

乘窗信号谱分解及其数据修复

孙晓军¹, 丁群^{1,2}, 朱勇¹

(1. 黑龙江大学电子工程学院, 哈尔滨, 黑龙江 150080; 2. 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 哈尔滨, 黑龙江 150001)

摘要: 针对图像信号缺损问题提出一种新的修复方法, 用乘窗函数描述信号缺损, 将数据修复转化为频域反卷积运算, 使问题得以简化和规范化. 由于任何形状缺损的位置均可转变成窗函数统一描述, 因此算法可用于修复任意形状的斑块缺损. 文中结合实例讨论了缺损形状大小和缺失量对修复效果的影响, 同时指出算法在边界处有一定的自动衔接功能.

关键词: 数据修复; 谱分解; 反卷积

中图分类号: TN991. 73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 03-0538-03

Spectrum Decomposition of Windowed-Signal and Data Restoration

SUN Xiao-jun¹, DING Qun², ZHU Yong¹

(1. Electronic Engineering college of Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

2. Department of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: A new restoration algorithm was proposed for a solution to the problem of data loss in image signal. To describe the incomplete signal as a function multiplied by a window can turn the restoration task into deconvolution in frequency domain. It has enabled the task to be simple and normative. As the position coordinate of lost segments in arbitrary shape could be indicated by a unitary window function, the algorithm was applicable to restore these lost segments. The paper illustrated the simulation examples and discussed the effect of segment shape and loss amount on restoration. Some ability of the algorithm to connect automatically the boundary was also pointed out in the paper.

Key words: data restoration; spectrum decomposition; deconvolution

1 引言

传输信号时因电路故障或外界干扰等原因, 数据流有时中断引起短时无信号, 使局部数据丢失形成断续信号流. 这种数据丢失可视为严重局部失真. 例如图 1(a) 的一维信号在 $n = I$ 正常, 称 I 正常区, 在 $n = I_1$ 时发生中断 $f(n) = 0$, 引起数据缺损, 称 I_1 为缺损区, 可认为 $f(n)$ 是无损信号 $g(n)$ 与一窗函数 $w(n)$ 相乘的结果.

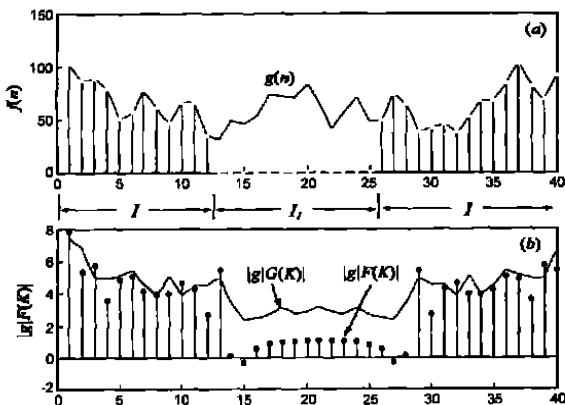


图 1 (a) 断续信号 $f(n)$ (b) $|F(k)|$ 和 $|G(k)|$ 分布

$$f(n) = g(n) \cdot w(n), w(n) = \begin{cases} 1, & n \in I \\ 0, & n \in I_1 \end{cases} \quad (1)$$

$w(n)$ 的离散傅立叶变换 $F(k)$ 、 $W(k)$ 和 $G(k)$ 有卷积关系 (2), 图 1(b) 给出 $F(k)$ 和 $G(k)$ 的对数幅度.

$$F(k) = G(k) * W(k) \quad (2)$$

数据修复可在时域进行, 也可在变换域进行. 在时域修复时要求在 I_1 上对 $f(n)$ 补值使其逼近 $g(n)$. 而在变换域修复时根据 $F(k)$ 和 $W(k)$ 求解 $G(k)$, 涉及到反卷积 (2). 文献 [1] 在提出反卷积算法中假设限带信号且频域能量集中于少数谱线, 利用期望的主谱线数 M 来控制迭代进程以求 $G(k)$. 因为缺损区 I_1 信号 $g(n)$ 的多态性使 M 不易事先确定, 难以控制迭代进程导致收敛性不明确.

