

2 维复图像插值技术研究

王亮 黄晓涛 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要 2 维复图像插值可按实部和虚部分为两个实图像插值, 实图像插值实际上是一个 2 维滤波过程。提出了一种局部自适应的 2 维实图像插值算法。该算法可以在不预设模型的前提下, 利用局部图像的自相关函数设计 2 维滤波函数。为满足插值均方误差最小, 算法中引入了遗传算法优化多变量函数。该算法在超宽带合成孔径雷达 (ultra-wideBand synthetic aperture radar, UWB SAR) 图像插值中有应用价值, 实测数据的复图像插值和复图像配准检验了该算法的可行性。

关键词 2 维图像插值 自相关函数 遗传算法 复图像配准

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)08-1417-07

Research Two-dimensional Complex Image Interpolation

WANG Liang, HUANG Xiao-tao, ZHOU Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha 410073)

Abstract 2D complex-image interpolation is decomposed into two real-image interpolation procedures based on real part and imaginary part of image. In fact, real-image interpolation is a 2D filtering procedure. In this paper we propose a local adaptive interpolated algorithm for 2D real-image. Presupposing there is no model, this algorithm utilizes fully local images to estimate autocorrelation function. To minimize the mean square error that interpolated local image, genetic algorithm is introduced in the procedure of optimizing multi-variable function. This interpolation algorithm is worth to be applied in ultra-wideband synthetic aperture radar (UWB SAR) image interpolation procedures. Two experiments with real data, complex-image interpolation and complex-image coregistration, have verified feasibility of this interpolation algorithm.

Keywords 2D image interpolation, autocorrelation function, genetic algorithm, complex-image coregistration

1 引言

人们在工程实践中常常会遇到图像插值问题, 一般的做法是将 2 维插值转化为两个独立的 1 维插值过程, 每一维按照事先设定好的模型拟合待插值点。常见算法有最近邻法、多项式法、分段线性法、双线性插值法、双立方插值法等。这些方法只利用待插值点左右和前后方向上采样点的信息, 而忽略了其余方向的作用, 对那些在统计意义上具有 2 维不可分离的图像而言, 这种方法的插值精度不高。因此, 图像插值问题

需要从 2 维平面考虑。2 维图像插值过程可以看作是一个 2 维滤波过程, 问题的关键在于设计 2 维滤波器。为克服一般 2 维插值算法的局限, Reichenbach 等人提出以插值均方误差达到最小的原则来设计 2 维滤波器, 典型例子有: 基于 2 维立方卷积核的双参数函数^[1]; 基于 2 维立方卷积核的 3 参数和 5 参数函数^[2]。设计时这些滤波器并不假定图像每一维的变化趋势, 而是假定目标场景的统计模型, 然后将该模型作为期望, 按照插值均方误差最小的原则确定滤波参数, 同时约束滤波器的连续性、对称性、光滑性等。

处理超宽带干涉合成孔径雷达 (UWB InSAR) 图

基金项目: 国防预研项目 (408010202)

收稿日期: 2006-11-28; 改回日期: 2007-04-03

第一作者简介: 王亮 (1978 ~), 男, 工程师。2007 年于国防科学技术大学获电磁场与微波技术专业工学博士学位。主要研究方向为超宽带 SAR/InSAR 成像技术。发表论文 10 余篇。E-mail: joya_wl@sohu.com

像配准时也遇到了图像插值问题。与一般图像不同,由于 2 维频谱支撑域是非矩形, UWB SAR(超宽带合成孔径雷达)图像中的目标响应出现非正交旁瓣^[3], 图像各像元的 2 维不可分离性强, 因此 UWB SAR 图像插值需要在 2 维平面上考虑。同时, 这里插值操作的对象是复数图像, 后续还需进行相位干涉, 插值要保证幅度和相位在 2 维平面都是连续的^[4,5]。为满足上述要求, 本文将复图像按实部和虚部分为两个实图像, 然后借鉴 Reichenbach 等人提到的 2 维图像插值算法进行实图像插值。为了使插值过程不依赖场景模型, 提出一种局部自适应的滤波算法, 并利用遗传算法(GA)优化多维滤波参数。复图像插值和配准两个实验证明, 该方法可行、有效。

2 UWB SAR 图像 2 维插值的必要性

要说明 UWB SAR 图像 2 维插值的必要性, 先来看图 1 给出的两幅 SAR 仿真点目标响应图, 其中图 1(a) 仿真的是中心频率 $f_c = 200\text{MHz}$ 的低波段

