

文章编号:1004-9037(2014)04-0625-06

基于数字聚束技术的双基 SAR-PFA 波前弯曲补偿算法

羌晓丹^{1,2} 毛新华² 朱岱寅²

(1. 煤炭工业郑州设计研究院股份有限公司, 郑州, 450007; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要:双基合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)极坐标格式算法(Polar format algorithm, PFA)是基于平面波前假设建立的,在聚焦过程中会引入波前弯曲误差,使聚焦图像出现空变几何失真和散焦现象。因此,实际应用双基 PFA 时其有效成像场景的大小通常受到一定限制。本文提出了一种基于数字聚束技术的双基 PFA 波前弯曲误差补偿新方法。该方法首先利用数字聚束预滤波处理将原始的宽波束划分成多个对应不同子场景的窄波束,然后依次对窄波束数据进行补偿和成像,最后再通过子场景拼接恢复全场景图像。理论和仿真结果表明该方法能够有效地补偿波前弯曲误差,扩大双基 PFA 的有效场景聚焦范围。

关键词:双基 SAR;极坐标格式算法;数字聚束;波前弯曲误差补偿

中图分类号:TN958

文献标志码:A

Bistatic SAR-PFA Wavefront Curvature Compensation Based on Digital Spotlighting Technology

Qiang Xiaodan^{1,2}, Mao Xinhua², Zhu Daiyin²

(1. Coal Industry Zhengzhou Design & Research Company, Zhengzhou, 450007, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The polar format algorithm(PFA) for bistatic SAR imaging is based on the planar wavefront assumption which introduces wavefront curvature effect in the focusing process. There is space-variant geometry distortion and defocusing effect in the focused image via bistatic PFA. Hence, the focused scene size using bistatic PFA is usually restricted. A new method is proposed to solve the problem of wavefront curvature compensation using the digital spotlighting technology. Firstly, the digital spotlighting is preprocessed to divide the original wide beam into several narrow beam phase history data, each of which corresponds to different small image patch. And then each narrow beam is compensated and imaged. Finally all these focused image patches are mosaiced together to get a full scene image. Theory and simulation results show that the method can effectively compensate the wavefront curvature effect and enlarge the focused scene size for bistatic PFA.

Key words: bistatic SAR; polar format algorithm; digital spotlighting; wavefront curvature compensation

引 言

近年来,双基 SAR 受到广泛关注,它能在散射方向、极化、视角等诸多方面获得更为丰富的地面

遥感信息,在高分辨率成像、干涉测高、干涉洋流测速、地表覆盖特征分类等方面有着广泛的应用前景^[1]。但双基 SAR 系统中的收发分置也使得其二维点目标响应频谱难以准确得到,从而导致单基 SAR 频率域成像算法扩展到双基数据处理中较为

基金项目:国家自然科学基金(61301210)资助项目;教育部博士点基金(20123218120021)资助项目;中央高校基本科研业务费专项(NS2012097)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20130815)资助项目。

收稿日期:2012-10-11;修订日期:2013-10-12

困难。与之相比,单基时间域成像算法可以直接移植到双基数据处理中,应用较为方便,其中,PFA算法简洁高效且适应性强,从而成为双基 SAR 成像处理的一种有效选择^[2]。但另一方面,双基 PFA 采用了平面波前假设,而实际的波前是弯曲的,由此引入了相位误差,并导致图像出现空变几何失真和散焦现象,在高分辨率要求下有效成像场景的范围难以满足实际应用需求^[3-4]。

针对 PFA 中波前弯曲误差补偿的问题,目前主要研究的解决方案有三种,即宽场景极坐标格式算法(Widefield polar format algorithm, WPFA)^[5],基于重叠子孔径处理的 PFA 算法^[6]和基于空变后处理的 PFA 算法^[7]。这些方法在雷达平台匀速直线运动条件下都能很好地补偿波前弯曲误差,提高算法有效成像场景范围,但却无法直接推广应用于任意雷达航迹。为了解决此问题,本文提出了一种基于数字聚束技术的双基 PFA 算法,能够很好地实现大机动条件下的高分辨率、大场景成像。

