

# 提高沿航向干涉法性能的最小二乘图像对补偿方法<sup>\*</sup>

王彤<sup>\*\*</sup> 保铮

西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 西安 710071

**摘要** 沿航向干涉法是对合成孔径雷达(SAR)功能的一种扩展, 通过对两幅SAR复图像(称为图像对)进行比较可以对洋流进行测速、对动目标进行检测。在陆地图像中, 动目标常和静止地物混在一起, 难以自动检测, 通常要依靠两幅复图像相消来抑制静止场景的图像(称做杂波), 提高信号和杂波的功率比。文中分析了SAR图像对存在的4种基本形式的误差, 提出了不同类型的误差应该在不同的域进行补偿的观点和一种基于最小二乘的二维相位补偿算法, 并给出SAR图像补偿的方法流程。由于对每一种误差都在恰当的域进行补偿, 该方法可以明显提高系统对杂波的抑制能力, 获得更高的信杂比, 从而提高对运动目标的检测性能。机载雷达实测数据处理的结果证实了该方法的有效性。

**关键词** 合成孔径雷达(SAR) 地面运动目标显示(GMTI) 干涉方法 杂波抑制

利用两个接收天线获得两幅合成孔径雷达(SAR)复图像并进行比较来获得更多的信息是一种干涉方法, 可以增强SAR的功能。两个接收天线的连线(基线)沿航向排列的方式称为沿航向干涉法(ATI)。利用它可以完成运动目标的检测和测速。其工作基础是在相同的观测几何条件下获得两幅SAR图像, 但这两幅图像的获取间隔了一个较短的时间(即时延)。这样, 获得的两幅图像之间的区别就反映出场景的变化。对于运动目标, 由于其位置变化引起的回波和图像的相位变化使我们可以对它们进行检测和测速。

在实际工作中, 两个接收系统总是存在各种各样的差异。这些非理想因素使得我们获得的两幅复图像并不完全相同(相干), 图像相减后得到的信号不仅包括了动目标、噪声, 而且还有静止杂波的剩余。杂波剩余会对运动目标的检测造成明显的不利影响, 在检测概率不变的情况下会使虚警率增大。

为了补偿两幅图像间的误差, 减小杂波剩余, 人们已经提出了一些方法, 主要包括: 文献[1]提

出的Doppler谱均衡方法、文献[2, 3]借鉴光学图像处理方法提出的图像子空间方法和文献[4]提出的二维频域模型和迭代求解方法。这3种方法分别在Doppler域、二维图像域和二维频率域对SAR图像对进行均衡, 它们都具有一定的补偿图像误差的能力, 但是由于处理域的局限性, 补偿性能都在一定程度上受到了限制。

本文对造成两幅SAR图像间出现误差的各种原因进行分析, 提出不同类型的误差应该在不同的域进行补偿的思想和一种二维相位补偿的最小二乘方法, 并给出SAR图像处理的算法流程。采用这种算法对实测数据图像进行处理, 连片强杂波的相消比可以达到28 dB, 且具有操作简单、不需要迭代等优点。

## 1 图像误差产生的原因分析

### 1.1 图像误差产生的原因

在实际应用中, 很多因素破坏了理想条件, 使

2008-04-02 收稿, 2008-05-23 收修改稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60872140)

<sup>\*\*</sup> E-mail: twang@mail.xidian.edu.cn

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

两幅 SAR 复图像中的静止场景不完全相同, 即产生了图像误差. 误差使静止地物图像(杂波)不能很好地相消, 杂波的剩余会严重干扰系统对运动目标的检测和测速. 为了设计出性能较好的补偿方法, 有必要对图像误差产生的原因进行分析. 主要包括以下 4 个因素:

**1.1.1 图像配准误差** 在实际中 ATI 方法往往采用一个天线发射、两个或多个天线子孔径接收的工作模式, 利用接收的回波进行 SAR 成像. 各个接收相位中心之间存在沿航向的位置偏差, 会引起图像间的沿航向位置误差. 同时, 接收路径长度不同也会产生微量的距离向位置误差. 所以, 最终得到的图像之间存在二维位置偏差, 即配准误差.

