

一种新的基于极坐标格式的快速后向投影算法

杨泽民* 孙光才 吴玉峰 邢孟道

(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: 快速分级后向投影算法(Fast Factorized Back-Projection Algorithm, FFBPA)研究了 BPA 中的冗余计算, 通过子孔径划分, 在极坐标系下将信号逐级相干积累成像, 该方法避免了 BPA 中每个图像点的重复性全孔径搜索过程, 大幅减少了计算量。然而多级插值操作加剧了误差积累, 减少分级次数又影响算法效率。为解决这一矛盾, 该文结合极坐标格式算法(PFA)提出了一种新的多级迭代快速 BP 成像算法, 并将算法拓展应用到曲线轨道, 多模式 SAR 中。分析表明, 该文方法与 FFBPA 相比更高效。最后通过该文算法与 FFBPA 的星载 0.1 m 超高分辨率聚束 SAR 成像进行仿真实验对比, 验证了该方法的优越性。

关键词: 合成孔径雷达; 快速分级后向投影算法(FFBPA); 极坐标格式算法(PFA); 曲线轨道; 多模式

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)03-0537-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00613

A New Fast Back Projection Algorithm Based on Polar Format Algorithm

Yang Ze-min Sun Guang-cai Wu Yu-feng Xing Meng-dao

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The redundant calculation in Back-Projection Algorithm (BPA) is studied in Fast Factorized BPA (FFBPA). By dividing sub-apertures and accumulating signal coherently in polar format coordinate, image with high resolution is obtained. The progress of repeatedly searching every signal in full aperture for every pixel is avoided in FFBPA, thus the amount of computation is reduced. However, multi-stage interpolation operation increases the error accumulation. Combining with the original Polar Format Algorithm (PFA), a new multi-stage iteration Fast PFA is proposed, and it is modified to process data in curve orbit and multiple modes SAR. Analysis indicates that the proposed algorithm is more efficient than FFBPA in practice. Comparison of simulation results of spaceborne spotlight SAR with very high resolution (0.1 m) processed by the proposed algorithm and FFBPA verifies the superiority of the new algorithm over FFBPA.

Key words: SAR; Fast Factorized Back-Projection Algorithm (FFBPA); Polar Format Algorithm (PFA); Curve orbit; Multiple modes

1 引言

通过移动实孔径天线, 合成孔径雷达(SAR)可以在很大的视角范围内照射场景, 从而极大地提高了方位分辨率。然而雷达与目标的相对运动也使得目标回波在不同脉冲时间内跨越了多个距离分辨单元, 大的距离徙动给成像带来了难题^[1]。

为解决 SAR 距离徙动问题, 国内外的学者提出了若干算法, 比如距离多普勒算法(RDA)^[2], 线频调变标算法(CSA)^[3], 非线性频调变标算法(NCSA)^[4]以及扩展的 NCS 算法(ENC SA)^[5]等。上述算法均是频域处理算法, 基于直线轨道模型和信号方位平移不变性。然而, 对于圆周 SAR^[6], 高分辨率星载

SAR^[7], 同步轨道 SAR^[8]等曲线轨道 SAR, 以及远距离、宽波束、大斜视等具有严重的方位空变的 SAR 模式信号, 上述频域算法均不能有效处理^[9]。这时需要同一种算法可以通用于任意轨道模型或任意成像模式。计算机层析(CT)成像领域引入的后向投影算法(BPA)^[10], 从 SAR 本质工作原理出发, 在时域将录取的距离脉冲压缩后的数据后向投影到各成像点, 通过相干积累得到精确聚焦的图像。该方法对 SAR 工作模式没有要求, 可以在含有运动误差的情况下对任意成像几何下的 SAR 数据进行精确聚焦。然而 BPA 需要逐点遍历, 对于 $N \times N$ 点的图像, 如果孔径长度也为 N , 那么, 成像需要 N^3 次插值操作。庞大的计算量是制约其实际应用的一大障碍。

为减少 BP 算法的计算量, Yegulalp^[11]提出了一种快速 BPA(FBPA), 该方法将 BPA 分为两步: 首先划分子孔径, 子孔径内利用 BPA 得到极坐标系

2013-05-03 收到, 2013-09-29 改回

国家自然科学基金优秀青年基金项目(61222108)资助课题

*通信作者: 杨泽民 yyy629@126.com

下的低分辨率图像,然后将所有子孔径相干叠加,得到高分辨图像,当分块大小取为 \sqrt{N} 时,该算法计算量达到理论最优的 $O(N^{2.5})$ 。后来,Ulander等人^[12]以2或4为基数,将BPA进一步细分,提出了快速分级(Fast Factorized)BPA(FFBPA),该方法在子孔径粗分辨成像后,信号通过多级迭代相干叠加进一步节省了计算量。基数取2或4时,FFBPA计算量达到理论最优的 $O(N^2 \log_2^N)$ 。