1 双基 SAR 极坐标格式算法

聚束模式双基 SAR 成像几何模型如图 1 所示。场景中心 O 点定义为坐标原点,地面为 $x-y$ 平面。假定发射机和接收机均以恒定高度匀速飞行,发射机沿着平行于 x 轴的方向飞行,接收机沿与 x 轴角度为 θ_s 的方向飞行。 $R_c^T(t)$ 和 $R_c^R(t)$ 分别表示发射机和接收机天线相位中心到场景中心点的瞬时距离。假设全场景范围用 W 表示, P 是场景中任意一点目标,设其坐标为 $(x, y, 0)$, $R_{xy}^T(t)$ 和 $R_{xy}^R(t)$ 分别表示发射机和接收机到该点目标的瞬时距离。将整个场景划分成若干个子块,其中第 m 个子块的中心点是 $(x_m, y_m, 0)$,范围用 W_m 表示。

雷达发射宽带信号被场景中点目标反射后接收到全场景 W 范围内的回波信号,再通过解调、距离向匹配滤波、运动补偿等预处理后可表示为

$$S_w(t, f_\tau) = \iint_{(x, y) \in W} \sigma(x, y) \cdot \exp\left[j \frac{2\pi}{c} (f_c + f_\tau) \cdot (R_c^T(t) - R_{xy}^T(t) + R_c^R(t) - R_{xy}^R(t))\right] dx dy = \iint_{(x, y) \in W} \sigma(x, y) \cdot \exp\left[j \frac{2\pi}{c} (f_c + f_\tau) \Delta R(t)\right] dx dy \quad (1)$$

式中: t 为方位时间, f_τ 为距离频率, $\sigma(x, y)$ 为目标散射强度, c 为电磁波传播速度, f_c 为载频, $\Delta R(t) = R_c^T(t) - R_{xy}^T(t) + R_c^R(t) - R_{xy}^R(t)$ 为差分距离项。

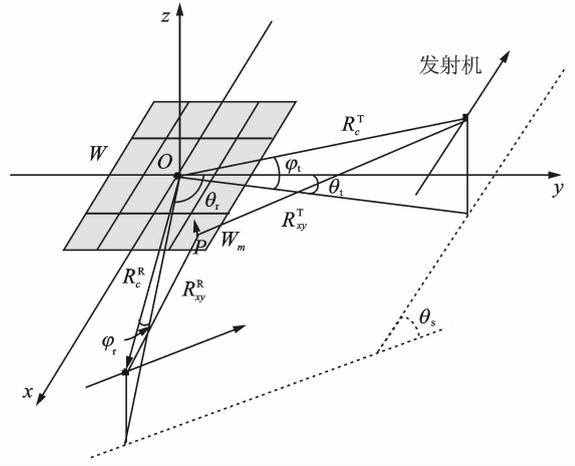


图 1 聚束模式双基 SAR 成像几何模型

Fig. 1 Imaging geometric model of spotlight mode bistatic SAR

在平面波前假设条件下, $\Delta R(t)$ 可表示为

$$\Delta R(t) \approx x \cos \varphi_t(t) \sin \theta_t(t) + y \cos \varphi_t(t) \cos \theta_t(t) + x \cos \varphi_r(t) \sin \theta_r(t) + y \cos \varphi_r(t) \cos \theta_r(t) \quad (2)$$

式中: $\varphi_t(t), \theta_t(t)$ 是发射机的俯仰角和方位角, $\varphi_r(t), \theta_r(t)$ 是接收机的俯仰角和方位角,将式(2)代入式(1)并定义双基数据采集的空间频率样本为

$$\left. \begin{aligned} f_x(f_\tau, t) &= \frac{f_c + f_\tau}{2} [\cos \varphi_t(t) \sin \theta_t(t) + \cos \varphi_r(t) \sin \theta_r(t)] \\ f_y(f_\tau, t) &= \frac{f_c + f_\tau}{2} [\cos \varphi_t(t) \cos \theta_t(t) + \cos \varphi_r(t) \cos \theta_r(t)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则信号表示为

$$S_w(t, f_\tau) = \iint_{(x, y) \in W} \sigma(x, y) \cdot \exp\left\{j \frac{4\pi}{c} [x f_x(f_\tau, t) + y f_y(f_\tau, t)]\right\} dx dy \quad (4)$$