假设原来第一幅复图像为  $s_1(x, r)$ , 其中  $x$  和  $r$  分别为图像的方位和斜距坐标. 在不考虑其他误差的前提下, 另外一幅图像可以表示为

$$s_2(x, r) = s_1(x + \Delta x, x + \Delta r) \quad (1)$$

其中  $\Delta x$  和  $\Delta r$  为二维配准误差.

这种误差实际上也可以在二维频率域表示为二维线性相位, 设第一幅复图像的二维频谱为  $S_1(f_d, f)$ , 则第二幅复图像的频谱可以表示为

$$S_2(f_d, f) = S_1(f_d, f) \cdot \exp\left\{j2\pi f_d \frac{\Delta x}{\gamma_x} + j2\pi f \frac{\Delta r}{\gamma_r}\right\} \quad (2)$$

其中  $\gamma_x$  和  $\gamma_r$  分别为方位和距离维的采样间隔.

**1.1.2 天线方向图误差** 对于简单的平面天线阵, 远场方向图实际上是方位、俯仰和频率的三维函数, 在远区可以表示为口径平面电流复分布的函数, 即

$$E(\psi, \varphi, f) = \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \iint g(x, z, f) e^{j\frac{2\pi f}{c}(x \sin\theta + z \sin\varphi)} dx dz \quad (3)$$

其中  $x, z$  分别为水平、垂直方向的坐标,  $r, \theta$  和  $\varphi$  分别为散射体相对于天线的距离、方位角和俯仰角,  $g(x, z, f)$  为天线的加权函数,  $\mu$  为常数,  $k$

为空间频率. 假设天线水平轴  $X$  方向和载机速度平行, 天线加权是二维可分离的且不随频率  $f$  变化, 则上述函数可以改写为

$$\begin{aligned} E(f_d, f, \varphi) &= \frac{\mu e^{-j\frac{2\pi f r}{c}}}{4\pi r} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_x(x) g_z(z) g_f(f) \cdot \\ &e^{j\frac{2\pi f}{c}(x \sin\theta + z \sin\varphi)} dx dz = \\ &\frac{\mu e^{-j\frac{2\pi f r}{c}}}{4\pi r} g_f(f) \int_{-\infty}^{\infty} g_x(x) e^{j\frac{2\pi f}{c} x \sin\theta} dx \cdot \\ &\int_{-\infty}^{\infty} g_z(z) e^{j\frac{2\pi f}{c} z \sin\varphi} dz = \\ &\frac{\mu e^{-j\frac{2\pi f r}{c}}}{4\pi r} g_f(f) p(f_d) \cdot q(f, \varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

在实际工作中, 造成两个天线方向图特性不一致的原因主要包括两个方面: 口径的电流(加权)分布误差和天线的安装误差. 口径电流分布误差会产生一个附加的随机的误差方向图, 真实方向图函数等于随机误差方向图和理想方向图之和. 按照目前国内外的天线设计和制造的工艺水平, 如果设计的目标是使两个天线的方向图完全相同, 则误差随机方向图在天线主瓣内会比主瓣低 30 dB 以上. 就是说天线加权误差或者幅相误差对方向图的影响是非常小的, 在主瓣内甚至可以忽略. 至于它对副瓣电平的影响, 由于天线副瓣杂波的 Doppler 谱相对于脉冲重复频率通常是模糊的, 即便这些天线误差是已知的, 也无法有效补偿.

