

机动飞行条件下基于 SIFFBP 算法的机载 UWB SAR 成像*

严少石, 李悦丽, 林世斌, 周智敏, 安道祥
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 机动飞行条件下, 运动误差的幅度较大, 频域运动补偿精度难以满足机载超宽带合成孔径雷达 (UWB SAR) 高精度成像的要求, 需要采用精确的时域后向投影 (Back Projection, BP) 算法, 然而原始 BP 算法的巨大计算量限制了其实际应用。提出了一种基于子图像快速因式分解 BP (Sub-image Fast Factorized Back Projection, SIFFBP) 算法的机动飞行条件下机载 UWB SAR 成像方案, 并对其子孔径和子图像划分的约束关系进行了推导, 给出了算法步骤, 并分析了算法的计算量。仿真和实测数据处理结果表明, SIFFBP 算法能够在保证处理精度的同时, 大幅度提高处理效率, 非常适合于机动飞行条件下的机载 UWB SAR 成像处理。

关键词: 机载 UWB SAR; 机动飞行; 运动补偿; SIFFBP 算法

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)02-0063-06

Focusing of airborne UWB SAR data under the condition of platform maneuvers by using SIFFBP algorithm

YAN Shaoshi, LI Yueli, LIN Shibin, ZHOU Zhimin, AN Daoxiang

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

Abstract: Under the condition of platform maneuvers, the accuracy of the motion compensation in frequency-domain cannot meet the focusing need of airborne Ultra-wideband Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) because of strong motion errors. The time-domain Back Projection (BP) algorithm can be used in this instance, whereas the large amount of computation limits its application. In light of this, a strategy of processing the airborne UWB SAR data with platform maneuvers is proposed by using the Sub-image Fast Factorized Back Projection (SIFFBP) algorithm. The constrain relationship between the sub-aperture and sub-image factorization was derived, and then the implementation approach was listed with the computation volume being analyzed. The processing results of the simulated and real data show that SIFFBP algorithm is applicable for the focusing of airborne UWB SAR under the condition of platform maneuvers with high precision and efficiency.

Key words: Airborne UWB SAR; platform maneuvers; motion compensation; SIFFBP algorithm

机载情况下, 受气流等因素的影响, 载机存在偏离理想航迹的运动误差, 需要运动补偿以获取高质量的图像。频域运动补偿采用了近似处理^[1-3], 当运动误差幅度较小时, 具有足够的补偿精度; 然而随着运动误差幅度的增加, 近似处理的不利影响越来越大, 回波中残余的运动误差会严重降低频域成像的精度。

近年来, 机动飞行条件下的 SAR 成像成为机载 SAR 研究领域的一个热点^[4-5]。机动飞行大致可分为两种情况, 一种是飞机在强气流影响下, 运动轨迹呈现较大偏移; 另一种是为了提高机载 SAR 任务规划的灵活性, 使飞机在受控的情况下按照非直线航迹运动。机动飞行情况下, 载机偏离直线航迹的误差幅度较大, 为了保证频域运动补偿精度, 需要将回波沿方位向划分重叠的子孔

径, 使得每段子孔径对应的运动误差幅度保持在可接受的范围, 最后再将子孔径处理结果拼接以获得整幅图像^[4]。对于成像孔径较短的高波段 SAR, 上述频域处理方法仍可获得较高的处理精度。文献[5]利用 E-SAR 机载 L 波段雷达进行了多组机动飞行实验, 并利用频域分块处理再拼接的思想和时域 BP 算法对实测数据进行了处理。结果表明, 当平台机动较大时, 频域处理不但存在局部成像精度降低的问题, 而且拼接也愈加困难; 相反, 时域 BP 算法则保持了较高的处理精度。低频工作的机载 UWB SAR 方位波束更宽、合成孔径更长, 频域处理已难以满足机动飞行条件下成像的要求, 只能采用时域 BP 算法。

本文提出一种基于 SIFFBP 算法的处理方案, 大幅度提高了机动飞行条件下机载 UWB SAR 的

* 收稿日期: 2012-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61201329)