式(4)表示的信号可以看作是地面点散射体坐标的二维傅里叶变换。但实际回波数据只是式(4)在空间频域的二维离散采样,采样间隔在 (t, f_τ) 域是均匀分布的,但映射到空间频域 (f_x, f_y) 上则为极坐标格式排列。为了利用 FFT 快速实现离散傅里叶变换,双基 PFA 通过二维重采样将极坐标格式数据转换成矩形格式数据,使式(4)在空间频域正交均匀采样,而后对数据作二维 IFFT 即可得到图像。双基极坐标格式算法的实现与单基情况下类似,具体流程如图 2 所示^[4]。

双基 PFA 推导中对差分距离作了一阶近似(即平面波前假设),这在对小场景进行远距离和 low resolution 成像时是合理的。但随着分辨率的提高,成

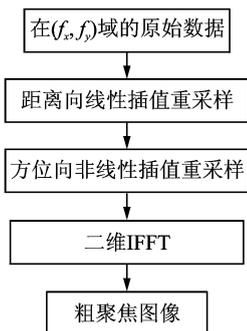


图 2 双基 PFA 处理流程

Fig. 2 Flow chart of bistatic PFA

像场景的增大,特别是在对近距离场景进行成像时,平面波前假设引入的误差变得不可忽略,会对有效成像场景的范围产生一定限制。

双基 PFA 有效成像场景半径与载频、分辨率、作用距离等因素有关,用公式表示为^[4]

$$r_0 \leq \sqrt{2\lambda_c} \left(\frac{L_t^2}{R_{tc0}^3} + \frac{L_r^2}{R_{rc0}^3} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: r_0 为有效成像场景半径, λ_c 为载频波长, L_t 和 L_r 分别为发射机和接收机的孔径长度(与方位分辨率成反比), R_{tc0} 和 R_{rc0} 分别为发射机和接收机的作用距离。在用 PFA 处理成像时,不论场景多大,只有距离参考中心 r_0 范围以内的部分可认为

是聚焦理想的,远离场景中心的目标仍然存在由波前弯曲误差引起的几何失真和散焦效益,且距离场景中心越远,波前弯曲的影响越严重。

2 基于数字聚束技术的双基 PFA 波前弯曲误差补偿

2.1 数字聚束预滤波

数字聚束通过对雷达回波信号进行预滤波处理,可以任意地减小天线波束有效照射范围,并控制天线波束指向在雷达实际波束照射范围内变化。因此,利用数字聚束预滤波处理可以实现对式(1)中点目标回波信号的分离,即将原始的宽波束大场景数据分解成若干个窄波束小场景数据。

本文根据文献[8]提出的改进的数字聚束预滤波思想,得到了一种新的双基 PFA 波前弯曲误差补偿的方法。图 3 是单基情况下采用 PFA 进行数字聚束预滤波处理的流程图。整个滤波过程分为三个部分:首先以整个场景中心为参考,采用极坐标格式算法进行粗聚焦成像,然后根据期望的子波束指向截取图像中不同子块区域,最后对每个子块图像通过 PFA 处理的逆过程返回数据域,得到 N 个子波束数据^[8-9]。

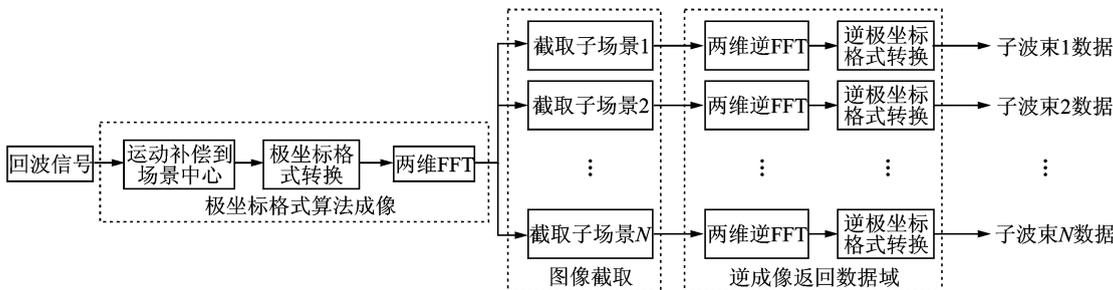


图 3 改进的数字聚束预滤波处理流程

Fig. 3 Pre-filter flow chart of modified digital spotlighting

2.2 基于数字聚束技术的波前弯曲误差补偿过程

利用数字聚束波束分割原理,本文提出了一种有效的双基 PFA 波前弯曲补偿算法,算法处理流程如图 4 所示。其基本思想是:利用改进的数字聚束技术实现雷达波束分割,使得分割后的子波束照射场景范围满足 PFA 平面波前假设,因此再利用 PFA 对每个子波束分别进行成像处理并将得到的