如果各个孔径是独立安装的, 考虑到天线口径的安装误差和飞机结构的形变, 两个孔径的方向图可能存在微小的指向偏差, 即

$$E_1(\theta, \varphi, f) = E_2(\theta - \Delta\theta, \varphi - \Delta\varphi, f) \quad (5)$$

因为  $\Delta\theta$  是一个很小的量, 所以近似得到

$$\begin{aligned} E_2(f_d, f, \varphi) &= E_1(f_d - \Delta f_d, f, \varphi - \Delta\varphi) = \\ &\frac{\mu e^{-j\frac{2\pi f r}{c}}}{4\pi r} g_f(f) p(f_d - \Delta f_d) \cdot \\ &q(f, \varphi - \Delta\varphi) \end{aligned} \quad (6)$$

上式表明这种误差中的 Doppler 频谱的误差可以独

立进行补偿。但由于 SAR 回波数据无法直接对俯仰角  $\varphi$  进行分辨，只有在地面比较平坦的情况下（即距离和俯仰角一一对应的情况下）可以从距离上间接地进行分辨和补偿。这时  $q(f, \varphi)$  同时是频率和距离的函数。

**1.1.3 接收机(通道)频率特性误差** 与各个天线子孔径连接的各个接收机的频率特性也不可能完全相同，这些误差包括频率特性误差和非线性误差。忽略非线性误差，我们可以将频率误差简单表示为

$$S_2(f_d, f) = S_1(f_d, f) \cdot G_c(f) \quad (7)$$

其中  $G_c(f)$  表示通道的频率特性区别，为一复函数，幅度表示幅频响应误差，而相位表示相频响应的误差。

**1.1.4 基线方向误差和地面起伏** 为了得到较好的运动目标探测效果，天线子孔径的相位中心通常都沿着与载体轴向平行的直线安装，即沿航向排列。但在飞行的过程中，由于气流等因素的影响或者由于飞机爬升、下降和转弯，载机的速度方向可能与载机的轴向并不平行，如图 1 所示。其中  $\alpha$  为偏流角（机载情况下有时可以达到  $20^\circ$ ）， $l$  为基线长度， $l_z = l \cdot \sin\alpha$  为偏流情况下的垂直于速度方向的基线分量，称为垂直基线。

垂直基线的存在使散射点到两个接收相位中心

的回波的波程出现差异。在机载情况下，由于基线长度  $l$  本身比较小（通常为数分米到数米），所以它对包络的影响是比较小的，而且是随距离缓变的，可以将包络的变化一起计入图像配准误差。但对于图像相位的影响却不能忽略。

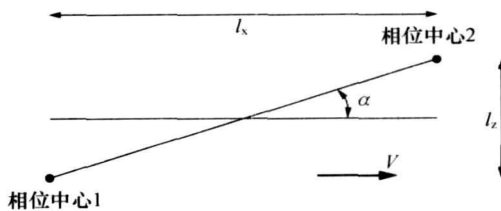


图 1 偏流情况下的基线情况

垂直基线使双天线系统具有了俯仰维的分辨能力，不同距离、不同高度的地面散射体在两幅复图像比较时会呈现出不同的相位差，这就是干涉 SAR 高程测量的基本原理。所以在实际条件下，两幅复图像比较得到的干涉相位也会随距离和方位变化。这种误差可以在图像域表示为

$$S_2(x, r) = S_1(x, r) \cdot \exp[j\phi_{\text{inter}}(x, r)] \quad (8)$$

**1.2 SAR 图像总的误差公式**

将这些误差综合起来，我们得到了从第一幅 SAR 图像演变到第二幅 SAR 图像的变化公式。图像的演变可以用下式表示

$$S_1(x, r) \xrightarrow{S_1(f_d, f)} S_2(x, r) = \left\{ S_1(x, r) \otimes g_c(r) \otimes g_{az}(x) \otimes \alpha_{x+\Delta x, r+\Delta r} \right\} \exp[j\phi_{\text{inter}}(x, r)] g_{el}(r)$$

$$S_2(f_d, f) = \left\{ S_1(f_d, f) G_c(f) \cdot G_{az}(f_d) \exp\left[ j2\pi f_d \frac{\Delta x}{\gamma_x} + j2\pi f \frac{\Delta r}{\gamma_r} \right] \right\} \otimes G_{\text{inter}}(f_d, f) \otimes G_{el}(f)$$

