

## 一种基于级数反演的机载圆迹环扫 SAR 成像算法

廖轶\* 周松 邢孟道 保铮

(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:** 较之传统的直线条带 SAR 模式, 圆迹环扫 SAR 作为一种新的成像模式, 能够在短时间内对较大的区域进行快速观测。但是由于其特殊的圆弧飞行轨迹的影响, 目标回波信号的 2 维频谱难以有效获得, 从而给后续成像处理带来困难。针对这个问题, 该文提出一种基于级数反演法的圆迹环扫 SAR 成像算法。该方法利用多普勒频率的展开式反演出驻相点展开式系数, 进而获得信号的 2 维频谱, 从而有效地实现距离脉冲压缩和距离徙动校正。该方法可通过对两个级数展开式阶数的选取自由控制频谱的精度, 利于成像分析及后续处理。最后, 点目标的仿真对比结果表明该算法的有效性。

**关键词:** 圆迹环扫 SAR; 级数反演; 2 维频谱

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2012)11-2587-07

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2012.00441

## An Imaging Algorithm for Airborne Circular Scanning SAR Based on the Method of Series Reversion

Liao Yi Zhou Song Xing Meng-dao Bao Zheng

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Compared with the traditional strip map mode, as a new imaging mode, Circular Scanning SAR (CSSAR) can be used to perform imaging with a wider area in a shorter time. However, due to the influence of the circular orbit, it is difficult to obtain the two-dimension spectrum of the target echo signal which brings a lot of obstacles to the following imaging processing. Thus, a new method for CSSAR imaging based on series reversion is proposed in this paper. By unfolding the Doppler frequency, the stationary phase point expansion coefficients are obtained, making it easy to access the signal's two-dimension spectrum, through which range compression and range cell migration correction can be implemented effectively. Furthermore, the accuracy of the spectrum is controlled by keeping enough terms in the two series expansions, which is helpful to the imaging analysis and the following processing. Finally, the feasibility of the proposed approach is validated with the point target simulations and the comparison results.

**Key words:** Circular Scanning SAR (CSSAR); Method of series reversion; Two-dimension spectrum

### 1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 由于其全天时、全天候成像的能力, 近年来已经广泛地投入到军用和民用的实际运用中<sup>[1-3]</sup>。传统的 SAR 成像系统一般采用直线轨迹<sup>[4]</sup>, 并出现了条带、聚束、扫描等各种模式。相比于经典的条带模式, 聚束模式的观测区域较小, 但是较长的观测时间使其拥有相比于条带更高的方位分辨率; 扫描模式通过距离向上的扫描观测增加了测绘带宽度, 但却因此牺牲了方位向的分辨率。近来曲线轨迹 SAR 系统越来越受到关注。20 世纪 90 年代, 文献[5]提出了圆迹合成孔径雷达(Circular

SAR, CSAR) 的概念, 此后逐渐成为雷达成像领域的热点之一。但是通常意义下的 CSAR 都只是针对某一特定局部区域进行观测, 这从某种意义上来看类似于曲线轨迹的聚束模式, 并且由于其飞行轨迹的特殊性而获得较高的分辨率或 3 维高程信息<sup>[6-8]</sup>。

近年来一种新的广域观测圆迹环扫 SAR (Circular Scanning SAR, CSSAR) 成像模式作为一个全新的研究热点逐渐受到了更多的关注<sup>[9]</sup>。在这种工作模式下, 飞行平台在一个固定的高度处作圆轨迹巡航运动, 天线方向固定朝背离圆心方向, 因而形成了一个环形的成像区域, 在某种意义上类似于圆迹正侧视条带模式, 这种模式由于提高了其方位向上的扫描速度因而较之传统的直线条带模式拥有更大的成像区域, 适合于进行快速的广域成像。

2012-04-19 收到, 2012-06-21 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)资助课题