FFBPA虽然理论上能达到 $O(N^2 \log_2^N)$,但每次相干叠加的插值操作都会引入误差,图像间多次插值融合会使误差难以忍受,并且多次迭代操作使得算法流程比较繁琐,因此实际操作中往往牺牲FFBPA的计算效率,首先取较长的子孔径,或取较大的基数以降低迭代次数,以获得较好的聚焦效果。也就是说,实际应用中,FFBPA难以达到 $O(N^2 \cdot \log_2^N)$ 的计算量。

FFBPA的计算量随子孔径长度的增大而增大,其根本原因是算法依然采用了效率低下的BPA进行低分辨成像,随着基数的增大,该算法向原始BPA靠拢。本文结合传统极坐标成像(PFA)算法,提出了一种新的多级迭代快速BP成像算法,文中分析证实了所提算法的计算量随子孔径长度的增大而减小,从而可以减少插值迭代次数,进而有效抑制插值误差的引入。本文算法适用于任意轨道模型和成像模式,文中具体分析了在处理不同成像模式SAR数据时,需要对算法所做的调整。最后结合STK(Satellite Tool Kit)软件进行了0.1 m超高分辨率星载聚束SAR仿真实验,利用所提算法进行成像,验证了其有效性以及处理曲线轨道,超长的合成孔径和严重的距离徙动SAR数据的能力,并通过与FFBPA仿真做对比,凸显本文算法在兼顾成像质量和效率方面的优越性。

2 算法原理

2.1 BPA与FFBPA

本节简单介绍著名的BPA和FFBPA。图1给出了常规SAR的成像几何。

图1中,椭圆区域为雷达照射场景范围,场景中心(又称参考中心) O 为原点,雷达瞬时位置为 $(x, -R_s)$, R_s 为最近斜距, $R_{ref} = \sqrt{R_s^2 + x^2}$ 为参考中心距离,点 $P(x_0, y_0)$ 为任意点目标,点 P 到雷达的瞬时距离为

$$R_p = \sqrt{(x - x_0)^2 + (R_s + y_0)^2} \quad (1)$$

天线接收的点 P 基带回波信号经距离向脉冲压缩后可表示为

$$s(x, K_r) = W_a(x)W_r(K_r)\exp(-jK_r R_p) \quad (2)$$

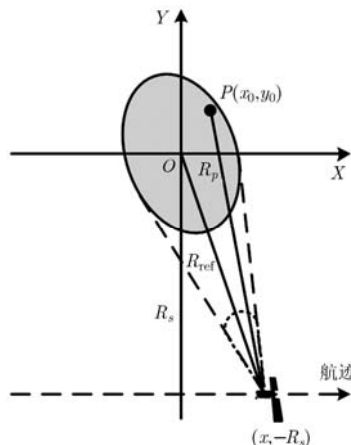


图1 SAR成像几何

其中 W_a 为方位窗函数, W_r 为距离窗函数, K_r 为距离波数。

SAR回波的每一列数据,都是雷达在当前位置接收到的场景回波的线性叠加^[13]。基于该过程,BPA将SAR回波数据逐列反向投影回各成像点,任一成像点 (x_0, y_0) 经过式(3)所示的信号相干积累的过程,得到高分辨的图像^[14]。理论上,BPA适用于任意SAR模式^[10]。

$$h(x_0, y_0) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x, K_r)\exp(jK_r R_p)dx \quad (3)$$

雷达接收到的回波数据是根据奈奎斯特采样定理对连续回波进行采样的离散数据。因此,在实际操作中,式(3)所表示的过程需要通过精确插值实现。假设合成孔径长度为 L ,那么对 $M \times N$ 的成像点阵来说,需要进行 $L \times M \times N$ 次插值操作。如此庞大的计算量限制了BP算法的应用。

Yegulalp^[11]指出,在初始孔径很短时,极坐标系格式下的数据在角频域只占很窄的一部分区域,这意味着可以在比较粗糙的分辨率下进行成像而不损失图像信息。FFBPA正是利用了这一点,基于树形结构,先在子孔径内用BPA在极坐标系下产生低分辨率的图像,再在可允许的误差范围内通过逐级信号相干叠加,逐渐提升分辨率,与BPA相比,该方法避免了对每个成像点都重复搜索全孔径的过程,大幅缩减了计算量。然而,为使FFBPA更高效,需尽可能减小第1步中子孔径的长度,增加逐级迭代的次数,而为减少误差引入,又需增加子孔径长度,减少迭代次数,这一矛盾限制了FFBPA的效率。

2.2 新的快速BP算法

FFBPA存在效率与质量之间的矛盾,其根本原因是FFBPA依然采用BPA完成第1步成像,当减少迭代级数时,算法流程逐渐向原始BPA靠拢。因

此，为了在保证成像质量的同时进一步提升速度，需要在第 1 步处理中摒弃 BPA。极坐标成像算法 (PFA) 是另一种极坐标格式下的成像算法，因此本文从 PFA 入手，结合树形结构，提出一种新的可以适用于任意轨道模型和成像模式的快速成像算法，由于孔径间本质上依然采用 BP 算法的原理，我们称之为基于 PFA 的快速 BP 算法。