其中左边  $S_1(x, r)$  和  $S_1(f_d, f)$  分别为第一幅 SAR 图像和它的二维 Fourier 变换，右边的公式表示另外一幅 SAR 图像及其 Fourier 变换； $g_c(r)$  和  $G_c(f)$  为复函数，它们是一对 Fourier 变换，表示通道的频率特性区别； $\alpha_{x+\Delta x, r+\Delta r}$  和  $\exp\left[ j2\pi f_d \frac{\Delta x}{\gamma_x} + j2\pi f \frac{\Delta r}{\gamma_r} \right]$  为一对二维 Fourier 变换，表示图像配准误差； $\exp[j\phi_{\text{inter}}(x, r)]$  和  $G_{\text{inter}}(f_d, f)$  为一对二维 Fourier 变换，表示图像的干涉相位误差； $g_{az}(x)$  和  $G_{az}(f_d)$  为一对 Fourier 变换，表示图像的方位方向图指向误差； $g_{el}(r)$  和

$G_{el}(f)$  为一对 Fourier 变换，表示图像的俯仰方向图指向误差。

我们知道，由于发射带宽和波束宽度的限制，地面一个几何点在 SAR 图像上将不再是一个几何点，而是有一定面积一定形状的二维信号，称为 SAR 响应函数或点扩散函数。SAR 图像实际是地面所有散射点的点扩散函数的复加权和。上面 4 种误差中通道响应误差、方向图误差、图像配准误差会使 SAR 图像的响应函数发生变化，而干涉相位误差不改变 SAR 的响应函数，只改变散射点的相位差，使复加权发生变化。

## 2 图像误差的补偿方法

### 2.1 图像误差补偿的基本思想

通过上面分析可以看到, 有 4 个主要的因素会引起图像误差. 这些误差既可以在图像域表示, 也可以在二维频率域表示. 但是在不同的域进行表示时, 其补偿的复杂程度是不同的, 比如图像配准误差, 在图像域表现为图像的移动, 对它直接进行补偿需要对配准误差进行精确估计和插值运算, 而如果在二维频率域进行补偿则只需要估计二维干涉相位随频率变化的斜率, 并在二维频域乘以一个相应的相位斜面. 反之, 垂直基线引起的二维图像域的干涉相位, 就很难在频率域进行估计和补偿. 所以, 我们认为, 不同的误差, 只在特定的域便于估计和补偿. 我们选择在二维频率域补偿图像配准误差、接收机特性误差和天线方向图误差中的方位向误差, 在二维图像域补偿垂直基线引起的干涉相位误差和天线方向图误差中的俯仰向误差.

另外, 对于天线和接收机的幅度响应误差和相位响应误差, 也应该采用不同的处理方法. 在文献 [1] 中, 为了补偿两个 SAR 图像的 Doppler 谱的幅度差异, 先用周期图法估计两个 SAR 图像的 Doppler 功率谱, 再采用 Doppler 电压谱互乘的方法提高方位频谱的一致性. 这种方法性能好、实现容易, 适宜进行幅度响应的补偿. 而对于相位误差, 由于其变化较大, 弱信号受到噪声的影响比较严重, 不容易估计和补偿. 我们提出一种最小二乘的相位估计和补偿办法, 并给出一种提高图像对相干性的处理流程.

### 2.2 最小二乘相位估计和校正方法

我们首先以二维频率域为例, 说明二维频率域最小二乘相位估计和补偿方法. 设两幅图像的二维复频谱为  $S_1(f_d, f)$  和  $S_2(f_d, f)$ , 为了对其相位差异进行估计, 我们对其进行干涉得到二维频率域的干涉相位:

$$\varphi(f_d, f) = \text{angle}[S_1^*(f_d, f) S_2(f_d, f)] \quad (9)$$

其中  $\text{angle}[\cdot]$  表示取复数的辐角. 理论上  $\varphi(f_d, f)$  是一个缓慢变化的量, 只要对图像 2 补偿这个变化的相位就可以使两幅图像的相位相同. 但受到噪声