子图像进行无缝拼接,可以有效解决 PFA 大场景高分辨率成像问题。

2.2.1 数字聚束处理

数字聚束预滤波处理时,首先是对式(1)以场景中心为参考点进行运动补偿的信号,利用极坐标格式算法处理得到整个场景的初步聚焦图像。接着需要对上述图像进行分块。考虑到粗聚焦图像存在几何失真,因此本文所述方法对图像的分块不是在粗聚焦图像上直接划分,而是在地理坐标系中将成像场景分成若干子块,对每个子块,利用双基

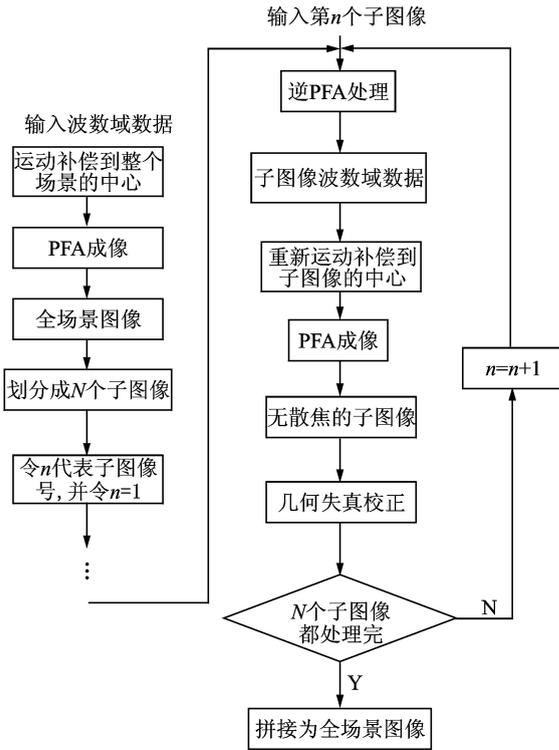


图 4 基于数字聚束处理的双基 SAR 成像流程图

Fig. 4 Flow chart of bistatic SAR imaging based on digital spotlighting processing

PFA 几何失真映射关系, 找到子块中心点在双基 PFA 粗聚焦图像中的位置, 并以此为中心, 截取包含子块的一个子图像。虽然子块划分的越小, 成像精度越高, 但过多的子块会增加算法的运算负担, 影响其高效性。因此划分时只需控制子块大小在有效成像场景范围内即可, 这样在子块内部, 波前弯曲误差引起的散焦效应可以忽略不计。但此时几何失真现象仍可能存在, 后续处理中需要进一步校正。

划分得到的子图像逐一通过极坐标格式处理的逆过程得到包含其信息的原始相位历史数据, 这里可以用较低的采样率, 此时要恢复的原始相位历史是在 (t, f_r) 域等间隔采样的数据。极坐标格式处理逆过程的第一步是对子图像作二维 IFFT 返回空间频域, 得到的数据在空间频域平面内为二维均匀采样; 接着通过二维逆重采样得到极坐标格式采样的波数域数据, 此时输入、输出坐标的选择要严格参考之前双基 PFA 重采样时的坐标, 且需要根据划分的子图像数目进行适当的抽取, 得到数字聚束预滤波处理后的第 m 个子图像的子波束数据

$$S_{w_m}(t, f_{m}) = \iint_{(x, y) \in W_m} \sigma(x, y) \cdot \exp\left[j \frac{2\pi}{c} (f_c + f_{m})\right]$$

$$\left. (R_c^T(t) - R_{xy}^T(t) + R_c^R(t) - R_{xy}^R(t)) \right] dx dy \quad (6)$$

