

快速分解后向投影 SAR 成像的自聚焦算法研究

李浩林* 陈露露 张磊 邢孟道 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: SAR 图像的自聚焦处理依赖图像域与距离压缩相位历程域之间的傅里叶变换对(Fourier Transform Pairs, FTP)关系。与频域算法不同,时域算法下的这种 FTP 关系不仅复杂,且难以获取。为了兼顾图像快速重建和自聚焦处理,该文首先对快速分解后向投影(Fast Factorized Back-Projection, FFBP)算法进行必要的改进和适当的优化处理,提出了 IFFBP(Improved FFBP, IFFBP)算法,为自聚焦算法的使用奠定了基础。其次,针对数据处理的实际需求,该文提出了一种结合中等精度惯导粗补偿、嵌套相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocus, PGA)精补偿的 IFFBP 算法处理流程。最后,通过仿真实验和实测数据处理验证该文方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 快速分解后向投影; 虚拟极坐标系; 相位梯度自聚焦; 运动补偿

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)04-0938-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00011

Study of Autofocus Method for SAR Imagery Created by Fast Factorized Backprojection

Li Hao-lin Chen Lu-lu Zhang Lei Xing Meng-dao Bao Zheng

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The Fourier Transform Pairs (FTP) between the image domain and its corresponding range-compressed phase history domain is critical for autofocus. Different from the frequency-domain algorithms, this requirement of FTP is both complicated and difficult to be met in the time-domain algorithms. For a swift and effective reconstruction and autofocus processing of imagery created by the time-domain algorithm, the necessary improvement and optimization in the Fast Factorized Back-Projection (FFBP) is performed, presenting an Improved FFBP (IFFBP) algorithm further. Through the pseudo-polar coordinate system, the IFFBP is able to pave the way for autofocus application. Also, in view of the practical requirements for data processing, the IFFBP uses a moderate-accuracy Inertial Measurement Unit (IMU) to achieve a coarse compensation, and combines with the Phase Gradient Autofocus (PGA) to make a fine compensation. Finally, the simulation results and the collected data sets verify and validate the proposed approach.

Key words: SAR; Fast Factorized Back-Projection (FFBP); Pseudo-polar coordinate system; Phase Gradient Autofocus (PGA); Motion compensation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种主动的信息探测工具,通过发射宽带信号实现距离维高分辨^[1],同时利用天线与目标相对运动产生的多普勒带宽实现方位维高分辨^[2]。对于机载 SAR,特别是无人机 SAR 来说,由于平台质量轻且飞行高度低,易受到气流扰动的影响而偏离理想航迹。为了避免图像散焦和几何失真,运动补偿的精度通常需要达到亚波长级,这对于大多数定位或运动测量系统来说是极为苛刻

的。因此,除了合理利用定位或运动测量系统记录的信息对数据进行补偿,成像算法还需要结合自聚焦实现对残余相位误差或包络误差的估计和校正。典型的频域 SAR 成像算法包括 R-D 算法、CS 算法及其衍生算法和 ω K 算法等。R-D 算法是一种高效的、成熟的成像算法;然而该算法难以解决二次距离压缩(SRC)对方位频率的依赖性,其在大斜视角或长孔径成像场合的应用受到限制。CS 及其衍生算法可对信号进行一定的尺度变化,通过精确的补偿函数实现 SRC;但限于窄波束假设和忽略 SRC 与距离向的依赖关系,该算法结合自聚焦在大斜视角或宽波束成像场合的应用受到限制^[3]。 ω K 算法利用

2013-01-05 收到, 2013-12-11 改回

国家“十二五”预研项目(51307030102)资助课题

*通信作者: 李浩林 lihaolin322@163.com

Stolt 插值精确地校正了距离方位耦合, 适用于近场、超宽带等复杂成像场合; 然而该算法对系统采样率的要求较高, 且插值处理对包络误差形式的影响较大^[4]。

时域后向投影的本质是天线相位阵列沿特定方向进行波束形成^[5], 通过沿斜距历程的积分实现成像网格上各像素点能量的积累。后向投影(Back-Projection, BP)算法理想地解决了距离方位耦合的问题, 适用于大相干积累角或者非线性航迹等复杂成像几何下的图像重建^[6], 且聚焦后的图像不存在几何失真。基于孔径分解和递归融合, 快速分解后向投影(Fast Factorized BP, FFBP)算法^[7,8]是对 BP 算法的快速精确实现。由于时间复杂度接近频域算法, FFBP 算法适用于大数据规模的成像场合。在开展基于回波数据的运动补偿时, 目前广泛使用的自聚焦方法主要有相位梯度自聚焦^[9](Phase Gradient Autofocus, PGA)、图像偏移及最大对比度自聚焦等。从成像原理上看, 频域算法依靠傅里叶变换重建图像, 图像域与距离压缩相位历程域(以下简称相位历程域)之间固有存在傅里叶变换对(Fourier Transform Pairs, FTP)关系。基于这种属性, 频域算法能够与自聚焦紧密结合, 通过相位历程域的相位估计和校正实现图像的良好聚焦。然而, 时域算法依靠积分重建方位维图像, 图像域与相位历程域之间的 FTP 关系复杂且难以获取。因此, 时域算法的自聚焦处理是目前亟待解决的问题。文献[10]以最大图像锐度作为自聚焦的优化指标, 通过求解聚焦性能代价函数估计运动误差; 然而该方法涉及高维参数优化搜索, 运算效率低, 其实用性受限。文献[11]使用波束形成(等价于后向投影)在距离-正弦角网格上重建图像, 指出在小角域条件下正弦角域与方位时域近似为 FTP 关系, 并验证了该方法结合 PGA 恢复图像的可能性; 然而该方法并未从根本上解决运动误差较大时的图像快速重建问题。