的影响,  $\varphi(f_d, f)$  是快速变化的, 不能正确反映图像间的相位关系, 因此在相位补偿前应该首先对  $\varphi(f_d, f)$  进行平滑. 考虑到相位以  $2\pi$  为周期模糊的性质, 平滑可以在复指数域完成, 设

$$z(f_d, f) = \exp[j\varphi(f_d, f)] \quad (10)$$

我们可以采用 InSAR 相位滤波的均值滤波法或者中值滤波方法, 但是这些方法只利用局部的数据, 容易受到扰动, 特别是受到图像中运动目标和噪声的影响, 在图像域运动目标附近和阴影区的性能更差. 考虑到天线方向图、频率响应误差中的相位都应该是连续慢变化的,  $\varphi(f_d, f)$  也应该是连续慢变的(第 3 节实测数据处理的结果将证实这一点). 所以我们可以对该  $\varphi(f_d, f)$  进行建模, 将其模型化为一个多阶的光滑曲面:

$$\varphi(f_d, f) = \begin{cases} A_0 + A_1 f_d + A_2 f_d^2 + \dots + A_N f_d^N \\ B_0 + B_1 f + B_2 f^2 + \dots + B_M f^M \end{cases} \quad (11. a)$$

或者

$$\varphi(f_d, f) = \begin{cases} A_0 + A_1 f_d + A_2 f_d^2 + \dots + A_N f_d^N \\ B_0 + B_1 f + B_2 f^2 + \dots + B_M f^M \\ C_{1,1} f_d f + \dots + C_{n,m} f_d^n f^m + \dots + C_{N,M} f_d^N f^M \end{cases} \quad (11. b)$$

其中  $A_n$ ,  $B_m$  和  $C_{n,m}$  表示的是多项式的系数,  $N$  和  $M$  是它们的阶数. (11 a) 式表示二维相位可以分离的形式, (11 b) 式表示二维相位不可以分离的形式. 令

$$\bar{z}(f_d, f) = \exp[j\varphi(f_d, f)] \quad (12)$$

采用最小二乘方法求解这些系数, 使  $z(f_d, f)$  和  $\bar{z}(f_d, f)$  的误差最小, 就可以得到一个光滑的相位曲面, 再用  $\bar{z}(f_d, f)$  乘以图像 2 的频谱  $S_2(f_d, f)$ , 就可以补偿二维频率域的相位误差.

在我们的误差模型中, 频率域的误差是二维可分离的, 可以采用模型 (11 a), 而图像域的误差不是二维可分离的, 可以采用模型 (11 b). 按照我们处理实测数据的经验, 其阶数  $N$  和  $M$  只要取到 5

就足够了。

在系统误差(包括天线误差、接收系统误差、基线误差等)无法精确测量的情况下, SAR 图像误差补偿主要是采用数据自适应的方法。要得到最优的滤波器, 必须有大量的不包括运动目标和其他奇异信号的好的训练数据。如果训练数据中包含了奇异的样本, 就会干扰滤波器矢量的计算。在有些情况下可能将运动目标的信号当做误差给予消除, 这是所有自适应方法的普遍问题。而这里采用的最小二乘方法的主要优点在于采用数万个甚至更多的点估计较少的参数, 噪声和运动目标对估计的影响非常小。在模型阶数足够的情况下, 最小二乘方法可以获得足够的精度。因为在整个场景中, 静止目标的总能量往往是运动目标总能量的数万倍甚至更多, 所以参数估计中起作用的主要部分是杂波的功率, 补偿不会使运动目标的差异出现明显下降, 即不会对运动目标的检测构成影响。

### 2.3 SAR 图像误差校正流程

有了幅度误差补偿的互乘方法和我们提出的最小二乘相位估计补偿这两个工具, 我们就可以对 SAR 图像对的不一致性进行补偿。其步骤如下:

步骤 1 将两幅复图像变换到二维频率域, 得到  $S_1(f_d, f)$  和  $S_2(f_d, f)$ , 采用上面给出的最小二乘方法估计补偿其二维相位区别;