作者简介: 严少石(1983—), 男, 甘肃武威人, 博士研究生, E-mail: yanshaoshi@nudt.edu.cn;

周智敏(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: kdzhouzhim@yahoo.com.cn

成像效率。仿真和实测数据处理实验结果表明, SIFFBP 算法能够兼顾处理精度与效率, 非常适合于机动飞行条件下的机载 UWB SAR 成像处理。

1 SIFFBP 算法原理

FFBP 算法利用原始 BP 成像的冗余性, 将长孔径分解为较短的子孔径进行处理, 每个子孔径生成粗分辨率子图像, 然后将粗分辨率子图像相干叠加以生成高分辨率图像。按处理方式的划分, FFBP 算法分为 PFFBP 和 SIFFBP 两种, 前者在极坐标系下划分子图像, 常用于波前弯曲不可忽略的近场成像领域^[6], 而后者则在直角坐标系下进行处理。机载 SAR 远场成像时目标接收到的照射电波波前近似为平面, 因此比较适合采用 SIFFBP 算法。文献[7]对 PFFBP 与 SIFFBP 算法进行了比较, 指出二者具有相近的处理精度, 但 SIFFBP 的极线较短, 因此所需存储量较小。此外, SIFFBP 固定了子图像区域后, 子图像只需按照一定规则进行分裂, 不需要动态改变子图像区域, 因此调度处理相对简单。

1.1 极线近似原理

原始 BP 算法不论合成孔径长度的大小, 一律按最高分辨率成像。而 FFBP 选择较短的子孔径进行成像, 由于子孔径成像的分辨率较低, 因此可以利用低分辨率的极坐标图像来代替高分辨率图像, 从而降低成像运算量, 这个过程称为极线近似^[8]。

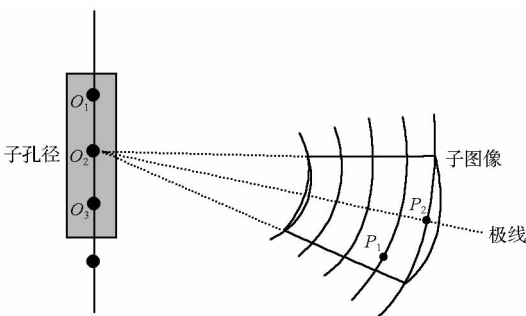


图 1 极线近似原理

Fig. 1 Polar approximation principle

图 1 为 FFBP 算法的极线近似原理示意图。方位向空间采样点等间隔分布, 对任意采样点, 其回波所成的一维距离像沿以采样点为中心的等间隔同心圆分布。采样点 O_1 、 O_2 和 O_3 录取的回波组成一个子孔径, 其等效相位中心为 O_2 。当子孔径长度较短时, 图像的角度分辨率较低, 因此在一定的子图像区域中, 可以用等效相位中心 O_2 对应极线上点的值近似代替子图像区域中其他位置点

的值。如图 1, 在满足距离误差的条件下^[9], 子图像区域中任意像素点 P_1 位置的值可以用极线上像素点 P_2 位置的值代替, 其中 P_2 与 P_1 位于以 O_2 为中心的同心圆上。

极线近似是 FFBP 算法的基础, 通过极线近似得到初级子孔径对应的初级低分辨率子图像后, 按照一定规则将初级子孔径合并为新的次级子孔径。子孔径合并后, 其等效波束宽度减小, 则子孔径的角度分辨率提高, 因此满足极线近似条件的子图像区域减小, 这个过程称为子图像分裂。将子孔径合并和子图像分裂过程迭代进行, 直至子孔径数据合成为全孔径数据时迭代终止, 此时图像分辨率已达到全孔径数据对应的分辨率, 子图像分裂过程终止。图 2 为极坐标情况下, 相邻两级之间的子孔径合并和子图像分裂示意图, 较小的子孔径对应较大的等效波束宽度和较低的角度分辨率, 因此子图像对应的成像网格较粗。随着子孔径的逐渐合并, 等效波束宽度逐渐减小, 角度分辨率逐渐提高, 则子图像对应的成像网格逐渐细化, 当达到全孔径分辨率时, 成像网格已缩减为实际图像对应的像素点。