为了实现快速的图像重建和有效的自聚焦处理, 本文提出了一种结合中等精度惯导粗补偿、嵌套 PGA 精补偿的 FFBP 自聚焦算法。首先, 根据惯导记录的信息解算斜距误差, 构造相位误差和包络误差的补偿函数, 然后对回波数据进行粗补偿。其次, 为了建立图像域与相位历程域之间的 FTP 关系, 本文创新引入了虚拟极坐标系(距离-正弦角坐标系), 提出了 IFFBP(Improved FFBP)算法, 为自聚焦的使用奠定基础。再次, 对于 IFFBP 算法重建的虚拟极坐标下的全孔径图像, PGA 对其进行残余相位误差的估计和补偿。本文将 PGA 合理地嵌入到 IFFBP 算法的直角坐标系变换之前, 实现了 PGA

与 IFFBP 算法紧密结合, 适用于大数据规模 SAR 成像自聚焦处理。最后, 通过仿真实验和实测数据的处理验证了本文方法的可行性和有效性。

2 虚拟极坐标系下的方位脉冲响应

如图 1 所示, 平台以速度 v 沿 x 方向匀速直线飞行, 形成以 O 为中心、长度为 L 的合成孔径。令 t_m 为慢时间, 则天线相位中心坐标可表示为 $X = vt_m$ 。以 O 为原点建立极坐标系, 若 P 点位于 (r_p, θ_p) , 则天线相位中心到 P 点的瞬时斜距为

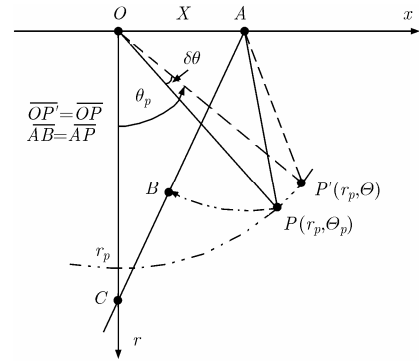


图1 投影几何关系

$$R(r_p, \theta_p; X) = \sqrt{r_p^2 + X^2 - 2r_p X \sin \theta_p} \quad (1)$$

假设天线发射线性调频信号, 其中心频率 f_c , 信号带宽为 B , 则对回波信号进行距离脉冲压缩

$$s_{MF}(\hat{t}; X) = \varepsilon_p \cdot \text{sinc}[B(\hat{t} - \Delta\hat{t})] \cdot \text{rect}(X/L) \cdot \exp(-j2\pi f_c \Delta\hat{t}) \quad (2)$$

其中 ε_p 为 P 点的常值后向散射系数, $\text{rect}(\cdot)$ 为窗函数, \hat{t} 为快时间, $\Delta\hat{t} = 2R(r_p, \theta_p; X)/c$ 为回波延时。式(2)获得了 sinc 状距离脉冲响应, 下面将推导 P 点在极坐标系下的方位脉冲响应。

沿斜距历程 $R(r_p, \theta; X)$ 对 θ_p 邻域内的能量进行相干积累, 则 P 点的方位脉冲响应为

$$\begin{aligned} s(r_p, \theta) &= \int_{X \in L} s_{MF} \left[\tau = \frac{2R(r_p, \theta; X)}{c}; X \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} R(r_p, \theta; X) \right] dX \\ &= \int_{X \in L} \varepsilon_p \cdot \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(r_p, \theta; X) \right] dX \quad (3) \end{aligned}$$

其中 λ 为波长, $\Delta R(r_p, \theta; X)$ 为投影斜距。

假设雷达工作在远场时有 $X \ll r_p$ 成立, 为了进一步推导式(3)的解析表达, 首先需要对 $\Delta R(r_p, \theta; X)$ 进行关于 X 的二阶泰勒级数展开:

$$\Delta R(r_p, \Theta; X) = R(r_p, \Theta; X) - R(r_p, \Theta_p; X) \quad \Delta\theta < 4Q \quad (10)$$

$$\approx -(\Theta - \Theta_p)X - \frac{\Theta^2 - \Theta_p^2}{2r_p} X^2 \quad (4)$$

其中变量 Θ 为方位角 θ 的正弦值, 即 $\Theta = \sin \theta$; 同理, $\Theta_p = \sin \theta_p$ 。为了便于下文使用、更好地突出与极坐标系 (r, θ) 的关联性, 本文将 (r, Θ) 命名为虚拟极坐标系。