步骤 2 采用周期图法求出两个图像的频谱和 Doppler 谱, 用互乘方法补偿两幅图像的频谱幅度区别;

步骤 3 将二维频谱变换回图像域, 采用上面给出的最小二乘方法估计补偿其图像域二维相位区别;

步骤 4 用周期图法求图像功率随距离的变化函数, 再采用互乘法来补偿天线俯仰误差。

在上面 4 个步骤中, 步骤 1 主要补偿的是通道误差和方向图方位指向误差中的相位部分, 即

$G_c(f) \cdot G_{az}(f_d) \exp\left[j2\pi f_d \frac{\Delta x}{\gamma_x} + j2\pi f \frac{\Delta r}{\gamma_r}\right]$  的相位,

由于该相位是二维可分离的, 所以可以采用(11. a)的模型; 步骤 2 主要补偿这两种误差的幅度部分; 步骤 1 和 2 共同完成对两个图像的点扩散函数的补

偿; 步骤 3 主要用于补偿两幅图像的干涉相位和方向图俯仰指向误差中的相位部分; 步骤 4 用来补偿方向图俯仰指向误差中的幅度部分。

这种补偿方法的优点是充分考虑到了各种非理想因素, 对不同类型的误差在不同的域进行补偿, 可以获得更好的补偿效果, 而且不需要迭代。

### 3 实际数据处理结果

我们采用机载三通道 SAR 系统录取的实测数据进行地面运动目标显示(GMTI)信号处理实验。3 个天线孔径平行于载机轴向排列, 中间的孔径发射信号, 所有孔径同时接收回波信号。系统载波波长为 0.03 m, 系统带宽为 40 MHz, 单个孔径的长度为 0.551 m, 两孔径间距为 0.559 m, 重复频率为 1000 Hz, 飞机速度为 115 m/s。图像场景中包含了农田、建筑、公路和实际的运动目标, 全孔径处理时图像的距离和方位分辨率分别为 4 m 和 0.3 m(理论分析和实验结果表明, 相位补偿的性能和图像分辨率并没有直接的关系, 它实际上更取决于地面的斜率)。

采用上面的处理步骤对两个天线孔径的两幅 SAR 复图像进行处理。图 2(a)和(b)分别给出二维频域干涉相位和最小二乘算法平滑后的二维频域干涉相位; 图 3(a)和(b)分别给出图像域干涉相位和最小二乘算法平滑后的图像域干涉相位; 图 4(a)和(b)分别给出原始 SAR 图像和相消后的 SAR 图像。注意在图 2, 3 中灰度表示的范围实际上不是  $-\pi \sim \pi$ , 而是一个更小的范围, 其目的是使相位的变化更加清楚。在图 2(b)和图 3(b)中, 为了更清楚地显示平滑后的相位, 不仅给出了灰度图, 还给出了等相位线。在图 2(a)中频率域相位图中归一化频率为  $-0.22$  附近存在一条干扰的带子, 在图 4 的图像域相位图中存在一些运动目标和低散射区域, 它们的相位和其他杂波明显不同, 如果采用一般的局部平滑方法, 这些区域的相位估计会出现明显的偏差。

经过这样的处理, 比较图 4(a)和(b)可以得到, 整个图像在相消后平均功率下降了 17.94 dB(即图像相消比为 17.94 dB)。图 4(a)中箭头所指示的是一幢钢结构建筑, 相消后平均功率下降了 28.25 dB, 说明该方法可以将 SAR 图像中的连片强

