

文章编号 1004-924X(2007)08-1287-06

# 航空光电成像模糊的实时恢复

李仕<sup>1,2</sup>, 张葆<sup>1</sup>, 孙辉<sup>1</sup>

(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)

**摘要:**基于复数离散傅里叶变换(CDFT)频谱的共轭对称性,对传统的实数离散傅里叶变换(RDFT)做了改进,将改进后的RDFT算法用于维纳滤波器中来实现对运动模糊图像的恢复处理。一幅水平方向运动模糊,大小为 $512 \times 512$ 的8 bit灰度图像被用作测试图像,可以在19 ms内在Intel Pentium 4 3.0 GHz主频的PC机上用一维维纳滤波及改进的RDFT算法完成模糊恢复,满足实时处理的需要。实验结果显示,改进的RDFT能对CDFT的频谱数据实现有效压缩,节省一半的存储空间,使得维纳滤波等图像恢复频域算法的运算速度提高将近一倍;与CDFT相比,改进的RDFT算法没有丢失数据,能达到相同恢复精度。

**关键词:**航空成像;实数傅里叶变换;维纳滤波;图像恢复

**中图分类号:**V247.5;TP391.4 **文献标识码:**A

## Real-time restoration for motion blurred in aerial E-O imaging system

LI Shi<sup>1,2</sup>, ZHANG Bao<sup>1</sup>, SUN Hui<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** Based on the conjugate symmetric frequency spectrum of Complex Discrete Fourier Transformation (CDFT) and the conventional Real Discrete Fourier Transformation (RDFT), a modified RDFT is implemented in Wiener filter to restore aerial images degraded by motion or vibration. A horizontal rectilinear motion blurred image of  $512 \times 512$  size and 8 bits as the test image in experiment can be restored by one dimensional Wiener filter and improved RDFT in 19 ms by an Intel Pentium 43.0 GHz CPU to meet real time requirement. Experiment results show that the modified RDFT efficiently reduce the data in the frequency spectrum of CDFT, which halves the storage space and nearly doubles the computational speed of the image restoration by Wiener filter. Meanwhile, compared with CDFT, the improved RDFT does not lose the data of frequency spectrum in the same restoration precision.

**Key words:** aerial imaging; real discrete Fourier transformation; Wiener filter; image restoration

收稿日期:2007-05-20;修订日期:2007-07-25.

基金项目:国防科技预研基金资助项目(No. 1040603)

## 1 引言

从 1964 年美国宇航局(NASA)处理第一张由 Mariner IV 飞船从火星带回来的图像<sup>[1]</sup>开始,数字图像的恢复处理技术就引起人们的关注。最初数字图像的恢复算法有空域去卷积算法和迭代算法,这两类算法的运算量庞大,适用于模糊图像的事后处理。随着视频技术的兴起,图像恢复算法的运算量成为人们关注的一个焦点。1965 年, J. W. Cooley 和 J. W. Tukey 提出快速傅里叶变换<sup>[2]</sup>(FFT)后,图像恢复的频域算法开始兴起,其中最为著名的是 Wiener 滤波算法,该算法在图像恢复领域的应用记录在 1977 年 H. C. Andrews 和 B. R. Hunt 写的《数字图像处理》<sup>[3]</sup>一书中。

维纳滤波算法的优点在于能很好地抑制图像的噪声及较快地恢复图像。文献<sup>[4]</sup><sup>[5]</sup>对维纳滤波在实际航空成像运动模糊恢复中的应用进行了详细的介绍,并用最优窗法对维纳滤波算法在实际应用过程中产生的像质问题进行修正处理,但并没能实现维纳滤波对模糊图像的实时恢复。文献<sup>[6]</sup>提出一种一维维纳滤波(1DWF)算法来实现一维运动模糊的实时恢复。但航空飞行器实际工作时并不总是向前直线飞行,例如受到侧向风力的作用时,飞行器会偏向侧方斜着飞行,而飞行器斜飞的时候,会产生二维方向上的运动模糊,这时 1DWF 算法将很难对二维方向上的运动模糊进行恢复。

为解决文献<sup>[4-6]</sup>所未解决的航空模糊图像实时恢复问题,本文从图像频域恢复算法的基础—复数傅里叶变换及其共轭对称的频谱入手,对常用的实数傅里叶变换进行改进,实现对复数傅里叶变换的运算量及存储量的有效压缩,并用改进后的实数傅里叶变换代替复数傅里叶变换,将图像信息转为维纳滤波等频域恢复算法所需的频谱信息,从根本上解决频域恢复算法的运算量无法满足实时计算要求的问题,将维纳滤波等算法所需的运算量减少到最低,使得在有限的硬件资源条件下,模糊图像的恢复速度能达到实时处理要求。