若 $\Delta R(r_p, \theta; X)$ 可以忽略 X^2 及高次项, 则式(3)可简化为

$$s(r_p, k_\Theta) = \int_{X \in L} \varepsilon_p \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi(\Theta - \Theta_p)}{\lambda} X \right] dX$$

$$= \int_{X \in L} \varepsilon_p \cdot \exp(-jk_\Theta X) dX \quad (5)$$

其中 $k_\Theta = 4\pi(\Theta - \Theta_p)/\lambda$ 对应角波数。

将式(5)由 r_p 距离单元扩展至所有距离单元, 得到的后向投影重建图像为

$$I(r, k_\Theta) = \int_{X \in L} \varepsilon_p \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi(\Theta - \Theta_p)}{\lambda} X \right] dX$$

$$= \int_{X \in L} \varepsilon_p \cdot \exp(-jk_\Theta X) dX \quad (6)$$

值得注意的是, 式(6)建立了 k_Θ 与 X 之间的傅里叶变换关系, 实现了图像的方位聚焦。其中 k_Θ 对应图像域, X 对应距离压缩相位历程域(以下简称相位历程域)。显然, 式(6)给出了图像域与相位历程域之间的 FTP 关系, 这对自聚焦来说是至关重要的。相反地, 如果缺少虚拟极坐标系, 现有的时域算法(如 BP 算法和 FFBP 算法)的这种 FTP 关系是复杂且难以获取的。因此, 虚拟极坐标系是时域算法下自聚焦的前提条件。

下面将推导式(4)忽略 X^2 项约束条件。根据文献[10], 当式(4)的线性分量引起的距离徙动小于一个距离分辨单元时, 可以忽略 X^2 及高次项对 $\Delta R(r_p, \theta; X)$ 的贡献。由于孔径两端对应线性分量的最大值, 则

$$|\Theta - \Theta_p|(L/2) < \rho_r \quad (7)$$

其中 $\rho_r = c/2B$ 为距离分辨率。

假设 θ 位于 θ_p 的 $\delta\theta$ 邻域内, 即 $\theta = \theta_p + \delta\theta$ 。当 $\delta\theta$ 足够小时, 存在 $\sin \delta\theta \approx \delta\theta$ 和 $\cos \delta\theta \approx 1$ 。因此, $|\Theta - \Theta_p|$ 可简化为

$$|\Theta - \Theta_p| = |\sin(\theta_p + \delta\theta) - \sin \theta_p| \approx \cos \theta_p \cdot |\delta\theta| \quad (8)$$

将式(8)代入(7), 则

$$|\delta\theta| < 2Q\rho_\theta \quad (9)$$

其中 $Q = f_c/B$ 为中心频率带宽比, $\rho_\theta = \lambda/(2L \cos \theta_p)$ 为角分辨率^[5]。考虑到 $\delta\theta$ 可正可负的双边特性, 则

其中 $\Delta\theta$ 为角分辨单元数目。

由式(10)可知, 当 P 点的能量集中在 θ_p 附近的 $4Q$ 个角分辨单元时, 式(4)可以忽略 X^2 项及高次项, 并得到如式(6)所示的理想方位聚焦以及图像域与相位历程域之间的 FTP 关系。如果将式(10)推广至存在运动误差的情况, 可以得到如下结论: 当运动误差引起的图像散焦小于 $4Q$ 个角分辨单元时, 后向投影重建的图像仍满足式(6)所示的 FTP 关系, 从而初步满足自聚焦的使用条件, 该部分内容将在下文做进一步说明。

3 FFBP 算法的改进与优化

FFBP 算法将 BP 积分划分为有限、等长子孔径上的分步、分段积分。在初始阶段, FFBP 算法按照一定系数将全孔径分解成若干较短的子孔径, 并将子孔径对应的相位历程数据后向投影到以其孔径中心为坐标原点的局部极坐标系。在最后阶段, 通过坐标系变换得到直角坐标系下 2 维全分辨率图像。然而, 无论极坐标系还是直角坐标系, FFBP 算法重建的图像均无法提供图像域与相位历程域之间的 FTP 关系, 因此无法满足自聚焦的使用条件。为了实现 FFBP 算法框架下的自聚焦处理, 有必要对 FFBP 算法的成像坐标系进行改进。此外, 本节还通过合理近似减小 FFBP 算法的运算量, 在兼顾算法精度的同时提高运算效率。区别于 FFBP 算法, 本文将改进、优化后的 FFBP 算法称之为 IFFBP 算法。

3.1 FFBP 算法的改进

在第 2 节的启发下, IFFBP 算法将采用 (r, Θ) 坐标系代替 (r, θ) 坐标系作为图像重建和融合平面。对虚拟极坐标系而言, 变量 Θ 为视角 θ 的正弦值。而根据多普勒 $f_d = 2v \sin \theta / \lambda = 2v \cdot \Theta / \lambda$, Θ 与 f_d 成正比, 因此虚拟极坐标系在某种意义上等价于距离-多普勒域。值得注意的是, 如果 IFFBP 算法统一地沿着合成孔径中心到场景中心的视线方向建立坐标系, 即使使用 (r, Θ) 坐标系作为图像重建平面, 非方位向的图像散焦仍然限制自聚焦的使用^[10]。借鉴 PFA 沿视线插值的经验, 沿视线插值可以起到旋转成像场景的作用, 从而获得沿方位向散布的脉冲响应函数^[2]。因此, IFFBP 算法除了采用虚拟极坐标系为自聚焦提供 FTP 关系之外, 还需要沿各个子孔径中心到场景中心的视线方向建立局部虚拟极坐标系, 以确保运动误差引起的图像散焦沿方位向, 并为自聚焦提供最优的相位估计方向。关于 (r, Θ) 坐标系对图像质量影响的问题, 文献[12]通过理论分析和