对于二维信号, 文献 [2] 在描述曲边图像 $f(m, n)$ 时 (见图 2(a)), 用一窗函数 $w(m, n)$ 来描述曲边图像的边界,

$$w(m, n) = \begin{cases} 1, & m, n \in I \\ 0, & m, n \in I_1 \end{cases} \quad (3)$$

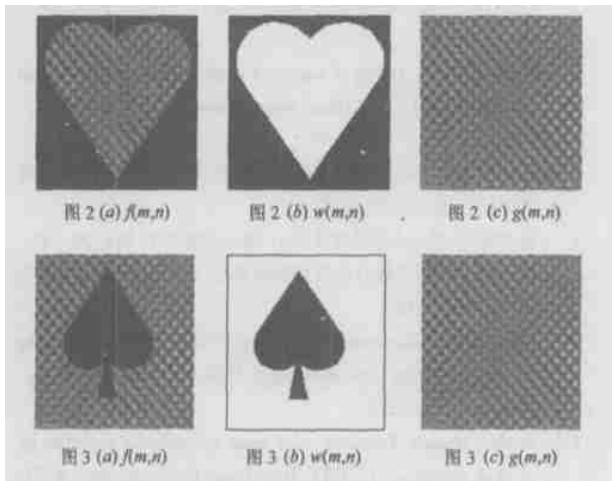
如图 2(b) 所示, $w(m, n)$ 有窗内 (白区) I 和窗外 (黑区) I_1 两部分. 曲边图像 $f(m, n)$ 可以等效窗函数 $w(m, n)$ 与另一信号 $g(m, n)$ 相乘.

$$f(m, n) = g(m, n) \cdot w(m, n) \quad (4)$$

$g(m, n)$ 的一部分是未知的.按 $w(m, n)$ 的划分, $g(m, n)$ 也可表示为:

$$g(m, n) = \begin{cases} f(m, n), & m, n \in I \\ a(m, n), & m, n \in I_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中 $a(m, n)$ 对应 $f(m, n)$ 的黑区,是未知的并可任意取值,但按式(5)定义 $g(m, n)$ 总可满足式(4).为使 $DFT[g(m, n)] = G(k, l)$ 有利于编码,希望谱能量尽量集中在少数 $G(k, l)$ 上,文献[2,3]的算法所确定的 $a(m, n)$ 与 $f(m, n)$ 在边界自动衔接,两者的纹理分布有趋同性,见图 2(c).这一特点可用于数据修复.



2 数据修复的乘窗算法

仍取图像信号为例,设图 3a 是某图像的一部分 $f(m, n)$,黑色桃形表示数据缺损区,相应的窗函数 $w(m, n)$ 如图 3(b)所示,与图 2(b)不同的是黑区 I_1 在中心,但仍可用(4~5)表示 $f(m, n)$ 、 $w(m, n)$ 和 $g(m, n)$ 的关系.按上述分析,如果所求的 $g(m, n)$ 中 $a(m, n)$ 与 $f(m, n)$ 的纹理有趋同性,用 $a(m, n)$ 填充 $f(m, n)$ 的黑区(即数据缺损区)在一定程度上对 $f(m, n)$ 修复作用,基于这一思路本文进行了相应的实验.

设 $f(m, n)$ 为 $N \times N$ 的图像数据, $g_1(m, n)$ 是 $g(m, n)$ 近似值,它可用正交基图像 $g_{kl}(m, n)$ 展开^[4],

$$g_1(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} G_1(k, l) g_{kl}(m, n) \quad (6)$$

$G_1(k, l) = T[g_1(m, n)]$ 是 $g_1(m, n)$ 的正交变换系数, $0 \leq m, n, k, l \leq N-1$.文献[2]用迭代法求 $G_1(k, l)$,

$$G_1^{p+1}(k, l) = \begin{cases} G_1^p(k, l) + G_w, & k = u, l = v \\ G_1^p(k, l), & k \neq u, l \neq v \end{cases} \quad (7)$$

反变换为 $g_1^p(m, n) = T^{-1}[G_1^p(k, l)]$.定义迭代误差 $r^p(m, n)$, $r^p(m, n) = f(m, n) - g_1^p(m, n) = f(m, n) - T^{-1}[G_1^p(k, l)]$ (8)

式(7)中 $G_w = \max_{k, l} G_{kl}(0, k, l, u, v, N-1)$ 由下式确定,

$$G_{kl} = \frac{\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} r^p(m, n) \cdot g_{kl}(m, n) \cdot w(m, n)}{\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} g_{kl}^2(m, n) \cdot w(m, n)} \quad (9)$$

由式(8)知,如果 $g_1^p(m, n)$ 在 I 区逼近 $f(m, n)$,应当有 $r^p(m, n) \rightarrow 0$.文献[2]证明了误差能量 $E^p = \sum_{m, n \in I} [r^p(m, n)]^2$ 随迭代次数 p 单调减,因此保证 $r^p(m, n) \rightarrow 0$.实验中选初值 $r^0(m, n) = f(m, n)$,代入(9)可求 G_w ,按(7~9)迭代直至误差能量 E^p 小于预选的阈值,迭代结束,得到近似值 $g_1(m, n)$.最后的修复结果 $g(m, n)$ 如下.

$$g(m, n) = \begin{cases} f(m, n), & m, n \in I \\ g_1(m, n), & m, n \in I_1 \end{cases} \quad (10)$$

