

## 圆周合成孔径雷达的快速时域成像算法\*

陈乐平, 安道祥, 黄晓涛

(国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**为实现圆周合成孔径雷达(Circular Synthetic Aperture Radar, CSAR)快速成像,提出一种用于CSAR的快速时域成像算法。该算法通过将CSAR的圆孔径分成若干子孔径,分别对子孔径采用快速因式分解后向投影算法处理,再将各子图像相干插值叠加至同一坐标系下得到成像结果。详细分析算法实现中的坐标转换、误差控制和运算效率等关键问题,并用点目标仿真和实测数据处理结果验证算法的有效性。所研究方法具有成像范围大、计算量小等优点。

**关键词:**圆周合成孔径雷达;时域算法;快速因式分解后向投影算法;子孔径

**中图分类号:**TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)02-077-08

## Fast time-domain imaging algorithm for circular synthetic aperture radar

CHEN Leping, AN Daoxiang, HUANG Xiaotao

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

**Abstract:** In order to make the process of CSAR (circular synthetic aperture radar) imaging more efficient, a fast time-domain CSAR imaging method was presented. The proposed method was based on the circular aperture of the CSAR model, and the full aperture was divided into several sub-apertures; those sub-apertures were processed by the fast factorized back projection algorithm to get their corresponding sub-images; the final focused image was obtained by the coherent interpolation of the sub-images from the polar coordinate to the global coordinate system. Some key problems in the algorithm realization, such as coordinate transformation, error control and computation efficiency, were analyzed in detail. Experiments results based on the simulated data and real data were given to prove the validity of the proposed method. The proposed method has the advantages of improving imaging extension and lowering computational complexity.

**Key words:** circular synthetic aperture radar; time domain method; fast factorized back projection algorithm; sub-aperture

圆周合成孔径雷达(Circular Synthetic Aperture Radar, CSAR)是一种有着特殊轨迹的SAR模式,其天线围绕观测场景作 $360^\circ$ 圆周或宽角度圆弧运动,同时波束始终指向目标场景进行观测成像。这种对场景全方位的观测能使CSAR获取更多目标的散射信息。观测角度的增加能使目标方位频谱得到展宽,从而其能获得更高的图像分辨率,且二维孔径使其具有一定的三维成像能力<sup>[1]</sup>。

近年来,随着CSAR技术研究的不断深入,其独特优势日益凸显,并受到国内外广泛关注。如美国空军研究实验室、德国宇航中心、瑞典国防研究所、法国宇航局、中国科学院电子学研究所、清华大学、成都电子科技大学、西安电子科技大学等国内外遥感领域内的高水平机构均开展了相关技

术研究<sup>[2-11]</sup>。

高精度成像处理是CSAR发展的关键技术之一。由于CSAR轨迹的特殊性,其成像算法不同常规直线轨迹SAR。Soumekh提出基于格林函数傅里叶分析的波前重构类算法,利用快速傅里叶变换提高了运算效率<sup>[2]</sup>,但是算法中系统核函数矩阵求逆操作增加了算法的复杂度。而CSAR的极坐标算法则基于远场假设提出,存在有效成像范围受限、场景边缘处目标散焦等问题。时域算法,如后向投影(Back Projection, BP)算法可以适用于任意成像几何,但需要极大的计算量,因此限制了此算法的应用。为了减小计算量,快速因式分解后向投影(Fast Factorized Back Projection, FFBP)方法应运而生,它采用极线图像近似区域图像,通过局部近似处理和递归孔径划分处理来

\* 收稿日期:2016-12-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61571447)

作者简介:陈乐平(1988—),男,福建福州人,博士研究生,E-mail:gkdcpl@126.com;

安道祥(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:daoxiangn@nudt.edu.cn

大幅度减小 BP 算法的计算量<sup>[3]</sup>。Ponce 等率先采用 FFBP 的方法处理了 L 波段的全极化 CSAR 数据,取得了良好的成像结果<sup>[4]</sup>。然而,其所采用分解因子固定为 2,不具有一般性,并且未给出算法的细节与具体实现步骤。本文在已有研究工作基础上,深入研究了基于 FFBP 原理的 CSAR 快速时域成像处理算法。

## 1 CSAR 成像回波模型及分辨率

### 1.1 回波模型

CSAR 的成像几何如图 1 所示,定义观测场景中心为  $xyz$  坐标系原点,SAR 平台位于高度平面  $H$  上以速度  $V$  沿着半径为  $R_{xy}$  的圆周轨迹逆时针运动,并对平面场景做  $360^\circ$  的持续观测。图中,实线圆为雷达飞行轨迹,其坐标向量可表示  $\mathbf{r}(\phi) = (R_{xy} \cos\phi, R_{xy} \sin\phi, H)$ ,其中  $\phi \in [0, 2\pi]$  为 SAR 平台相对  $x$  轴的方位角。假设场景中任意点目标  $P$  坐标为  $\mathbf{r}_p = (x_p, y_p, z_p)$ 。则当 SAR 平台位于  $\phi$  时,其到  $P$  点的距离斜距历程可表示为:

$$R(\phi, \mathbf{r}_p) = 2 \sqrt{(R_{xy} \cos\phi - x_p)^2 + (R_{xy} \sin\phi - y_p)^2 + (H - z_p)^2} \quad (1)$$