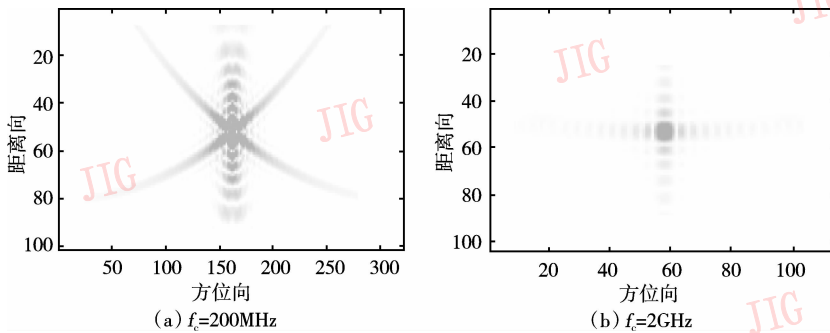


图 1 高低波段 SAR 仿真回波的点目标响应

Fig. 1 Point target responses with high and low frequency band simulated echoes

实际上, 在 UWB SAR 成像中会利用频域加变口径窗的方法控制旁瓣响应, 不会出现像图 1(a) 那样过于显著的非正交旁瓣, 但是考虑到 UWB InSAR 高程测量的要求, 复图像配准要达到亚像素级, 而过于粗糙的插值会降低图像配准的精度, 因此研究 2 维复图像插值算法是必要的。

3 2 维图像插值算法

2 维插值实际上是一个 2 维滤波过程。设 2 维离散图像为 $s(m, n)$, $(m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, 2 维滤波核函数为 $f(x, y)$ ($x, y \in \mathbf{R}$), 是 2 维连续函数, 则插值图像为

SAR 点目标; 图 1(b) 仿真的是 $f_c = 2\text{GHz}$ 的高波段 SAR 点目标。仿真回波成像时均未进行加窗处理, 目标响应的旁瓣十分明显。从图中可以看到, 高波段点目标响应的旁瓣出现在相互正交的距离向和方位向, 而低波段点目标的旁瓣却出现在与距离向和方位向成一定角度的方向上, 特别是方位向上旁瓣电平很小, 即存在显著的非正交旁瓣。造成这种现象可以从 UWB SAR 回波的 2 维频谱支撑域的形状上给予解释, 简言之就是因为 UWB SAR 回波的 2 维频谱支撑域是非矩形的, 具体分析参见文献[3]。

由于 UWB SAR 图像中存在非正交旁瓣, 点目标的能量散布在 2 维平面内, 图像各像元的 2 维不可分离性强, 因此 UWB SAR 图像插值时仅利用常规的 1 维插值, 精度难以保证。例如, 若只采样到图 1(a) 中点目标的旁瓣, 需要插值得到主瓣响应, 那么如果只是对距离向和方位向分别进行插值, 距离向会恢复出部分主瓣能量, 而方位向对恢复主瓣能量几乎没有贡献。所以, 对 UWB SAR 图像插值时从 2 维平面考虑是必要的。

$$r(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(m, n) f(x - m, y - n) \quad (1)$$

这里 $r(x, y)$ 为 2 维连续函数, 表明插值能够得到采样率更高的图像。式(1)中一般常用的滤波函数包括最近邻函数、双线性函数、三次样条函数、立方卷积函数^[6-8]等等, 本文重点研究分段立方卷积核函数。设核函数的定义域为 $[-2, 2] \times [-2, 2]$ (一般令定义域外函数取值为 0), 这是一个 5×5 的窗, 可平均划分为 16 个小窗, 每个小窗口内的函数值可用 2 维立方多项式表示, 例如

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j \quad (2)$$

$$0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 1$$

式中, a_{ij} 是 3 次多项式系数, 在 $f(x, y)$ 的整个定义域内共有 $16 \times 16 = 256$ 个。为了减少参数规模, Reichenbach 和 Geng 约束 $f(x, y)$ 为二轴对称、对角对称、连续、光滑、平坦函数, 提出了双参数立方卷积 (2D-2PCC) 核函数; 在此基础上, Shi 和 Reichenbach 又将约束放松, 去掉平坦约束提出 3 参数立方卷积 (2D-3PCC) 核函数, 再去掉对角对称约束提出 5 参数立方卷积 (2D-5PCC) 核函数。下面仅利用更为宽松的 2D-5PCC 进行讨论。