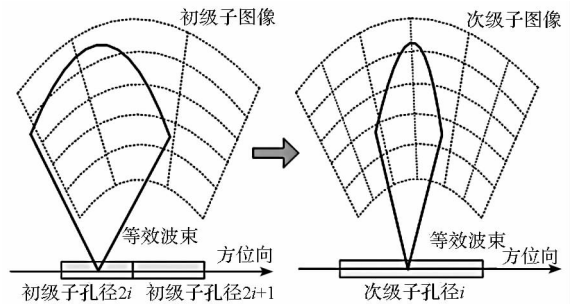


图 2 子孔径合并与子图像分裂

Fig. 2 Sub-aperture combination and sub-image factorization

1.2 机动飞行条件下子孔径与子图像划分的约束关系

极线近似过程中的近似误差不可避免。采用极线近似的子图像区域越大, 引入的近似误差也越大; 反之, 引入的近似误差也越小。实际上, 极线近似的子图像区域不能无限扩大, 其大小由极线近似的距离误差决定。

图 3 为极线近似的距离误差示意图。对空间采样点 A , 斜距为 r 的像素点 N 与波束视角变化 $\Delta\varphi$ 时的像素点 M 处的回波具有相同的值, 则将 M 点的值投影到极线 AN 上不会引入误差。当载机飞行状况非理想时, 对于视线运动误差为 a 的空间采样点 B , 将 M 处的回波用 N 代替, 则会引入距离误差。如图 3 所示, 极线近似带来的距离误差为

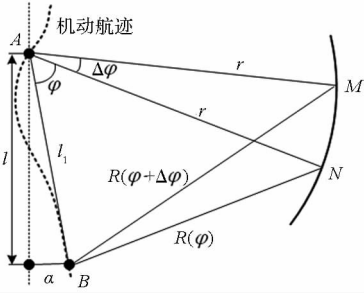


图3 机动飞行条件下极线近似的距离误差
Fig.3 Range error of polar approximation under the condition of platform maneuvers

$$\begin{aligned} \Delta R &= R(\varphi + \Delta\varphi) - R(\varphi) \\ &= \sqrt{r^2 + l_1^2 - 2rl_1 \cos(\varphi + \Delta\varphi)} \\ &\quad - \sqrt{r^2 + l_1^2 - 2rl_1 \cos\varphi} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $l_1 = \sqrt{l^2 + a^2}$, 通常满足 $\Delta R \ll R(\varphi)$, 则上式可近似为

$$\begin{aligned} \Delta R &\approx \frac{R^2(\varphi + \Delta\varphi) - R^2(\varphi)}{2R(\varphi)} \\ &= r l_1 \cdot \frac{\cos\varphi - \cos(\varphi + \Delta\varphi)}{\sqrt{r^2 + l_1^2 - 2rl_1 \cos\varphi}} \end{aligned} \quad (2)$$

上式可进一步化简为

$$\begin{aligned} \Delta R &\leq \min(l_1, r) \cdot \frac{\cos\varphi - \cos(\varphi + \Delta\varphi)}{\sin\varphi} \\ &= 2\min(l_1, r) \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \left[\cos \frac{\Delta\varphi}{2} + \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\tan\varphi} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

远场成像满足 $\Delta\varphi \ll \min(1, \tan\varphi)$, 且 $\Delta\varphi \approx \sin\Delta\varphi$, 则

$$\Delta R \leq \min(l_1, r) \cdot \Delta\varphi = \begin{cases} l_1 \cdot \Delta\varphi, & r \geq l_1 \\ r \cdot \Delta\varphi, & r < l_1 \end{cases} \quad (4)$$