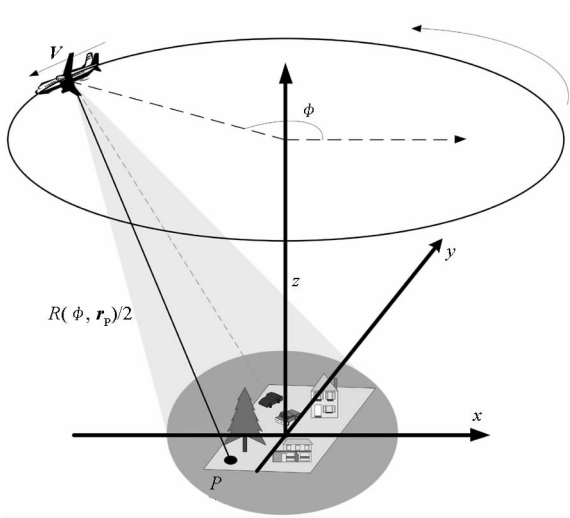


图 1 CSAR 场景图

Fig. 1 Scene graph of CSAR

设所发信号为线性调频信号,则在正交解调和距离压缩后,所接收信号可表示为:

$$s_{rc}(\tau, \phi) = \sigma_p \cdot p_{rc} [B(\tau - R(\phi, \mathbf{r}_p)/c_0)] \cdot \exp[-j2\pi f_c R(\phi, \mathbf{r}_p)/c] \quad (2)$$

式中,  $\sigma_p$  为点目标  $P$  的散射系数,  $p_{rc}(\cdot)$  为距离压缩后脉冲函数,  $B$  为发射信号带宽,  $\tau$  为快时间,  $c$  为光速常数,  $f_c$  是信号载频。对观测场景进行网格划分,  $\mathbf{r} = (x, y, 0)$  为其中任意格点,则该点

幅度信息可由距离压缩后的每个方位采样回波信号进行相位延迟补偿项后相干叠加所得:

$$I(\mathbf{r}) = \int_0^{2\pi} s_{rc}(R(\phi, \mathbf{r}_p)/c, \phi) \cdot \exp[j2\pi f_c R(\phi, \mathbf{r})/c] d\phi \quad (3)$$

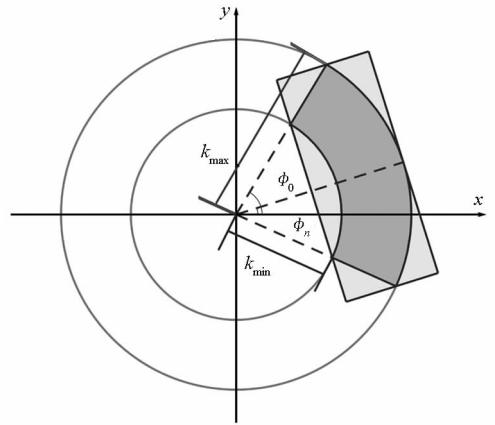
以上即为利用 BP 算法进行 CSAR 成像的基本原理。由于需要对每个场景格点进行后向投影,其理论计算量高达  $O(N^3)$ ,不利于高分辨率 CSAR 的快速成像处理。

### 1.2 空间分辨率分析

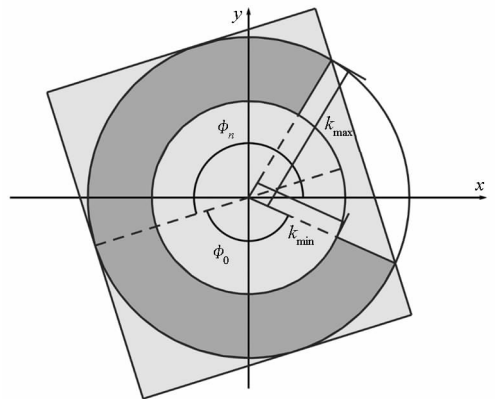
由于 BP 类算法的网格划分是以成像的分辨率为基础,因此为便于后续讨论,首先从空间谱角度将子孔径扇环形孔径谱近似为矩形谱来估计 CSAR 的分辨率。

图 2 为子孔径空间谱,其中  $\phi_0 \in [0, \pi]$  为孔径对应的半方位积累角,  $\phi_n$  为孔径中心相对于  $x$  轴的方位角,最大波数以及最小波数在  $x-y$  平面上的投影为:

$$\begin{cases} k_{\max} = \cos\theta_z \cdot 2\pi(f_c + B/2)/c \\ k_{\min} = \cos\theta_z \cdot 2\pi(f_c + v \cdot B/2)/c \end{cases} \quad (4)$$



(a)  $0 < \phi_0 \leq \pi/2$



(b)  $\pi/2 < \phi_0 \leq \pi$

图 2 CSAR 空间谱  $x-y$  平面投影图

Fig. 2 The  $x-y$  projection of the CSAR's spatial spectrum

其中,  $\theta_z = \arctan(z/R_{xy})$  为雷达俯仰角,  $v =$

$$\begin{cases} -1 & 0 < \phi_0 \leq \frac{\pi}{2} \\ 1 & \frac{\pi}{2} < \phi_0 \leq \pi \end{cases}. \text{由带宽与分辨率关系可得垂}$$

直于  $\phi_n$  方向的分辨率,即:

$$\rho_{\perp} = \frac{\pi}{2k_{\max}\gamma} \quad (5)$$

式中,

$$\gamma = \begin{cases} \sin\phi_0 & 0 < \phi_0 \leq \frac{\pi}{2} \\ 1 & \frac{\pi}{2} < \phi_0 \leq \pi \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可见,当子孔径半方位积累角大于  $\pi/2$  时,  $\rho_{\perp}$  就不再改变。而平行于  $\phi_n$  的方向的分辨率为:

$$\rho_{\parallel} = \frac{\pi}{k_{\max} - k_{\min}\cos\phi_0} \quad (7)$$

尤其当  $\phi_0 = \pi$  时,即全孔径下,上述两维分辨率可表示为:

$$\rho_{\parallel} = \rho_{\perp} = \frac{c}{4(f_c + B/2)} \quad (8)$$

由此可见,全孔径下分辨率可达亚波长量级,但是要求目标具有各向同性的散射特性,实际场景中目标方位角散射范围有限,故难以达到该理论分辨率。

## 2 FFBP 算法

FFBP 算法相对于原始 BP 算法主要采用了两种加速技术:一是局部近似处理,二是递归孔径划分处理。局部近似处理是指将距离压缩后的数据仅仅投影到成像区域中的距离中心线上,而非原本对整个成像区域的后向投影,这样可以大幅减小 BP 算法的计算量。但是近似算法不可避免会引入成像误差,因此需要对 FFBP 算法进行误差控制。递归孔径划分处理则是将临近孔径合并为一些子孔径,得到粗分辨率子图像,然后将子孔径合并为一些新的子孔径,得到分辨率提高的子图像,然后不断进行子孔径合并以得到分辨率更高的子图像,直至得到所需分辨率图像。但由于每级合并孔径后对应的图像需要更换新的坐标系,增加了子图像累加的难度,尤其对于 CSAR 构型,其坐标系变换更加复杂。故本节将首先讨论以上两问题。

### 2.1 误差控制

如图3所示,左侧圆点表示子孔径采样位置,中心距离线  $OP$  与孔径之间的夹角为  $\varphi$ 。根据局

部近似原理,采用中心距离线上的数据近似为中心距离线附近的数据,因此在中心距离线上的数据没有误差。现在考虑非中心距离线上的任意点  $P'$ ,其与中心距离线上点  $P$  都位于以孔径中心  $O$  为圆心、半径为  $r$  的同一圆上,故由点  $P$  表示。而孔径上其他采样位置到点  $P$  和  $P'$  距离不同,在局部近似中将被忽略,这就引入了误差,误差大小则由孔径末端点  $O_k$  到  $P$  和  $P'$  的距离误差决定,可记为  $\Delta R = |R(\varphi + \Delta\theta) - R(\varphi)|$ ,其中  $\Delta\theta$  为  $P$  和  $P'$  相差方位角。当  $\Delta R \ll R$  时,距离误差可做以下近似:

$$\begin{aligned} \Delta R &= |R(\varphi + \Delta\theta) - R(\varphi)| \\ &= \left| \frac{R^2(\varphi + \Delta\theta) - R^2(\varphi)}{R(\varphi + \Delta\theta) + R(\varphi)} \right| \\ &\approx \left| \frac{R^2(\varphi + \Delta\theta) - R^2(\varphi)}{2R(\varphi)} \right| \end{aligned} \quad (9)$$

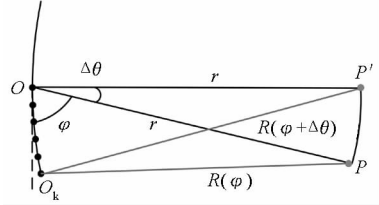


图3 距离误差分析

Fig.3 Analysis of range errors

在子孔径中,当孔径弧度很小时,近似为直线处理,则  $R(\varphi)$  可表示为:

$$R(\varphi) \approx \sqrt{r^2 + \widehat{OO}_k^2} - 2r \widehat{OO}_k \cos\varphi \quad (10)$$

式中,  $\widehat{OO}_k$  为半子孔径弧长。将式(10)代入式(9)中,得:

$$\begin{aligned} \Delta R &\approx \left| \frac{2r \widehat{OO}_k \cos\varphi - 2r \widehat{OO}_k \cos(\varphi + \Delta\theta)}{2 \sqrt{r^2 + \widehat{OO}_k^2} - 2r \widehat{OO}_k \cos\varphi} \right| \\ &= \left| \frac{r \widehat{OO}_k}{\sqrt{r^2 + \widehat{OO}_k^2} - 2r \widehat{OO}_k \cos\varphi} \right| |\cos\varphi - \cos(\varphi + \Delta\theta)| \end{aligned} \quad (11)$$

记  $|\cos\varphi - \cos(\varphi + \Delta\theta)|$  为  $\Delta(\cos\varphi)$ , 则可得:

$$\begin{aligned} |\Delta(\cos\varphi)| &= |\cos\varphi - \cos(\varphi + \Delta\theta)| \\ &= \left| 2\sin\left(\varphi + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \sin\left(-\frac{\Delta\theta}{2}\right) \right| \\ &= 2 \left| \sin\frac{\Delta\theta}{2} \left( \sin\varphi \cos\frac{\Delta\theta}{2} + \cos\varphi \sin\frac{\Delta\theta}{2} \right) \right| \end{aligned} \quad (12)$$

当  $\Delta\theta \rightarrow 0$  时,式(12)可改写为

$$\begin{aligned} |\Delta(\cos\varphi)| &= 2 \left| \frac{\Delta\theta}{2} (\sin\varphi \times 1 + \cos\varphi \times 0) \right| \\ &= |\Delta\theta \sin\varphi| \end{aligned} \quad (13)$$

令  $u = \overline{OD}_k/r$ , 则可得:

$$\begin{aligned} f(u, \varphi) &= \left| \frac{u}{\sqrt{1+u^2-2u\cos\varphi}} \right| \\ &= \left| \frac{u}{\sqrt{1-\cos^2\varphi+(\cos\varphi-u)^2}} \right| \\ &\leq \left| \frac{u}{\sqrt{1-\cos^2\varphi}} \right| = \left| \frac{u}{\sin\varphi} \right| \end{aligned} \quad (14)$$

将式(13)与式(14)代入式(11)中, 可得:

$$\begin{aligned} \Delta R &\approx |rf(u, \varphi)| |\Delta(\cos\varphi)| \\ &\leq \left| r \frac{u}{\sin\varphi} \right| |\Delta\theta \sin\varphi| \\ &= |\overline{OD}_k \cdot \Delta\theta| \end{aligned} \quad (15)$$