仿真实验对此给出了详细的说明, 验证了虚拟坐标系不但能够有效地减少运算量, 而且对图像质量几乎没有影响。因此, 本文将直接引用该结论, 不再进行重复论证。

为了便于描述, 本文定义变量的下脚标“ i ”为第 i 处理阶段、上角标“ k ”为第 k 个子孔径。如图 2 所示, C 为成像场景中心, 第 i 处理阶段第 k (假设 k 为偶数) 个子孔径的中心为 $X_{0_i}^{(k)}$, 到 C 的视线角为 $\theta_{0_i}^{(k)}$; 第 $k-1$ 个子孔径的中心为 $X_{0_i}^{(k-1)}$, 到 C 的视线角为 $\theta_{0_i}^{(k-1)}$ 。假设 FFBP 算法进行基 2 图像融合, 则第 $i+1$ 处理阶段第 $k/2$ 个子孔径的中心为 $X_{0_{i+1}}^{(k/2)}$, 到 C 的视线角为 $\theta_{0_{i+1}}^{(k/2)}$, 其中 $X_{0_{i+1}}^{(k/2)} = (X_{0_i}^{(k-1)} + X_{0_i}^{(k)})/2$ 。图 2 直观展示了坐标系 a 和坐标系 b 向坐标系 c 的融合过程, 而本质上实现 $\theta_{0_i}^{(k-1)}$ 和 $\theta_{0_i}^{(k)}$ 方向波束在 $\theta_{0_{i+1}}^{(k/2)}$ 方向的波束形成。图像融合后, 孔径长度加倍, 角分辨率加倍, 即角域网格被进一步细化, 如图中虚线所示。

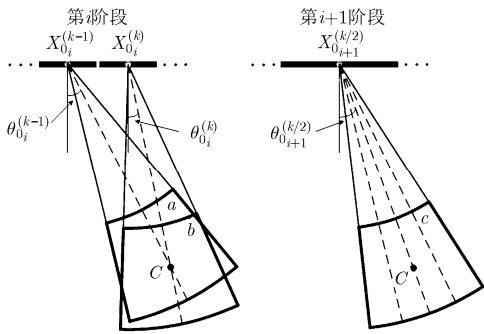


图 2 图像融合前后的虚拟极坐标系

以第 i 处理阶段第 k 个子孔径为例, 沿视线 $\theta_{0_i}^{(k)}$ 方向建立局部虚拟极坐标系, 则角域成像范围

$$\Theta^{(k)} \in \left[\frac{\lambda}{2v} \left(f_0^{(k)} - \frac{B_d}{2} \right), \frac{\lambda}{2v} \left(f_0^{(k)} + \frac{B_d}{2} \right) \right] \quad (11)$$

其中 $f_0^{(k)} = 2v \sin \theta_{0_i}^{(k)} / \lambda$ 为该孔径的多普勒中心, B_d 为角域信号带宽。根据式(6)对第 k 个子孔径数据进行图像重建, 则子图像可表示为

$$I^{(k)}(r, k_{\Theta^{(k)}}) = \int_{X_{0_i}^{(k)} - d/2}^{X_{0_i}^{(k)} + d/2} \varepsilon_p \cdot \exp(-jk_{\Theta^{(k)}} X) dX \quad (12)$$

其中 d 为第 i 处理阶段的子孔径长度, $k_{\Theta^{(k)}}$ 为第 k 个子孔径对应的角波数。根据第 2 节推导的 FTP 关系, $I^{(k)}$ 对应的相位历程域信号可表示为

$$H^{(k)}(r, t^{(k)}) = \int_{[f_0^{(k)} - B_d/2]v/2\pi}^{[f_0^{(k)} + B_d/2]v/2\pi} I^{(k)}(r, k_{\Theta^{(k)}}) \cdot \exp(jk_{\Theta^{(k)}} t^{(k)}) dk_{\Theta^{(k)}} \quad (13)$$

其中 $t^{(k)}$ 为第 k 个子孔径时间, 其离散时间间隔和孔径中心时刻分别为 $1/B_d$ 和 $X_{0_i}^{(k)}/v$ 。

3.2 FFBP 算法优化

3.2.1 投影斜距的线性拟合 如图 3 所示, 以第 $i+1$ 阶段的第 $k/2$ 个子孔径的中心为原点建立局部虚拟极坐标系, 并将第 i 阶段的第 $k-1$ 个子孔径数据向当前坐标系投影, 则孔径位置 $X_{0_i}^{(k-1)}$ 到第 (i, j) 像素点的投影斜距为

