低分辨力图像获得 $M_1 \times M_2$ 高分辨力图像。由于考虑到物体的先验信息, 充分利用了多幅不同欠采样低分辨图像的信息, 解具有唯一性, 能获得较理想的复原结果。

2 对遥感图像的超分辨力图像处理技术

2.1 基于单幅图像的 MPMAP 超分辨力复原

图 2 为对我国海洋卫星照相机地面实验图像的 MPMAP 超分辨力复原结果。可以看出: MPMAP 超分辨力对原图像的分辨力有明显的改善。



(a) 原图像
(a) Original image
(b) 超分辨力复原图像
(b) Super-resolution reconstructing image

图 2 HY-1 卫星相机遥感图像的超分辨力复原

Fig. 2 Super-resolution reconstructing remote-sensing image by HY-1 satellite camera

2.2 基于多画幅图像的超分辨力复原

图 3 给出采用多画幅超分辨力 MPMAP 复原算法对实际遥感图像的模拟复原结果, 其中图 3(a) 为 512×512 像素、256 灰度级的实际遥感图像 pyramid (原图像), 首先用 2×2 像素的窗口对原图像分别进行上下左右相互位移半个像素的积分采样, 并加入 $(0, 0.01g_{max})$ 的高斯白噪声, 得到超分辨力复原所需要的 4 幅 256×256 像素低分辨力图像 (图 3(b) 给出其中 1 幅), 然后合成 4 幅低分辨力图像得到 1 幅 512×512 像素的图像 (如图 3(c) 所示), 对其进行去模糊处理, 得到最终的 512×512 像素的超分辨力复原图像^[2] (如图 3(d) 所示), 图(e)~(h) 分别为 (a)~(d) 的对应频谱图

像,(i)、(j)分别为(g)、(h)与(e)的频谱相关图。

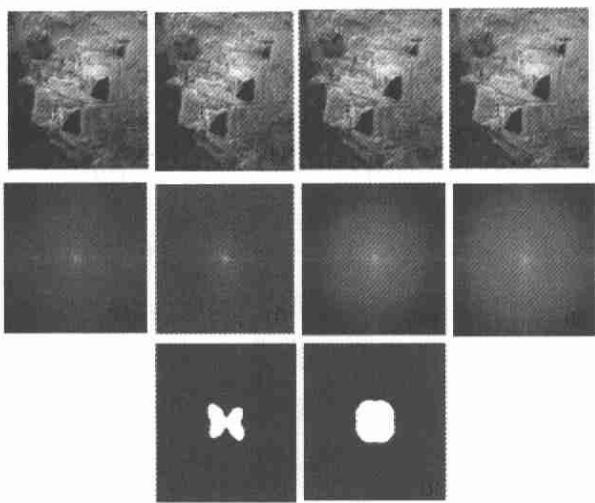


图3 多画幅超分辨力算法 MPMAP 的复原效果

Fig.3 Reconstructing results of multiframe

MPMAP super-resolution arithmetic

图像效果以及一些定量的评价指标分析表明:多画幅超分辨力复原 MPMAP 算法能够把多幅具有不同而又相关信息的低分辨力图像信息有效地融合起来,同时可去除或削弱成像过程(大气弥散、光学系统、积分采样等)点扩散函数对图像的影响,有效抑制噪声,获得了高分辨力复原图像,相对低分辨力图像实现了超分辨力复原。

3 结束语

实际上,在法国国家宇航中心(CNES)“图像链的整体最优化”的研究主题中,提出了一种新的梅花型采样网络,并已应用于2002年发射的“SPOT-5”卫星,通过在地面上将两幅5 m 分辨力/同时相的卫星图像进行梅花型插值技术、去噪声和解卷积等处理,几乎可获取所有未被光学系统滤掉的图像频谱,使“SPOT-5”超分辨力模式的地面分辨力接近采样间隔为3 m 的常规模式,以最低的仪器研制费用显著地提高了“SPOT-5”初始计划的空间分辨力。国内有的单位在“九五”863计划卫星有效载荷的CCD相机中,采用了错开半个像元的CCD阵列拼接成像方式,类似于多画幅成像,在未做超分辨力处理的情况下已使分辨力提高1.7倍。

单画幅超分辨力图像处理技术可以在现有遥感相机的基础上进一步提高遥感图像的分辨力,但由于成像弥散过程的影响因素较多,且部分因素易变,因此如何构造图像的弥散点扩散函数、寻求抑制噪声以及新的复原算法等是进一步研究的关键。而多画幅超分辨力图像复原技术则需要在多传感器的构造或多画幅图像源等方面进行新的构思,并着重研究解决恢复图像细节与抑制噪声的矛盾以及各幅图像间相对位移的确立问题等。总之,超分辨力图像处理技术以及进一步的超分辨力成像技术在航空航天领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Tekalp A M,Ozkan M KSezan M I. High-resolution reconstruction from lower-resolution image sequences and space-varying image restoration[A].IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing[C]. San Francisco: IEEE Press, 1992. III - 169-172.
- [2] Kim S P, Su Wen-yu. Recursive high-resolution reconstruction of blurred multiframe images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1993, 2(4):534-539.
- [3] Patti A J,Sezan M I,Tekalp A M. Superresolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(8):1064-1076.
- [4] Elad M,Feuer A. Super-resolution reconstruction of an image[A]. The 19th IEEE Conference in Israel[C]. 1996. 391-394.
- [5] Hardie R C,Barnard K J,Armstrong E E. Joint-MAP registration and high-resolution image estimation using a sequence of undersampled images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12):1621-1633.
- [6] 周春平. 提高 CCD 成像卫星空间分辨力的理论方法研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(3):179-182.
- [7] 郝鹏威. 数字图像空间分辨力改善的方法研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 1997.
- [8] 苏秉华, 金伟其, 牛丽红, 等. 基于 Markov 约束的 Poisson-MAP 超分辨率图像复原法[J]. 光子学报, 2002, 31(4): 492-496.
- [9] Su Binghua, Jin Weiqi, Niu Lihong, et al. MPMAP super-resolution image restoration algorithm based on multiframe and multisensor[A]. SPIE's Photonics Asia [C]. 2002, 4925:5-9.