如果选取图像角度向分辨率  $\rho_\theta = |\Delta\theta|$ , 那么角度相差  $|\Delta\theta|$  的两个像素点将处于同一个分辨单元内。同时, 为了保证各个回波在距离向偏移不超一个分辨单元, 需要满足  $\Delta R \leq \frac{c}{2B}$ , 那么有:

$$\begin{cases} \Delta\rho_r \leq \Delta R \leq \frac{c}{2B} \\ \Delta\rho_\theta \leq |\Delta\theta| \leq \frac{\lambda_c}{4 \overline{OD}_k} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $\Delta\rho_r$  和  $\Delta\rho_\theta$  为子孔径中极坐标的距离向和方位向采样间隔,  $\lambda_c$  为载波波长。它们由信号载频的波长和子孔径长度确定, 若分辨率选取超出这个约束, 则图像将会出现分裂、重叠等现象。

## 2.2 坐标转换

如图 4 所示, 将成像坐标系  $x-y$  通过平移, 得到新的直角坐标系  $x'-y'$ 。其中左上角为以某子孔径中心为原点的直角坐标系  $x'-y'$ 。子孔径中心位于成像坐标系  $x-y$  的  $(R_{xy} \cos\phi_i, R_{xy} \sin\phi_i)$  处, 其中  $\phi_i$  为子孔径中心相对于成像坐标系的方位角。则可得成像平面中任意点  $(x, y)$  坐标与子孔径极坐标系中转换关系为:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(R_{xy} \cos\phi_i - x)^2 + (R_{xy} \sin\phi_i - y)^2} \\ \theta = \arctan\left(\frac{y - R_{xy} \sin\phi_i}{x - R_{xy} \cos\phi_i}\right) \end{cases} \quad (17)$$

同时可得子孔径极坐标下的波束中心角为:

$$\theta_{ic} = \begin{cases} \pi + \phi_i & 0 \leq \phi_i \leq \pi \\ \phi_i - \pi & \pi < \phi_i < 2\pi \end{cases} \quad (18)$$

且积累角  $\psi_{in}$  为:

$$\psi_{in} = 2 \times \arctan(R_{scene}/R_{xy}) \quad (19)$$

其中,  $R_{scene}$  为成像场景半径。因此  $\theta$  的范围为  $[\theta_{ic} - \psi_{in}/2, \theta_{ic} + \psi_{in}/2]$  以及  $\rho$  的范围为  $[R_{xy} - R_{scene}, R_{xy} + R_{scene}]$ 。

设在第  $i$  级子孔径合并过程中, 通过式(16) ~

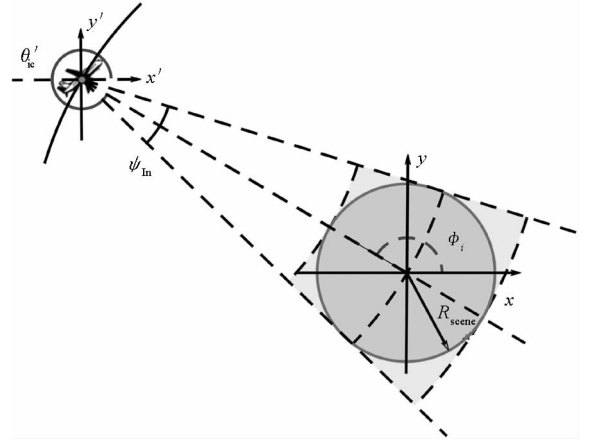


图 4 子孔径成像几何关系

Fig. 4 Geometry of subaperture imaging

(19), 确立新子孔径的成像极坐标网格,  $(\rho^{(i+1)}, \theta^{(i+1)})$  为该成像网格中任意点, 其所对应成像直角坐标系位置为  $(x, y)$ 。同理可得点  $(x, y)$  在合成该孔径的第  $n$  个子孔径的极坐标为  $(\rho_n^{(i)}, \theta_n^{(i)})$ ,  $1 \leq n \leq I$ , 其中  $I$  为该级的分解因子。因此孔径合成过程可表示为:

$$\begin{aligned} G^{(i+1)}(\rho^{(i+1)}, \theta^{(i+1)}) \\ = \sum_{n=1}^I G_n^{(i)}(\rho_n^{(i)}, \theta_n^{(i)}) \cdot \exp(j4\pi\rho_n^{(i)}f_c/c) \end{aligned} \quad (20)$$

式中,  $G$  表示各级子孔径所对应图像。

## 2.3 基于 FFBP 算法的 CSAR 成像

所提基于 FFBP 算法的 CSAR 成像处理基本思想为: 首先对圆周全孔径进行子孔径划分, 获得若干子圆弧孔径; 然后对子圆弧孔径分别采用直线 FFBP 处理; 最后将所获得子图像相干累加。具体步骤如下:

**Step 1:** 假设某次圆周飞行沿航迹进行了  $L_{full}$  次采样, 距离向采样点数为  $M$ , 回波数据位矩阵为  $D_{L_{full} \times M}$ 。将圆周全孔径数据均匀分成  $K$  段子圆弧孔径数据 (一般取  $K/L_{full} \leq 1/8$ ), 使得每段子圆弧数据为  $D_{N \times M}$ , 其中  $N = \lfloor L_{full}/K \rfloor$ , 可采用补零或者剪裁的方式对  $N$  进行适当调整, 以便后续因式分解。根据因式分解原理确定圆弧数据的最佳初始孔径长度  $l_0$  以及每次合并的子图像个数  $I$  (记为分解因子)。则有  $N = l_0 \times I^F$ , 其中  $F$  为分解层数。