2D-5PCC 可表示为^[2]

$$f(x, y) = a_{33}f_{33}(x, y) + a_{32}f_{32}(x, y) + a_{23}f_{23}(x, y) + a_{30}f_{30}(x, y) + a_{03}f_{03}(x, y) + f_{00}(x, y) \quad (3)$$

$(x, y) \in [-2, 2] \times [-2, 2]$

式中, $(a_{33}, a_{32}, a_{23}, a_{30}, a_{03})$ 为 5 个待定参数, 滤波器核函数 $(f_{33}, f_{32}, f_{23}, f_{30}, f_{03}, f_{00})$ 如图 2 所示 (具体表达式参见文献[2]), 它们从不同区域突出了 2 维平面的细节。例如, f_{30} 和 f_{32} 增强已知图像沿 x 轴的细节, 而 f_{03} 和 f_{23} 增强沿 y 轴的细节。

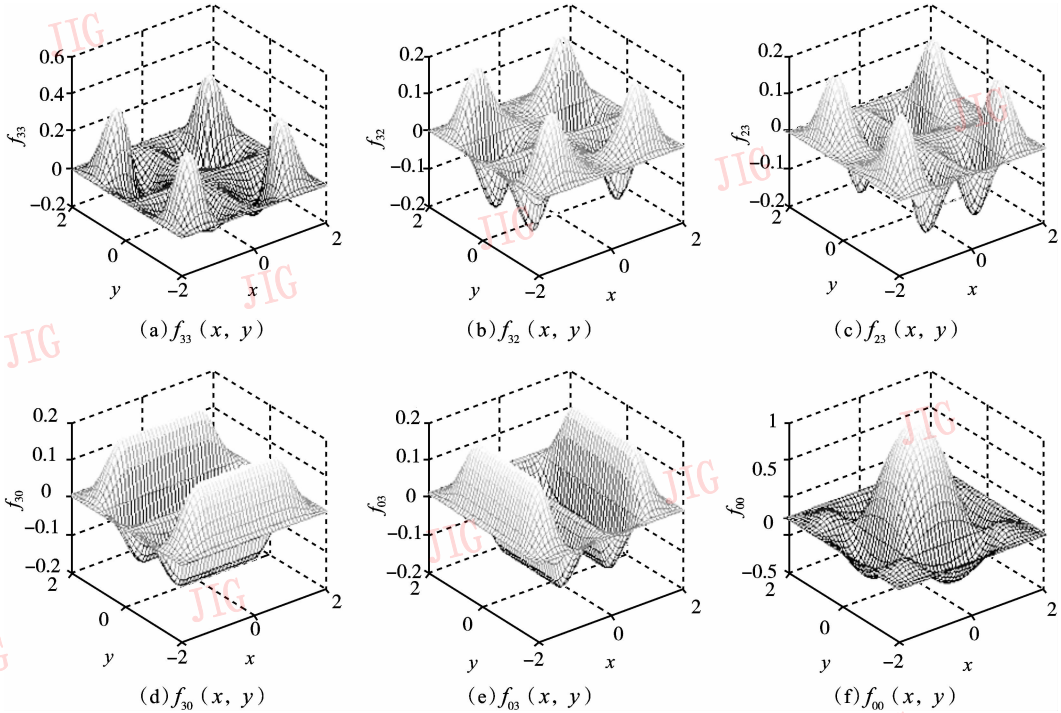


图 2 2D-5PCC 核函数各分量
Fig. 2 The 2D-5PCC kernel function components

确定待定参数 $(a_{33}, a_{32}, a_{23}, a_{30}, a_{03})$ 是一个最优化过程, 即求

数的偏导为 0, 再联立方程组为

$$\min_{a_{ij}} \varepsilon^2 = E \left\{ \iint |r(x, y) - s(x, y)|^2 dx dy \right\} \quad (4)$$