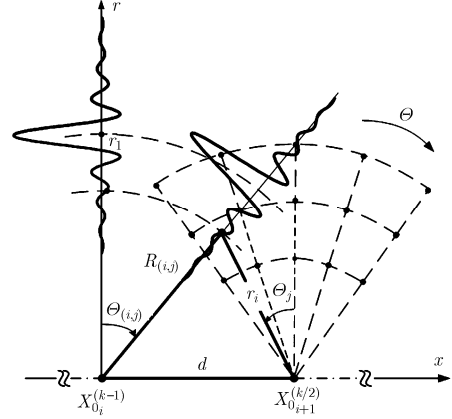


图 3 虚拟极坐标系下投影斜距和投影视角几何

$$R_{(i,j)} = \sqrt{r_i^2 + d^2 - 2dr_i \Theta_j}, \quad i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J \quad (14)$$

其中 I 和 J 分别为距离和角域网格的像素点数。

由式(14)可知, 孔径位置到成像网络的每个像素点的斜距计算都需要进行开根号操作, 显然这种处理方式在大数据量的情况下是非常低效的。针对这个问题, IFFBP 算法沿 r 方向对斜距进行线性拟合, 通过分维处理的方式避免式(14)的逐点计算, 在保证斜距近似精度的同时提高运算效率。在第 $i+1$ 处理阶段, 以一个角域位置 Θ_{j_0} 为例, 计算投影斜距 $R_{(i, j_0)}$ 的具体步骤如下:

步骤 1 沿 r 方向选择 r_2 和 r_{I-1} 两个距离位置样本, 根据式(14)计算得到 $R_{(2, j_0)}$ 和 $R_{(I-1, j_0)}$;

步骤 2 进行线性近似, 计算自变量 $R_{(i, j_0)}$ 相对变量 r_i 的斜率

$$K_{j_0} = \frac{R_{(I-1, j_0)} - R_{(2, j_0)}}{r_{I-1} - r_2} \quad (15)$$

步骤 3 将 r_i 代入函数表达式(16)

$$R_{(i, j_0)} = K_{j_0} r_i, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (16)$$

该方法通过两次开根号操作实现第 J_0 维斜距 $R_{(i, j_0)}$ 的 1 维线性拟合。在进行远场、高波段信号处理时, 这种线性近似是非常有效的, 其近似误差约为波长的 10^{-6} , 足以满足处理精度的要求^[12]。

3.2.2 插值核的选用 同现有的 FFBP 算法一样, IFFBP 算法通过距离插值和角域插值实现图像的递

归融合。然而,为更好地兼顾图像质量和运算效率,IFFBP算法根据不同阶段的精度需求选用不同的插值核进行处理。

距离插值通过升采样实现:距离频域两端补零、距离逆傅里叶变换、低阶插值。为了得到较好的插值效果,升采样倍数应大于 $10^{[13]}$,导致升采样后的数据存储会消耗较大的内存资源。但由于升采样方法的运算效率比sinc插值高,本文在进行距离插值时以牺牲一定的内存资源为代价换取运算效率的提高。

相比距离插值,角域插值对插值核的选取相对复杂。对VHF波段数据,文献[7]角域插值完全由最近邻点插值(nearest neighbor interpolation)实现,然而这种方法在进行高波段数据处理时的效果并不理想。为了解决这个问题,IFFBP算法在不同阶段的角域插值核选用如下:

(1)在初始阶段,只进行距离插值,无需角域插值,完成距离压缩数据向局部虚拟极坐标系的后向投影;

(2)在处理阶段,先前阶段的子孔径不断融合成为当前阶段子孔径。而在该阶段的初期,子孔径的角域采样点数较少,如果插值精度不足,那么随着递归融合的不断进行,插值误差会不断地积累、放大,最终会影响图像质量。为此,IFFBP算法在处理阶段采用截断的8点加权sinc插值以保证插值精度,以牺牲一定的算法效率为代价换取图像质量的提高^[14];

(3)在最后阶段,将虚拟极坐标系下的全孔径图像变换到直角坐标系。由于不涉及图像融合操作,该阶段采用精度相对较低的最近邻点插值,以牺牲一定的图像质量为代价换取运算效率的提高。

4 IFFBP算法的自聚焦处理

4.1 加权相位梯度自聚焦

相位梯度自聚焦(Phase Gradient Autofocus, PGA)是SAR成像运动补偿中最常用的自聚焦方法之一。PGA利用相位误差在不同距离单元之间的冗余性来抑制噪声扰动的影响,从而提高相位估计的精度和鲁棒性^[9]。WPGA^[15](Weighted PGA)是对PGA的一种加权优化实现,其基本原理:考虑到不同信杂比(SCR)样本对估计的贡献不同,通过加权增强高SCR样本对估计的贡献,同时抑制低SCR样本的扰动。通过对SCR加权,有效降低PGA对样本数量的要求,从而提高了相位估计的精度和收敛速度。

假设IFFBP算法已经完成了所有的子图像融合

操作,则虚拟极坐标系下的全孔径图像为

$$I_{\text{polar}}(r, k_{\theta}^{(k)}) = \int_{X \in L} \varepsilon_p \cdot \exp(-jk_{\theta} X) dX \quad (17)$$

假设 $\phi(t)$ 为相位误差,则理想重建图像 I_{polar} 和相位误差 $\phi(t)$ 之间的关系可描述为

$$I'_{\text{polar}}(r, k_{\theta}) = I_{\text{polar}}(r, k_{\theta}) \odot \exp[j\phi(t)] \quad (18)$$