**Step 2:** 以各个初始子孔径中心为原点建立极坐标系, 按 2.2 节确定待成像场景区域的取值范围, 以及按 2.1 节误差控制确定初始图像角度和距离向采样间隔。计算圆弧数据最终生成图像的分辨率, 最终角度向分辨率可由式(21)计算:

$$\rho_{\theta N} = \rho_{\perp N} / (R_{xy} + R_{scene}) \quad (21)$$

式中,  $\rho_{\perp N}$  为  $N$  点采样子孔径对应的垂直向分辨率。对每个子孔径按照传统 BP 算法进行成像, 得到  $I^F$  幅粗分辨率图像。子孔径成像结果进行逐级合并, 每进行一级合并, 将  $I$  幅子图像生成一幅次一级子图像, 第  $i+1$  级子图像角度向分辨率和第  $i$  级子图像角度向分辨率存在以下关系:

$$\begin{cases} \rho_{\theta}^{(i+1)} = \rho_{\theta}^{(i)} / I & \rho_{\theta}^{(i)} > \rho_{\theta N} \\ \rho_{\theta}^{(i+1)} = \rho_{\theta}^{(i)} & \rho_{\theta}^{(i)} \leq \rho_{\theta N} \end{cases} \quad (22)$$

不断进行子孔径合并, 直至第  $F$  次孔径合并完毕, 获得  $K$  个子图像。

**Step 3:** 将  $K$  个子图像由各自极坐标系插值至最终成像场景的直角坐标系之中, 便可得最终成像结果。

流程示意图如图 5 所示。

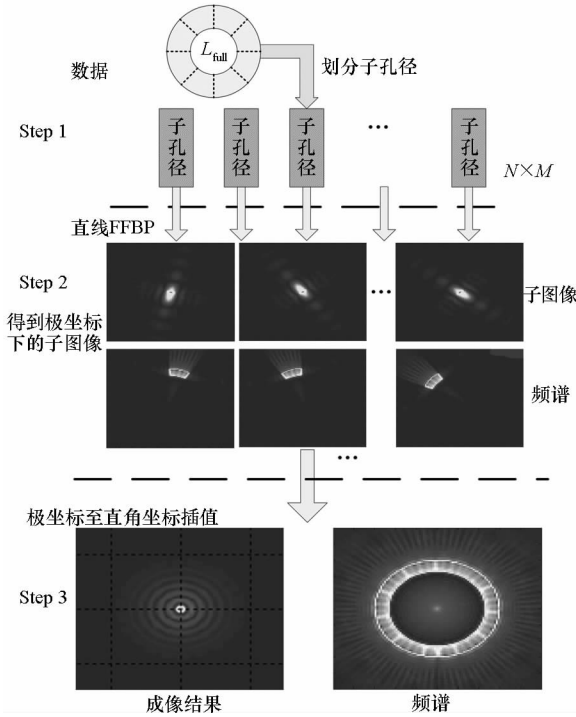


图 5 基于 FFBP 算法的 CSAR 成像流程图

Fig. 5 Flowchart of CSAR imaging based on FFBP algorithm

## 2.4 计算效率分析

设最后成像场景矩阵大小为  $N_x \times N_y$ , 且子圆弧方位角采样数  $N$  可表示为  $N = l_0 \times I^F$ , 初级子图像矩阵大小为  $N_{\theta 0} \times N_{\rho 0}$  (角度向  $\times$  距离向), 则对于 FFBP 算法, 其由 BP 算法获得的初级子图像所需计算量为:

$$C_0 \propto K \left( \frac{L_{\text{full}}}{K} / l_0 \right) l_0 N_{\theta 0} N_{\rho 0} = L_{\text{full}} N_{\theta 0} N_{\rho 0} \quad (23)$$

设第  $i$  级孔径合并后所获得子图像大小为  $N_{\theta i} \times N_{\rho i}$ , 则该级合并所需计算量为:

$$C_i \propto K \left( \frac{L_{\text{full}}}{l_0 K} / I^i \right) I N_{\theta i} N_{\rho i} = \frac{L_{\text{full}}}{l_0 I^{i-1}} N_{\theta i} N_{\rho i} \quad (24)$$

最后, 将所有图像插值到最终图像中所花计算量为:

$$C_{\text{final}} \propto K N_x N_y \quad (25)$$

故所提 FFBP 算法总的计算量为:

$$\begin{aligned} C_{\text{FFBP}} &= C_0 + \sum_{i=1}^F C_i + C_{\text{final}} \\ &\propto L_{\text{full}} N_{\theta 0} N_{\rho 0} + \sum_{i=1}^F \frac{L_{\text{full}}}{l_0 I^{i-1}} N_{\theta i} N_{\rho i} + K N_x N_y \end{aligned} \quad (26)$$

假设孔径合成过程中, 网格划分有以下关系:  $N_{\rho 0} = N_{\rho F} = N_x = N_y$ ,  $N_{\theta F} = I^F N_{\theta 0} = \mu_{\theta} N_x$ , 则有:

$$\begin{aligned} C_{\text{FFBP}} &= C_0 + \sum_{i=1}^F C_i + C_{\text{final}} \\ &\propto L_{\text{full}} N_{\theta 0} N_{\rho 0} + \sum_{i=1}^F \frac{L_{\text{full}}}{l_0 I^{i-1}} N_{\theta i} N_{\rho i} + K N_x N_y \\ &= [(l_0 + I \times F) \mu_{\theta} + 1] K N_x N_y \end{aligned} \quad (27)$$

而 BP 算法的计算量可表示为:

$$C_{\text{BP}} \propto L_{\text{full}} N_x N_y \quad (28)$$

由式(28)与式(27)可得出 FFBP 算法相对于 BP 算法的提速因子为:

$$\begin{aligned} \kappa_{\text{FFBP}} &\propto \frac{L_{\text{full}}}{[(l_0 + I \times F) \mu_{\theta} + 1] K} \\ &= \frac{N}{(l_0 + I \times \log_t \frac{N}{l_0}) \mu_{\theta} + 1} \end{aligned} \quad (29)$$