3 实验结果及讨论

因为以上提及的变换是正交变换,所以可以选不同的正交基函数 $g_{kl}(m, n)$,本文取离散余弦变换 DCT,

$$g_{kl}(m, n) = a(m) \cdot a(n) \cos\left(\frac{2m+1}{2N}k\right) \cos\left(\frac{2n+1}{2N}l\right),$$

$$a(0) = 1/\sqrt{N}, a(m) = \sqrt{2/N}, \quad m, n, k, l = 1, 2, \dots, N-1 \quad (11)$$

实验中选 $N = 128$, E^p/N^2 的阈值为 2.三种纹理的 8 比特灰度级图像含缺损,见图 4 第一列(a、d、g)的黑斑,修复结果见图 4 第二列(b、e、h).为便于比较,将无缺损的原图排于图 4 的第三列(c、f、i),相关的实验数据如表 1 给出,其中定义了数据缺失比 $R_{loss} = n_{I1}/N^2$, n_{I1} 表示缺损像素的总数(即 I_1 区像素的总数), N^2 是 $f(m, n)$ 像素的总数.需要说明,本文在缺损位置 $w(m, n)$ 已知的前提下,利用乘窗信号模型研究数据修复算法,因此图 4 中黑斑的位置修复前是确知的.但实际上 (m, n) 事先一般是未知的,需要判断识别,考虑到这方面内容超出了本文算法讨论的范畴,在此不做进一步讨论.

由式(6)知 $g_1(m, n)$ 是 $g_{kl}(m, n)$ 的线性组合, $g_{kl}(m, n)$ 同时覆盖 I 和 I_1 ,即 $g_1(m, n)$ 为 $g_{kl}(m, n)$ 覆盖的结果.覆盖使 $g_1(m, n) \rightarrow f(m, n)$,同时在 I_1 区填补新数据 $a(m, n)$,这等效对缺损区 I_1 补值修复. $a(m, n)$ 的纹理与 I 区 $f(m, n)$

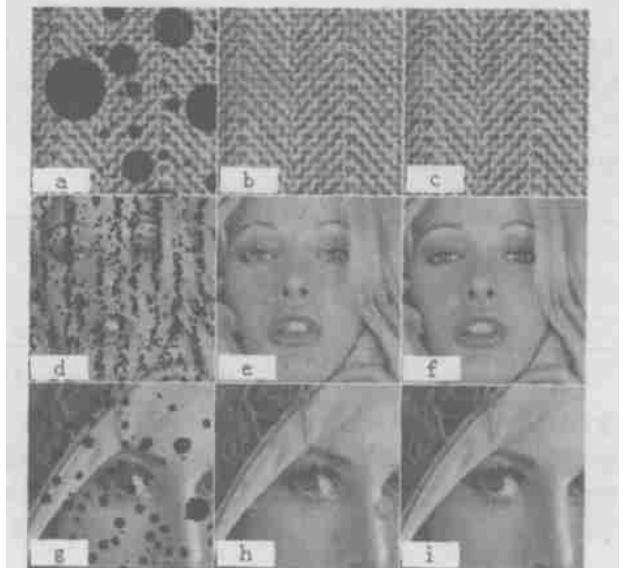


图 4 对三种纹理的图象以及不同缺损的数据修复

能否一致,和缺损区 I_1 的形状大小以及图像的谱特征 $G(k, l)$ 有关。一般来说缺损区 I_1 越小, $a(m, n)$ 易趋近 $f(m, n)$ 。反之,若缺损区 I_1 呈独立块状且面积较大, $a(m, n)$ 偏离 $f(m, n)$ 加大,使修复效果变差。另外,当 $G(k, l)$ 相对集中时图像 $g(m, n)$ 的纹理规律强, $kl(m, n)$ 覆盖 I 和 I_1 时纹理易趋同,修复效果好(见图 4(a)、(b)、(c))。反之,若 $G(k, l)$ 分散,图像纹理无明显规律(见图 4(d)和 4(g)),尽管黑斑面积比 4(a)小,修复后仍显痕迹(见图 4(e)和 4(h))。另外,由于 $kl(m, n)$ 本身纹理的连续性以及覆盖 I 和 I_1 的次数有限,可保证 $g_1(m, n)$ 在 I 和 I_1 的边界处有一定的连续性,使填充黑区的数据与周围自动衔接,减小修复痕迹与周围正常部分的反差,(见图 4(b)、(e)、(h))。