极坐标格式算法是针对直线轨道 SAR 提出的算法，实际上，对于任意曲线轨道 SAR，在足够短的时间内，曲线轨道均可以近似为直线。以星载 SAR 为例，其成像几何如图 2 所示。为保证仿真的真实性，本文采用卫星工具包 (STK) 对星载 SAR 进行仿真，图 2 (a) 为用 STK 对星载聚束模式 SAR 的仿真示意图，为更为清晰地展示，图中加大了照射场景范围以及合成孔径长度，实际仿真中小得多。图 2 (b) 为子孔径内用直线轨道近似卫星航迹的成像几何示意图，其中， t_a 为子孔径方位时间， v 为卫星在该子孔径内的等效速度， φ 为卫星在该子孔径内的等效斜视角。等效速度 v 可以通过式 (4) 近似得到。

$$v = \sqrt{v_s v_g} \tag{4}$$

其中 v_s 是卫星线速度， v_g 是地面投影速度；也可以通过调频率估计得到，后者更准确但计算量大。等效斜视角可以用子孔径中心波束的斜视角近似，也可以通过多普勒中心估计得到。图 2 (c) 为对应的 2 维波数域。子孔径内采用直线轨道近似，本文采用 PFA 得到低分辨的图像，该近似对成像的影响将在下文仿真中具体分析。

根据 PFA^[15]，对图 2 中的任意点 P ，用场景中心回波进行去斜处理后的剩余相位为

$$\begin{aligned} \Phi(K_x, K_y) = & -K_r (R_p - R_{ref}) = K_x x_0 \frac{R_{ref}}{R_p} \\ & + K_y (R_{ref} - R_p) + K_x^2 \frac{x_0^2 - y_0^2}{2K_c R_{ref}} + \delta \end{aligned} \tag{5}$$

其中 $K_c = 4\pi/\lambda$ ， λ 为载波波长。 K_x 和 K_y 定义为

$$\left. \begin{aligned} K_x &= K_r - x/R_{ref} \\ K_y &= K_r R_s/R_{ref} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式 (5) 中前两项线性项决定了成像后位置，二次项和高次项 δ 是由平面波假设引入的，会导致图像方位散焦， δ 一般较小可忽略。

有两种方式可以消除平面波假设造成的影响。一种是后滤波方法^[15]，该方法会消耗更多的时间，且增加算法复杂度。因此本文采用另一种更为简单的方法，即缩短子孔径的长度，降低分辨率，使子孔径成像满足平面波假设。具体说来，为消除散焦，式 (5) 中第 3 项应满足

$$\left| K_x^2 \frac{x_0^2 - y_0^2}{2K_c R_{ref}} \right| \leq \frac{\pi}{4} \tag{7}$$

设 K_x 的支撑区为 $(-\Delta K_{xM}/2, \Delta K_{xM}/2)$ ，则图像的方位分辨率 $\rho_x = 2\pi/\Delta K_{xM}$ ，设子孔径长度为 L_s ，那么子孔径图像方位分辨率可以表示为 $\rho_x = R_{ref}\lambda/(2L_s)$ 。同时设场景范围为 $(-x_M/2, x_M/2)$ 和 $(-y_M/2, y_M/2)$ ，并考虑到 $K_c = 4\pi/\lambda$ ，则从式 (7) 可得子孔径长度与成像场景大小的关系为

$$\left. \begin{aligned} L_s &\leq \sqrt{2\lambda R_{ref}^3/x_M} \\ L_s &\leq \sqrt{2\lambda R_{ref}^3/y_M} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