杂波抑制 28 dB 以上。在相消后的图中，我们可以  
看到一些白色的亮点，经过和场景记录信息对照，

发现绝大部分目标是公路上的车辆目标，另外少数  
的一些则是强杂波剩余。

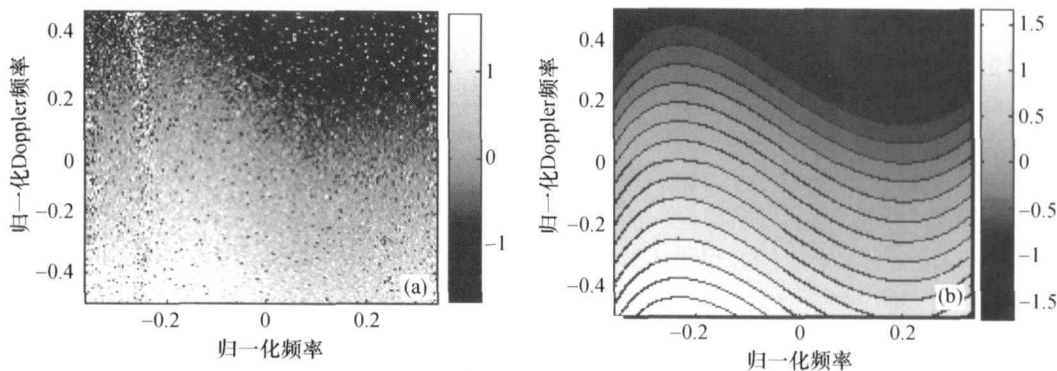


图 2 二维频域干涉相位

(a) 原始的二维频域干涉相位；(b) 平滑后的二维频率干涉相位(含等相位线)

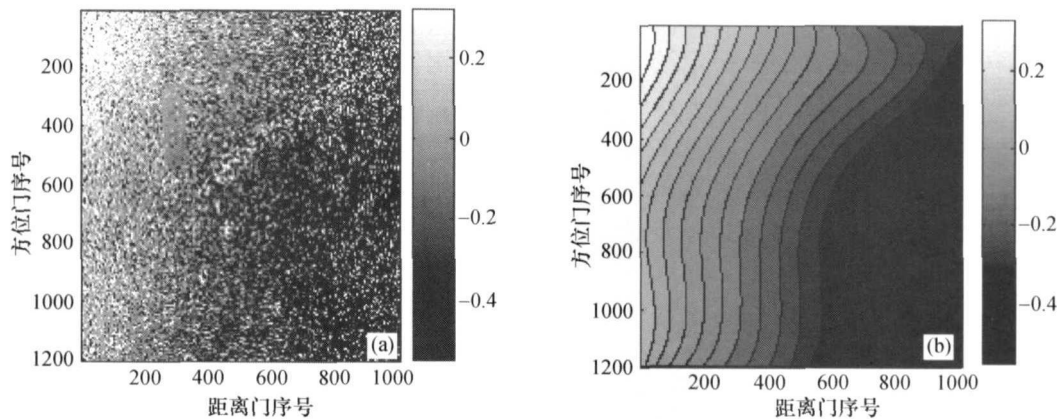


图 3 图像域干涉相位

(a) 原始图像域干涉相位；(b) 平滑后的图像域干涉相位(含等相位线)

