

基于双基地 ISAR 的极坐标格式算法及其改进算法

朱小鹏¹, 张 群^{1,2}, 李宏伟¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077;

2. 复旦大学波散射与遥感信息国家教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要: 通过对双基地逆合成孔径雷达(Bistatic-ISAR)回波信号模型进行分析,得出双基地 ISAR 回波信号在空间波数域的分布特性及其支撑区范围;在此基础上,提出了适于双基地 ISAR 的极坐标格式算法(PFA),该算法采用距离向线性插值和方位向非线性插值的方法实现极坐标到直角坐标的变换;此外,针对插值运算复杂度高的问题,在距离向插值中引入 Chirp-Z 变换代替距离向线性插值,并结合方位向非线性插值提出了基于 Chirp-Z 变换的双基地 ISAR 的 PFA 算法;最后通过对点目标模型的仿真验证了所提算法的有效性。

关键词: 双基地逆合成孔径雷达(Bistatic-ISAR); 极坐标格式算法(PFA); Chirp-Z 变换

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2011)02-0388-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.02.024

Bistatic-ISAR Based Polar Format Algorithm and Its Improved Algorithm

ZHU Xiao-peng¹, ZHANG Qun^{1,2}, LI Hong-wei¹

(1. Inst. of Telecommunication Engineering, AFEU, Xi'an 710077, China;

2. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A method called Polar Format Algorithm(PFA) suitable for the Bistatic-ISAR system is analyzed, the coordinate transformation from polar coordinate to rectangular coordinate is achieved by linear interpolation in range dimension and non-linear interpolation in azimuth dimension. Considering the complexity in interpolation, an improved PFA is proposed by using Chirp-Z transformation to replace the range dimension interpolation, thus reducing computational complexity greatly and obtaining the same effect as interpolation. Simulations of scatter points have demonstrated the validity of the proposed improved algorithm.

Key words: Bistatic-ISAR; Polar format algorithm(PFA); Chirp-Z transform

0 引 言

近年来,双基地逆合成孔径雷达(Bistatic-ISAR)作为一种新的雷达体制,正逐渐成为雷达成像领域的研究热点。由于其收发分置的结构特性,双基地 ISAR 的成像算法不同于常规单基地 ISAR 系统,因此不能简单将单基地 ISAR 系统中的成像算法套用到双基地 ISAR 系统上。目前,针对双基地 SAR 系统中的运动补偿、多普勒参数估计和波数域的研究文献较多^[1-3],而对双基地 ISAR 的研究正

处于起步阶段。国外学者 Palmer 利用水面反射特性分析了伪双基地 ISAR 系统的特性^[4];而后国内学者黄艺毅、张亚标等人对双基地 ISAR 成像体制进行讨论^[5-6],分析了双基地 ISAR 系统中的分辨率和聚焦范围等一些基本问题。

极坐标格式算法(Polar Format Algorithm,PFA)是最早应用于聚束 SAR 的成像算法^[8],同时也是聚束 SAR 中研究较深入的一种成像算法^[8-9];该算法的关键在于实现二维内插,而内插的精度是成像质量和运算效率的关键因素,此后很多工作的重点就

收稿日期:2009-12-10; 修回日期:2010-11-01

基金项目:国家自然科学基金(60971100)

在于如何降低 PFA 算法中的运算量。其中实用化的就是美国 Sandia 国家实验室所提出改进算法^[10], 该算法通过改变雷达接收机的参数来避免距离向的插值, 在方位向采用 Chirp-Z 变换代替插值操作, 整个过程不需要任何插值运算, 但其改变雷达接收参数的方法并不适合大多数雷达系统。

2007 年, Daiyin Zhu 在聚束 SAR 中利用 Chirp-Z 变换对距离向进行处理^[11], 避免了距离向插值操作, 提高了运算效率, 但其没有讨论成像范围和图形失真等问题; 而 Tang Yu 在此基础上, 采用双 Chirp-Z 变换对匹配滤波后的信号进行处理^[12], 给出了一种新颖的实现 PFA 的算法; 而在双基地聚束 SAR 中, 国内学者孙进平于 08 年提出了一种有效聚焦的 PFA 算法^[13], 但具体还是通过内插操作来实现, 其运算效率有待进一步的提高。虽然 PFA 算法主要应用于 SAR 成像系统中, 但对如空天大型运动平台、水面大型舰船等大目标成像时, PFA 算法在 ISAR 成像系统中逐渐凸显出其实用性和军事价值, 而目前国内外对双基地 ISAR 的研究中, 尚没有应用极坐标格式算法的文献发表, 所以研究双基地 ISAR 中的 PFA 算法更有其必要性和紧迫性。