得到低分辨的子图像后，再按照 FFBPA 的原理，通过插值取点相干叠加，子图像间层层融合，分辨率逐级提高，最后一步叠加在直角坐标系下获得高分辨率的图像。

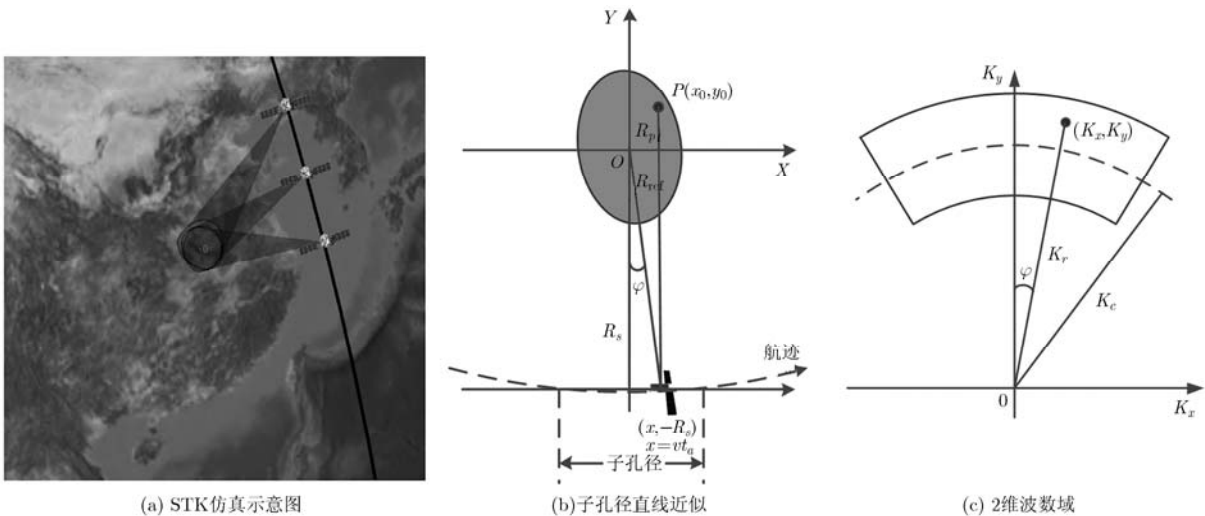


图 2 子孔径成像几何模型

从以上分析可知,本文算法不同于经典的重叠子孔径算法(OSA)^[16],OSA先在子孔径内获得直角坐标系下的低分辨子图像,得到初始位置信息,利用位置信息校正波前弯曲造成的形变和散焦,然后子图像相干叠加获得高分辨图像。本文算法无需校正形变和散焦,先在极坐标系下成像,子图间利用BP的原理逐点匹配相干叠加,其间通过相位校正,使其满足平面波假设。本质上说,OSA从宏观上在子图间构造滤波器消除平面波假设的影响,本文算法从微观上在每个成像点分别构造滤波器。OSA要求方位(时域或角度域)平移不变性,本文算法适用更多种成像模式。

3 计算量分析

假设FFBPA首先将长度为 N 的合成孔径分为 N/n 块,子孔径长度为 n ,子孔径内利用BPA得到极坐标系下的低分辨率图像,则所需的插值次数为(子图像数) \times (子图像像素) \times (子孔径长度) $=N/n \times N \times n \times n = nN^2$;然后以2为基数将信号逐级相干叠加,第1次相干叠加将 N/n 块子图合并成 $N/(2n)$ 块子图,共需 $N \times 2n \times 2 \times N/(2n) = 2N^2$ 次插值操作,第2次叠加一直到最后一次叠加所需插值次数均与第1次相同,一共经过 $\log_2^{N/n}$ 次叠加得到高分辨图像。那么FFBPA需要 $nN^2 + 2N^2 \log_2^{N/n}$ 次插值操作,假设插值采用8倍sinc插值,那么FFBPA需要 $8nN^2 + 16N^2 \log_2^{N/n}$ 次复乘运算。

本文算法的第1步用PFA实现,去斜处理需要 $N \times n \times 1 \times N/n = N^2$ 次复乘运算,假设2维插值操作也采用8倍sinc插值,那么需要 $N \times n \times 8 \times 2 \times N/n = 16N^2$ 次复乘运算,2维IFFT操作需要 $N^2 \log_2^{\sqrt{Nn}}$ 次复乘运算。全孔径相干叠加与FFBPA类似,需要 $16N^2 \log_2^{N/n}$ 次复乘运算。因此本文算法一共需要 $17N^2 + N^2 \log_2^{\sqrt{Nn}} + 16N^2 \log_2^{N/n}$ 次复乘运算。

需要说明的是,分析中假设插值方法采用8倍sinc插值只是为了定量分析对比两种算法的计算量,其它的插值方法也可同样分析。为了清晰对比两种算法的计算量,令 $N = 16384$,图3(a)和图3(b)给出了第1步分块大小 n 从2到1024变化时两步骤的计算量(复乘运算次数)变化,图3(c)给出了FFBPA与本文算法计算量的比值。

从图3(a)可以看出,分块越小,FFBPA的计算量越小。然而分块越小,分辨率越粗糙,用波数中心的点代表波束范围内其它点带来的距离误差就越大^[12];同时,多次迭代插值引入的误差也随着子孔径的变小而加大。因此,实际中为了减少插值带来的误差,保证图像质量,分块不能过小。从图3(b)可看出,分块越大,本文算法的计算量越小。本文算法采用了与FFBPA相同的图像融合算法,因此子孔径越大,成像质量和算法效率均得到提升。而实际中分块大小受限于子孔径直线模型近似于子孔径平面波假设,以及频谱不混叠3个因素,不能过大,