\*通信作者: 廖轶 fjsdfzly@126.com

在 SAR 成像的处理过程中,回波信号 2 维频谱的有效获取对于设计快速频域算法是至关重要的,由于 CSSAR 圆弧飞行轨迹的特殊性,在其目标的斜距方程中存在根号下三角函数的形式,如果直接使用 POSP(驻相点法)难以推导信号 2 维频谱的精确解析表达式。因而如何获得信号的 2 维频谱成为了 CSSAR 算法设计的一个难点。针对 CSSAR 成像,文献[9]在其 2 维频谱的推导过程中对斜距方程进行了二阶近似,并以此为基础设计成像算法,在平台飞行高度较高,俯仰角较大,积累时间较短使得曲线影响可以忽略的情况下,该方法能够获得较好的成像结果;然而该方法采用的二阶近似舍弃了高阶斜距信息,因此在积累时间较长,分辨率要求较高的成像条件下,这种近似将引入较大的斜距近似误差,若使用原有的算法所得的 2 维频谱会产生较大的误差,进而导致目标成像质量下降,所以原有算法在使用中存在一定的局限性。

为了得到一种适用性更广的成像算法,本文将基于级数反演法提出了一种 CSSAR 成像的新思路。级数反演法是利用多普勒频率的展开式反演驻相点展开式系数,进而获得信号的 2 维频谱的一种方法<sup>[10-12]</sup>,该方法在推导过程中可以通过调整展开式的阶数来有效控制 2 维频谱表达式的精度。在获得的 2 维频谱的基础上,设计相应的频域算法。首先在 2 维频域补偿于场景中心相对应的频谱,再在距离多普勒域补偿随距离空变的相位差。

文中首先分析了圆迹运动的几何模型,探讨了通过直接 POSP 求解所面临的问题,然后将斜距方程近似到四阶,再利用基于级数反演的方法推导得到信号的 2 维频谱表达式。接着对 2 维频谱进行了分析并且给出了算法流程。最后,通过不同距离处的点目标的仿真及结果对比,验证了所述算法的有效性。

## 2 圆迹环扫 SAR 的信号模型

圆迹环扫 SAR 的成像几何如图 1 所示。雷达平台在高度为  $H_c$  的平面上以半径  $r_a$  做圆形轨迹运动,平台运动的角速度为  $\omega$ ,平台旋转运动的方位角慢时间为  $\eta$ ,则飞行平台转过的角度为  $\theta$ , $\theta \in [0, 2\pi)$ ,雷达平台运动时,波束的指向始终与飞行速度方向垂直,波束的俯仰角为  $\theta_r$ ,当雷达平台旋转飞行一周时,其波束照射的区域将形成以  $OB$  为内径,  $OC$  为外径的环形区域。设雷达平台  $A$  的坐标为  $(r_a \cos \theta, r_a \sin \theta, H_c)$ ,而以  $O$  点为圆心,半径为  $r_p$ ,方位角为  $\theta_p$  的目标点  $P$ ,则  $P$  点的坐标可以表示为  $(r_p \cos \theta_p, r_p \sin \theta_p, 0)$ ,雷达与目标  $P$  之间的瞬时距离

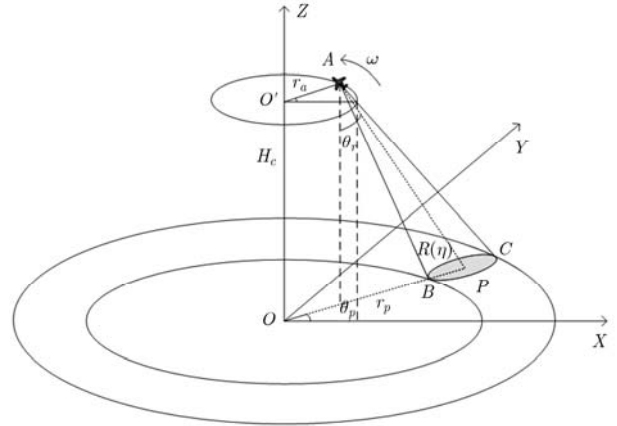


图1 圆迹环扫 SAR 成像几何模型

为  $R(\eta)$ , 利用余弦定理,可以得到以下关系:

$$H_c \tan \theta_r = r_p - r_a \quad (1)$$

$$R(\eta) = \sqrt{H_c^2 + r_p^2 + r_a^2 - 2r_a r_p \cos \omega \eta} \quad (2)$$

令  $R_{\text{cen}} = \sqrt{H_c^2 + (r_p - r_a)^2}$ , 对瞬时斜距  $AP$  作泰勒展开并忽略 4 次以上高阶项则其表达式可以写成

$$R(\eta) = R_{\text{cen}} + k_1 \eta + k_2 \eta^2 + k_3 \eta^3 + k_4 \eta^4 + \dots \quad (3)$$