上式给出了极线近似的距离误差对子图像的限制条件。当子图像对应的最大张角为 $2\Delta\varphi_{\max}$ 时, 满足极线近似距离误差的子图像最大宽度为

$$D_{\max} = 2r \cdot \Delta\varphi_{\max} \quad (5)$$

机载 SAR 远场成像情况下, $r \gg l_1$, 则由式(4)可得

$$\Delta R \leq l_1 \cdot \Delta\varphi_{\max} \leq \frac{l_{1\max} D_{\max}}{2r} \quad (6)$$

其中 $l_{1\max}$ 为 l_1 的最大值, 由最大半子孔径长度 l_{\max} 和最大运动误差 a_{\max} 确定

$$l_{1\max} = \sqrt{l_{\max}^2 + a_{\max}^2} \quad (7)$$

其中 $l_{\max} \geq l$ 。式(6)即为机动飞行条件下 FFBP 算法的距离约束条件, 由其可得子孔径和子图像划分的约束关系。

机载 SAR 成像要求距离误差的最大值

$$\Delta R_{\max} \leq \frac{\lambda_{\min}}{M} \quad (8)$$

其中 λ_{\min} 为最小工作波长, M 为误差控制因子, 通常 $M \geq 4$ 。由式(6)可知距离误差的最大值

$$\Delta R_{\max} = \frac{l_{1\max} D_{\max}}{2r} \quad (9)$$

则子图像最大宽度满足

$$D_{\max} \leq \frac{2r\lambda_{\min}}{M l_{1\max}} \quad (10)$$

为了使成像区域中所有子图像满足距离误差条件, 则要求

$$D_{\max} \leq \frac{2R_{\min}\lambda_{\min}}{M \sqrt{l_{\max}^2 + a_{\max}^2}} \quad (11)$$

其中 R_{\min} 为子图像区域对应子孔径中心的最小斜距。上式即为机动飞行条件下, 极坐标系中子孔径和子图像划分的约束关系。

1.3 算法步骤

机载 SAR 远场成像时, 波前近似为平面, 因此极坐标情况下满足式(11)的约束关系在直角坐标系下也近似满足, 据此可以设计 SIFFBP 算法的实施方案。以下为 SIFFBP 算法的实施步骤:

(1) 确定子孔径合并策略。设原始孔径数据的点数为 L , SIFFBP 算法的处理级数为 K , 则当子孔径合并策略为 $f_1 \times f_2 \times \dots \times f_k$ 时, 第 i 级的子孔径点数为

$$l_i = \frac{L}{\prod_{n=1}^i f_n} \quad (12)$$

其中 f_i 表示第 i 级子孔径数目减小的倍数。

(2) 确定子图像分裂策略。由式(11)和(12)可以确定子图像的方位向点数, 子图像的距离向也采用相同的点数, 将成像区域划分为若干子图像。对第 i 级处理, 当合并后的子孔径长度为原子孔径长度的 f_i 倍时, 子图像长度和宽度等比例缩小为原来的 $1/f_i$ 。

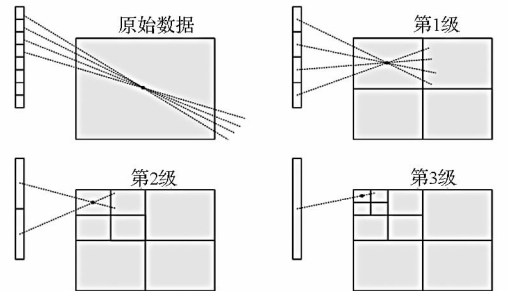


图4 三级基2因子 SIFFBP 算法实例

Fig.4 An example of 3 stages SIFFBP algorithm based on the factorization factor of 2