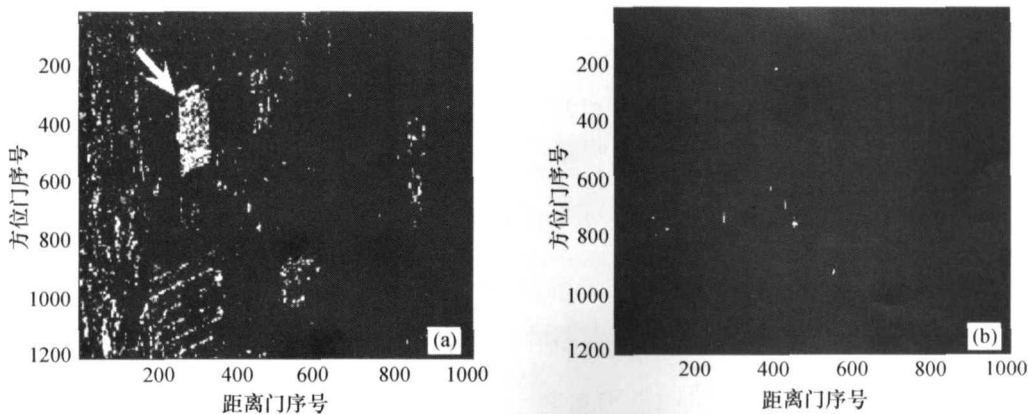


图 4 相消前后的 SAR 图像

(a) 原始 SAR 图像；(b) 相消后的 SAR 图像

为了判断算法流程中的4个步骤的必要性,我们尝试去掉其中某一个步骤,观察其对相消比的影响.只去掉二维频率域的相位补偿(步骤1),整个图像的相消比变为6.05 dB;只去掉二维频率域的幅度补偿(步骤2),相消比变为14.04 dB;只去掉二维图像域的相位补偿(步骤3),相消比变为14.00 dB;只去掉天线俯仰指向误差补偿(步骤4),相消比变为17.91 dB.可以看到,步骤1是非常重要的,没有步骤1相消比将下降10 dB以上,步骤2和步骤3也比较重要,而步骤4似乎是可有可无的,它对图像的相消比影响不大.这是因为我们的天线安装非常近,天线的方向图指向误差非常小.也许在某些情况下(比如两个天线孔径分别安装在飞机的不同位置),步骤4可以起到明显的作用.在这4个步骤中,步骤1和2使两个图像具有相同的或者相似的二维频谱,它们可以明显提高图像域的信号相关性.只有二维频谱相同,才能精确估计图像域的相位,才能进行步骤3和步骤4.所以在这4个步骤中步骤1和2是可以交换的,步骤3和4也是可以交换的.其他的步骤交换会带来杂波抑制能力的下降,仿真处理实验也证实了这种观点.

对于这些数据,我们也采用文献[2,3]中Soumekh提出的子空间方法进行了实验,采用不同的子空间维数进行处理,最好的情况下杂波的相消比只能达到11 dB左右.采用文献[4]的二维频域迭代方法,其相消比也只能达到13 dB.说明仅仅依靠单个域是难以对误差进行非常有效的补偿的.

## 4 结论

沿航向干涉方法可以进行运动目标检测和测速.动目标的检测依靠两幅SAR图像相消来提高

信杂比.为了提高相消比,必须补偿两个接收成像系统的误差,提高静止场景图像的一致性(相干性).本文分析了SAR图像对存在的4种基本形式的误差,提出了不同类型误差应该在不同域进行补偿的观点,并给出一种基于最小二乘思想的二维相位补偿算法和一种完整的SAR图像误差补偿的算法流程.采用这种算法流程,每一种误差都可以在其最适当的域进行补偿,且不需要迭代处理.采用机载三通道实际测量的SAR数据处理实验证实了该方法的有效性.对于地面钢结构建筑的强杂波,杂波抑制比可以达到28 dB.由于参数估计中起作用的主要部分是杂波的功率,补偿没有使运动目标的差异出现明显下降,所以不会将低速目标当成误差滤掉,这是最小二乘方法的一个明显的优点.此外,我们对处理流程的各个步骤的作用也进行了分析和比较.

## 参 考 文 献

- 1 Schwäbisch M, Geudtner D. Improvement of phase and coherence map quality using azimuth prefiltering: Examples from ERS-1 and X-SAR. 1995 Internal Geoscience and Remote Sensing Symposium, Firenze, Italy, 1995. New Jersey: IEEE, 1995, 205-207
- 2 Soumekh M. Moving target detection in foliage using along track monopulse synthetic aperture radar imaging. IEEE Trans Image Processing, 1997, 6(8): 1148-1163
- 3 Soumekh M. Signal subspace fusion of uncalibrated sensors with application in SAR and diagnostic medicine. IEEE Trans Image Processing, 1999, 8(1): 127-137
- 4 Ender JH. The airborne experimental multi-channel SAR system AER-II. 1998 EUSAR Conf Proceedings, Köln, Germany, 1998, London: IEE, 1998, 49-52