由上式可见, 该提速因子受子圆弧方位角采样数  $N$ 、分解因子  $I$ 、最佳初始孔径长度  $l_0$  以及方位向插值因子  $\mu_{\theta}$  的影响。其中提速因子与  $N$  成正比, 而  $N = L_{\text{full}} / K$ , 故  $L_{\text{full}}$  也与提速因子成正比, 即孔径数据量越大越能体现 FFBP 快速的优势; 提速因子与  $l_0$ 、 $I$  成反比, 因此适当的因式分解有助于提高 FFBP 算法的计算效率; 插值因子  $\mu_{\theta}$  与子孔径方位角采样间隔有关, 一般取  $1/K \leq \mu_{\theta} \leq 1$ , 故子孔径方位角采样间隔越大, 则  $\mu_{\theta}$  越小, 算法速度也就越快。

图 6 为不同分解因子下的提速因子曲线 (所采用的其他仿真参数为  $K=8$ ,  $\mu_{\theta}=2/K$ ,  $l_0=I$ ), 可见 FFBP 算法理论上相对于 BP 算法具有较大的速度改善。但是需要说明的是, FFBP 算法需要额外的内存空间存储子图像数据, 当子图像数据过于庞大时, 受硬件内存和数据传输的影响, 会对算法速度产生较大的影响。

## 3 仿真结果

为了证明所提 FFBP 算法的有效性, 本节将分别对低频和高频下的 CSAR 模式进行成像实验

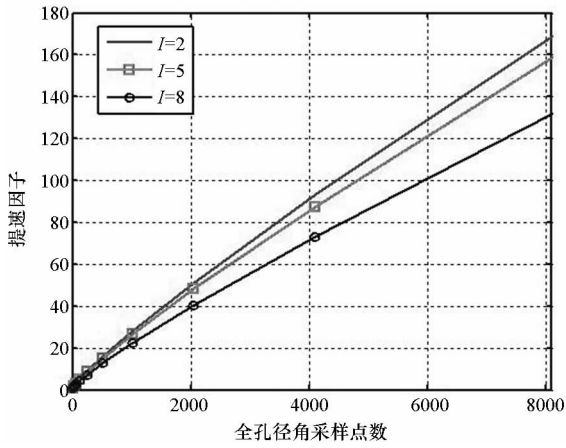


图 6 FFBP 算法提速因子曲线

Fig. 6 Curve of FFBP algorithm's acceleration factor

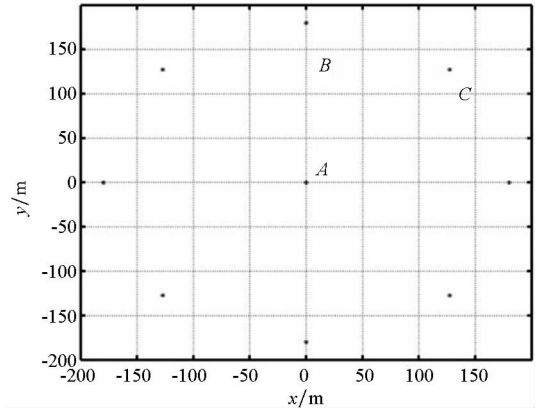
验证。

低频 CSAR 目前尚缺少实测数据,故采用理想点目标仿真实验。实验中采用线性调频信号,具体仿真参数如表 1 所示。仿真场景大小为  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ ,有 9 个理想点目标。其中 1 个点目标位于场景中心处,另外 8 个则以半径  $180\text{ m}$  绕场景中心均匀排列。该仿真中 FFBP 算法所采用的初始子孔径为  $I_0 = 32$ ,分解因子  $I$  为 2,每  $45^\circ$  积累角为一个最大子孔径图像,即取  $K$  为 8。图 7(a)、图 7(b) 分别给出了 BP 算法和所提 FFBP 算法的仿真结果。图 8~10 分别为图 7(a) 中所标识的 A、B 和 C 点目标的放大轮廓图。从以上图像结果可以看出,采用 FFBP 算法的成像结果与采用 BP 算法的结果相似,但是结果中点目标的远旁瓣上有些不同,这是由于 FFBP 算法中引入了一定误差。为了更好地对比两种算法的成像质量,表 2 给出了各点聚焦质量评价指标: $x$ 、 $y$  方向分辨率以及峰值旁瓣比。从主要的成像质量指标来看,FFBP 算法的聚焦质量与 BP 算法相差无几。

表 1 仿真系统参数

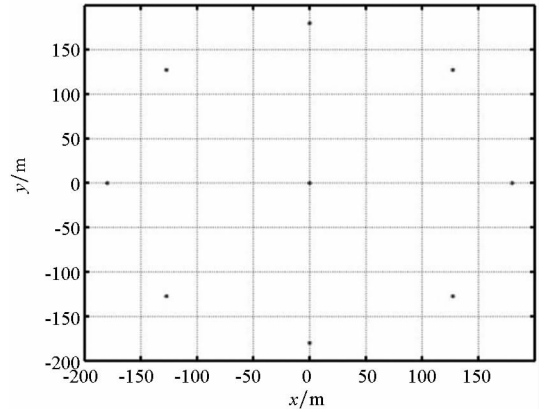
Tab. 1 Parameters of system simulation

参数	值
载频	600 MHz
带宽	200 MHz
脉冲重复频率	100 Hz
采样频率	240 MHz
脉冲时宽	1 $\mu\text{s}$
载机速度	45 m/s
圆周轨迹半径	1000 m
飞行高度	1000 m