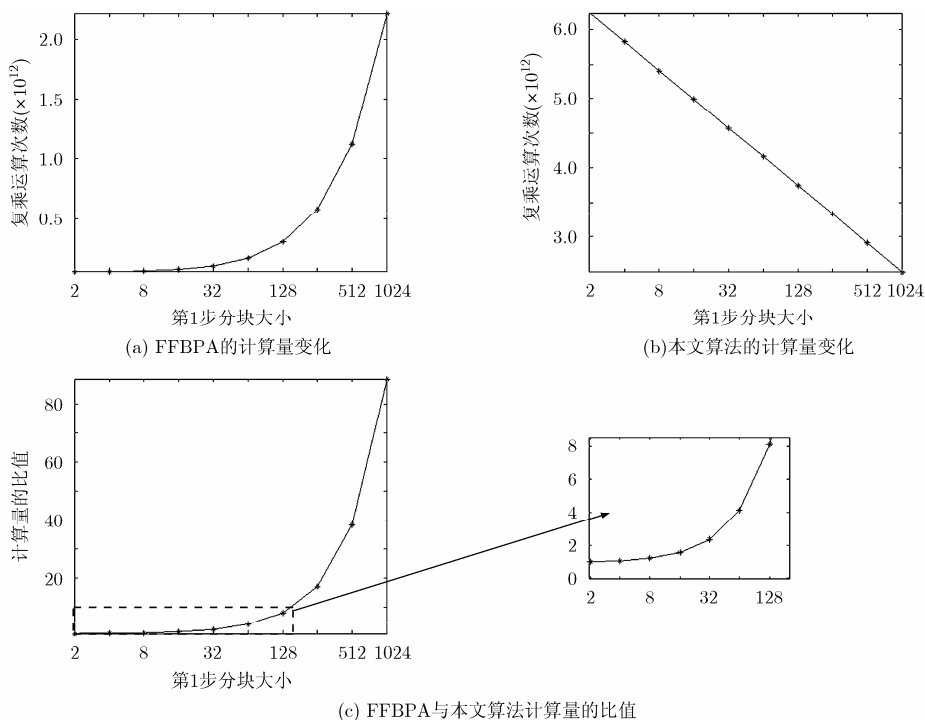


图3 两种算法的计算量对比

下文仿真中对此将具体量化分析。结合图 3 (c)可以看出，在子孔径长度取 2 时，两种算法的计算量相当，但随着子孔径长度的加大，本文算法相对于 FFBPA 进一步减少了计算量。

4 本文算法在多模式 SAR 下的应用

如前文所述，本文算法采用子孔径直线轨道近似，可以妥善处理直线轨道 SAR 和曲线轨道 SAR，适用于任意轨道模型。而对于不同的成像模式，只需做简单的调整即可，下面针对几种典型的 SAR 模式，分析本文算法的应用。

首先分析聚束 SAR，滑动聚束 SAR 和 TOPS SAR 这类波束指向 SAR，其成像几何如图 4 所示，图中， R_{rot} 为波束旋转中心距离。

由图 1 和图 4 可以看出，条带 SAR 和上述 3 种波束指向 SAR 之间存在一定的内在关系，令 $\rho = R_{rot} / R_{ref}$ ，则第 n 个子孔径的参考中心距离可以用相应的旋转中心距离表示为

$$R_{ref}(n) = R_{rot}(n) / \rho \quad (9)$$

因此，用本文算法处理波束指向 SAR 数据时，需按照式(9)调整每个子孔径的去斜函数值。全孔径信号相干积累累加时，通过目标到各子孔径中心的

斜距和方位角 ϕ 对应的方位多普勒值在各子图中插值取点。

对于圆周 SAR 来说， R_{ref} 是定值，子孔径间去斜函数维持定值，处理过程更为简单，这里不再赘述。

除上述单基 SAR 之外，本文算法也适用于双基 SAR 的成像处理。图 5 给出了双基 SAR 的成像几何。

对于任意点 P 来说，用场景中心回波进行去斜处理后的剩余相位形式依然为式(5)，只不过其中的 R_p 和 R_{ref} 应改写为(下标 T 代表发射天线， R 代表接收天线)

$$\left. \begin{aligned} R_p &= \frac{R_{pT} + R_{pR}}{2} \\ R_{ref} &= \frac{R_{refT} + R_{refR}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

新的插值函数为

$$\left. \begin{aligned} K_x &= \frac{K_r}{2} \left(\frac{-x_T}{R_{refT}} + \frac{-x_R}{R_{refR}} \right) \\ K_y &= \frac{K_r}{2} \left(\frac{R_{sT}}{R_{refT}} + \frac{R_{sR}}{R_{refR}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