## 2 实数傅里叶变换

### 2.1 复数傅里叶变换

傅里叶变换的操作对象一般都是复数序列,通常是将空域(时域)的复数序列转换到频域或者

将频域的复数序列转换到空域(时域),如图 1 所示。所得复数频谱具有共轭对称性<sup>[7]</sup>,参见实验频谱图图 5。

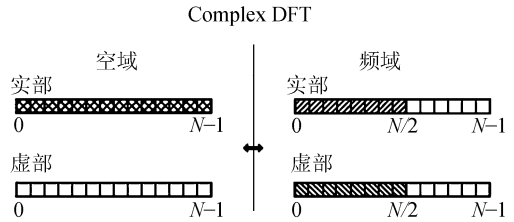


图 1 CDFT 图解

Fig. 1 Illustration of CDFT

以一维傅氏变换频谱为例,频域  $N$  点复数序列  $F(u)$  除  $F(0)$  点外,其他数据关于  $F(N/2)$  点成共轭对称(见图 1 右图),即

$$\operatorname{Re}(u) = \operatorname{Re}(N-u), \quad (1)$$

$$\operatorname{Im}(u) = -\operatorname{Im}(N-u). \quad (2)$$

数字图像处理的时候,图像像素信息都是实数值,在使用傅里叶变换对图像信息进行转换时,一般将像素值直接作为复数序列的实部,同时将复数序列的虚部置 0,以组成傅里叶变换所需的复数序列,再进行复数傅里叶变换,此举无疑将运算数据量提升了一倍,影响运算处理速度。

### 2.2 实数傅里叶变换

实数傅里叶变换在 1968 年由 Glenn D. Bergland 最早提出<sup>[8]</sup>。实数傅里叶变换的理论基础是复数傅里叶变换频谱的共轭对称特性及线性系统下频谱的奇偶分解<sup>[9]</sup>特性。常用的实数傅里叶变换的计算步骤如下:

(1) 将  $N$  点的实数序列按奇偶位置顺序进行分离,将奇位的实数序列作为新的复数序列的实部,将偶位的实数序列作为相应复数序列的虚部,组成一个  $N/2$  点的新的复数序列;

(2) 对  $N/2$  点复数序列进行快速傅里叶变换,得到一个  $N/2$  点的频域序列;

(3) 对  $N/2$  点的频域序列进行奇偶分解,分别得到一个对应原先奇位的实数序列的  $N/2$  点的频谱和一个对应原先偶位的实数序列的  $N/2$  点的频谱;

(4) 通过蝶形算法循环,将两个  $N/2$  点频谱合成所要的  $N$  点频谱。

### 2.3 实数傅里叶变换的改进

由于傅里叶变换的频谱是共轭对称的,可认

为当拥有原频谱一半数据的时候,按照共轭对称的性质可以还原出完整的频谱,即复数傅里叶变换的频谱有一半可以省略。在频域滤波的时候,对半个频谱进行滤波的运算效率明显是对整个频谱进行滤波的效率的两倍,因此,对前面实数傅里叶变换的计算方法进行了修改:在对  $N/2$  点频域序列进行奇偶分解的时候,只取能生成完整频谱左半边频谱数据的相应数据成分进行运算,并最终得到能还原完整频谱的半频谱。

图2为按改进的实数傅里叶变换所求取的二维实数傅里叶变换频谱图,通过图中复数实部、虚部的脚标及复数傅里叶变换频谱图中心共轭对称的特性,不难还原出完整的频谱图。

$$\begin{array}{cccccccc}
 R_{(0,0)} & R_{(0,n/2)} & R_{(0,1)} & I_{(0,1)} & \cdots & R_{(0,n/2-1)} & I_{(0,n/2-1)} \\
 R_{(1,0)} & I_{(1,0)} & R_{(1,1)} & I_{(1,1)} & \cdots & R_{(1,n/2-1)} & R_{(1,n/2-1)} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\
 R_{(m/2,0)} & R_{(m/2,n/2)} & R_{(m/2,1)} & I_{(m/2,1)} & \cdots & R_{(m/2,n/2-1)} & I_{(m/2,n/2-1)} \\
 I_{(m/2+1,n/2)} & R_{(m/2+1,n/2)} & R_{(m/2+1,1)} & I_{(m/2+1,1)} & \cdots & R_{(m/2+1,n/2-1)} & I_{(m/2+1,n/2-1)} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\
 I_{(m-1,n/2)} & R_{(m-1,n/2)} & R_{(m-1,1)} & I_{(m-1,1)} & \cdots & R_{(m-1,n/2-1)} & I_{(m-1,n/2-1)}
 \end{array}$$