(a) BP 算法

(a) By BP algorithm

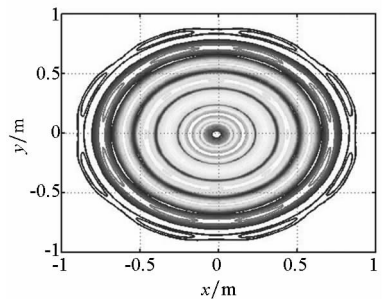


(b) FFBP 算法

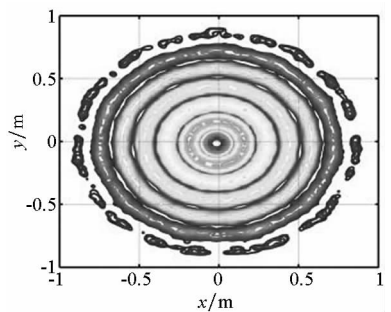
(b) By FFBP algorithm

图 7 成像结果图

Fig. 7 Imaging results



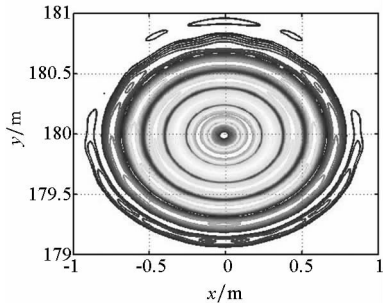
(a) BP



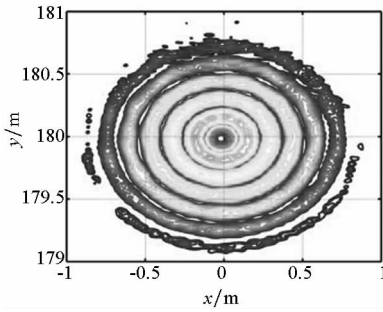
(b) FFBP

图 8 目标 A 放大图

Fig. 8 Enlarged view of target A



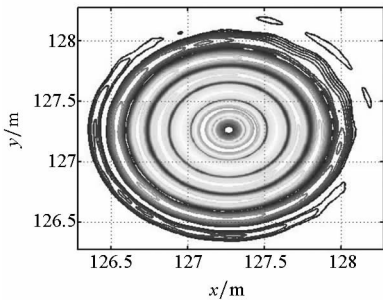
(a) BP



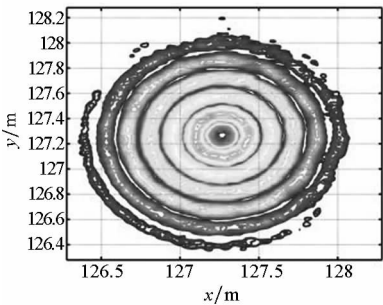
(b) FFBP

图 9 目标 B 放大图

Fig. 9 Enlarged view of target B



(a) BP



(b) FFBP

图 10 目标 C 放大图

Fig. 10 Enlarged view of target C

高频 CSAR 成像实验采用美国空军实验室公开的多极化 CSAR 数据——Gotcha。该数据所采用信号为 X 波段(9.6 GHz)、带宽 640 MHz 的线性调频信号。图 11 为数据中雷达平台的观测轨迹。图 12 与图 13 分别为采用 FFBP 算法和 BP 算法的成像结果,成像场景大小为 100 m × 100 m,所划分网格间距为 0.05 m × 0.05 m,显示

动态范围为 0 ~ -47 dB。为了便于观察,对场景中大型顶帽以及一辆小轿车进行放大显示,分别位于图 12 与图 13 的右上和右下,而图左侧为其所对应的实物图。

表 2 点目标成像质量

Tab. 2 Imaging quality of the point targets

目标	算法	分辨率/m		峰值旁瓣比/dB	
		x	y	x	y
A	FFBP	0.106	0.105	-8.106	-7.842
	BP	0.098	0.099	-9.127	-8.249
B	FFBP	0.093	0.091	-8.152	-8.394
	BP	0.099	0.099	-8.217	-8.021
C	FFBP	0.098	0.094	-8.379	-7.798
	BP	0.099	0.099	-8.093	-8.069

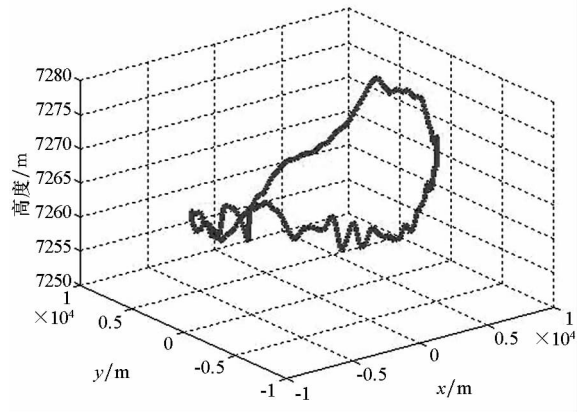


图 11 Gotcha 数据第一次飞行轨迹图

Fig. 11 Trajectory of pass one in Gotcha dataset

从以上实验结果可以看出,CSAR 模式具有全角度观测的优势,能很好地反应实际物体的轮廓,此为直线 SAR 所不具备。所提基于 CSAR 模式的 FFBP 算法成像质量与 BP 算法相当,均能实现良好聚焦,从而证明了所提算法的有效性。

## 4 结论

主要针对 CSAR 的时域成像问题进行了研究,采用将 CSAR 数据分成若干子孔径、进行直线 FFBP 处理再合成方法,提出了基于 CSAR 的 FFBP 成像算法,分析了算法中关键误差控制和坐标转换问题,并通过仿真实验以及实测数据验证了该算法的优势以及有效性。该算法还可结合硬件处理,如图像处理器(Graphics Processing Unit, GPU)或并行处理子孔径等,可进一步提高成像效率,后续工作将对此展开研究。