因此, 本文首先对双基地 ISAR 回波信号作解线频调(Dechirp)处理, 将处理后的信号转换到空间波数域进行分析, 得出双基地 ISAR 在空间波数域的分布特性及其支撑区范围; 然后, 通过分析其二维波数域分布特点提出了适于双基地 ISAR 的基于二维内插的 PFA 算法, 该算法运算复杂度高的问题, 本文采用 Chirp-Z 变换代替距离向插值, 提出基于距离向 Chirp-Z 变换的 PFA 算法, 大大降低了双基地 ISAR 中 PFA 算法的复杂度; 最后, 通过对点目标模型的仿真对文中所提算法进行了验证。

1 双基地 ISAR 回波信号模型

建立如图 1 所示的双基地 ISAR 成像模型。在图 1 中, 以收发平台 T_x 和 R_x 的连线中点为坐标原点、以 T_x 和 R_x 的连线为 x 轴建立直角坐标系。其中 o' 为目标参考点 P 为目标区域一散射点。则将目标参考点、 P 点与收发平台的初始距离设为 R_{T0} 、 R_{R0} 、 R_{TP} 和 R_{RP} , 目标参考点与 x 轴的垂直距离为 R_0 , 将收发平台与目标连线的夹角定义为双基地角 β 则为

双基地角的一半, 由于 ISAR 成像目标大小相对于目标与雷达的距离来说一般都很小, 因此收发平台与目标上所有散射点所构成的双基地角在同一时刻可认为是近似相等的, 因此, 在以下的分析中, 均认为 β 为一定值。

双基地 ISAR 与常规 ISAR 成像系统相同, 也是利用距离-多普勒原理进行成像。假设发射平台发射的线性调频信号(LFM)为:

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu \hat{t}^2\right)\right) \quad (1)$$

$$\text{其中 } \text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & |u| > \frac{1}{2} \end{cases}, f_c \text{ 为中心频率, } T_p$$

为脉宽 μ 为调频率。脉冲信号以重复周期 T 依次发射, 即发射时刻 $t_m = mT (m = 0, 1, 2, \dots)$, t_m 称为慢时间。以发射时刻为起点的时间用 \hat{t} 表示, 称为快时间。这两个时间与全时间 t 的关系为: $\hat{t} = t - t_m$ 。

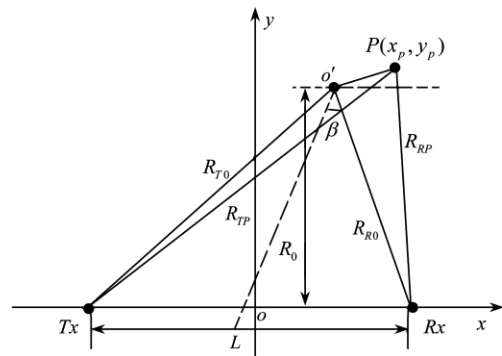


图 1 双基 ISAR 系统模型

Fig. 1 The model of Bi-static ISAR system

设作解线频调处理的参考 LFM 信号为 $s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m)$, 其参考距离为收发平台到参考点的距离和, 设为 R_{ref} , R_p 为点目标 P 到收发平台的距离和。如图 1 所示: $R_{\text{ref}} = R_{T0} + R_{R0}$, $R_p = R_{TP} + R_{RP}$ 。则参考点 o' 、 P 点的回波分别为:

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_{\text{ref}}/c}{T_{\text{ref}}}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{R_{\text{ref}}}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{R_{\text{ref}}}{c}\right)^2\right)\right) \quad (2)$$

$$s_p(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_p/c}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c\left(t - \frac{R_p}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(\hat{t} - \frac{R_p}{c}\right)^2\right)\right) \quad (3)$$