图2 二维实数傅里叶变换频谱图

Fig. 2 Frequency spectrum of 2D-RDFT

常用的实数傅里叶变换算法相对复数快速傅里叶变换能缩减40%左右<sup>[9]</sup>的运算处理时间,改进后的实数傅里叶变换能缩减48%左右的运算处理时间(详见第4部分的实验结果),可见通过改进能提升实数傅里叶变换效率达15%。

### 3 图像频域恢复算法

#### 3.1 维纳滤波

维纳滤波恢复的思想是在假设图像信号可以近似地看成平稳随机过程的前提下,按照使恢复的图像与原图像  $f(x,y)$  的均方差最小的原则来恢复图像。维纳滤波的数学模型是:

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y) + n(x,y), \quad (3)$$

式中  $f(x,y)$  表原始图像,  $g(x,y)$  表模糊图像,  $h(x,y)$  表系统点扩散函数,  $n(x,y)$  为系统加性噪声。

式(4)是维纳滤波的表达式,式中  $F(u,v)$ 、 $G(u,v)$ 、 $H(u,v)$  分别是  $f(x,y)$ 、 $g(x,y)$ 、 $h(x,y)$  的傅里叶变换,  $H(u,v)^*$  是  $H(u,v)$  的复共轭,其中  $H(u,v)$  在信息光学中又被称为系统的光学传递函数(OTF)。式(4)中的系数  $k$  是系统的噪

声功率谱与输入图像功率谱的比值,可近似为一个适当的常数,取值范围一般在  $0.0001 \sim 0.01$ <sup>[4]</sup>。

$$F(u,v) = \frac{H(u,v)^*}{H(u,v)H(u,v)^* + k} G(u,v), \quad (4)$$

因为式(3)中的  $h(x,y)$  或式(4)中的  $H(u,v)$  表示的是二维矩阵向量,它能描述出二维的模糊模型,所以维纳滤波能对二维模糊(如:离焦模糊、运动模糊等)进行恢复。

#### 3.2 1DWF 算法

1DWF 算法<sup>[6]</sup>是一维维纳滤波(1-Dimensional Wiener Filter)的缩写,它的数学模型是:

$$g(x) = f(x) * h(x) + n(x), \quad (5)$$

式中  $f(x)$ 、 $g(x)$ 、 $h(x)$ 、 $n(x)$  分别表示一维方向上的原始图像、模糊图像、系统点扩散函数及系统加性噪声。因为式(5)的  $h(x)$  只能表现一维的信息,所以1DWF算法适合做水平或竖直方向上模糊的恢复。

1DWF 算法的思路是把一幅二维  $M \times N$  的模糊图像  $g(x,y)$  分解成  $M$ (或  $N$ ) 条每条含有  $N$ (或  $M$ ) 个像素点的一维模糊图像的像素条,即  $g(x) = [g(x,1), g(x,2) \cdots g(x,N)]$  或  $g(x) = [g(1,x), g(2,x) \cdots g(N,x)]^T$  ( $x=1, 2, \dots, M$ ),即将全幅图像看作由  $M$  个水平(或  $N$  个竖直)的一维像素序列组成,对每一像素条按式(5)所示的模型用一维维纳滤波进行恢复,最后将各个滤波结果整合成恢复图像。式(6)为1DWF算法的滤波公式

$$F(u) = \frac{H(u)^*}{H(u)H(u)^* + k} G(u). \quad (6)$$

#### 3.3 频域恢复算法小结

由式(4)、(6)可知,维纳滤波及1DWF算法是将空域的图像信息通过傅里叶变换转换到频域,并在频域进行滤波还原,最后将滤波后的频域信息通过傅里叶逆变换转换到空域生成结果图像。相对频域滤波过程的运算量,频域滤波前后的两次傅里叶变换所需的运算量在总的图像恢复的运算量中所占比例是十分大的。所以要有效提高维纳滤波及1DWF算法的效率,根本途径在于减少由傅里叶变换所带来的运算量。因此本文在后续的试验中采用改进的实数傅里叶变换作为维纳滤波及1DWF算法的算法引擎,来实现图像频域恢复算法效率的提升。

## 4 实验过程与结果

选择  $512 \times 512$  的 8 bit 灰度图像 Bridge 作测试图像。实验过程中,分别以改进后的实数傅里叶变换和传统的复数傅里叶变换作为算法引擎,对维纳滤波及 1DWF 算法进行测试和验证。