其中 I'_{polar} 为受运动误差破坏的全孔径图像,符号 \odot 表示关于方位时间的卷积。值得注意的是,式(18)中的 $\phi(t)$ 是距离非空变的,而当距离高分辨或者距离宽测绘时,需要考虑相位误差的距离空变性。这种情况可以通过相位历程数据的距离分块转化为式(18)所示的非空变模型,这里不再进行讨论。

根据傅里叶变换性质, I'_{polar} 对应的相位历程信号等于理想相位历程信号与相位误差指数项的乘积,即

$$\begin{aligned} H'(r, t) &= H(r, t) \cdot \exp[j\phi(t)] \\ &= \int I_{\text{polar}}(r, k_{\theta}) \exp[j\phi(t)] \cdot \exp(jk_{\theta} t) dk_{\theta} \end{aligned} \quad (19)$$

应用WPGA对 H' 进行相位估计,并得到 $\phi(t)$ 的估计值为

$$\hat{\phi}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t) \quad (20)$$

其中 $\Delta R(t)$ 为斜距误差的估计值。构造相位误差补偿项 $\exp[j\hat{\phi}(t)]$,并对 H' 进行校正;将校正后的相位历程数据变换到图像域,最终实现图像的良好聚焦。

4.2 自聚焦处理流程

第3节对FFBP算法进行了必要的改进和合理的优化,提出了IFFBP算法;4.1节介绍了WPGA的相位误差估计方法。值得注意的是,上述分析和推导是在运动误差不超过一个距离分辨单元的前提下展开的,即大部分运动误差可由惯导或GPS得以校正,而残余误差以相位误差的形式破坏了图像能量的相干积累,引起了沿方位向的图像散焦。为此,本节将提出一种结合中等精度惯导粗补偿、嵌套WPGA精补偿的IFFBP算法的处理流程,如图4所示。

第1部分:利用惯导记录的平台运动参数解算出斜距误差,构造包络和相位补偿函数,完成对数据的粗补偿,从而使斜距误差小于一个距离分辨单元。

第2,3,5部分为IFFBP算法成像处理单元,分别对应初始阶段、处理阶段和最后阶段。在初始阶段,按照一定的分解系数将全孔径分解成若干较短的子孔径,并将子孔径对应的距离压缩数据后向投影到以其孔径中心为原点的局部虚拟极坐标系;在处理阶段,通过2维插值实现图像的递归融合,

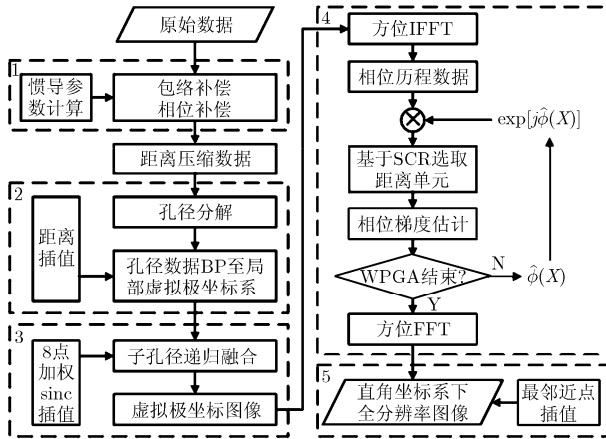


图4 结合惯导粗补偿、嵌套 WPGA 精补偿的 IFFBP 算法处理流程

直至获得虚拟极坐标系下的全孔径图像；在最后阶段，通过坐标系变换得到直角坐标系图像。

第4部分：在得到虚拟极坐标系下的全分辨率图像后，用WPGA对其进行相位误差估计及校正。

5 实验分析与验证

为了验证本文方法的有效性，下面使用X波段雷达参数进行SAR成像仿真，相关参数见表1。在40 m×40 m的成像区域内等间隔放置9个点目标。如图5所示。对回波数据加入如图6实线所示的5阶斜距误差。由于仿真过程无需惯导补偿，加入的斜距误差应保证包络误差不超过一个距离分辨单元，以满足自聚焦对图像散焦方向的要求。使用IFFBP算法进行图像重建(不包含自聚焦处理过程)，成像结果如图5(a)所示。观察图5(a)，图像散焦宽度约为40个角域分辨单元。根据表1参数，当图像散焦宽度小于50个角域分辨单元时满足式(9)FTP关系的约束条件，因此可以使用本文方法进行自聚焦处理，估计的斜距误差如图5虚线所示，成像结果如图5(b)所示。由图6可见，估计的斜距误差曲线与加入的曲线基本保持一致，说明了相位估计的有效性。对比图5(a)，图5(b)中的9个点目