其中, T_{ref} 为参考信号的脉宽, 它比 T_p 要大一些。若设 $\Delta R = R_p - R_{\text{ref}}$, 则解线频调后的差频输出为:

$$s_{\text{Pref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - R_p/c}{T_p}\right) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{\Delta R}{c} - j2\pi\mu\left(\hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}\right) \frac{\Delta R}{c} + j\pi\mu \frac{\Delta R^2}{c^2}\right) \quad (4)$$

对上式去剩余视频相位(RVP) 处理后为:

$$s_{\text{Pref}}(t', t_m) = \text{rect}\left(\frac{t'}{T_p}\right) \exp\left(-j \frac{2\pi}{c}(f_c + \mu t') \Delta R\right) \quad (5)$$

式中, $t' = \hat{t} - \frac{R_{\text{ref}}}{c}$, 表示以参考点时间为基准的快时间域。

在成像过程中, 以 o' 点为参考点, 在录取数据期间雷达对该参考点进行精确跟踪, 并使该点的基频回波相位固定为零。则 ΔR 可近似为^[7]:

$$\Delta R = 2x_0 \cos\beta \sin(\Delta\theta_m) + 2y_0 \cos\beta \cos(\Delta\theta_m) \quad (6)$$

式(6)中, x_0, y_0 为目标点相对参考点的水平和垂直距离; $\Delta\theta_m$ 为成像过程中目标相对于雷达转过的角度, 则(5)式可转化为:

$$s_{\text{Pref}}(t', t_m) = \text{rect}\left(\frac{t'}{T_p}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi \cos\beta}{c}(f_c + \mu t') \cdot (x_0 \sin\Delta\theta_m + y_0 \cos\Delta\theta_m)\right) \quad (7)$$

2 双基地 ISAR 的波数域分析

将(7)式重写如下:

$$s_{\text{Pref}}(t', t_m) = \text{rect}\left(\frac{t'}{T_p}\right) \exp(-jK_R \cdot (x_0 \sin\Delta\theta_m + y_0 \cos\Delta\theta_m)) \quad (8)$$

其中 $K_R = \frac{4\pi \cos\beta}{c} f$, 而 $f = f_c + f_b$, $f_b = \mu t'$ 。

在 ISAR 成像中, 由于目标相对雷达与目标的距离很小, 因此可采用平面波近似。在此近似条件下, 对于任一次回波, 目标上所有散射点回波的波数向量均为 K_R 。其径向波数谱的支撑区为:

$$K_R \in \left(\frac{4\pi \cos\beta}{c} \left(f_c - \frac{B}{2}\right), \frac{4\pi \cos\beta}{c} \left(f_c + \frac{B}{2}\right)\right) \quad (9)$$

图 2 给出了单基地 ISAR 和双基地 ISAR 的波数谱分布示意图。

假设共录取了 M ($m = 1, \dots, M$) 次回波数据, 则第 m 次回波的波数向量方向为:

$$\theta_m = \theta_0 - \Delta\theta_m \quad (10)$$

其中, θ_0 为波数向量的初始方向, 如图 2 所示。通过分析双基地 ISAR 回波信号的波数谱并结合图 2 可以得出: 双基地 ISAR 回波数据的波数谱支撑区与半双基地角 β 有关, 结合本文第二部分 β 为定值的假设, 则回波数据在距离方向上的支撑区是一定的。对于单次回波数据的波数谱, 由于脉冲宽度和采样频率是一定的, 所以其在距离方向上的采样间隔也是均匀的, 但各回波波数谱的起始位置是不同的; 而波数谱的方位向分布与各次回波波数向量的方向 θ_m 有关, 在双基地 ISAR 中, θ_m 并不是均匀变化的^[13], 那么波数谱在方位向上的分布也就是不均匀的。因此, 如果对双基地 ISAR 的波数谱不进行处理而直接进行二维 IFFT 变换不可能得到目标清晰的二维像, 尤其是当目标的横向尺寸较大时, 目标两侧的散射点将在纵向距离上横跨多个距离单元产生越距离单元徙动现象。