图4 为一个三级基2因子 SIFFBP 算法的例子。原始数据对应的孔径长度为8, 处理级数为

3. 每一级处理的子孔径都由相邻两个子孔径合并而成,对应的子孔径合并和子图像分裂策略为 $2 \times 2 \times 2$ 。

(3) 极线投影。当子孔径和子图像确定以后,将子孔径数据投影到极线上,得到近似的子图像数据。投影操作的计算量与总极线长度成正比。

(4) 对子孔径进行合并,同时对子图像进行分裂。

(5) 算法重复 $K-1$ 次。

(6) 通过插值将极线数据投影到子图像的所有像素单元并相干叠加,并将子图像拼接即可得到最终的成像结果。

1.4 计算量分析

由 SIFFBP 算法的处理步骤可知,其计算量与其子孔径合并以及子图像分裂策略相关。为了分析简便,假定原始数据方位向点数、成像区域的方位和距离向点数皆为 L ,则原始 BP 算法的计算量正比于 L^3 。如果采用 SIFFBP 算法,且每一级的子孔径合并和子图像分裂因子 f_i 皆为 f ,则

$$L = f^K \quad (13)$$

对第 i 级处理过程,子孔径合并和子图像分裂所需的计算量

$$C(i) \propto f L^2 \quad (14)$$

则 SIFFBP 运行 K 级的总计算量

$$C_{total} \propto f L^2 K = f L^2 \log_f L \quad (15)$$

由上式可知 SIFFBP 算法可以大幅度降低原始 BP 算法的计算量,从而提高 BP 类算法的实用性。

需要说明的是,上述分析中采用了诸多近似,而且未考虑插值操作的影响,因此只能在一定程度上说明 SIFFBP 算法具有较高的效率,对实际算法的实施并不具有明确的指导意义。关于如何确定处理级数、子孔径合并和子图像分裂策略等问题,还需要进一步研究。

2 仿真和实测数据处理

利用 SIFFBP 算法对仿真数据和实测数据进行处理,其中实测数据由某 P 波段机载 UWB SAR 在机动飞行条件下获得。将 SIFFBP 算法处理结果与频域和原始 BP 算法处理结果进行对比,其中频域处理采用结合运动补偿的 NCS 算法^[10]。

2.1 仿真实验

点目标仿真实验采用的机载 UWB SAR 系统参数如表 1。在测绘带中心处放置点目标,并加入图 5 所示的三维运动误差。总共模拟了 4 种机

动飞行状态:线性机动、弧形机动、正弦机动以及俯冲机动,对应的最大运动误差幅度分别为 400m、200m、100m 及 600m。分别用 NCS 算法、原始 BP 算法和 SIFFBP 算法对仿真数据进行处理。

表 1 系统仿真参数

Tab. 1 The simulation parameters of the system

中心频率	500MHz
飞行高度	2.5km
方位积累角	28°
信号带宽	200MHz
中心斜距	6.5m
平均速度	50m/s

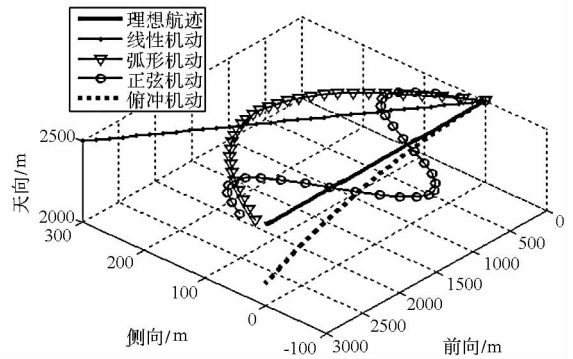


图 5 机动飞行情况下的三维航迹

Fig. 5 The 3D trajectory under the condition of platform maneuvers

(a) 线性机动

当载机受恒定侧风影响的情况下,可能出现近似线性机动的情况。由于 UWB SAR 的孔径时间较长,载机航迹角的微小偏差也可能在孔径末端积累起较大的线性位移误差,在回波中引入的相位误差除线性相位误差以外,还包含有三次甚至高次相位误差,频域运动补偿难以完全消除其影响,残余相位误差仍将导致聚焦精度下降。

(b) 弧形机动

载机受较大侧风影响偏离然后回归预定航迹的过程,或者载机在空中转弯的过程可以用弧形机动来描述。相对于机载 UWB SAR 的孔径时间,弧形运动轨迹变化较慢,但是其幅度误差通常较大,因此对频域处理精度的影响也较大。