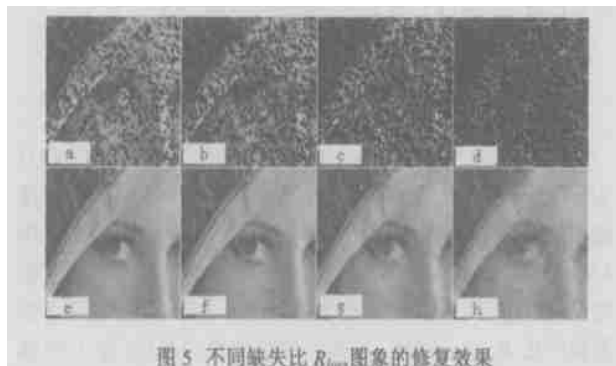


表 1 图 4 实验的缺损数据比例及 PSNR

图 4 序号	数据缺失比 R_{loss} (%)	PSNR/dB
B	27.3	22.61
E	27	28.64
H	12.6	30.54

以上定性说明了图像纹理以及缺损的形状大小对修复效果的影响,实际中还要考虑的另一方面就是 $f(m, n)$ 所含的信息量是否足够修复所用。为此图 5 给出相同缺损模式时不同缺失比 R_{loss} 的图像及其修复的结果,表 2 给出相应数据。可以看到图 5(d) 的缺失比 $R_{loss} = 81.3\%$,难以判断图像信号的全貌,本文算法根据仅剩下的 18.7% 正常像素进行修复,其结果图 5h 大体上仍可接受,基本信息尚未丢失。另外,这一过程也可理解为把部分隐藏在黑区后的信息恢复出来,但原理和方法上与全隐藏技术[5,6]完全不同。

表 2 不同缺失比修复图像的 PSNR

图 5 序号	a	b	c	d
缺失比 (%)	33.9	46.7	61.6	81.3
图 5 序号	e	f	g	h
PSNR/dB	31.9	29.8	27.3	23.49

本文将信号缺损视为乘窗操作,信号修复转化为频域反卷积运算,使问题得以简化和规范化,允许缺损区的边界是任意形状的,因而可用于修复任意形状的斑块缺损,包括修复矩形块数据缺损问题^[7-9],由于文献[7~9]方法主要应用邻块平均或替代法,所以无法解决本文例举的非矩形缺损。需要说

明,若将 $kl(m, n)$ 作相应的改变,上述方法也适用于其它正交变换,图 4 和图 5 是结合 DCT 完成的。(所有实验由 Matlab 编程实现)。

参考文献:

- [1] Uwe Franke. Selective Deconvolution: A new approach to extrapolation and spectral analysis of discrete signals [J]. Proc IEEE-ICASS 87, 1987. 1300 - 1303.
- [2] Andre Kaup, T Aach. A new approach towards description of arbitrarily shaped image segments[A]. IEEE international workshop on intelligent signal processing and communication systems[C]. Taipei: IEEE, 1992. 543 - 553.
- [3] A Kaup, T Aach. Coding of segmented image using shape-independent basis functions[J]. IEEE Trans Image Processing, 1998, 7(7): 937 - 947.
- [4] Kenneth R Castleman[美](朱志刚,等译). 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- [5] 孙圣和,等. 数字水印处理技术[J]. 电子学报, 2000, 28(8): 85 - 90.
- [6] 柳葆芳,等. 基于融合的数据隐藏算法[J]. 电子学报, 2001, 29(11): 1445 - 1448.
- [7] Xiaobing Lee. Information loss recovery for block-based image coding techniques - A fuzzy logic approach[J]. IEEE Trans Image Processing, 1995, 4(3): 259 - 273.
- [8] Sheila S Hemami. Transform coded image reconstruction exploiting inter-block correlation [J]. IEEE Trans Image Processing, 1995, 4(7): 1023 - 1027.
- [9] Zhou Wang, Yinglin Yu, David Zhang. Best neighborhood matching: An information loss restoration technique or block-based image coding system[J]. IEEE Trans Image Processing, 1998, 7(7): 1056 - 1061.

作者简介:



孙晓军 男, 1955 年 10 月出生于黑龙江省鸡西市, 教授, 黑龙江大学工程学院副院长, 1982 年 1 月毕业于黑龙江大学无线电专业, 获理学学士, 1988 年 6 月毕业于哈尔滨工业大学通信与电子系统专业, 获工学硕士, 主要研究方向: 信号处理、图像处理、数据加密, 获航空航天工业部 1990 年科技进步二等奖, 1992 年德国 Aachen 工业大学通信与电子技术研究所访问学者, 1998 年德国 Fraunhofer 信息处理研究所访问学者。E-mail: sunxj@hlju.edu.cn



丁群 女, 1957 年 4 月生于黑龙江省哈尔滨市, 硕士, 副教授, 目前主要研究方向: 电路理论与设计、硬件加密技术。发表论文 20 余篇, 编写教材 1 本, 完成科研项目 12 项, 获省级科技进步二等奖 1 项、技术鉴定 3 项、专利 1 项。E-mail: dingqun@263.net