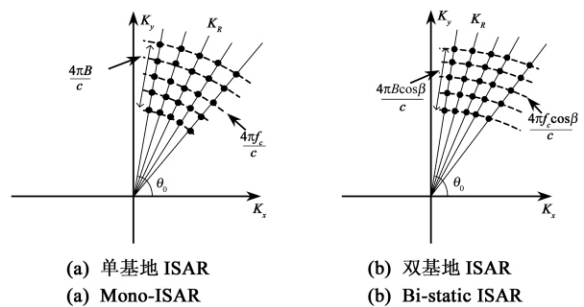


图 2 波数谱分布图

Fig. 2 Distribution of wavenumber spectrum

以初始波数向量的方向 θ_0 为 K'_y 轴重新建立直角坐标系 $K'_x - K'_y$, 则 K'_x 和 K'_y 可以表示成:

$$k_x = K_R \sin\Delta\theta_m; k_y = K_R \cos\Delta\theta_m \quad (11)$$

得到波数谱在新直角坐标系 $K'_x - K'_y$ 中的表达式为:

$$S_{\text{Pref}}(k_x, k_y) = \sigma_0 \exp(-jk_x x_0 - jk_y y_0) \quad (12)$$

式中 σ_0 为目标点散射系数。

3 双基地 ISAR 的极坐标格式成像算法

在确定双基地 ISAR 回波数据的空间波数谱分

布后,采用极坐标格式算法对目标进行成像时,与单基地 ISAR 中的 PFA 类似,需要将二维插值分解为两个一维插值来进行。插值的过程必须保持信号的完整性,同时不能使信号发生畸变。由于距离向插值是从均匀输入间隔到均匀输出间隔的采样,因此实现距离向插值的滤波器必须是线性相位^[14]。这里插值滤波器选为对 sinc 函数进行加窗处理后的低通滤波器。

$$h(m) = \text{sinc}\left(\frac{m}{l}\right) \cdot \text{hamming}(m),$$

$$-\frac{N_m}{2} \leq m \leq \frac{N_m}{2} \quad (13)$$

上式中, N_m 为滤波器的长度。则距离向插值可表示为

$$S_{\text{Pref}}(k_x, k_y) = \sum_{n=-N_m/2}^{N_m/2} S_{\text{Pref}}(k_x, k_y) h(k_y - n\Delta k_y) \quad (14)$$

其中 Δk_y 为满足奈奎斯特准则的距离维空间波数域的采样间隔, k_y 为插值后距离维波数谱的输出点。距离向插值后如图 3 所示。

完成距离维插值后,对给定的距离波数域采样点 k_y , 方位向插值点的位置应满足:

$$\bar{k}_x = \sqrt{K_R^2 - k_y^2} \quad (15)$$

而在双基地 ISAR 成像中,方位向波数谱的分布不均匀,所以对方位向的插值操作实现的是从不均匀输入间隔到均匀输出间隔的重采样。这里采用文献[15]中的非线性插值方法,即:

$$S_{\text{Pref}}(k_x, k_y) = \sum_{n=-N_m/2}^{N_m/2} J \cdot S_{\text{Pref}}(k_x, k_y) h(k_x - n\Delta k_x) \quad (16)$$

上式中 J 是从 K_R 到 \bar{k}_x 变换的雅各比函数, k_x 为插值后方位向波数谱的输出点,其它变量同式(14)。方位向插值后结果如图 4 所示。

经过距离向和方位向插值后,回波波数谱在 $K'_x - K'_y$ 坐标系上为等间隔的直角坐标分布,此时可直接进行二维 IFFT 得到目标在 $K'_x - K'_y$ 坐标系上无模糊的目标二维像。

4 距离向 Chirp-Z 变换的极坐标格式算法

上述部分通过距离向线性插值和方位向非线性插值实现了双基地 ISAR 中的 PFA 算法,但插值操

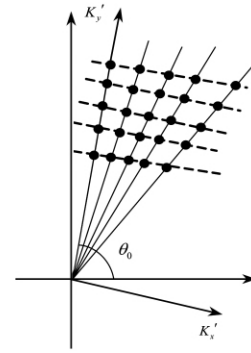


图 3 距离向插值

Fig. 3 Range dimension interpolation

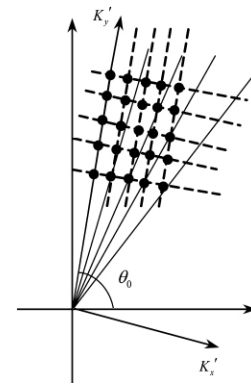


图 4 方位向插值

Fig. 4 Azimuth dimension interpolation

作需要大量的运算,对系统造成的巨大的运算负担。因此,有必要寻找一种能够有效降低运算量的替代方法。本文将 Chirp-Z(CZT) 变换引入到距离向重采样中,很好地解决了上述 PFA 算法运算量大的问题。Chirp-Z 变换可以实现 Z 平面上沿部分单位圆的均匀采样,均匀采样序列 $x(n)$ 的 Chirp-Z 变换定义为^[18]:

$$X(z_k) = \text{CZT}(x(n)) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) A^{-n} W^{nk},$$

$$k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (17)$$

式中, $z_k = AW^{-k}$, $A = A_0 \exp(j\varphi_0)$, $W = W_0 \exp(-j\phi_0)$ 。当 $k = 0$ 时 $z_0 = A_0 \exp(j\varphi_0)$, z_0 点在 z 平面上的幅值为 A_0 , 幅角为 φ_0 , 是 CZT 变换的起点; 而当 $k = 1$ 时 $z_1 = A_0 W_0^{-1} \exp(j(\varphi_0 + \phi_0))$, z_1 点的幅值变为 $A_0 W_0^{-1}$, 而幅角则在 φ_0 的基础上增加了 ϕ_0 。因此, 可以通过改变幅角 φ_0 及幅角增量 ϕ_0 来改变信号在 z 平面上的取值范围和增量大小, 进而改变信号的时域分布。与单基地 SAR 情况类似, 本文将利用

Chirp-Z 变换的这一性质实现双基地 ISAR 中的距离维插值重采样。

将 (12) 式离散化并重写如下:

$$S_{\text{Pref}}(n, m) = \sigma_0 \exp(-jk_x(n, m)x_0 - jk_y(n, m)y_0)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1 \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (18)$$

其中 N, M 分别为距离向和方位向的采样点数。将 t' 离散化可得各采样点在空间二维波数域的坐标分别为:

$$k_x(n, m) = \frac{4\pi}{c}(f_c + n\mu T_p) \cos\beta \sin\Delta\theta_m \quad (19)$$

$$k_y(n, m) = \frac{4\pi}{c}(f_c + n\mu T_p) \cos\beta \cos\Delta\theta_m \quad (20)$$

距离向插值重采样的目的是使 $k_y(n, m)$ 与脉冲数 m 无关, 即脉冲数 m 的变换不会影响 $k_y(n, m)$ 在距离向上的位置, 因此首先需要选定一基准脉冲 m' , 使得对任一 n 值, 都有 $k_y(n, m') = k_y(n, m)$, $m = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 。本文以 $m = 0$ 为基准脉冲, 此时在 $K'_x - K'_y$ 坐标系中, $\theta_0 = 0$, 则:

$$k_y(n', m) = k_y(n, 0) = \frac{4\pi}{c}(f_c + n\mu T_p) \cos\beta \quad (21)$$

而方位向坐标则为:

$$\frac{4\pi}{c}(f_c + n'\mu T_p) \cos\Delta\theta_m \cos\beta$$

$$= \frac{4\pi}{c}(f_c + n\mu T_p) \cos\beta \quad (22)$$

上式中, n' 为重采样以后采样点的位置, 其值为:

$$n' = \alpha_m \left(n + \frac{f_x}{\mu T_p} \right) - \frac{f_x}{\mu T_p} \quad (23)$$

其中 $\alpha_m = \frac{1}{\cos\theta_m}$ 。

与文献 [18] 中的处理方法类似, 对距离向重采样后的数据作 FFT 变换可得:

$$\text{FFT}_n(s_{\text{Pref}}(n', m))$$

$$= \text{FFT}_n\left(s_{\text{Pref}}\left(n' = \alpha_m \left(n + \frac{f_x}{\mu T_p}\right) - \frac{f_x}{\mu T_p}, m\right)\right) \quad (24)$$

设 $S_n(u, m)$ 为信号 $s(n, m)$ 的频域表示, 即 $S_n(u, m) = \text{FFT}_n(s(n, m))$ 则 $S_n(u, m)$ 可表示为:

$$S_n(u, m) = S\left(\frac{u}{\alpha_m}\right) \exp\left(j\frac{2\pi f_c}{N\mu T_p}(\alpha_m - 1)\frac{u}{\alpha_m}\right) \quad (25)$$