其中

$$k_1 = 0, k_2 = \frac{r_a r_p \omega^2}{2R_{\text{cen}}}, k_3 = 0, k_4 = -\frac{\omega^4 r_a r_p}{24R_{\text{cen}}} - \frac{\omega^4 r_a^2 r_p^2}{8R_{\text{cen}}^3} \quad (4)$$

假设发射雷达信号为线性调频(LFM)信号,脉冲宽度为  $T_p$ ,调频率为  $\gamma$ ,则点目标  $P$  的回波可表示为

$$s_r(t, \eta) = \sigma_p a_r \left( t - \frac{2R(\eta)}{c} \right) a_a(\eta) \cdot \exp \left[ j\pi \gamma \left( t - \frac{2R(\eta)}{c} \right)^2 \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta) \right] \quad (5)$$

其中  $\sigma_p$  为散射系数,  $a_r(\bullet)$  和  $a_a(\bullet)$  分别为雷达(LFM)信号的距离向包络和方位向包络,  $c$  为光速,  $\lambda$  为中心频率所对应的波长。

此时,将式(5)所示的回波信号变换到距离频域-方位时域,得

$$S_0(f_r, \eta) = \sigma_p A_r(f_r) a(\eta) \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi(f_c + f_r)R(\eta)}{c} \right] \exp \left[ -j \frac{\pi f_r^2}{\gamma} \right] \quad (6)$$

其中  $f_c$  为载频,  $f_r$  为距离向频率,  $A_r(f_r)$  代表距离频率包络。现在试用驻相点法求解信号 2 维频谱,对式(6)作方位 FFT,得

$$S_2(f_r, f_\eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_0(f_r, \eta) \exp(-j2\pi f_\eta \eta) d\eta \quad (7)$$

那么其傅里叶积分中的相位为

$$\theta(\eta) = -\frac{4\pi(f_c + f_r)R(\eta)}{c} - \frac{\pi f_r^2}{\gamma} - 2\pi f_r \eta \quad (8)$$

对  $\theta(\eta)$  关于  $\eta$  求得

$$\frac{d\theta(\eta)}{d\eta} = -\frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} \cdot \frac{\omega r_a r_p \sin \omega \eta}{\sqrt{r_a^2 + H_c^2 + r_p^2 - 2r_a r_p \cos \omega \eta}} - 2\pi f_r \eta \quad (9)$$

令该导数为零,

$$f_\eta = -\frac{2(f_c + f_r)\omega r_a r_p \sin \omega \eta}{\eta c \sqrt{r_a^2 + H_c^2 + r_p^2 - 2r_a r_p \cos \omega \eta}} \quad (10)$$

由式(9)可见, 在多普勒频域的表达中, 分子和分母的根号下均存在三角函数形式的表示式, 因此由式(9)推导  $\eta$  的表达式十分不易, 从而给 SAR 回波信号的 2 维频谱推导带来了较大的困难。针对该问题, 文献[9]通过对斜距表达式作二阶近似使其表达形式与传统直线条带式的斜距方程具有类似的形式, 并以该二阶近似斜距式为基础给出了相应的成像方法。在飞行高度较高, 轨道半径较小的情况下, 飞行轨迹曲率的影响对于斜距的变化可以忽略, 即飞行轨迹对于目标点可以近似地认为是直线。因此在这种情况下, 文献[9]的方法是适用的, 但是对于某些低空运动平台如无人机, 其圆弧飞行轨迹所引入的斜距变化信息对于频谱的影响是不可忽略的, 如果使用二阶近似而忽略高次项将导致聚焦质量的下降, 因此需要找到一种新的适合于圆迹环扫 SAR 的频谱推导方法。

### 3 基于 MSR 的 2 维频谱推导

从以上的分析可以看出, CSSAR 由于其斜距表示较为复杂, 成像处理中不便于方位傅里叶变换中驻相点的求解及信号 2 维频谱的推导, 而文献[9]的近似方法所引入的斜距误差在积累时间较长, 分辨率要求较高的情况下对聚焦的影响较大, 不能满足成像质量的要求。因此以下我们利用级数反演的方法对信号回波进行 2 维频谱的推导, 通过对 POSP 中多普勒频谱的展开式系数反演得到驻相点方位时间的级数展开式系数, 进而得到精度较高的 2 维频谱表达式。在推导过程中, 我们可以通过调整展开式中的近似阶数来控制 2 维频谱表达式的精度, 并以该频谱为基础, 设计有效的 CSSAR 成像算法。