式中, $E\{\cdot\}$ 表示求均值; ε^2 是均方误差; $s(x, y)$ 是 2 维连续图像, 代表滤波器的期望输出, 由于图像场景不同而具有随机性。式(4)在频域展开为

$$HA = K \quad (6)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{00} & \cdots & h_{04} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{40} & \cdots & h_{44} \end{bmatrix}$$

$$A = [a_{33}, a_{32}, a_{23}, a_{30}, a_{03}]^T$$

$$K = [k_0, \cdots, k_4]^T$$

式中, 功率谱函数 $\Phi_s(u, v) = E\{|S(u, v)|^2\}$; $S(u, v)$ 、 $F(u, v)$ 分别是 $s(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 的频谱; (μ, γ) 是频谱域的离散采样序号。Reichenbach 和 Shi 等人从式(5)出发, 令均方误差 ε^2 关于各个待定参

式中, 矩阵 H 和向量 K 中各元素与滤波核函数 f 、连续图像自相关函数 ϕ_s 都有关。因为 f 的定义域是一个 5×5 的窗口, 那么根据定义, 自相关函数 ϕ_s 也只在 7×7 的窗 (即 $[-3, 3] \times [-3, 3]$) 内取值^[9], 则有

$$h_{ij} = \sum_{m=-3}^3 \sum_{n=-3}^3 (g_i * g_j)(m, n) \phi_s(m, n)$$

$$k_i = \int_{-2}^2 \int_{-2}^2 g_i(x, y) \phi_s(x, y) dx dy - \sum_{m=-3}^3 \sum_{n=-3}^3 (g_i * f_{00})(m, n) \phi_s(m, n) \quad (7)$$

式中, $(g_0, g_1, g_2, g_3, g_4) = (f_{33}, f_{32}, f_{23}, f_{30}, f_{03}, f_{00})$ 。
2 维连续图像 $s(x, y)$ 的自相关函数 ϕ_s 可以事先假定为圆环脉冲、方形脉冲或马尔可夫随机场 (MRF)^[1,2], 然后带入式(6)求出待定参数的具体值, 最终构建 2 维滤波函数 $f(x, y)$ 。

4 自适应参数优化算法

4.1 2D-5PCC 算法的不足

图像插值关键就是设计一个性能优良的 2 维滤波器。通过上节介绍可以看到, 2D-5PCC 算法实际上是在已知模型假设下构建滤波系数, 这种算法往往依赖于模型的适应性, 稳健性不强。而且文献 [1]、[2] 研究的都是幅度图像插值问题, 所引入的脉冲模型或 MRF 模型并不适合本文所讨论的实图像自相关函数。另外, 2D-5PCC 算法求待定系数时需要解 $HA = K$ 方程, 当系数矩阵 H 非满秩时, 方程独立解的个数小于 5, 即得不到全部的所需系数。同时考虑到构建方程 $HA = K$ 时, 各已知元素都是估计值, 不可避免地存在噪声, 直接利用 $A = H^{-1}K$ 求解误差较大, 只能考虑更为复杂的总体最小二乘 (TLS) 解方程法^[10], 这将带来更大的运算负担。

4.2 自适应估计自相关函数

式(4)可在时域展开为

$$\min_{a_{ij}} \varepsilon^2 = \min_{a_{ij}} \iint [\rho_s(x, y) - 2f(x, y)\phi_s(x, y) + f(x, y) * f(x, y) \iint \phi_s(x', y') \delta(x' - m, y' - n) dx' dy'] dx dy \quad (8)$$

式中, $\rho_s(x, y) = E\{|S(u, v)|^2\}$ 。再令

$$\iint \phi_s(x', y') \delta(x' - m, y' - n) dx' dy' = \phi_d(m, n) \quad (9)$$

表示连续自相关函数 $\phi_s(x, y)$ 的离散取值。 $f * f$ 的取值范围限制, 则 $\phi_d(m, n)$ 只在 $[-3, 3] \times [-3, 3]$ 的窗内有值。所以式(8)可重写为

$$\min_{a_{ij}} \varepsilon^2 = \min_{a_{ij}} \left\{ \iint [\rho_s(x, y) - 2f(x, y)\phi_s(x, y)] dx dy + \sum_m \sum_n [(f * f)(m, n)\phi_d(m, n)] \right\} \quad (10)$$

式(10)中如果事先不设定场景模型, $\phi_s(x, y)$ 需要从已知离散图像中估计。根据经验^[11], 一个

$M \times M$ 矩阵的自相关函数可由它周围独立同分布的 $(2K + 1) \times (2K + 1)$ 个矩阵的自相关函数求平均得到, 只要 $2K + 1 > 2M - 1$ 即能保证估计结果的误差小于 3dB。所以 $\phi_s(m, n)$ 的估计值为

$$\hat{\phi}_s(m, n) = \frac{1}{(2K + 1)^2} \sum_{k=-K}^K \sum_{l=-K}^K \psi_s(m, n; k, l) \quad (11)$$