对插值重采样前的数据进行 Chirp-Z 变换, 如

果选择合适的幅角 φ_0 和幅角增量 ϕ_0 , 可得到与插值处理效果相同的信号频域分布, 为此, 本文将 Chirp-Z 变换的参数选为:

$$A = \exp\left(-j\frac{\pi}{\alpha_m} + j\frac{2\pi f_c}{N\mu T_p \alpha_m}(\alpha_m - 1)\right),$$

$$W = \exp\left(-j\frac{2\pi}{N\alpha_m}\right) \quad (26)$$

经过距离向 Chirp-Z 变换后的空间波数谱分布类似于图 3 的结果, 实现了距离向重采样, 但在两种处理方式下, 距离向上各采样点的具体位置不同, 主要是因为两种方式下采样点的起始位置和采样间隔不同所造成的。在方位向上, 由于双基地 ISAR 空间波数谱方位向分布不均匀, 因此在完成距离向插值后, 对方位向的插值目前只能采用本文第 4 部分中介绍的非线性插值实现。

5 仿真实验

仿真数据中雷达信号载频设为 10GHz, 信号带宽为 300MHz。双基地 ISAR 成像雷达的空间构造如图 1 所示, 其中 $L = R_0 = 10\text{km}$, 目标的几何形状如图 5 所示, 并以速度 $v = 150\text{m/s}$ 沿 x 轴正向运动。

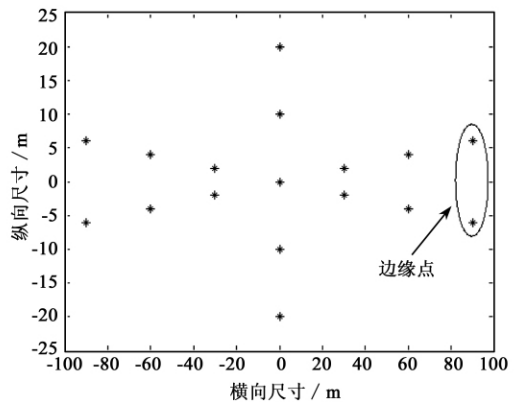


图 5 散射点模型

Fig. 5 Model of scatter

图 6 是对散射点模型回波信号直接作二维 FFT 后的成像结果。从图中可以明显看出, 有多个散射点发生了越距离单元徙动现象 (MTRC), 且随着散射点横向尺寸增大, 越距离单元徙动现象越明显, 目标散射点也越模糊。

图 7 给出了在距离向直接作 FFT 处理、插值处理和 Chirp-Z 变换三种处理方式散射点模型中所标注的边缘点的一维距离像比较。其中 (a) 为采用插

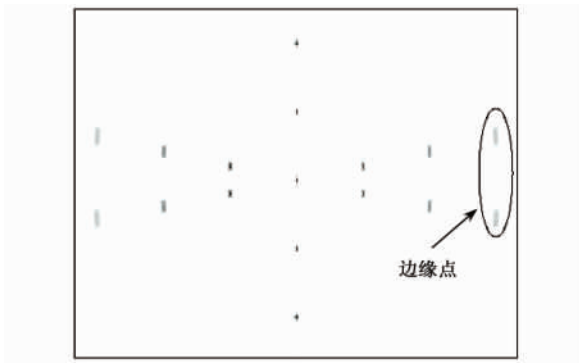
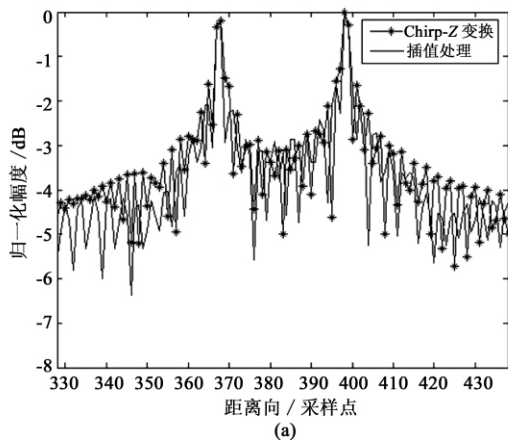
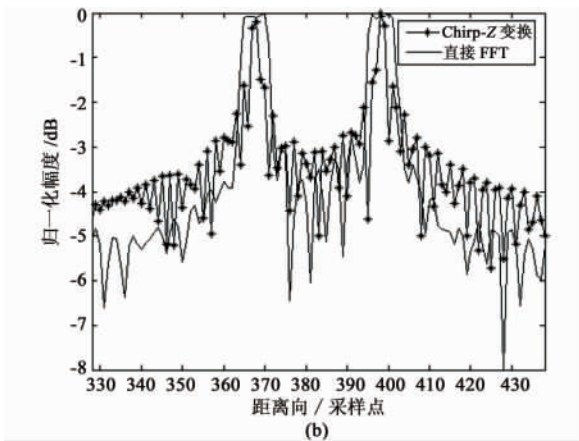