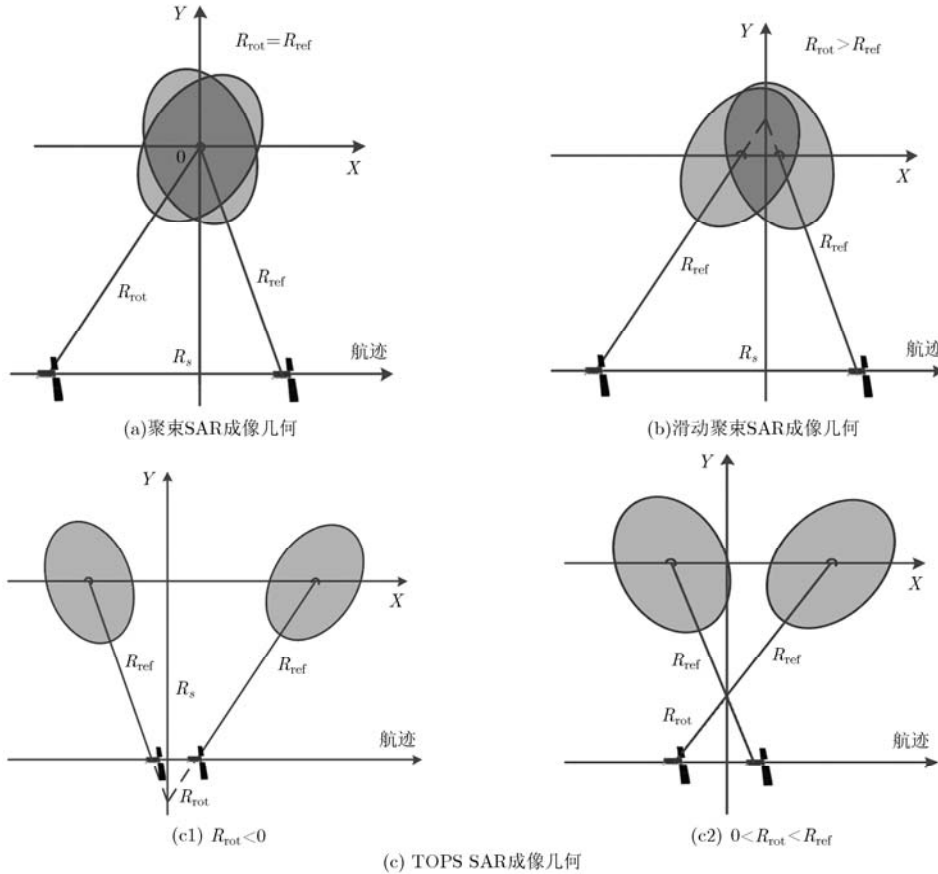


图 4 波束指向 SAR 成像几何

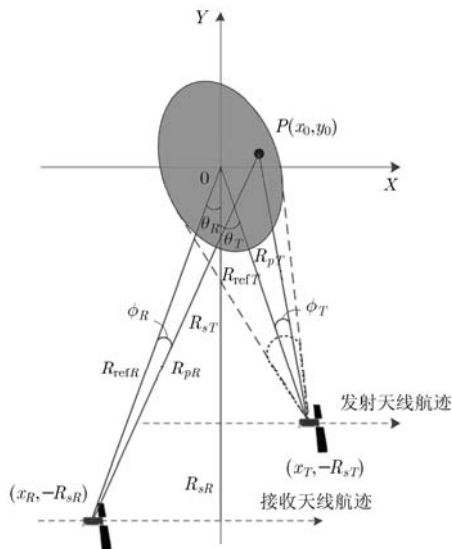


图 5 双基 SAR 成像几何

用本文算法处理双基 SAR 数据时, 根据式(10)和式(11)进行子孔径 PFA 处理, 子孔径间信号相干叠加即可。对其它 SAR 模式, 只需按照上文分析的思路将本文算法做相应的调整。所以, 本文算法适用于任意轨道模型和成像模式。

5 仿真

为验证本文算法处理曲线轨道, 长孔径, 大距离徙动等难题的有效性, 这里结合 STK 对 0.1 m 分辨率星载聚束 SAR 进行成像仿真, 并将成像结果与 FFBPA 进行对比, 以凸显本文算法的优越性。主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

载波波长 λ	0.03125 m
发射信号带宽 B	3 GHz
脉冲持续时间 T_a	1 μ s
PRF	2500 Hz
轨道高度 H	1100 km
离心率 e	0.001
入射角 θ	30°

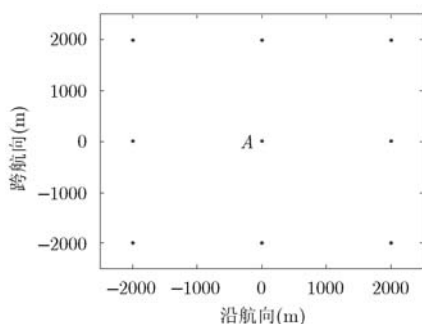


图 6 点目标位置

在表 1 中, 入射角 $\theta = 30^\circ$, 为使场景地距分辨率 $0.886 \times C / (2B \sin(\theta))$ 达到 0.1 m, 取发射信号带宽 $B=3$ GHz。方位向为达到 0.1 m 分辨率, 对于正侧视来说分辨率为 $0.886 \times \lambda / (2\Delta\varphi)$, 波束扫描范围设为 $(-4.5^\circ, 4.5^\circ)$, 即 $\Delta\varphi = 9^\circ$

在 4 km \times 4 km 的场景中均匀放置 9 个点目标, 点的位置如图 6 所示。

首先分析子孔径内直线模型近似对成像质量的影响, 以及场景大小对分块大小选取的要求。采用表 1 的参数, SAR 合成孔径点数 $N = 71680$, 子孔径内采用直线模型近似, 分别分 8 块, 16 块和 32 块进行处理, 近似误差如图 7 所示。

可以看出, 分 16 块和 32 块时, 子孔径直线近似带来的斜距误差小于 $\lambda/4$ 。近似误差对成像的影响如图 8 所示, 可以看出, 分 8 块进行子孔径直线近似会产生较大的栅瓣, 分 16 块时, 栅瓣已经得到抑制, 分 32 块时已基本没有栅瓣。

除此之外, 另一个影响分块大小的因素为平面波假设, 结合仿真参数 $R_{ref} \approx 1250$ km, 由式(9)可得子孔径长度 $L_s \leq 1.09 \times 10^4$ m, 卫星速度 $V_s \approx 7400$ m/s, 那么子孔径点数 $n \leq 3700$, 即分块数应多于 20 块。