式中, $\psi_s(m, n; k, l)$ 表示数据窗中心位置为 (k, l) 时的自相关函数, k 和 l 值实际上表示窗的偏移量。得到 $\hat{\phi}_s(m, n)$ 只是 $\phi_s(x, y)$ 的离散值, 无法直接带入式(10)。为此, 通过 2 维频域补零来提高自相关函数的采样率。一般情况下自然场景的自相关函数在 2 维平面都是缓变的, 它的 2 维频谱主要集中在低频区域, 因而在高频区域补零, 再进行 2 维逆 FFT, 能够无失真地提高时域采样率。 $\hat{\phi}_s(m, n)$ 升采样后得到 $\hat{\phi}_s(x, y)$, 注意到式(10)中 $\hat{\phi}_s(x, y)$ 和 $f(x, y)$ 相乘, 所以升采样时只要保证达到 $f(x, y)$ 的采样率即可。

通过以上描述可以看到, 本文算法与 2D-5PCC 算法有所不同, 本文利用离散图像的局部特性构造目标函数, 并不依赖场景模型的假设, 因此具有任意场景的自适应性。

4.3 多变量参数优化算法

式(10)中优化目标函数是待定参数 (a_{ij}) 的二次式, 利用 GA 可以快速地获得最优解。GA 是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制而形成的自适应全局优化随机搜索算法, 具有对可行解表示的广泛性、群体搜索、无需辅助信息、不易陷入局部最优、易于并行实施等特点, 已在生物技术、化学工程、计算机辅助设计、医学工程、模式识别等领域获得广泛应用^[12,13]。特别地, 近年来许多基于 MATLAB® 平台的 GA 工具箱日趋完善, 为实际工程应用 GA 提供了更为便利的条件^[14]。本文在 MATLAB® 7.0 平台上设计 GA, 求解式(12)的多变量参数优化问题。

具体实现中需要关注的问题包括: 定义适应度函数、确定种群初始范围、选择遗传算子。

(1) 定义适应度函数

适应度函数就是优化问题中的目标函数, 即式(10)中的大括号项。根据滤波核函数和自相关函数的定义域, 又注意到与参变量 (a_{ij}) 无关的常量 $\rho_s(x, y)$ 可以省略, 则适应度函数可写为

$$FIT(a_{ij}) = \sum_{m=-3}^3 \sum_{n=-3}^3 [(f * f)(m, n) \cdot \phi_d(m, n)] - 2 \int_{-2}^2 \int_{-2}^2 f(x, y) \hat{\phi}_s(x, y) dx dy \quad (12)$$

根据式(3),上式中卷积项 $f * f$ 可以写为

$$\begin{aligned}
 f * f = & a_{33}^2 f_{33} * f_{33} + a_{32}^2 f_{32} * f_{32} + a_{23}^2 f_{23} * f_{23} + a_{30}^2 f_{30} * f_{30} + \\
 & a_{03}^2 f_{03} * f_{03} + f_{00} * f_{00} + 2a_{33} a_{32} f_{33} * f_{32} + \\
 & 2a_{33} a_{23} f_{33} * f_{23} + 2a_{33} a_{30} f_{33} * f_{30} + 2a_{33} a_{03} f_{33} * f_{03} + \\
 & 2a_{33} f_{33} * f_{00} + 2a_{32} a_{23} f_{32} * f_{23} + 2a_{32} a_{30} f_{32} * f_{30} + \\
 & 2a_{32} a_{03} f_{32} * f_{03} + 2a_{32} f_{32} * f_{00} + 2a_{23} a_{30} f_{23} * f_{30} + \\
 & 2a_{23} a_{03} f_{23} * f_{03} + 2a_{23} f_{23} * f_{00} + 2a_{30} a_{03} f_{30} * f_{03} + \\
 & 2a_{30} f_{30} * f_{00} + 2a_{03} f_{03} * f_{00}
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