图 6 直接 FFT 结果

Fig. 6 Direct result of FFT



(a)

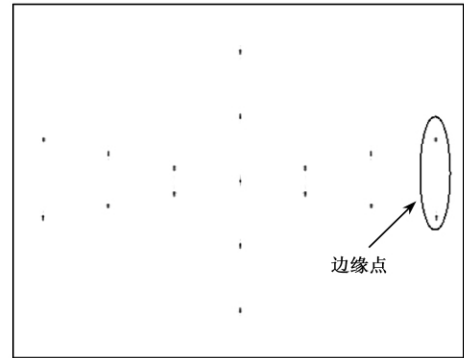


(b)

图 7 目标边缘点一维距离像比较

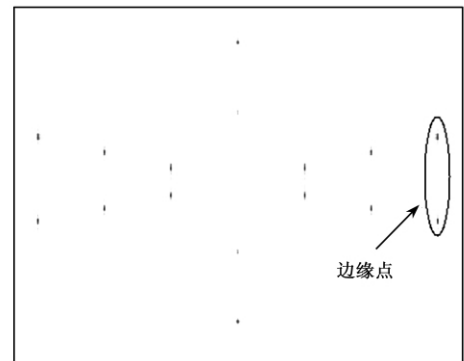
Fig. 7 Profile comparison of points in target edge

值处理和 Chirp-Z 变换所获得的一维距离像比较,从 (a) 可以看出,两种距离向处理方式都获得了非常好的距离维聚焦效果,但 Chirp-Z 变换所获得的一维距离像主瓣略宽,而旁瓣则大致相当;(b) 为对距离向直接作 FFT 处理和 Chirp-Z 变换两种方式下的边缘点一维距离像比较,结合图 6 的分析可以得



(a) 基于二维插值的 PFA 成像结果

(a) Imaging of PFA under dimensional interpolation



(b) 基于距离向 Chirp-Z 变换的 PFA 成像结果

(b) Imaging of PFA under two Chirp-Z transformation

图 8 PFA 算法成像结果

Fig. 8 Imaging result of PFA

出:在距离向直接作 FFT 处理不能很好地进行聚焦,假设当目标模型的两个边缘点在纵向上的距离很小时,采用直接作 FFT 的方式会造成两个目标点的一维距离像主瓣相连的情形,因此,对目标点直接作 FFT 处理将不能将两个目标点分辨开。图 8 是本文所述双基地 ISAR 中基于二维插值的 PFA 算法和基于距离向 Chirp-Z 变换的 PFA 算法的成像结果,结合图 6 比较来看,文中所提算法得到了非常好聚焦效果,能够得到清晰的目标二维像。

6 结论

本文在对双基地 ISAR 成像雷达回波信号分析的基础上,得到了其在二维空间波数域分布特性和支撑区范围;根据其二维波数域分布特点提出基于二维插值的 PFA 算法;同时考虑到插值运算复杂度高度的问题,提出了运算量较小的基于距离向 Chirp-Z 变换的 PFA 算法。仿真结果表明:文中所

述两种 PFA 算法性能相当,但基于距离向 Chirp-Z 变换的 PFA 算法避免了距离向的插值操作,大大降低了算法的复杂度,提高了 PFA 算法在双基地 ISAR 系统中的实用性。但由于方位向上采样点的分布不均匀,目前只能采用非线性插值来处理,算法的运算量仍然非常庞大,因此如何降低方位向插值运算复杂度是该算法实用化的一大障碍。