综合以上两个因素, 同时要顾及子孔径内方位频谱不模糊, 下面用本文方法采用 32 个分块, 以 4 为基数, 对星载 0.1 m 分辨率聚束 SAR 仿真回波数据进行处理, 程序在一台单核服务器上运行, 整个过程用了 56 min。成像结果如图 9 所示。

为了凸显本文算法相对 FFBPA 的优越性, 在同一台服务器上, 对相同的回波数据用 FFBPA 也进行了处理, 根据 FFBPA 分块误差的要求, 将全孔径分为 512 块, 同样以 4 为基数进行图像融合。整个过程用了 380 min, 达到本文所提算法消耗时间的 6 倍之多, 因此本文算法相比 FFBPA 大大减少了计算量。

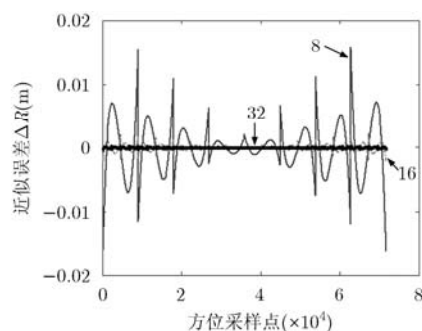


图 7 子孔径直线近似斜距误差

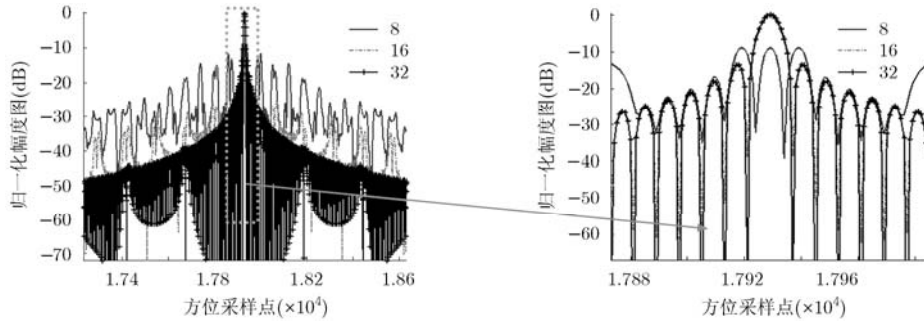


图 8 子孔径直线近似对成像的影响

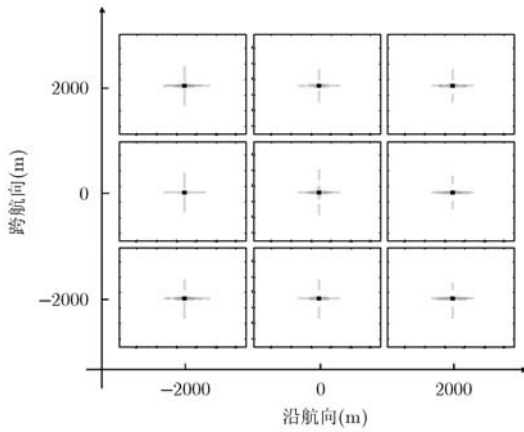


图 9 正侧视聚束 SAR 成像结果

图 10(a)和图 10(b)分别给出了采用两种算法对场景中心点 A 进行成像的成像结果高程图，可以看出，两种算法的成像效果相当。为了凸显文中分析的 FFBPA 分块较多即子孔径较短时带来的插值误差引入的问题，我们将全孔径分为 1792 块(每块 40 个脉冲)，同样以 4 为基数(不足 4 块时以实际为准)进行图像融合，用时 280 min，成像结果如图 10 (c)所示，可以看出 1792 块成像已经造成图像质量的下降，分块越多，虽然速度更快但质量将越差。图 11 给出了成像结果剖面图对比，更为清晰地说明 FFBPA 的插值误差问题，以及本文算法可以在保证成像质量的同时提高运算效率。