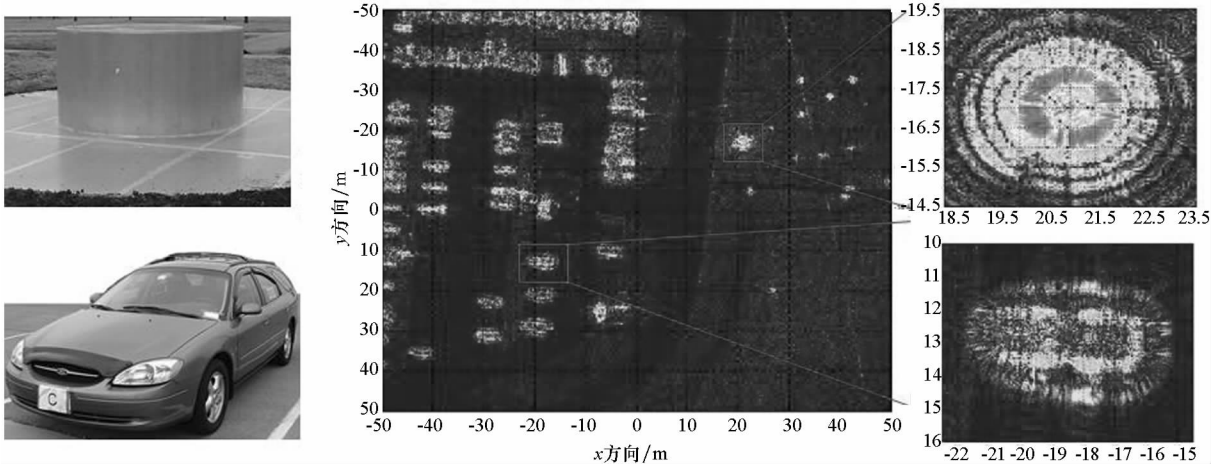


图 12 FFBP 成像结果

Fig. 12 Imaging result by FFBP algorithm

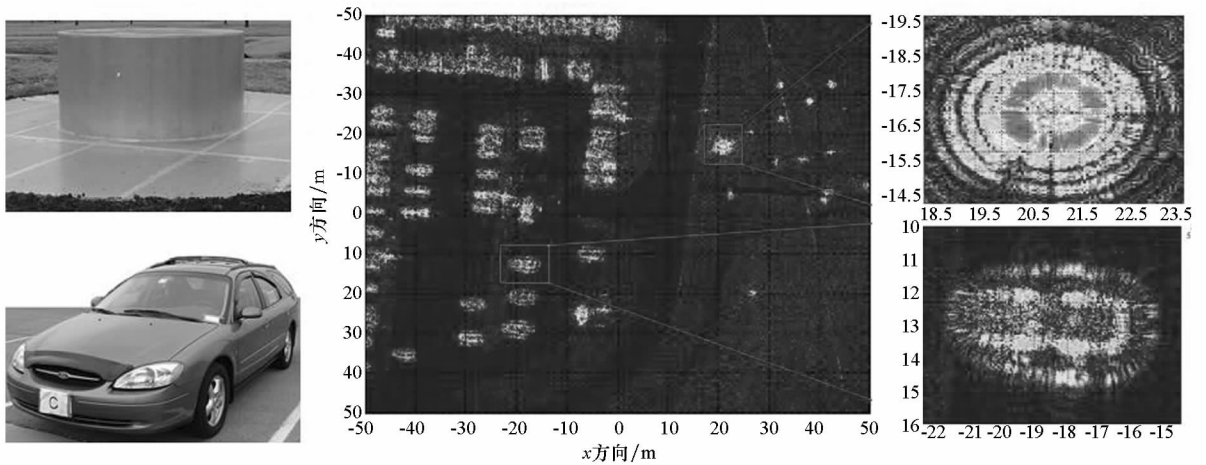


图 13 BP 成像结果

Fig. 13 Imaging result by BP algorithm

### 参考文献 (References)

[1] Knael K K, Cardillo G P. Radar tomography for the generation of three-dimensional images [J]. IEE Proceedings—Radar, Sonar and Navigation, 1995, 142(2): 54 – 60.

[2] Soumekh M. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(8): 1252 – 1265.

[3] Ulander L M H, Hellsten H, Stenstrom G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760 – 776.

[4] Ponce O, Prats-Iraola P, Pinheiro M, et al. Fully polarimetric high-resolution 3-D imaging with circular SAR at L-band [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3074 – 3090.

[5] Christopher D G, Xu L Z. Focusing, imaging, and ATR for the Gotcha 2008 wide angle [J]. SPIE Proceedings, 2013, 8746(87460N): 1 – 8.

[6] Saville M A, Jackson J A, Fuller D F. Rethinking vehicle classification with wide-angle polarimetric SAR [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2014, 29(1): 41 – 49.

[7] Frörlind P O, Gustavsson A, Lundberg M, et al. Circular-aperture VHF-band synthetic aperture radar for detection of vehicles in forest concealment [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1329 – 1339.

[8] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 124 – 135.  
HONG Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. Journal of Radars, 2012, 1(2): 124 – 135. (in Chinese)

[9] Ishimaru A, Chan T K, Kuga Y. An imaging technique using confocal synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1524 – 1530.

[10] Lin Y, Hong W, Tan W X. A novel PGA technique for circular SAR based on echo regeneration [C]//Proceedings of CIE International Conference on Radar, 2011: 411 – 413.

[11] Cantalloube H M J, Koeniguer E C, Oriot H. High resolution SAR imaging along circular trajectories [C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007: 2259 – 2262.