标的聚焦情况明显得到改善。为了给出定量说明，对图5中方框内的点目标进行方位脉冲响应分析，如图7所示，趋于sinc状的响应形式也说明本文方法的有效性。

表1 仿真参数

中心频率	9 GHz
信号带宽	720 MHz
Q	12.5
中心斜距	1000 m
距离/方位分辨率	0.2 m

下面将通过无人机正侧视SAR成像处理验证本文方法的可行性。该数据包含10620个脉冲回波，数据处理使用的距离采样点数为8192。中心斜距为9.7 km，距离/方位分辨率为1 m。使用IFFBP算法，但不包含自聚焦处理进行图像重建，其成像结果如图8(a)所示。使用本文方法(图4所示的处理流程)进行图像重建和自聚焦处理，其成像结果如图8(b)所示，斜距误差如图9所示。对比图8(a)和图8(b)，未进行运动补偿处理的图像不但存在方位散焦，而且存在严重的几何失真，如子场景B中所示的河流中的一处小洲。相比图8(a)，图8(b)对图像质量的改善明显，不仅消除了几何失真，还实现了图像的良好聚焦。由图9可知，无人机在短时间内的斜距误差变化接近40 m，说明了运动补偿的必要性。

为了直观说明本文方法对图像聚焦的改善情况，从图8中提取子场景A进行分析。而为了说明WPGA的精补偿作用，本实验开展结合中等精度惯导粗补偿的IFFBP算法成像处理(不包含自聚焦处理过程)。限于文章篇幅，这里仅给出该方法得到的子场景A的局部放大图，如图10(b)所示。对比图10(a)，图10(b)的惯导粗补偿对图像质量的改善明

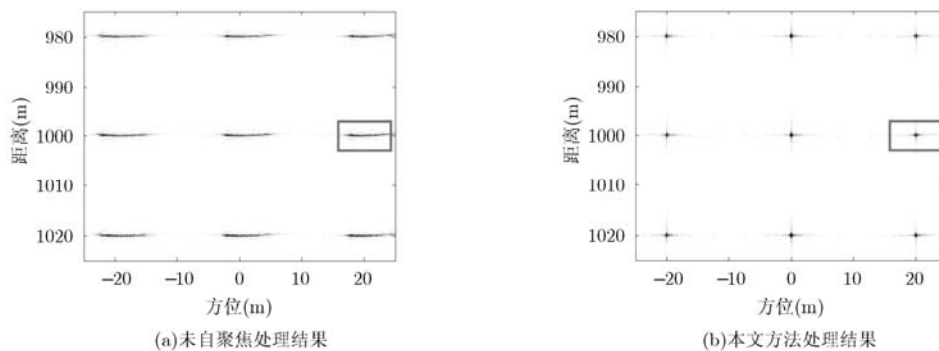


图5 成像结果对比

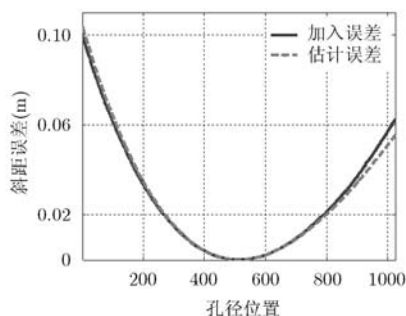


图 6 斜距误差曲线

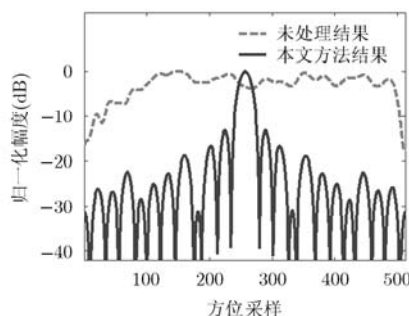
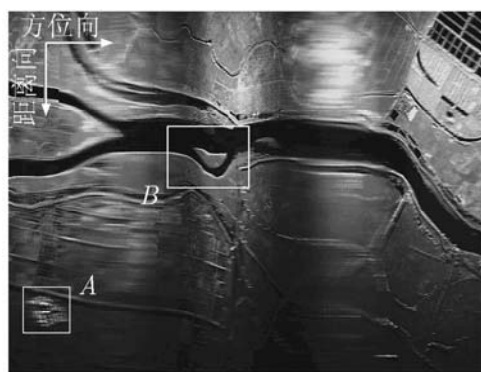


图 7 边缘点方位脉冲响应



(a) 未经运动补偿的IFFBP算法的成像结果



(b) 本文方法成像结果

图 8 成像结果对比

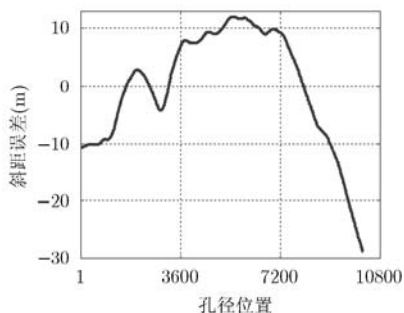
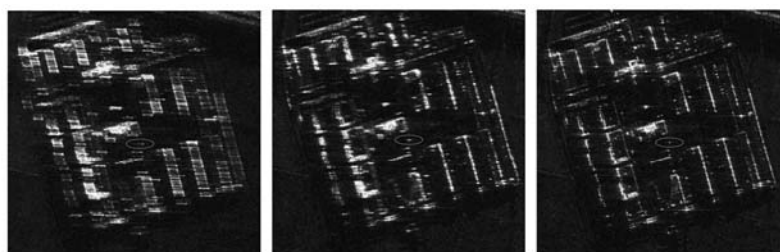


图 9 斜距误差



(a) 没有运动补偿

(b) 惯导+IFFBP算法

(c) 惯导+IFFBP算法+WPGA

图 10 子场景 A 的放大图对比

显。在 WPGA 的精补偿作用下，图 10(c)进一步减小了图像散焦，并提高了图像的对比度。为了定量评价 WPGA 对图像的改善情况，对图 10 中椭圆框内的特显点进行方位脉冲响应分析，如图 11 所示。显然，本文方法聚焦的点目标的能量更集中、旁瓣更低、响应形式更理想，也充分说明了自聚焦处理精补偿的有效性和必要性。

6 结束语

以兼顾图像快速重建和有效的自聚焦处理为目标，本文提出 IFFBP 算法和嵌套 PGA 的处理流程，取得比较理想的结果。IFFBP 算法在虚拟极坐标系下进行图像重建，建立了图像域与相位历程域间的 FTP 关系，为自聚焦的使用奠定基础。为了兼顾图

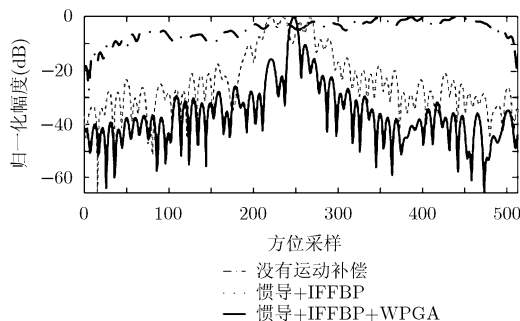


图 11 椭圆框中点目标方位脉冲响应

像质量和运算效率，本文还对 IFFBP 算法进行优化处理，包括投影斜距的 1 维线性近似和插值核的选择。最后，通过仿真实验和实测数据处理验证了 IFFBP 算法嵌套 PGA 的可行性和有效性。值得注意

的是, 仅在最后阶段之前进行自聚焦处理还会使图像中残余一定的高阶相位误差。因此, 如何将PGA递归地嵌入到IFFBP算法的不同阶段, 获得更理想的自聚焦效果将是以后工作的重点。

参考文献

- [1] 邓云凯, 陈倩, 祁海明. 一种基于频域子带合成的多发多收高分辨率 SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1082-1087.
Deng Yun-kai, Chen Qian, and Qi Hai-ming. A high-resolution imaging algorithm for MIMO SAR based on the sub-band synthesis in frequency domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1082-1087.
 - [2] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithm[M]. Boston, MA: Artech House, 1995: 81-200.
 - [3] Cumming I G and Wong F H. Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston, MA: Artech House, 2005: 461-463.
 - [4] Zhang Lei, Sheng Jia-lian, and Xing Meng-dao. Wavenumber autofocusing for highly squinted SAR imaging[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 1574-1588.
 - [5] Jakowatz C V, Wahl D E, and Yocky D A. Beamforming as a foundation for spotlight-mode SAR image formation by backprojection[J]. *SPIE*, 2008, 6970: 6970Q-1-6970Q-15.
 - [6] Vu V T, Sjögren T K, and Pettersson M I. Fast time-domain algorithms for UWB bistatic SAR processing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3): 1982-1994.
 - [7] Ulander L M H, Hellsten H, and Stenström G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 760-776.
 - [8] 李杨寰, 宋千, 王鹏宇. 多级多分辨快速后向投影成像算法[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 518-524.
Li Yang-huan, Song Qian, and Wang Peng-yu. Multi-stage multi-resolution fast back-projection imaging algorithm[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2011, 39(3): 518-524.
 - [9] Wahl D E, Eichel P H, and Ghiglia D C. Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution phase correction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 827-835.
 - [10] Joshua N A. An autofocus method for backprojection imagery in synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 104-108.
 - [11] Jakowatz C V and Wahl D E. Considerations for autofocus of spotlight-mode SAR imagery created using a beamforming algorithm[J]. *SPIE*, 2008, 7337: 73370A-1-73370A-9.
 - [12] 李浩林, 张磊, 杨磊. 一种改进的快速分解后向投影 SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(6): 1435-1441.
Li Hao-lin, Zhang Lei, and Yang Lei. A novel fast factorized back-projection algorithm for synthetic aperture radar imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(6): 1435-1441.
 - [13] Gorham L A, and Moore L J. SAR image formation toolbox for MATLAB[J]. *SPIE*, 2010, DOI: 10.1117/12.855375.
 - [14] Fröling P O and Ulander L M H. Evaluation of angular interpolation kernels in fast back-projection SAR processing[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 243-249.
 - [15] Ye Wei, Tat Soon yeo, and Bao Zheng. Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2487-2494.
- 李浩林: 男, 1987年生, 博士, 研究方向为SAR高分辨成像和运动补偿等。
- 陈露露: 女, 1990年生, 硕士, 研究方向为SAR成像与实时信号处理。
- 张磊: 男, 1984年生, 讲师, 研究方向为SAR、ISAR高分辨成像与运动补偿等。
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别等。
- 保铮: 男, 1927年生, 教授, 中国科学院院士, 研究方向为SAR成像和目标识别等。