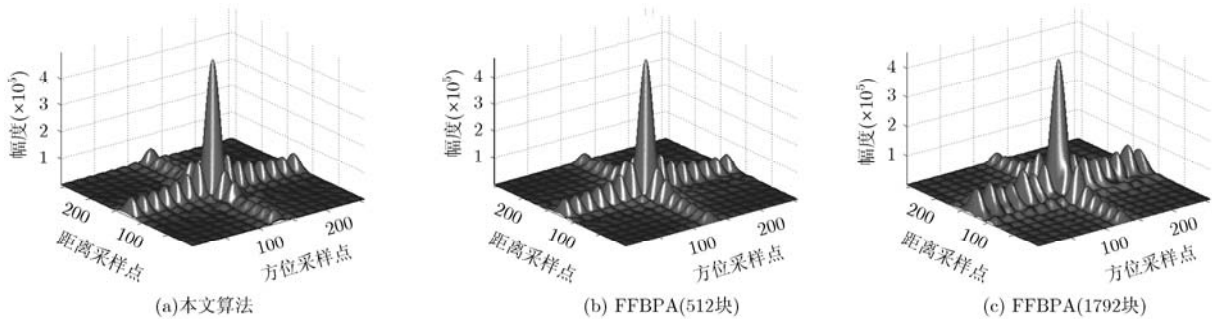


图 10 采用两种方法对中心点 A 成像的结果对比

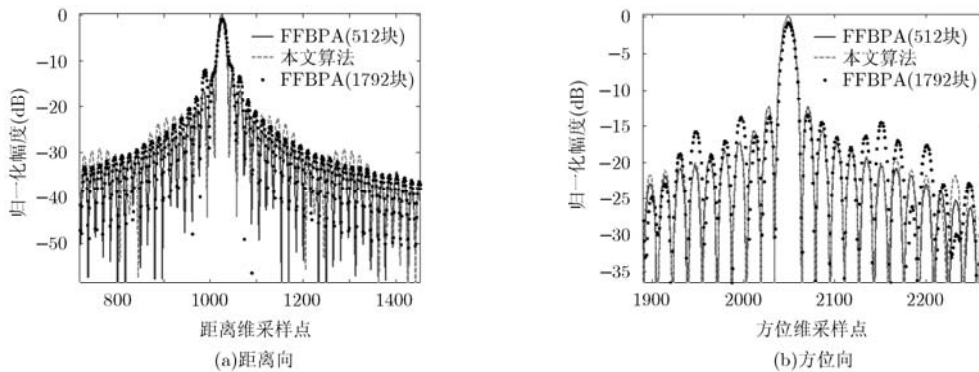


图 11 采用两种方法对中心点 A 成像的结果剖面图

6 结论

本文分析了 FFBPA 中计算效率和图像质量相互矛盾的问题, 结合传统 PFA 成像, 提出一种新的快速算法。该算法首先采用 PFA 在极坐标系下进行成像, 与 FFBPA 相比可以在减少信号相干叠加次数的同时保证运算效率, 不仅减少了多次插值操作引入的误差积累, 同时简化了算法流程, 因此, 从兼顾计算量和图像质量角度考虑, 本文算法有很大的优越性。本文还分析说明了本文算法通用于任意轨道模型和多种成像模式, 并从细节上针对多种模式对算法进行了调整。最后通过本文算法和 FFBPA 的仿真实验对比, 证实本文算法能在保证图像质量的同时, 大幅削减计算量, 同时, 仿真也证实了本文算法可以有效处理曲线轨道、远距离、超高分辨率等棘手的问题, 具有较高的实用性。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 200-206.
 - [2] Smith A M. A new approach to range-Doppler SAR processing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(2): 235-251.
 - [3] Raney R K, Runge H, Bamler R, *et al.* Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
 - [4] Zeng T, Wang R, Li F, *et al.* A modified nonlinear chirp scaling algorithm for spaceborne/stationary bistatic SAR based on series reversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(5): 3108-3118.
 - [5] Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, Liu Yan, *et al.* Extended NCS based on method of series reversion for imaging of highly squinted SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 446-450.
 - [6] Lin Yun, Hong Wen, Tan Wei-xian, *et al.* Airborne circular SAR imaging: results at P-band[C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012, 1: 5594-5597.
 - [7] Lee Woo-kyung and Kim Ah-leum. An efficient automatic geo-registration technique for high resolution spaceborne SAR image fusion[C]. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011, 1: 3566-3569.
 - [8] Wang J, Wang Y, Zhang J, *et al.* Resolution calculation and analysis in bistatic SAR with geostationary illuminator[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 194-198.
 - [9] Vu V T, Sjogren T K, and Pettersson M I. SAR imaging in ground plane using fast backprojection for mono- and bistatic cases[C]. 2012 IEEE Radar Conference, Atlanta, USA, 2012: 184-189.
 - [10] Wang Yi-duo, Xi Ping, and Xue Wei. Fast filter back projection algorithm based on hexagonal grid[C]. International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, China, 2010: 964-969.
 - [11] Yegulalp A F. Fast backprojection algorithm for synthetic aperture radar[C]. The Record of the 1999 IEEE Radar Conference, Waltham, Massachusetts, 1999: 60-65.
 - [12] Ulander L M H, Hellsten H, and Stenstrom G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic System*, 2003, 39(3): 760-776.
 - [13] Durand R, Ginolhac G, Thirion-Lefevre L, *et al.* Back projection version of subspace detector SAR processors[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1489-1497.
 - [14] Albuquerque Marcelo, Prats Pau, and Scheiber Rolf. Applications of time-domain back-projection SAR processing in the airborne case[C]. 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008: 1-4.
 - [15] Doren N E. Space-variant post-filtering for wavefront curvature correction in polar formatted spotlight-mode SAR imagery[D]. [Ph.D. dissertation], the University of New Mexico, 1999.
 - [16] Burns B L and Cordaro J T. SAR image formation algorithm that compensates for the spatially variant effects of antenna motion[J]. *Proceedings SPIE*, 1994, DOI: 10.1117/12.177178.
- 杨泽民: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为机载 SAR 运动补偿和星载 SAR 成像等。
- 孙光才: 男, 1984 年生, 讲师, 研究方向为星载高分辨多模式 SAR 成像、动目标成像及干扰技术研究。
- 吴玉峰: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像和运动补偿等。
- 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。