(c) 正弦机动

载机在空中的实际航迹通常表现为围绕预定航迹的正弦摆动。当气流相对平稳或载机控制频率变化较频繁时,运动误差通常表现为小幅正弦摆动;而对于一些体积小重量轻的飞机,由于其飞行状态受气流影响较大,当空中气流比较紊乱时,常会表现出幅度较大的正弦机动。受载机惯性的

影响,正弦摆动的频率和幅度是相互制约的,当摆动频率较高时,其幅度通常较小,而当摆动频率较低时,通常摆动幅度较大。

(d) 俯冲机动

当载机受较大垂直气流的影响时,可能出现俯冲机动的情况。俯冲机动的运动误差在垂直方向上,其影响与水平方向类似。

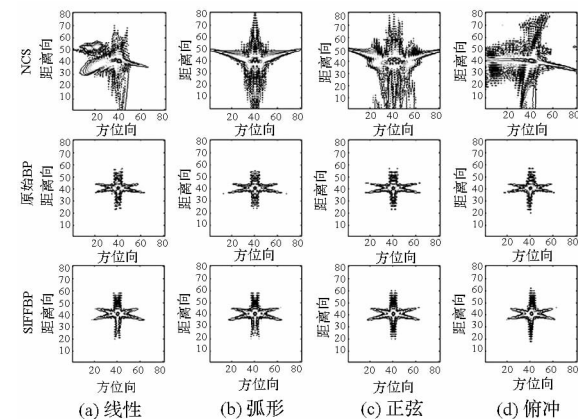


图 6 仿真点目标的聚焦结果

Fig. 6 The focusing results of simulated point targets

图 6 为线性机动条件下点目标的成像结果。由于频域运动补偿采用了近似处理,因此当运动误差幅度较大时,补偿后回波中残余的相位误差较大,从而导致频域处理精度的降低。以图 6(a)和图 6(c)为例,频域处理没有完全消除回波中残余的相位误差,导致压缩波形出现非对称旁瓣;而图 6(c)中,频域运动补偿后回波中残余的高次相位误差导致了压缩波形旁瓣电平的升高。时域 BP 算法和 SIFFBP 算法则完全不受成像孔径的影响,能够获得近乎理想的聚焦结果。

为了便于比较,将仿真点目标的方位和距离分辨率,二维 PSLR 和 ISLR 等质量参数列于表 2。可见,频域处理后,点目标方位向主瓣的分辨率下降比较严重,较高的二维 PSLR 和 ISLR 则表明其方位和距离向旁瓣的影响也较大。原始 BP 算法得到聚焦近似理想,而 SIFFBP 算法的聚焦质量与原始 BP 算法非常接近。

仿真数据处理结果表明,机动飞行条件下,频域处理不再适用于机载 UWB SAR 数据处理,而 SIFFBP 算法则具有较高的处理精度,可以用于机动飞行条件下的机载 UWB SAR 处理。

2.2 实测数据处理

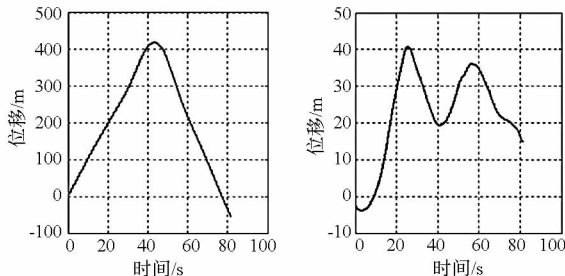
P 波段机载 UWB SAR 录取了机动飞行条件下的实测回波。载机的侧向运动误差幅度最大可达 400m,而天向运动误差幅度最大为 40m(如图 7(a)和图 7(b))。分别利用 NCS 算法、原始 BP

算法以及 SIFFBP 算法对录取的回波进行处理。其中采用 NCS 算法时,首先对回波沿方位向重采样,消除前向运动误差的影响,然后利用结合子孔径的运动补偿降低运动误差方位空变性的影响。