对于式(9), 令导数为零时, 多普勒频率可以写成如下形式:

$$\left(-\frac{c}{f_c + f_r}\right) f_\eta = 2k_2 \eta + 3k_3 \eta^2 + 4k_4 \eta^3 + \dots \quad (11)$$

利用级数反演法, 我们可以得到方位时间由多普勒频率展开式表达的形式, 即驻相点的表示式,

表示如下:

$$\eta(f_\eta) = A_1 \left(-\frac{c}{f_c + f_r} f_\eta\right) + A_2 \left(-\frac{c}{f_c + f_r} f_\eta\right)^2 + A_3 \left(-\frac{c}{f_c + f_r} f_\eta\right)^3 + \dots \quad (12)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2k_2} = \frac{R_{\text{cen}}}{\omega^2 r_a r_p}, \quad A_2 = 0 \\ A_3 &= \frac{-1}{(2k_2)^5} \cdot 2k_2 \cdot 4k_4 = \frac{R_{\text{cen}}^3}{6\omega^4 r_a^3 r_p^3} + \frac{R_{\text{cen}}}{2\omega^4 r_a^2 r_p^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由式(6)和式(12), 可以得到

$$S_A(f_r, f_\eta) = \sigma_p A_r(f_r) A_u(f_\eta) \exp\{-j2\pi f_r \eta(f_\eta)\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} R(\eta(f_\eta)) - j\frac{\pi f_r^2}{\gamma}\right\} \quad (14)$$

其中  $A_u(f_\eta)$  为信号多普勒谱的包络, 需要指出的是, 由于斜距公式中含有三角函数的原因, 展开式里奇次项均为 0。对于式(14)的表达式, 需要对其进行展开并保留一定的阶次, 而阶次的选取就关系到成像精度的问题。在这里我们将相位阶次保持到四阶, 关于扩展阶次的选取原则, 本文的第 5 节将对此进一步做定量分析。结合式(12), 式(13)和式(14), 那么此时点目标信号的 2 维频谱的相位可以写成

$$S_{2df}(f_r, f_\eta) = W_r(f_r) W_a(f_\eta) \exp(j\phi(f_r, f_\eta)) \quad (15)$$

其中式(15)中的相位项表示如下:

$$\phi(f_r, f_\eta) = -\frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} R_{\text{cen}} + \frac{\pi}{k_2} \frac{c}{4(f_c + f_r)} f_\eta^2 - \frac{\pi k_4}{64k_2^4} \left(\frac{c}{f_c + f_r}\right)^3 f_\eta^4 - \frac{\pi f_r^2}{\gamma} \quad (16)$$

在式(16)中, 信号 2 维频谱的表达式保留到了多普勒频率  $f_\eta$  的四阶项, 式(16)等号右边的第 3 项包含斜距四次项系数  $k_4$ , 这是在二阶近似的成像方法中忽略的高次项。在低空运动平台的成像过程中, 其飞行曲线轨迹引入的距离变化信息将带来明显的高次相位信息, 这时未补偿的斜距四次项将会严重影响 2 维频谱的精度, 因此, 在成像算法设计时, 需要对斜距高阶项进行补偿。以下将根据获取的 SAR 信号回波的 2 维频谱表达式, 给出适用于 CSSAR 的成像算法。

下面利用所得到的 2 维频谱进行成像算法推导。

### 4 成像算法分析

从之前的推导中可以看出, 2 维频谱的表达式含有  $f_r$ ,  $f_\eta$  和  $R(\eta)$  等变量, 鉴于回波信号 2 维频谱

中的距离频率  $f_r$  和多普勒频率  $f_\eta$  的耦合, 不便于后续处理, 因此将式(16)在距离频率  $f_r = 0$  处进行泰勒级数展开, 整理后可以得到如下形式:

$$\theta_c = -\frac{4\pi(f_c + f_r)R_{\text{cen}}}{c} + \varphi_{\text{az}}(f_\eta) + \varphi_{\text{rcm}}(f_\eta)f_r + \varphi_{\text{src}}(f_\eta)f_r^2 + \varphi_{\text{ry}}(f_r) + \varphi_{\text{res}}(f_\eta, f_r) \quad (17)$$