以上卷积运算可事先计算得到,再由 $f * f$ 中离散取值得到一个 7×7 矩阵,带入式(12)即可。

(2) 确定种群初始范围

决定 GA 的一个重要性能是种群的多样性,多样性过高或过低都可能会影响 GA 运行的性能,因此需要合理设置种群的初始范围来控制其多样性。根据 Shi 和 Reichenbach 的研究结果^[2],对于常见的自然场景,在 MRF 模型假设下, $-15 < a_{ij} < 8$ 。本文以此为依据确定种群的初始范围为 $[-15, 8]$,根据种群的多样性,后续各代的取值可以跳出这个范围。

(3) 选择遗传算子

在 GA 中,种群的进化是在遗传算子作用下完成的,最主要的遗传算子有选择算子、交叉算子和变异算子。每一代种群,可以直接选择出当代中适应度较高的个体遗传到下一代,这些称为优良子辈。除过优良子辈,本代剩余的个体通过交叉和变异生成下一代个体。交叉概率(CF)和变异概率(MF)之

和为 1。交叉操作时以 CF 选择具有较好适应度值的个体,然后将这些个体随机配对,对每对个体随机设置交叉点位置,并交换两个个体的基因值,得到交叉子辈。本代剩余个体进行变异操作,变异算子通过随机改变个体中的基因而产生变异子辈。

设计 GA 时参数设置和相关函数如表 1 所列,未列出项目设为默认。

表 1 本文所用 GA 的设置

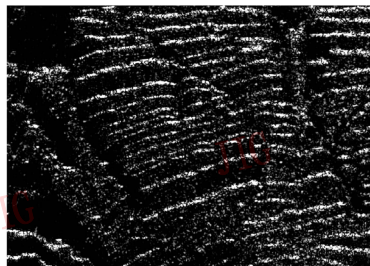
Tab. 1 The GA setting used in this paper

项 目	值或函数名
种群大小	20
初始种群范围	$[-15; 8]$
最大代数	200
优良子辈个数	2
交叉概率	0.9
变异概率	0.1
种群初始化	@ gacreationuniform
适应度计算	@ fitscalingrank
选择	@ selectionroulette
交叉	@ crossovertwopoint
变异	@ mutationgaussian

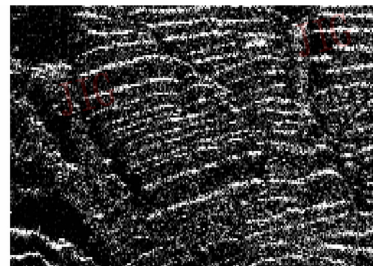
5 算法检验

5.1 复图像插值

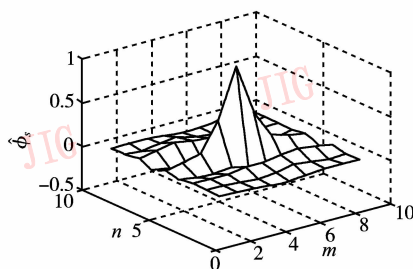
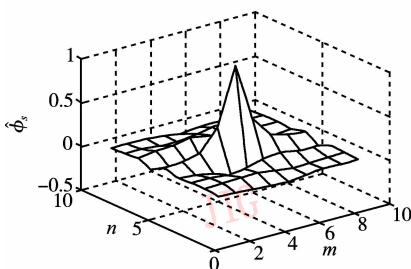
图 3(a)是一复图像 A,为检验本文算法的可行性,先将图 A 按 4:1 的比例降采样,如图 3(b)所示,



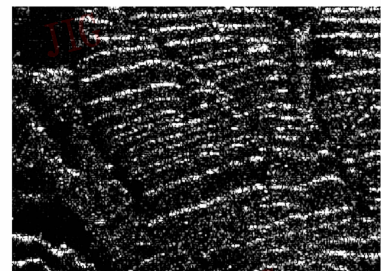
(a) 复图像 A



(b) 4:1降采样后的图像



(c) 某个数据窗的自相关函数: $\hat{\phi}_s$ (左:实部数据; 右:虚部数据)



(d) 本文算法插值恢复的图像

图 3 复图像插值实验

Fig. 3 The experiment of complex-image interpolation

然后通过复图像插值恢复到原采样率。图 3(c) 分别给出了实部和虚部插值时某一 2×2 数据窗的自相关函数(为便于比较 $\hat{\phi}_s$ 没有升采样)。可以看到, 实图像的自相关函数具有冲激形状, 而且取值有正有负, 与脉冲模型或 MRF 模型差距甚远。该窗内实部数据和虚部数据的 GA 优化结果分别为(6.340 0, 8.132 5, -12.201 6, 6.166 0, -3.792 8) 和 (6.517 8, -11.772 9, 3.752 2, 0.358 0, 1.989 4), 最后一代的适应度函数达到 0.75 和 0.41。最后的插值结果如图 3(d) 所示。