这里 f_{cm} 表示按照子图像数目进行抽取后的距离频率。

2.2.2 子波束 PFA 成像

对子波束处理成像时, 需要先将每个子波束数据重新运动补偿至对应子图像的中心点。由于此时子波束数据处于相位历史域, 可以很方便地进行运动补偿。要注意的是, 由于几何失真的影响, 子图像的中心位置 $(x_m, y_m, 0)$ 并不是真实的空间位置 $(x_{act}, y_{act}, 0)$, 而是其在有几何失真的图像中的像素位置。为了精确地进行运动补偿, 需要根据几何失真的映射关系, 由子图中心的名义位置 $(x_m, y_m, 0)$ 计算其实际位置 $(x_{act}, y_{act}, 0)$ 。可得到运动补偿函数如下

$$S_{ref}(t, f_{cm}) = \exp\left[j \frac{2\pi}{c} (f_c + f_{cm}) \left(R_{c_{act}}^T(t) - R_c^T(t) + R_{c_{act}}^R(t) - R_c^R(t) \right) \right] \quad (7)$$

其中 $R_{c_{act}}^T(t)$ 和 $R_{c_{act}}^R(t)$ 分别表示发射机和接收机到子图像场景中心真实位置 $(x_{act}, y_{act}, 0)$ 的瞬时距离。

相位补偿后得到新的只包含第 m 个子图信息的相位历史为

$$S'_{w_m}(t, f_{cm}) = \iint_{(x, y) \in W_m} \sigma(x, y) \cdot \exp\left[j \frac{2\pi}{c} (f_c + f_{cm}) \left(R_{c_{act}}^T(t) - R_{xy}^T(t) + R_{c_{act}}^R(t) - R_{xy}^R(t) \right) \right] dx dy \quad (8)$$

根据新的运动补偿中心, 对式 (8) 所示的子波束数据进行 PFA 成像。此时得到的子图像在有效成像场景范围内, 可认为是无散焦的, 这样就实现了改善子图像质量的目的。

2.2.3 子图像拼接

将各子图分别进行几何失真校正后, 按照实际的几何位置关系进行拼接。由于子图像划分时相邻子图像之间有少量的重叠, 通过重叠区域相关的方法可以很方便地进行相邻子图的配准和拼接。将所有子图像全部拼接起来, 即可得到聚焦效果全面改善的整幅全图像。

整个成像的示意图如图 5 所示。

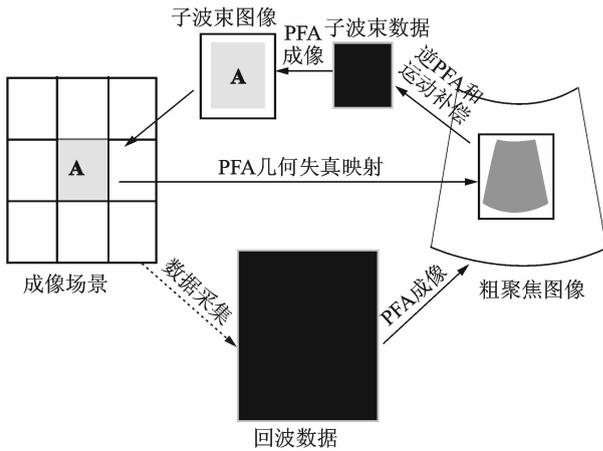


图 5 子图像划分和拼接示意图

Fig. 5 Illustration of dividing and mosaicing sub-images

3 点目标仿真

设置地面仿真场景由 49 个点目标组成,在场景中心有一个点目标,其余的点目标围绕中心点目标组成一个矩形场景,成像场景方位和距离宽度均为 420 m。仿真参数如表 1 所示。发射机沿着与 x 轴平行的方向飞行,接收机飞行轨迹与 x 轴成 30° 夹角。

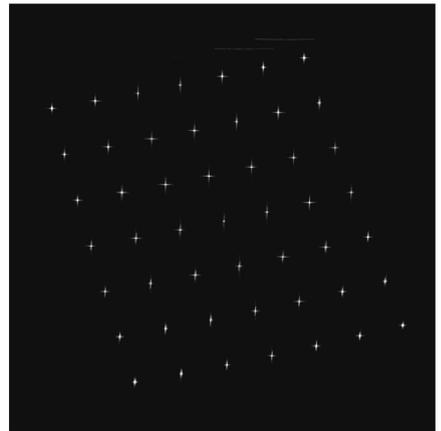
表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