### 4.1 维纳滤波恢复实验

以水平、竖直各 20 pixel ( $\Delta x = 20, \Delta y = 20$ ) 为模板对图 3 做卷积,得到人工模糊图像如图 4。图 5、图 6 均为图 4 的频谱图,其中图 5 是用复数傅里叶变换求得的完整频谱图,该频谱图是关于中心共轭对称的;图 6 是用改进后的实数傅里叶变换所求得的结果,频谱图数据只有频谱图 5 数据的一半,并与频谱图 5 的左半边频谱数据相近,两者的区别在于频谱左边第一列数据的组成不一样,详见图 2 所示的 RDFT 频谱结构。图 7 是用改进后的实数傅里叶变换对实验模型中的点扩散函数(PSF)进行转换后所得的 PSF 频谱图,它也为完整频谱数据的一半。



图 3 Bridge 原图( $512 \times 512$ )

Fig. 3 Original image of Bridge ( $512 \times 512$ )



图 4 模糊图像( $512 \times 512$ )

Fig. 4 Blurred image ( $512 \times 512$ )

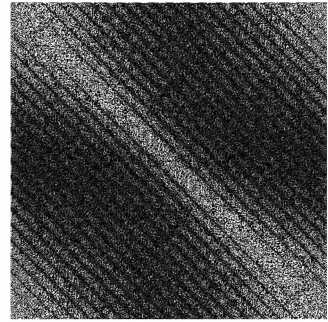


图 5 图 4 的频谱图( $512 \times 512$ )

Fig. 5 Frequency spectrum of Fig. 4 ( $512 \times 512$ )

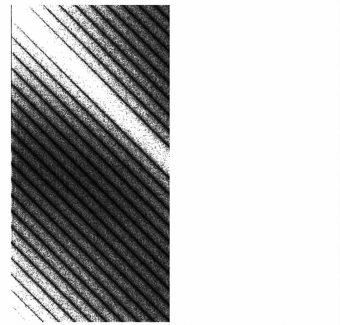


图 6 改进后的 RDFT 所求得的图 4 的频谱图( $512 \times 512$ )

Fig. 6 Frequency spectrum of Fig. 4 by modified RDFT ( $512 \times 512$ )

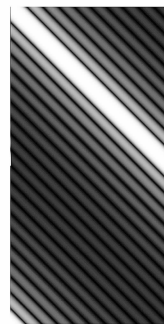


图 7 改进后的 RDFT 所求得的 PSF 的频谱图( $512 \times 512$ )

Fig. 7 Frequency spectrum of PSF by modified RDFT ( $512 \times 512$ )

在数学上很容易证明:两复数间基本数学运算(加、减、乘、除)的结果与这两复数的共轭复数之间的相应基本数学运算的结果互为共轭。所以改进后的实数傅里叶变换所得频谱的维纳滤波结果与直接用复数傅里叶变换所得频谱进行维纳滤



图 8 用维纳滤波还原的图像(512×512)

Fig. 8 Restored image by Wiener filter(512×512)

波的结果之间还是存在着图 2 所示的共轭对称关系。即频谱图 6 与频谱图 7 在公式(4)准则下所求得的频谱图可以经过图 2 所示的共轭特性恢复到直接用复数傅里叶变换频谱进行维纳滤波所得的完整的频谱。

图 8 为用维纳滤波算法对频谱图 6 与频谱图 7 进行滤波操作后再作实数傅里叶逆变换所得的恢复结果图像。由于实数傅里叶变换和复数傅里叶变换比较起来并没发生数据丢失,所以图像的恢复效果一致,均为维纳滤波恢复结果,这里仅提供以改进后的实数傅里叶变换为算法引擎的维纳滤波恢复结果图像。维纳滤波算法分别在两算法引擎下的运算时间对比测试如表 1 所示,其中的测试时间均未包含点扩散函数的计算时间。因为这里假设在实际操作中模糊模型为已知,这样就不需要对每帧图像都进行点扩散函数的判断计算,实际工作中甚至可以通过查表获取相应点扩散函数的数据。

表 1 维纳滤波时间测试结果

Tab. 1 Time test of Wiener filter

图像大小	引擎类型	实验次数	平均耗时(ms)
512×512	RDFT	20	40
	CDFT		77.5
Time(RDFT)/Time(CDFT)			51.61%