可以根据保真度来衡量图像插值算法的优劣。保真度的定义为^[2]

$$f = 1 - \frac{\iint |r(x,y) - s(x,y)|^2 dx dy}{\iint \phi_s(x,y) dx dy} \quad (14)$$

由于是复图像, 计算时分实部和虚部分别计算。其中 $s(x,y)$ 是图像 A , $r(x,y)$ 是插值后图像, $\phi_s(x,y)$ 由原图像直接求相关得到。表 2 列出最近邻插值、双线性插值、双立方插值、立方样条插值(均由 MATLAB[®] 7.1 中 interp2 函数实现)和本文插值算法恢复图像 A 时的保真度。由于 2D-3PCC 或 2D-5PCC 算法模型与实图像的情况差距较大, 本文没有分析它们的处理结果。根据表 2 中结果, 常见 4 类插值算法中双线性插值的保真度最好, 反映出图像 A 中各维信号更适合线性模型。但与本文算法相比, 无论是实部数据还是虚部数据, 双线性插值结果的保真度要差一些。这说明本文算法是可行的和有效的。另外, 虚部数据的保真度整体要比实部数据的低, 即使本文算法最优, 其虚部插值结果的保真度也只能达到最近邻插值结果的水平。解释这一现象有待进一步研究。

表 2 不同算法插值结果的保真度

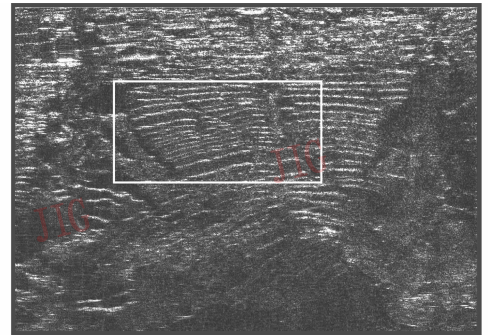
Tab. 2 The fidelity of interpolated image with various algorithm

	最近邻	双线性	双立方	立方样条	本文算法
实部	0.963 5	0.978 3	0.976 0	0.974 8	0.985 1
虚部	0.922 3	0.954 3	0.949 4	0.946 8	0.968 9

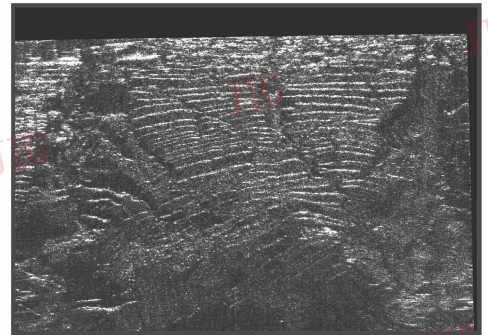
5.2 复图像配准

本文算法可用于 UWB InSAR 复图像配准。现有两幅待配准 SAR 图像 B 和 C , 首先用最大相关法^[15]在 B 和 C 上选择一组配准控制点, 建立起 B 和 C 的映射关系 $Z: B \rightarrow C$ 。然后以 B 采样为基准,

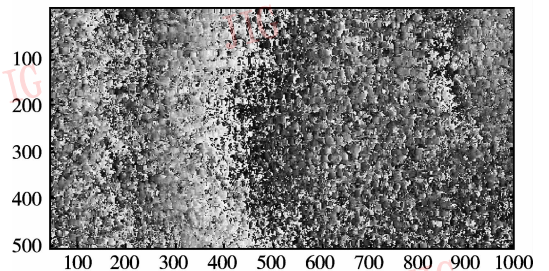
逐点计算采样点位于 C 的位置, 即设 $(m_B, n_B) \in B$, 有 $Z(m_B, n_B) \in C$; 令 $(x_C, y_C) = Z(m_B, n_B)$, 这里 (x_C, y_C) 并不一定是整数, 其幅度值需要用离散采样图像 $(m_C, n_C) \in C$ 插值得到。根据上文提出的复图像插值算法, 可按实部和虚部分为两个实图像插值。插值时, 以距 (x_C, y_C) 最近的采样点作为滤波窗中心, 选出一个 3×3 的实矩阵, 再计算该矩阵的局部自相关函数 ϕ_d 和估计连续自相关函数 $\hat{\phi}_s$ 。接下来利用 GA 优化多变量参数, 进而确定局部滤波核函数 f 。最后由式(1)计算插值结果 $r(x_B, y_B)$ 。对于 (x_C, y_C) 超出 C 图像范围的那些点, 直接令其为 0。上述操作遍历所有待插值点后就得到最终的插值图像。图 4(a)、(b) 分别给出了两幅配准后的 SAR 图像。为检验复图像配准的效果, 图 4(c) 还给出了两幅图像局部(图 4(a) 中白框所标注区域)干