式(17)中,  $\frac{-4\pi f_r R_{\text{cen}}}{c}$  为表征点目标位置的线性相位, 距离压缩后目标峰值将出现在该处,  $\frac{-4\pi f_c R_{\text{cen}}}{c}$

为常数项, 该项与距离频率  $f_r$ , 多普勒频率  $f_\eta$  无关, 对成像的影响可以忽略。式(17)中的其余 5 项可以表示如下:

(1)方位调制项: 式(17)中等号右边的第 2 个相位项为方位调制项, 即

$$\varphi_{\text{az}}(f_\eta) = \frac{\pi \cdot c \cdot f_\eta^2}{4k_2 f_c} - \frac{\pi k_4 c^3 f_\eta^4}{64k_2^4 f_c^3} \quad (18)$$

该项包含方位调制, 将在距离徙动校正和距离压缩之后与构造的方位匹配滤波函数相乘完成方位脉压。

(2)距离徙动(Range Cell Migration, RCM)项: 式(17)中等号右边的第 3 个相位项为距离徙动项, 即

$$\varphi_{\text{rcm}}(f_\eta) = -\frac{\pi \cdot c}{4k_2} \left(\frac{f_\eta}{f_c}\right)^2 + \frac{3\pi k_4 c^3}{64k_2^4} \left(\frac{f_\eta}{f_c}\right)^4 \quad (19)$$

该项与多普勒频率的  $f_\eta$  有关, 体现为距离向和方位方向的耦合, 需予以补偿。通常情况下, 在距离测绘带不是很宽的 CSSAR 成像中, RCM 项随距离的变化可以忽略; 在后续的处理中, 可用场景中心处为参考, 在 2 维频域构造相应的距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)函数, 实现距离徙动校正。

(3)二次距离脉压(Secondary Range Compression, SRC)项: 式(17)中等号右边的第 4 个相位项为 SRC 项, 即

$$\varphi_{\text{src}}(f_\eta) = \frac{\pi \cdot C \cdot f_\eta^2}{4k_2 f_c^3} - \frac{3\pi k_4 c^3 f_\eta^4}{32k_2^4 f_c^5} \quad (20)$$

该项体现了由距离频率  $f_r$  和多普勒频率  $f_\eta$  的耦合所引入的距离调频率的改变。如果不考虑 SRC 项将影响距离向的聚焦, 而 SRC 随距离的变化往往可以忽略; 因此可以以场景中心作为参考, 在 2 维频域构造相应的补偿项, 消除 SRC 项对成像的影响。

(4)距离调制项: 式(17)中等号右边的第 5 个相位项为距离调制项, 即

$$\varphi_{\text{ry}}(f_r) = -\frac{\pi f_r^2}{\gamma} \quad (21)$$

(5)残余相位项: 式(17)中等号右边的第 6 个相位项为残余相位项, 即

$$\varphi_{\text{res}}(f_\eta, f_r) = -\frac{\pi \cdot c \cdot f_\eta^2}{4k_2} \frac{f_r^3}{f_c^3 (f_c + f_r)} - \frac{\pi k_4 c^3 f_\eta^4}{64k_2^4} \cdot \{1/(f_c + f_r) - 1/f_c^3 + 3f_r/f_c^4 - 6f_r^2/f_c^5\} \quad (22)$$

该项为展开后的残余相位项, 可在 2 维频域对其进行补偿。

根据以上的分析, 并结合式(15)和式(16)的 SAR 回波信号的 2 维频谱表达式, 在 2 维频域中补偿与场景中心相对应的频谱, 再在距离-多普勒域补偿随距离空变的相位项。

具体的算法流程如下:

(1)首先对式(5)的回波信号做 2 维 FFT 得到如式(15)所示 2 维频谱。

(2)这时对距离徙动项  $\varphi_{\text{rcm}}(f_\eta)$ , 距离调制项  $\varphi_{\text{ry}}(f_r)$ , 残余相位项  $\varphi_{\text{res}}(f_\eta, f_r)$  和距离调制项  $\varphi_{\text{ry}}(f_r)$  进行补偿, 乘以其相位的共轭,