	发射机	接收机
X 方向速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	154	133.4
Y 方向速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0	77
斜视角度/ $(^\circ)$	0	30
载频/GHz	10	10
距离向带宽/MHz	400	400
信号采样频率/MHz	480	480
脉冲重复频率/Hz	1 200	1 200

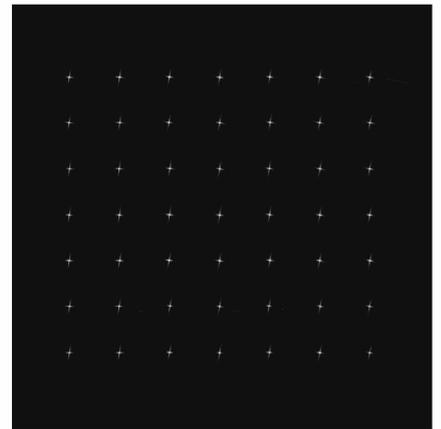
在该组参数下,双基 PFA 有效聚焦场景半径为 87 m,设置的成像场景大小远超出此范围。图 6(a)给出了对仿真回波数据直接用双基 PFA 成像的结果,可以看出,受波前弯曲误差的影响,除了靠近场景中心的部分点目标外,其余目标均存在明显的几何失真和散焦效应。图 6(b)是采用通过数字聚束实现双基 PFA 波前弯曲补偿得到的结果,其在实现坐标旋转的同时也校正了几何失真,同时从图中也可大致看出点目标散焦的补偿效果。

为了更直观地看出数字聚束技术对散焦效应的补偿效果,可以分析点目标的方位向剖面图,因为波前弯曲引起的高次相位误差只存在于方位向,对距离向是没有影响的。图 7 是 4 个具有代表性



(a) 双基极PFA成像

(a) Image of bistatic PFA



(b) 本文方法成像

(b) Image of the proposed algorithm

图 6 两种方法成像效果对比

Fig. 6 Imaging comparison of the two algorithms

的点目标在双基 PFA 和本文方法处理下的方位向剖面图。从图中比较得出结论:由于场景中心点不存在高次相位误差,因此两种算法有几乎相同的响应;但对于非场景中心点,尤其是距离场景中心较远的点,双基 PFA 成像后有明显散焦,这会严重影响成像精度,通过数字聚束的方法处理后,所有目标聚焦效果接近理想,波前弯曲效应得到明显补偿。

4 结束语

本文提出了一种基于数字聚束技术的双基 PFA 波前弯曲误差补偿方法,且对该方法的实现流程进行了详细的介绍。文中对原始的回波数据进行数字聚束处理,得到对应不同子图像的窄波束数据,控制子图像的大小在有效成像场景范围内,通过在相位历史域对每个窄波束进行处理能得到精确聚焦的子图像,从而有效解决了双基 PFA 波前弯曲误差的精确补偿问题。仿真结果表明该方法具有良好的双基成像效果。