参 考 文 献

- [1] 陈晓龙,丁赤飏,梁兴东,等.改进的接收机固定双站 NLCS 成像方法[J].电子与信息学报,2008,30(5):1041-1046. [Chen Xiao-long, Ding Chi-biao, Liang Xing-dong, et al. An improved NLCS imaging algorithm of bistatic SAR with a stationary receiver[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(5): 1041-1046.]
- [2] 李燕平,张振华,邢孟道,等.机载双站 SAR 运动补偿研究[J].电子学报,2008,36(3):124-724. [Li Yan-ping, Zhang Zhen-hua, Xing Meng-dao, et al. Motion compensation for the airborne bistatic SAR[J]. Journal of Electronics, 2008, 36(3): 124-724.]
- [3] 朱振波,汤子跃,张亚标,等.基于 Radon 变换的双站 SAR 多普勒参数估计[J].电子与信息学报,2008,30(6):1331-1335. [Zhu Zhen-bo, Tang Zi-yue, Zhang Ya-biao, et al. The estimation of Doppler parameter of bistatic SAR based on radon translation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(6): 1331-1335.]
- [4] Palmer M J, Wdegetail T R. Airborne ISAR imaging using the emulated bistatic radar system[C]. The 4th EUSAR Conference, Ulm Germany, 375-378, 2004.
- [5] 黄艺毅,王军锋.双站 ISAR 成像算法的研究[J].信号处理,2007,23(4):514-517. [Huang Yi-yi, Wang Jun-feng. Study of imaging algorithm in bistatic ISAR[J]. Signal Processing, 2007, 23(4): 514-517.]
- [6] 张亚标,朱振波,汤子跃,等.双站逆合成孔径雷达成像理论研究[J].电子与信息学报,2006,28(6):969-972. [Zhang Ya-biao, Zhu Zhen-bo, Tang Zi-yue, et al. Bistatic ISAR imaging formation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(6): 969-972.]
- [7] Walker J L. Range-Doppler imaging of rotation objects[J]. IEEE Trans. On AES, 1980, 16(1): 23-51.
- [8] Carrara W G. Spotlight synthetic aperture radar[M]. Norwood, MA, Artech House, 1995.
- [9] Jakowatz C V. Spotlight-Mode synthetic aperture radar: A signal processing approach[M]. Kluwer Academic Publishers, Norwell Mass, 1996.
- [10] Tsunoda S L, Pace F, Woodring M, et al. Lynx: a high-resolution synthetic aperture radar [C]. The 2000 IEEE Aerospace Conference Proceedings, MT USA, 51-58, 2000.
- [11] Zhu D, Zhu Z. Range resampling in the polar format algorithm for spotlight SAR image formation using the chirp-Z transform [J]. IEEE Trans, Signal Process, 2007, 55(3): 1011-1023.
- [12] Tang Yu, Xing Meng-dao, Bao Zheng. The polar format imaging algorithm based on double Chirp-Z transforms[J]. IEEE Geo and Remote sensing letters, 2008, 5(4): 610-614.
- [13] 孙进平,白霞,毛士艺.聚束模式双基地 SAR 极坐标格式成像算法研究[J].电子学报,2008,36(12): 2324-2327. [Sun Jin-ping, Bai Xia, Mao Shi-yi. The PFA imaging algorithm for spotlight mode bistatic SAR [J]. Journal of Electronics, 2008, 36(12): 2324-2327.]
- [14] Mehrdad S. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1999.
- [15] 尹曼,皮亦鸣.结合 Chirp Z 变换的聚束 SAR 极坐标格式成像算法[J].雷达科学与技术,2007,5(5): 349-352. [Yin Man, Pi Yi-ming. Polar format algorithm for spotlight SAR imaging based on Chirp Z transform[J]. Radar Science and Technology, 2007, 5(5): 349-352.]

作者简介:朱小鹏(1982-),男,博士生,主要从事雷达信号处理, SAR/ISAR 成像技术的研究。

通信地址:陕西省西安市沣镐路一号研管大队十四队(710077)

电话:13759970920

E-mail: zxpkongjun@126.com

(编辑:余未)