表 2 仿真点目标的聚焦质量比较

Tab. 2 The comparison of the focusing quality of the simulated point targets

	方位分辨率/m	距离分辨率/m	二维 PSLR/dB	二维 ISLR/dB
线性	1.3576	0.9795	-2.6728	0.2690
	0.6785	0.7926	-13.6444	-7.7378
	0.7098	0.9450	-12.6551	-7.6560
弧形	1.5742	1.1290	-4.3018	0.2210
	0.6931	0.8130	-13.1026	-7.5209
	0.7518	0.9571	-12.5268	-7.3595
正弦	3.1102	0.9374	-2.0788	4.9424
	0.6675	0.8206	-13.4332	-7.5797
	0.7335	0.9347	-12.5598	-7.2607
俯冲	2.2029	0.9214	-4.1912	2.3159
	0.6568	0.7774	-13.6488	-7.6699
	0.7319	0.9334	-13.0787	-7.7018



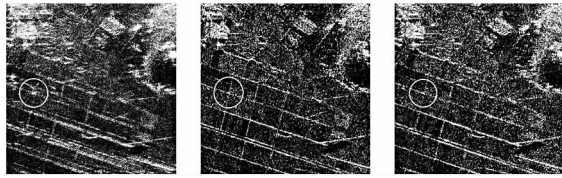
(b) 侧向位移 (c) 天向位移

图 7 机动飞行的运动误差

Fig. 7 The motion errors under the condition of platform

图 8(a)为频域处理得到的图像,可以看出图像中的点状目标散焦比较严重,农田的边界模糊,图像的整体信噪比较低,说明频域运动补偿在运动误差幅度较大时性能不佳。图 8(b)为原始 BP 算法处理的结果,相比于频域处理,原始 BP 算法得到的图像质量有了大幅度提高,点状目标聚焦良好,农田轮廓清晰。图 8(c)为误差控制因子为 8 时 SIFFBP 算法处理的结果,其聚焦质量与原始 BP 算法接近,远好于频域处理结果。

为了便于直观比较,在图像中选取一个点状目标进行分析(如图 8 中圆圈标示的部分)。图 9 所示为频域 NCS 处理、原始 BP 处理及 SIFFBP 处理后的点状目标放大结果,可以看出,频域处理难以有效消除大幅度运动误差的影响,点状目标不但存在散焦,而且其能量沿方位和距离向发生了

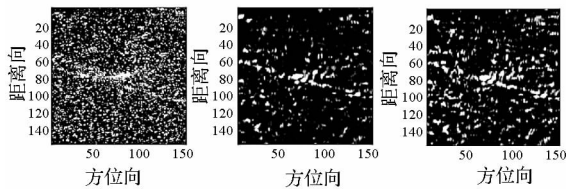


(a) NCS (b) 原始 BP (c) SIFFBP

图8 成像结果(部分)

Fig. 8 Part of the imaging results

扭曲; SIFFBP 算法得到的目标主瓣聚焦质量与原始 BP 结果相近, 但是其图像整体信噪比低于原始 BP 的结果。点状目标的方位和距离分辨率、二维 PSLR 和 ISLR 等参数如表 3 所示。



(a) NCS (b) 原始 BP (c) SIFFBP

图9 点状目标聚焦结果

Fig. 9 The focusing result of a point-like target

表3 实测点状目标的聚焦性能比较

Tab. 3 The comparison of the focusing quality of the real point-like targets

	方位分 辨率/m	距离分 辨率/m	二维 PSLR /dB	二维 ISLR /dB	耗时/s
NCS	6.72	1.05	-0.89	1.8	380
BP	2.90	1.44	-8.27	-5.18	17853
SIFFBP	3.10	1.57	-4.05	-1.12	1605