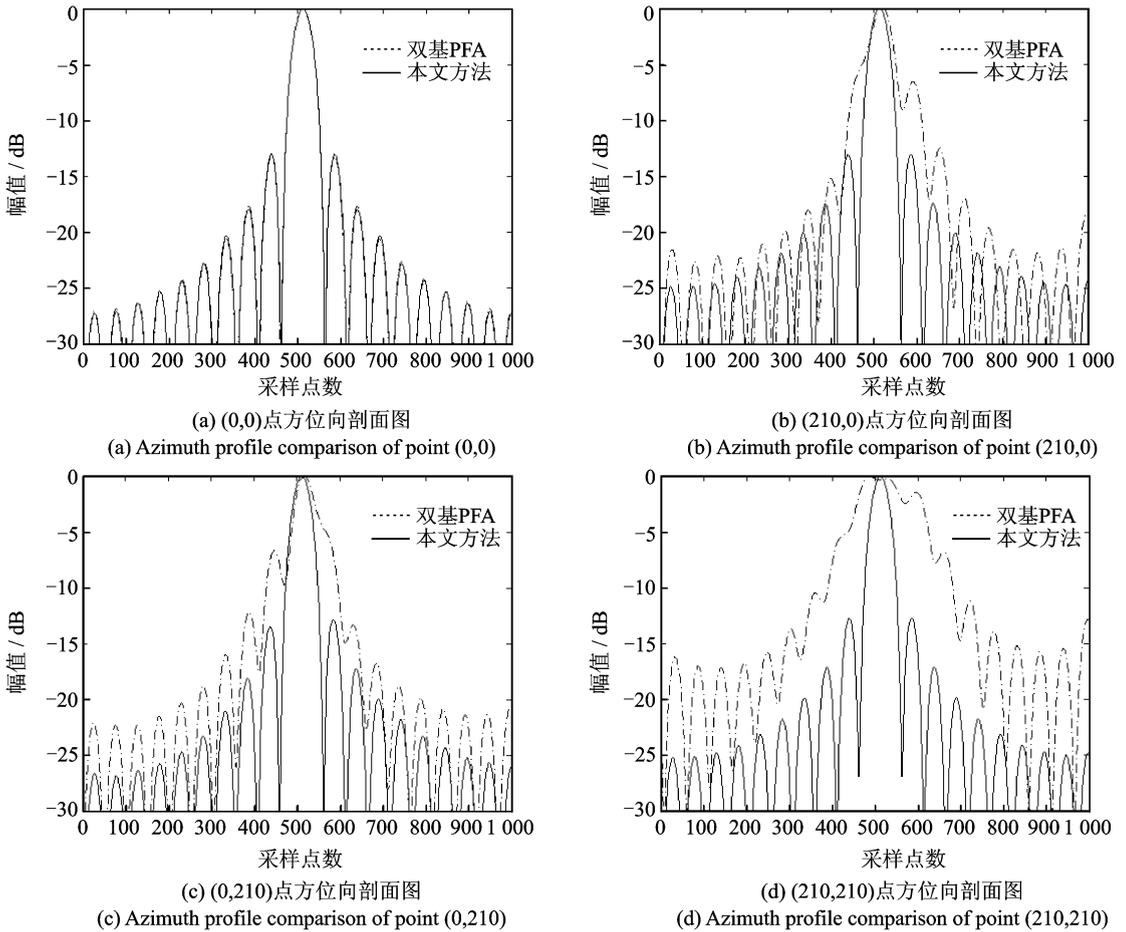


图 7 点目标响应方位向剖面图比较

Fig. 7 Azimuth profile comparison of point target response

参考文献:

- [1] Yarman C E, Yazici B, Cheney M. Bistatic synthetic aperture radar imaging for arbitrary flight trajectories [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2008, 17(1):84-93.
- [2] 夏玉立, 黄瑶, 雷宏. 双站聚束 SAR 极坐标格式成像算法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(1):49-54.
Xia Yuli, Huang Yao, Lei Hong. Polar format algorithm for bistatic spotlight SAR [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2009, 24(1):49-54.
- [3] Doerry A W. Wavefront curvature limitations and compensation to polar format processing for synthetic aperture radar images [R]. Sandia Report, Sandia National Laboratories, 2007:1-60.
- [4] Rigling B D, Moses R L. Polar format algorithm for bistatic SAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4):1147-1159.
- [5] Carrara W G, Goodman R S, Ricoy M A. New algorithms for widefield SAR image formation [C]//Proceedings of IEEE Radar Conference. Philadelphia, PA: 2004:38-43.
- [6] Doerry A W. Synthetic aperture radar processing

- with polar formatted subapertures [C]//Conference Record of the Twenty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 1994:1210-1215.
- [7] Jakowatz J C V, Wahl D E, Thompson P A. Space-variant filtering for correction of wavefront curvature in spotlight mode SAR imagery formed via polar formatting[J]. Proc of SPIE, 1997, 3070:33-42.
- [8] 朱岱寅, 毛新华. 基于数字聚束的合成孔径雷达极坐标波前弯曲补偿方法[P]. 中国专利: 102043142, 2011-5-4.
Zhu Daiyin, Mao Xinhua. PFA wavefront curvature compensation based on digital spotlighting technology in SAR[P]. CN102043142, 2011-5-4.
- [9] Nguyen L, Ressler M, Wong D, et al. Enhancement of backprojection SAR imagery using digital spotlight preprocessing[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference. Philadelphia: PA, 2004:53-58.

作者简介: 羌晓丹(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向: SAR 成像和信号处理, E-mail: qiangxiaodan@126.com; 毛新华(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 雷达成像和空时自适应处理, E-mail: xinhua@nuaa.edu.cn; 朱岱寅(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 雷达信号处理, E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn.