

一种基于快速分解后向投影的条带 SAR 成像新方法

李浩林* 张磊 邢孟道 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 快速分解后向投影(Fast Factorized Back-Projection, FFBP)最初用于超宽带 SAR 成像,并在聚束 SAR 信号处理领域取得了巨大的成功。然而,由于积分孔径和角域升采样的限制,FFBP 算法难以直接用于条带 SAR 处理。为了提高 FFBP 算法在条带 SAR 处理的实用性,该文从积分孔径和角域波数带宽的角度出发,提出一种适用于条带 SAR 处理的重叠图像法。该方法极大地保留 FFBP 算法的运算效率,有效地避免因角域升采样带来数据量大的问题。最后,通过斜视条带 SAR 仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 后向投影积分; 快速分解后向投影; 积分孔径; 角波数带宽

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)08-1808-06

DOI: 10.11999/JEIT141633

Innovative Strategy for Stripmap SAR Imaging Using Fast Factorized Back-projection

Li Hao-lin Zhang Lei Xing Meng-dao Bao Zheng

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

Abstract: Fast Factorized Back-Projection (FFBP) is originally developed for Ultra-WideBand (UWB) Synthetic Aperture Radar (SAR), and it shows great success for spotlight SAR signal processing. However, its implementation is not straightforward for stripmap SAR due to the limitation of integration aperture and angular upsampling. To investigate the applicability of FFBP to stripmap SAR, this paper describes a reasonable implementation of overlapped-image method based on integration aperture and angular wavenumber bandwidth. This approach retains high efficiency of the original FFBP. Finally, the simulated squinted SAR data are utilized to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: SAR; Back-Projection (BP) integration; Fast Factorized Back-Projection (FFBP); Integration aperture; Angular wavenumber bandwidth

1 引言

条带 SAR 在运动过程中保持天线波束指向的固定,通过波束连续扫过观测场景实现高效的遥感测绘^[1]。典型的 SAR 成像方法包含频域算法和时域算法^[2,3]。随着硬件技术的发展和使用需求的提高, SAR 成像将不断面临严苛的成像环境,如高分辨^[4]、宽测绘^[5]和复杂航迹等^[6,7]。一方面,严重的距离-方位耦合极易导致频域算法的测绘范围受限,甚至无法实现图像聚焦。另一方面,频域算法对理想的阵列流形(直线航迹和沿迹均匀采样)的要求在实际应用中难以满足。相比之下,时域算法不但受非均匀的沿迹采样的影响^[8],还能实现图像的精确聚焦和宽幅测绘。

后向投影(Back-Projection, BP)是一种精确的时域算法,然而高的运算复杂度 $O(N^3)$ 限制其在数

据规模较大场合的应用。为此,一些能够加速 BP 积分的快速算法相继被提出,其中快速后向投影(Fast BP, FBP)^[9]和快速分解后向投影(Fast Factorized BP, FFBP)^[10]的运算复杂度分别为 $O(N^{2.5})$ 和 $O(N^2 \lg N)$ 。BP 积分是时域算法的核心,它是一个能量连续积累的过程,要求所有待重建的像素点位于同一个积分区间,即积分孔径。以聚束 SAR^[11]为例,成像场景在合成孔径时间内始终被波束覆盖,即待重建的所有像素点对应同一个积分孔径,因此时域算法能够直接用于聚束 SAR 处理。对于条带 SAR,成像场景中任意点目标不可能始终被波束覆盖,不同的像素点可能对应不同的积分孔径。如果在 BP 积分过程中引入积分孔径判断,并将当前孔径位置处的距离脉冲压缩回波数据投影至波束能够覆盖的像素点,BP 算法和 FBP 算法是能够用于条带 SAR 处理的,但是将 FFBP 算法拓展至条带 SAR 仍是一个严峻的挑战。文献[12]提出了在后向投影过程中引入波束宽度限制的思路。由于未给出实施细节且仿真实验仅停留在对 BP 算法的改进

2014-12-25 收到, 2015-03-23 改回, 2015-06-09 网络优先出版

国家自然科学基金(61301280)资助课题

*通信作者: 李浩林 lihaolin322@163.com

层面，文献[12]的借鉴性有限。文献[13]明确地指出 FFBP 算法难以直接用于条带 SAR 的原因，提出了一种基于二叉树的加窗分解 BP 算法，区别于文献[10]提出的 FFBP 算法。

以实现 FFBP 算法在条带 SAR 中的应用为目标，本文首先回顾了 FFBP 算法的基本原理，介绍了 FFBP 算法直接用于条带 SAR 处理的问题，如积分孔径和角域升采样等。然后，以积分孔径和角域波数带宽的恢复为出发点，本文提出了利用图像重叠法，并从原理上清楚地解释了该方法适用于条带 SAR 成像的原因。图像重叠法无需角域升采样，极大地保留 FFBP 算法的运算效率优势，具有先聚束处理、后聚束-条带处理的特点。最后，通过仿真实验验证了图像重叠法的可行性和有效性。

2 FFBP 算法概述

2.1 基本原理

雷达系统工作在斜视条带 SAR 模式，斜视角为 θ_{sq} 。假设雷达和观测场景位于 xyz 坐标系，平台以速度 v 沿 x 轴正方向运动。对于空间位置矢量为 \mathbf{a} 的点目标，雷达到点目标的距离可表示为 R ，则距离压缩后的基带信号可表示为

$$F(\tau, x; R) = w_{az}(\mathbf{a}; x) \text{sinc}[B(\tau - 2R/c)] \exp(-j\kappa_{rc}R) \quad (1)$$

其中 τ 为快时间， $w_{az}(\cdot)$ 为合成天线方向图，是关于雷达和目标位置的函数， B 为发射信号带宽， c 为光速， $\kappa_{rc} = 4\pi/\lambda_c$ 为距离波数中心， λ_c 为中心频率对应的波长。

本文使用 (r, α) 坐标系进行 FFBP 算法的公式推导，其中 r 定义为偏离子孔径中心的距离， α 为子孔径中心到像素点的连线与视线方向夹角 θ 的正弦值，即 $\alpha = \sin \theta$ 。初始阶段划分的子孔径数目为 $N_{sub}^{(1)} = 2^{G-1}$ ，其中 G 为大于 1 的整数，代表总的阶段数。假设第 g ($g = 1, 2, \dots, G$) 阶段的子孔径数目为 $N_{sub}^{(g)}$ ，每个子孔径的长度为 $l^{(g)} = L_a/N_{sub}^{(g)}$ 。相应地，子孔径中心的方位坐标为 $x_k^{(g)} = (u - N_{sub}^{(g)}/2 - 1/2) \cdot l^{(g)}$ 其中下角标“ k ”代表第 k 个子孔径，且 $k = 1, 2, \dots, N_{sub}^{(g)}$ 。每幅子孔径图像被重建在以其子孔径中心为原点的局部极坐标系，导致不同的子孔径图像位于不同的坐标系。为此，我们以 $\alpha_k^{(g)}$ 表示第 g 阶段、第 k 个极坐标系的角域划分。

在初始阶段，FFBP 算法将合成孔径划分为若干较短的子孔径，利用较少的脉冲便可以重建粗角分辨率的子孔径图像。子孔径的长度越短，FFBP 算法的运算效率越高^[10]；然而在实际处理时，子孔径的选取还需兼顾聚焦精度^[14]。如图 1 所示，以 $x_k^{(1)}$ 为原点建立局部极坐标系 $(r, \alpha_k^{(1)})$ ，则第 k 幅子孔径图像可以表示为

$$I_k^{(1)}(r, \alpha_k^{(1)}) = \int_{-l^{(1)}/2}^{l^{(1)}/2} F[\tau, \xi; R(r, \alpha_k^{(1)}; \xi)] \cdot \exp[j\kappa_{rc}R(r, \alpha_k^{(1)}; \xi)] d\xi \quad (2)$$

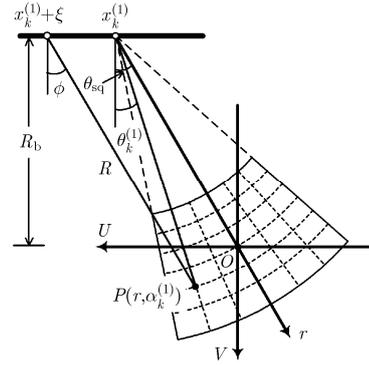


图 1 第 1 阶段的第 k 个子孔径的局部极坐标网格

其中 $R(r, \alpha_k^{(1)}; \xi)$ 为孔径位置 ξ 到像素点 $(r, \alpha_k^{(1)})$ 的距离。

第 2~ G 阶段为递归融合阶段，先前阶段的子孔径图像通过相干相加得到当前阶段的子孔径图像，即

$$I_k^{(g)}(r, \alpha_k^{(g)}) = \text{II} \left[I_{2k-1}^{(g-1)}(r, \alpha_{2k-1}^{(g-1)}) + I_{2k}^{(g-1)}(r, \alpha_{2k}^{(g-1)}) \right], \quad g = 2, 3, \dots, G \quad (3)$$

其中符号“II”表示相干融合，通常可通过距离和角域插值实现。随着子孔径长度的增加，子孔径的数目不断减少，子孔径图像的角域间隔被不断细化。在完成第 G 阶段的处理后，子孔径长度等于整个孔径的大小，局部极坐标图像可表示为 $I(r, \alpha) = I_1^{(G)}(r, \alpha_1^{(G)})$ ，而此时的局部极坐标系 $(r, \alpha_1^{(G)})$ 等价于全局极坐标系 (r, α) ^[15]。关于全局极坐标系，我们将在下一节给出说明。

在最后阶段，将极坐标系图像 $I(r, \alpha)$ 变换到直角坐标系，得到全空间分辨率图像 $I(U, V)$ 。

2.2 直接用于条带 SAR 处理的问题

2.2.1 积分孔径^[10] 明确的积分孔径(即积分限)是进行精确积分的一个重要环节。实际上，积分孔径与 SAR 系统的工作模式有关。对于聚束 SAR，每个孔径位置对像素点的形成均有贡献。所有像素点对应同一个积分限，因此积分孔径为整个孔径。对于条带 SAR，成像场景中的每个目标在合成孔径时间内不可能被天线波束一直照射。在进行 BP 积分时，不同的像素点可能对应不同的积分孔径。如果在进行 BP 积分时将距离压缩数据直接投影到整个成像网格，不但会引起波束宽度以外的像素点的能量的错误积累，影响成像质量，还会导致运算量的增加。因此，在进行条带 SAR 图像重建时，积分孔径还需针对不同的像素点做进一步确定。

2.2.2 角域升采样 当角域网格划分比较稀疏时，局部极坐标系具有低角域采样率的优势，这是 FFBP 算法能够利用 SAR 数据的冗余性来降低运算量的前提^[10,16]。此外，局部极坐标系还能满足图像融合对波数谱无模糊、无混叠的要求，这是 FFBP 算法使用局部极坐标系的主要原因。然而，局部极坐标

系既是联系孔径分解和递归融合的纽带，也是限制 FFBP 算法直接用于条带 SAR 处理的原因。

局部极坐标系之间的差异性导致不同的子孔径波数谱位于不同的波数空间，这给条带 SAR 角域采样需求的推导带来困难。全局极坐标系^[15]是以条带 SAR 的整个孔径的中心为原点建立的极坐标系，因此全局极坐标系只有一个。当 FFBP 算法递归融合至一个子孔径时，局部极坐标系等价于全局极坐标系。如果使用全局极坐标系用于图像重建，所有子孔径图像及其波数谱位于同一波数空间。根据全局极坐标系下的波数谱，我们能够反演出局部极坐标系下的角域采样需求。

文献[15]指出：聚束 SAR 的最大角域波数带宽为 $\Delta\kappa_\alpha^{\max} = \kappa_r^{\max} L_a$ ，其中 κ_r^{\max} 为最大距离波数；角域采样率 F_α 与合成孔径长度 L_a 成正比，与角域采样间隔 $\Delta\alpha$ 成反比。假设条带 SAR 包含 J 个完整的合成孔径，整个孔径的长度为 JL_a 。条带 SAR 全局极坐标系下无模糊的角域波数带宽为 $J\Delta\kappa_\alpha^{\max}$ ，角域采样率为 JF_α ，角域采样点数为 JQ 。换言之，若使用 FFBP 算法直接用于条带 SAR 处理，角域采样率需要提高到处理聚束 SAR 时的 J 倍。对于局部极坐标系，角域采样率越高，角域采样点数越多，角域网格划分得越细密。事实上，角域间隔的细化没有提供额外的有用信息，只是在信号处理层面为了得到无模糊的角域波数谱人为地进行局部极坐标系下的角域升采样处理，而这不可避免地引起数据量的提高。

3 条带 SAR 处理

3.1 积分孔径的判断

对于 FFBP 算法，初始阶段的子孔径图像质量直接决定了第 2~G 阶段的图像递归融合的精度。因此，在初始阶段的子孔径 BP 积分过程中需要引入积分孔径判断。根据 SAR 系统的工作模式的不同，积分孔径的计算需要做出相应的调整。由于条带 SAR 具有固定的波束指向，积分孔径与天线波束指向和天线方位波束宽度 θ_{BW} 紧密相关。以图 1 中的 P 点为例，假设 P 点的极坐标为 $(r, \alpha_k^{(1)})$ ，其中 $\alpha_k^{(1)} = \sin \theta_k^{(1)}$ 。当天线到 P 点的连线方向 ϕ 和视线方向 θ_{sq} 的夹角不超过 $\theta_{\text{BW}}/2$ 时，天线波束能够照射到 P 点，即

$$-\frac{\theta_{\text{BW}}}{2} \leq \arcsin \left[\frac{|\xi - r \sin \theta_k^{(1)}|}{R(r, \alpha_k^{(1)}; \xi)} \right] - \theta_{\text{sq}} \leq \frac{\theta_{\text{BW}}}{2},$$

$$\xi \in \left[-\frac{l^{(1)}}{2}, \frac{l^{(1)}}{2} \right] \quad (4)$$

本文将满足式(4)的 ξ 定义为 P 点的积分孔径，用符号 ξ^{IA} 表示。进一步地，当明确知道成像网格上每个像素点的积分孔径后，则式(2)可以简化为

$$I_k^{(1)}(r, \alpha_k^{(1)}) = \int_{-l^{(1)/2} / 2}^{l^{(1)/2} / 2} w_{\text{az}}(r, \alpha_k^{(1)}; \xi) \cdot \text{sinc} \left\{ B \left[\tau - 2R(r, \alpha_k^{(1)}; \xi) / c \right] \right\} d\xi$$

$$= \int_{\xi \in \xi^{\text{IA}}} \text{sinc} \left\{ B \left[\tau - 2R(r, \alpha_k^{(1)}; \xi) / c \right] \right\} d\xi \quad (5)$$

实际上，积分孔径与天线方向图 $w_{\text{az}}(\cdot)$ 对 BP 积分的影响是一致的，二者均由 SAR 系统的工作模式决定。当引入积分孔径后，在式(5)推导过程中便可忽略天线方向图的影响，而式(5)也可以理解为一种类似聚束 SAR 处理的子孔径 BP 积分。

3.2 角域波数带宽

聚束 SAR 的整个孔径对每个像素点的形成均有贡献，因此所有像素点对应同一个积分孔径，且积分孔径的长度满足 $L_{\text{IA}} = L_a$ 。如 2.2 节所述，积分孔径的长度决定角域波数带宽的大小，这是聚束 SAR 角域波数带宽等于 $\kappa_r^{\max} L_{\text{IA}}$ 的原因。对于条带 SAR，固定的天线波束指向使得场景中的任一点目标无法一直被天线波束照射，因此每个像素点的积分孔径长度均不超过合成孔径长度，即 $L_{\text{IA}} \leq L_a$ 。即使条带 SAR 包含多个合成孔径，每个像素点的角域波数带宽等于 $\kappa_r^{\max} L_{\text{IA}}$ ，且不超过 $\kappa_r^{\max} L_a$ 。至此，我们发现了条带 SAR 和聚束 SAR 的共同点：积分孔径的长度决定角域波数带宽的大小。

对于孔径长度为 JL_a 的条带 SAR 来说，天线波束扫过的场景宽度为 $(J+1)L_a$ 。以整个孔径的中心 O 原点建立 (U, V) 局部直角坐标系，其中 U 轴为方位坐标轴。积分孔径与像素点方位坐标 u 的关系可以表示为

$$L_{\text{IA}}(u) = \begin{cases} L_a, & |u| \leq \frac{(J-1)}{2} L_a \\ \frac{J+1}{2} L_a - |u|, & \frac{(J-1)}{2} L_a < |u| \leq \frac{(J+1)}{2} L_a \end{cases} \quad (6)$$

根据角域波数带宽 $\Delta\kappa_\alpha = \kappa_r^{\max} L_{\text{IA}}$ ， $\Delta\kappa_\alpha$ 随像素点方位坐标变化的规律如图 2 所示。显然，只有位于 $[-(J-1)L_a/2, (J-1)L_a/2]$ 的像素点的积分孔径的长度为 L_a ，角域波数带宽为 $\kappa_r^{\max} L_a$ 。

为了利用局部极坐标系的角域带宽优势和避免角域升采样，本文限制 FFBP 算法每次只针对一个合成孔径进行处理，即局部的聚束处理。对于一个完整的合成孔径来说，波束扫过的最大场景宽度为合成孔径长度的 2 倍，如图 3 所示。像素点的方位坐标越接近零，积分孔径的长度 \hat{l}_{IA} 越接近 L_a ；像素点的方位坐标越接近 $\pm L_a$ ， \hat{l}_{IA} 越接近零，即

$$\hat{l}_{\text{IA}}(u) = \begin{cases} L_a - |u|, & |u| \leq L_a \\ 0, & |u| > L_a \end{cases} \quad (7)$$

相应地，角域波数带宽 $\Delta\hat{\kappa}_\alpha$ 等于 $\kappa_r^{\max} \hat{l}_{\text{IA}}$ ， $\Delta\hat{\kappa}_\alpha$ 随像素点方位坐标 u 变化的规律如图 4 所示。在这种情况下，只有方位坐标为零的像素点的积分孔径长度为 L_a ，角域波数带宽为 $\kappa_r^{\max} L_a$ 。通过 FFBP 算

法的局部聚束处理， J 个合成孔径能够产生 J 幅合成孔径图像，且每幅图像的积分孔径长度 \hat{l}_{IA} 的变化规律形如“ \wedge ”。以“ \wedge ”作为基本构型，如果能够通过一定的方法得到如图 2 所示的角域波束带宽，便可实现聚束-条带处理，并得到最终输出的条带 SAR 图像。

3.3 重叠图像法

在 3.2 节的启发下，我们通过数学推导发现一种恢复像素点的真实积分孔径的方法，即

$$\begin{aligned} \hat{L}_{IA}(u) &= \sum_{m=1}^J \hat{l}_{IA} \left[u + \left(m - \frac{J+1}{2} \right) L_a \right], J \geq 1 \\ &= L_{IA}(u) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 \hat{L}_{IA} 是由 J 个合成孔径恢复得到的积分孔径。

由式(8)可知，将 J 个积分孔径 \hat{l}_{IA} 沿方位间隔 L_a 进行相互叠加，如图 5 中“ \wedge ”所示。除了场景边缘点之外，当前合成孔径图像中积分孔径长度不足 L_a 的像素点可由相邻图像进行补偿，从而保证恢复的积分孔径 \hat{l}_{IA} 与真实的积分孔径 L_{IA} 相等。根据 \hat{L}_{IA} 得到的角域波数带宽 $\Delta\hat{\kappa}_\alpha$ 在整个孔径上的变化规律如图 5 的虚线所示。可见， $\Delta\hat{\kappa}_\alpha$ 与图 5 中 $\Delta\kappa_\alpha$ 保持一致。这说明根据式(8)恢复像素点的真实积分孔径的有效性，即实现了由局部聚束处理到条带处理的过渡。

若 FFBP 算法处理的孔径长度小于 L_a ，积分孔径长度势必小于 L_a ，即 $l_{IA} < L_a$ 。这将导致角域波束带宽小于 $\kappa_r^{\max} L_a$ ，即信息的“欠”利用；若 FFBP 算法处理的孔径长度大于 L_a ，我们又将面临 2.2 节

所述的角域升采样的问题。因此，只有限制 FFBP 算法针对一个合成孔径进行处理，我们才能刚好完整地利用全部的有效信息用于图像重建，同时避免角域升采样处理。为了得到如图 5 所示的积分孔径的重叠情况，相邻合成孔径图像之间的位置关系如图 6 所示。由于需要在图像域进行图像重叠，本文称该方法为重叠图像法。

4 仿真实验

下面开展一个近场、高分辨、超宽带斜视条带 SAR 仿真实验，详细参数如表 1 所示。如图 7 所示，该成像几何构型包含 3 个完整的合成孔径。每个合成孔径的长度为 $L_a = 102.4$ m，包含的脉冲数为 1024。考虑到条带 SAR 的工作特点，天线扫过的场景的方位宽度为 $4L_a = 409.6$ m。在斜平面上建立最终输出图像网格，成像网格的像素点数为 1024×4096 (距离 \times 方位)，距离像素间隔为 0.087 m，方位像素间隔为 0.1 m。在该实验中，能够实现像素点完全聚焦的区间为 $[-102.4, 102.4]$ m。我们将能够完全聚焦的像素用圆点表示，将不能够完全聚焦的像素点用五角星表示，其中 P 点的坐标为 $(102.4, -40)$ m。

表 1 仿真参数

中心频率	10 GHz	斜视角	30°
信号带宽	1.2 GHz	速度	100 m/s
方位波束宽度	8.19°	脉冲重复频率	1000 Hz

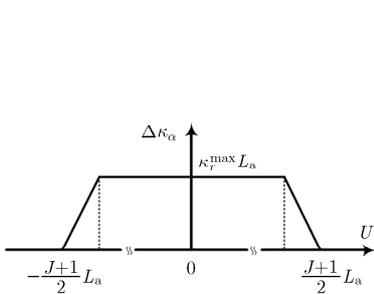


图 2 全孔径下角域波数带宽

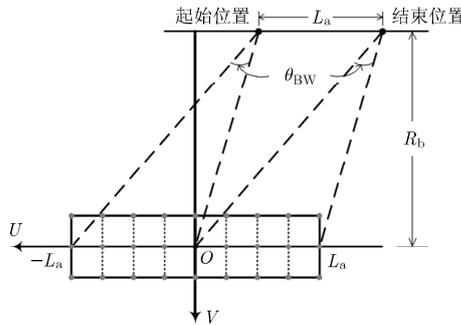


图 3 合成孔径长度为 L_a 、成像网格宽度为 $2L_a$ 时的几何构型

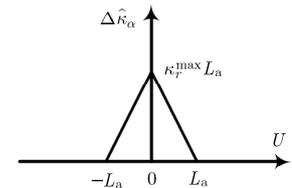


图 4 合成孔径图像的角域波数带宽

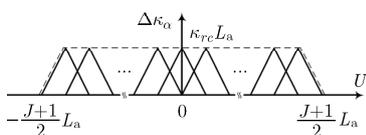


图 5 J (J 为奇数) 个合成孔径恢复的真实积分孔径示意图

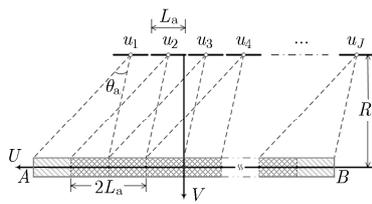


图 6 重叠图像法的成像构型

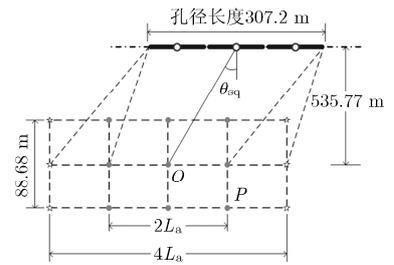


图 7 仿真几何及点目标分布

为了清楚地展示重叠图像法的特点,我们特意在成像场景中设置了字母“LIhFE”点阵,并使用表 1 中的参数进行回波数据仿真。使用 FFBP 算法对每个合成孔径进行处理,共得到 3 幅图像,如图 8(a), 8(b)和图 8(c)所示。每幅图像均位于局部直角坐标系,其方位成像范围为 $[-102.4,102.4]$ m,且相邻两幅图像存在相同的成像区域。将 3 幅位于局部直角坐标的图像映射到最终输出图像网格,从而形成相邻合成孔径图像的重叠。然后通过相干相加得到最终输出图像,如图 8(e)所示。以字母“H”为例,由于构成该字母的像素点的积分孔径在这 3 个合成孔径下均不足 L_a ,因此该字母在图 8(a), 8(b)和图 8(c)均得不到完全聚焦。然而,当前图像中积分孔径不足 L_a 的像素点可由相邻图像的同一位置的像素点进行补偿。在图 8(a), 8(b)和图 8(c)共同作用的情况下,字母“H”最终在图 8(e)中实现完全

聚焦。同理,字母“I”和“F”也能得到完全聚焦,图 8(d)为 P 点成像结果放大图。然而,位于 $[-204.8, -102.4]$ m 和 $(102.4,-204.8]$ m 区间的像素点的积分孔径不足 L_a ,因此字母“L”和“E”均无法得到完全聚焦。如果初始阶段的 BP 积分过程中不引入积分孔径判断,成像结果如图 8(f)所示。虽然设置点目标能够得到良好聚焦,但是在图 8(f)中还存在许多阴影。这些阴影可以理解为错误的 BP 积分引起的杂波,其能量水平在 $-30\sim-40$ dB。因此,这些杂波一定程度上破坏了重建图像的真实性和降低了图像的信杂比,不利于图像中微弱目标的检测。

5 结束语

本文指出了 FFBP 算法直接用于条带 SAR 存在的问题。除了积分孔径之外,局部极坐标系的角域升采样处理将给 FFBP 算法带来不必要的运算负

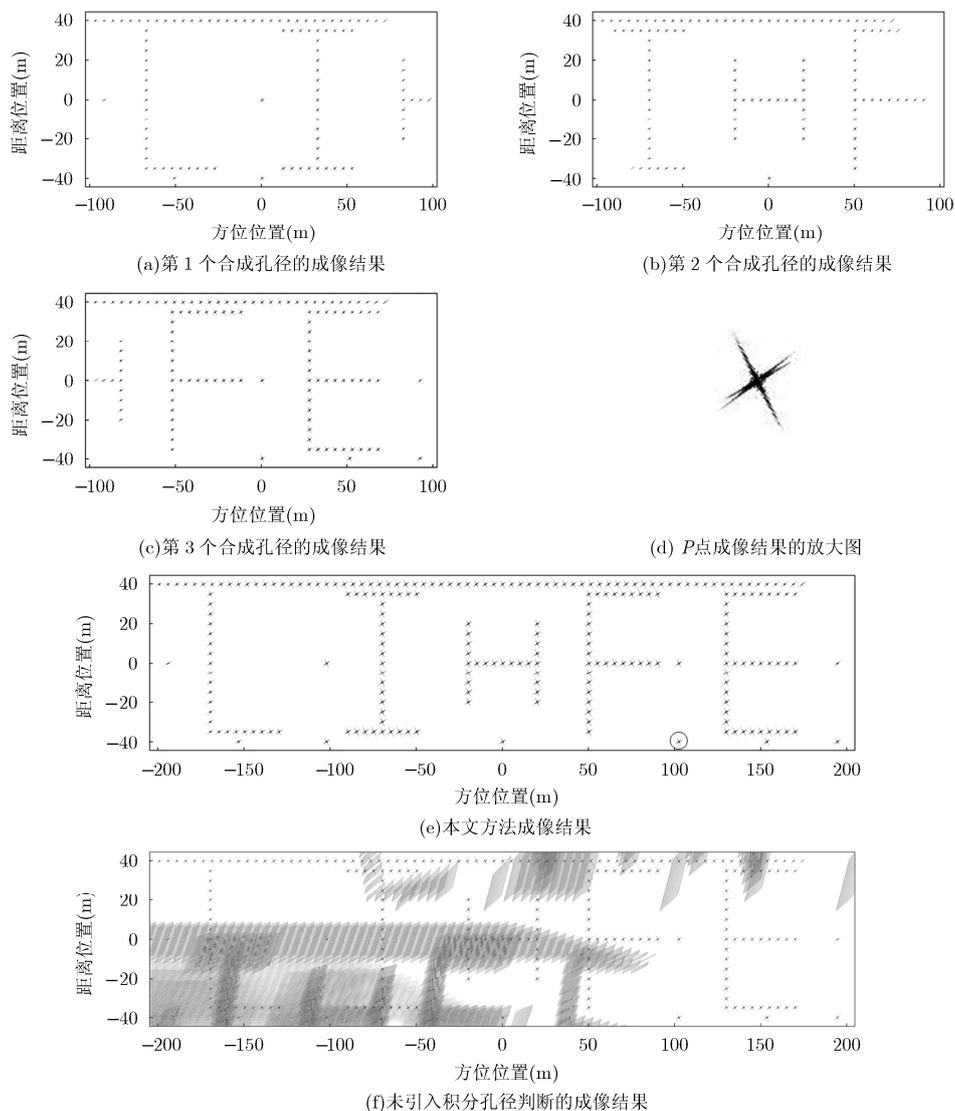


图 8 合成孔径及整个孔径的 SAR 成像结果

担。在清楚了解局部极坐标系的特点后，我们着眼于 FFBP 算法在条带 SAR 处理中实用化的研究。以积分孔径和角域波数带宽作为出发点，本文提出了重叠图像法。该方法在初始阶段的后向投影过程中引入积分孔径判断，通过相邻合成孔径图像的相互叠加恢复各像素点应有的角域波数带宽，从而实现条带 SAR 处理。该方法不但继承了 FFBP 算法在运算效率和运动补偿方面的优势，而且避免了数据升采样问题。

参 考 文 献

- [1] Cumming I G and Wong F H. Digital Signal Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston, MA: Artech House, 2005: 5-7.
- [2] Shippey G, Banks S, and Pihl J. SAS image reconstruction using fast polar back projection: comparisons with fast factored back projection and Fourier-domain imaging[C]. IEEE Oceans 2005-Europe, Brest, France, 2005: 96-101.
- [3] Jakowatz C V and Doren N. Comparison of polar formatting and back-projection algorithms for spotlight-mode SAR image formation[J]. *SPIE*, 2006, Vol. 6237: 62370H-1-62370H-7.
- [4] 胡建民, 王岩飞, 李和平. 基于回波数据的超高分辨率 SAR 通道相位误差估计与补偿[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(7): 1602-1608.
Hu Jian-min, Wang Yan-fei, and Li He-ping. Channel phase error estimation and compensation for ultra-high resolution SAR based on echo data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(7): 1602-1608.
- [5] 吴明宇, 杨桃丽, 吴顺君, 等. 星载多通道高分辨率宽测绘带 SAR 系统运动目标检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(2): 441-444.
Wu Ming-yu, Yang Tao-li, Wu Shun-jun, et al. Ground moving target indication for spaceborne multi-channel high resolution wide swath SAR system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(2): 441-444.
- [6] 冉金和, 张剑云, 武拥军. 机载并行双站大斜视 SAR 两步式成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(5): 1036-1043.
Ran Jin-he, Zhang Jian-yun, and Wu Yong-jun. Two-step imaging algorithm for airborne parallel high squint SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(5): 1036-1043.
- [7] 潘舟浩, 李道京, 刘波, 等. 基于 BP 算法和时变基线的机载 InSAR 数据处理方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(7): 1585-1591.
Pan Zhou-hao, Li Dao-jing, Liu Bo, et al. Processing of the airborne InSAR data based on the BP algorithm and the time-varying baseline[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1585-1591.
- [8] Gorham L A, Majumder U K, Buxa P et al. Implementation and analysis of a fast backprojection algorithm[J]. *SPIE*, 2006, Vol. 6237: 62370G-1-62370G-8.
- [9] Yegulalp A F. Fast backprojection algorithm radar for synthetic aperture radar[C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Waltham, MA, USA, 1999: 60-65.
- [10] 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.
- [11] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithm[M]. Boston, MA: Artech House, 1995.
- [12] Ulander L M H, Fröling P O, and Mursin D. Fast factorized backprojection algorithm for processing microwave SAR data[C]. Proceedings of 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, 2006: 577-580.
- [13] Moon K and Long D G. A new factorized backprojection algorithm for stripmap synthetic aperture radar[J]. *Positioning*, 2013, 4(1): 42-56.
- [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] Zhang Lei, Li Hao-lin, and Qiao Zhi-jun. A fast BP algorithm with wavenumber spectrum fusion for high-resolution spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1460-1464.
- [16] 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.

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。

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。