利用 SIFFBP 算法对实测数据进行处理时, 原始数据的方位向点数为 8192, 采用三级处理, 子孔径合并策略为 $8 \times 8 \times 8$, 则第一、二、三级的子孔径数目分别为 1024、128 和 16。成像区域的方位和距离向点数为 3072×3072 。根据距离误差限制条件, 将成像区域沿方位向和距离向各分为 12 块, 则第一级子图像的点数为 256×256 , 第二级和第三级的子图像点数分别为 32×32 、 4×4 。原始 BP 算法的总计算量正比于 $8192 \times 3072 \times 3072$, 而 SIFFBP 的总计算量与之相差约 128 倍。实际上上述分析是比较粗略的, 由于 SIFFBP 算法每一级到下一级进行投影操作时都需要进行插值操作, 插值操作对计算量的影响非常大, 因此实际处理时间不能与理论计算相吻合。在本例中, 插值操作都采用临近点插值。表 3 中列出了频域处理, 原始 BP 算法处理以及 SIFFBP 算法处理的实际耗时, 可见 SIFFBP 只需原始 BP 约 1/10 的时间即可完成处理。算法编程语言采用 Matlab, 处理器采用 Intel(R) Core(TM) i7 CPU。

3 结束语

机动飞行条件下, 频域运动补偿精度不能满足机载 UWB SAR 的要求。时域 BP 算法非常适合机载 UWB SAR 处理, 然而原始 BP 算法的巨大计算量限制了其实际应用。本文对 SIFFBP 算法的原理进行了分析, 然后用仿真和实测数据进行了数据处理实验。实验结果表明, SIFFBP 算法可以在保持成像精度的同时, 大幅度降低原始 BP 算法的计算量, 非常适合大机动飞行情况下的机载 UWB SAR 成像。

参考文献 (References)

- [1] Gianfranco F, Giorgio F, Stefano F. On center-beam approximation in SAR motion compensation [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Letters, April, 2006, 3(2): 276-230.
- [2] Potsis A, Reigber A, Mittermayer J, et al. Improving the focusing properties of SAR processors for wide-band and wide-beam low frequency imaging [C]// IGARSS 2001: 3047-3049.
- [3] Potsis A, Reigber A, Mittermayer J, et al. Sub-aperture algorithm for motion compensation improvement in wide-beam SAR data processing [J]. Electronics Letters. November 2001, 37(23): 1405-1406.
- [4] Mehrdad S. Time domain non-linear SAR processing [R]. Dept. Elect. Eng., State Univ. New York, 2006: 20-22.
- [5] Frey O, Magnard C, Ruegg, M, et al. Focusing of airborne synthetic aperture radar data from highly nonlinear flight tracks [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., June. 2009, 47(6): 620-626.
- [6] 李杨寰. 低空平台载超宽带合成孔径雷达成像技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2010. Li Yanghuan, Research on low-altitude airborne ultra-wideband SAR imaging techniques [D]. ChangSha: National University of Defense Technology. 2010. (in Chinese)
- [7] Sjögren T K, Vu V T, Pettersson M I. A comparative study of the polar version with the subimage version of fast factorized back-projection in UWB SAR [C]// Proceedings. IEEE IRS' 08. Wrocław: Poland, 2008: 156-159.
- [8] 刘维, 张春华, 刘纪元. FFBP 算法在合成孔径声呐成像中的应用 [J]. 声学技术, 2009, 28(5): 572-576. LIU Wei, ZHANG Chunhua, LIU Jiyuan. Application of FFBP algorithm to synthetic aperture sonar imaging [J]. Technical Acoustics. 2009, 28(5): 572-576. (in Chinese)
- [9] Ulander L M H, Hellsten H, Stenström G. Synthetic aperture radar processing using fast factorized back-projection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760-775.
- [10] 李建阳. 机载 UWB SAR 实时成像技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2010. Li Jianyang. Research on real-time image formation processing of airborne UWB SAR [D]. Changsha: National University of Defense Technology. 2010. (in Chinese)
- [11] Li Y H, Song Q, Jin T, et al. Arbitrary synthetic aperture motion compensation based on fast back projection [C]// Paris, France. EuMA. 2010: 487-490.
- [12] Ponce O, Prats P, Rodriguez-Cassola M, et al. Processing of circular SAR trajectories with fast factorized back-projection [C]// IGARSS 2011: 3692-3695.