(a) 图像 B



(b) 配准后的图像 C



(c) 方框区域干涉相位图(已去平地)

图 4 复图像配准实验

Fig. 4 The experiment of complex-image coregistration

涉得到的相位图(已去平地)。虽然本文插值算法精度只能达到像素级,干涉条纹并不清晰,但图4(c)足以说明本文插值算法的可行性。

6 结 论

在 2D-5PCC 算法的基础上提出了一种 2 维复图像插值算法,该算法将复数插值按实部和虚部分为两个实数插值,根据局部自适应的参数估计方法确定 2 维滤波参数,算法中引入 GA 能够提高多变量函数优化效率。本文算法通过复图像插值和复图像配准两个实验得到了检验。需要指出的是,实践中发现在设计 GA 时初始种群范围确定不好,会造成在某些区域内适应度函数收敛较慢,因此本文算法仍有待完善。

本文是在 UWB InSAR 技术的背景之下展开研究的,所讨论的 2 维图像插值算法已证明其可行性,但是该插值算法较之常规的 1 维插值算法对干涉相位图究竟能有多大程度的改善,要回答这个问题从一般的角度入手,首先需要寻求配准误差和干涉相位之间的量化关系,其次还要明确 2 维复图像插值算法对 2 维相位的保持能力。解决这些问题是今后研究工作的重点。

参考文献 (References)

- 1 Reichenbach S E, Geng F. Two-dimensional cubic convolution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 857 ~ 865.
- 2 Shi J Z, Reichenbach S E. Image interpolation by two-dimensional parametric cubic convolution [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(7): 1857 ~ 1870.
- 3 Wang Liang, Huang Xiao-tao, Zhou Zhi-min. Non-orthogonal sidelobes suppression in image formation of UWB SAR [J]. Signal Processing, 2006, 22(1): 28 ~ 31. [王亮,黄晓涛,周智敏. UWB SAR 成像中非正交旁瓣的抑制[J]. 信号处理, 2006, 22(1):

- 28 ~ 31.]
- 4 Franceschetti G, Lanari R. Synthetic Aperture Radar Processing [M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 1999.
- 5 Hanssen R, Bamler R. Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1999, 37(1): 318 ~ 321.
- 6 Blu T, Thévenaz P, Unser M. Linear interpolation revitalized [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(5): 710 ~ 719.
- 7 Lehmann T M, Gonner C, Spitzer K. Survey: interpolation methods in medical image processing [J]. IEEE Transactions on Med. Imag., 1999, 18(11): 1049 ~ 1075.
- 8 Meijering E. A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing [J]. Proceedings of IEEE, 2002, 90(3): 319 ~ 342.
- 9 Orfanidis S J. Optimum Signal Processing: An Introduction (2nd Edition) [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- 10 Zhang Xian-da. Matrix Analysis and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 408 ~ 418. [张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004: 408 ~ 418.]
- 11 Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1974, 10(6): 853 ~ 863.
- 12 Chen Guo-liang, Wang Xu-fa, Zhuang Zhen-quan, et al. Genetic Algorithm and Applications [M]. Beijing: PPT Publication House, 1995. [陈国良,王煦法,庄镇泉等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1995.]
- 13 Lei Yin-jie, Zhang Shan-wen, Li Xu-wu, et al. MATLAB Genetic Algorithm Toolbox and Applications [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005. [雷英杰,张善文,李续武等编著. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.]
- 14 User's Guide: Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox for Use with MATLAB [CP]. Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks Inc., 2004.
- 15 Wang Chao, Zhang Hong, Liu Zhi. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Interferometry [M]. Beijing: Science Press, 2002. [王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:科学出版社,2002.]