#### 4.2 1DWF 恢复实验

航空飞行器工作的时候,更多的还是做直线飞行,通过调整航空平台上的光电成像系统位置和角度,可以将运动模糊方向调整到水平(或竖

直)。1DWF 算法在恢复水平(或竖直)方向上的运动模糊时具有很大优势,所以这里以新的算法引擎对 1DWF 算法进行耗时测试是有实际意义的。实数傅里叶变换在 1DWF 算法中进行的是一维的实数傅里叶变换。在试验中以水平 20 pixel 像移( $\Delta x = 20, \Delta y = 0$ )为模板对图 3 做卷积,得到人工模糊图像,用 1DWF 算法对模糊图像进行复原操作。

表 2 为在不同 FFT 算法引擎下 1DWF 算法恢复处理 512×512 的 8 bit 灰度图像所需的时间情况。表 2 中的时间统计也未包含对系统点扩散函数的计算时间。

表 2 1DWF 时间测试结果

Tab. 2 Time test of 1DWF

图像大小	引擎类型	实验次数	平均耗时(ms)
512×512	RDFT	20	19
	CDFT		36
Time(RDFT)/Time(CDFT)			52.78%

#### 4.3 试验小结

实验中所使用的软硬件平台及编译环境参见表 3。表 1、表 2 的试验数据表明,改进后的实数傅里叶变换在做一维变换和二维变换的时候,运算效率相对复数傅里叶变换均有近一倍的提升,且能达到相同的计算效果。在以改进后的实数傅里叶变换为算法引擎时,对 512×512 的 8 bit 灰度图像的一维模糊及二维模糊的恢复处理速度均能达到实时要求。

表 3 实验的测试环境

Tab. 3 Experimental environment

CPU	Intel P4 531 主频 3.0 GHz
系统平台	Windows XP sp2 操作系统
程序编译环境	VC 6.0 SP6 Intel c++ compiler 8.1

## 5 结 论

本文介绍了复数傅里叶变换的对称性质及实数傅里叶变换的常用算法,并在此基础上对实数傅里叶变换进行改进,使之相对原常用算法效率提升 15% 左右,相对 FFT 算法效率提升将近

一倍。本文将改进后的实数傅里叶变换成功地引入到维纳滤波及 1DWF 算法中,用来提高图像恢复算法的运算效率。试验结果表明,实数傅里叶变换的改进及应用对航空图像的恢复处理具有重要的意义:

(1)在不丢失数据的情况下,恢复算法的运算效率提升近一倍,实现了图像的实时处理;

(2)在实时处理的前提下为具体算法的执行

争取到时间,使得具体算法的选择及调整的空间余地更大;

(3)大幅压缩数据的存储空间及大量减少数据处理的运算量,使得硬件资源及成本得到有效缩减;

(4)傅里叶变换在图像匹配、图像拼接等图像处理领域的广泛应用,使得实数傅里叶变换的应用可以推广,实现了图像处理效率的进一步提升。

## 参考文献:

- [1] NAGEL M R. Introduction to "evaluation of motion-degraded images"[C]. *Proc. Of NASA Electronics Research Center Seminar, Cambridge, MA*,1968;3-5.
- [2] COOLEY J W, TUKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series[J]. *Mathematics Computation*, 1965,19 :296-301.
- [3] ANDREWS H C, HUNT B R. *Digital Image Restoration*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1977.
- [4] 孙辉,张葆,刘晶红.基于维纳滤波的运动模糊消除算法及其在航空成像系统中的应用[J]. *光学 精密工程*,2005,13(6):735-740.  
SUN H, ZHANG B, LIU J H. Restoration of motion-blurred image based on Wiener filter and its application in aerial imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):735-740. (in Chinese)
- [5] 贾平,张葆,孙辉.航空成像移模糊恢复技术[J]. *光学 精密工程*,2006,14(4):697-703.  
JIA P, ZHANG B, SUN H. Restoration of motion-blurred aerial image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4) : 697-703. (in Chinese)
- [6] 李仕,孙辉,张葆.一种运动模糊图像的实时恢复算法[J]. *光学 精密工程*,2007,15(5):767-772.  
LI SH, SUN H, ZHANG B. A method for real-time restoration of motion-blurred images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):767-772. (in Chinese)
- [7] 程佩青.数字信号处理教程[M].北京:清华大学出版社,2001.  
CHENG P Q. *Digital Signal Processing Course* [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2001. (in Chinese)
- [8] BERGLAND G D. A fast Fourier transform algorithm for real-valued series[J]. *Comm. of the ACM*, 1968, 11(10): 703-710.
- [9] SMITH S W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*[M]. California:California Technical Publishing,1997.

**作者简介:**李仕(1984—),男,浙江苍南人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究光学系统成像的补偿算法。E-mail: brightlishi@gmail.com