$$H_1(f_r, f_\eta, R_0) = \exp \left[ j \frac{\pi \cdot c}{4k_2 (R_0)} \left(\frac{f_\eta}{f_c}\right)^2 - j \frac{3\pi k_4 (R_0) c^3}{64k_2^4 (R_0)} \left(\frac{f_\eta}{f_c}\right)^4 - j \frac{\pi \cdot c \cdot f_\eta^2}{4k_2 (R_0) f_c^3} + j \frac{3\pi k_4 (R_0) c^3 f_\eta^4}{32k_2^4 (R_0) f_c^5} + j \frac{\pi \cdot c \cdot f_\eta^2}{4k_2 (R_0)} \frac{f_r^3}{f_c^3 (f_c + f_r)} + j \frac{\pi k_4 (R_0) c^3 f_\eta^4}{64k_2^4 (R_0)} \cdot \left\{ 1/(f_c + f_r) - 1/f_c^3 + 3f_r/f_c^4 - 6f_r^2/f_c^5 \right\} \right] \quad (23)$$

(3)作距离 IFFT 将信号变换至距离多普勒域并乘以方位匹配滤波函数完成方位脉冲压缩方位匹配滤波函数为

$$H_2(f_r, R_{\text{cen}}) = \exp \left[ -j \frac{\pi \cdot c \cdot f_\eta^2}{4k_2 (R_{\text{cen}}) f_c} + j \frac{\pi \cdot k_4 (R_{\text{cen}}) \cdot c^3 f_\eta^4}{64k_2^4 (R_{\text{cen}}) \cdot f_c^3} \right] \quad (24)$$

(4)最后对信号做方位 IFFT 就可以得到聚焦后的 SAR 图像, 完整的算法流程图如图 2 所示。

## 5 仿真实验结果对比

在 SAR 成像中, 对于斜距的近似误差而言, 忽略斜距中的高次项而引起的双程最大相位误差应小

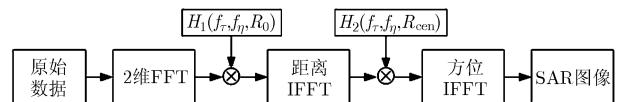


图2 算法流程图

于  $\pi/4$ 。针对上述分析，斜距展开到了四次，以下我们分析近似扩展阶次的问题。

选取一组典型参数，假设飞行平台的参数为  $H_c = 2000\text{ m}$ ， $r_a = 4000\text{ m}$ ， $r_p = 5154.7\text{ m}$ ，飞行速度  $v = 100\text{ m/s}$ ，雷达波长  $\lambda = 0.3\text{ m}$ ，现在分别计算在一个合成孔径时间内目标斜距二次的近似误差和四次的近似误差，如图 3，图 4 所示，其中虚线所指示的是相位误差为  $\pi/4$  的位置，实线表示的是合成孔径积累时间内由不同斜距阶次近似所引入的相位误差。另外由于奇次项为零，故这里不再考虑三次的近似误差。从图中可以看出，二次近似相位误差在边缘最大处为 1.7 左右，大于虚线所表示的  $\pi/4$  位置，进而说明了由二阶近似引入的近似误差不能够被忽略，否则将导致成像质量的下降；而四次近似相位误差的最大值约为  $3 \times 10^{-3}$ ，远小于  $\pi/4$ ，故而在图中不再画出表示  $\pi/4$  的虚线，同时这也说明对斜距的四阶近似已经足够满足成像的要求，无需再提高近似阶次。因此，对圆迹环扫 SAR 而言，式(15)所表示的频谱表达式具有更广的适用性。

为了验证本文方法的有效性，下面分别采用本文推导的方法与文献[9]中所述的斜距二阶近似条件下的成像算法进行点目标全孔径成像仿真对比。仿真参数如表 1 所示，场景中有远、中、近 3 个点目标，点目标的坐标分别为  $P_n(0, 4854.7, 0)$ ， $P_m(0, 5154.7, 0)$ ， $P_f(0, 5454.7, 0)$ 。

同样针对场景中心点，运用两种算法对场景中心点  $P_m$  进行成像并对结果作对比，如图 5，图 6 所示。其中(a)为点目标等高线图，(b)为方位向脉冲响应，(c)为距离向脉冲响应。从图中可以看出，由于圆迹飞行轨迹曲率的影响，斜距的二阶次近似已经无法表征足够的相位变化信息，进而造成点目标的聚焦效果下降，难以满足成像的要求。然而本文所

表 1 雷达参数

波长	0.03 m	飞行高度	2000 m
信号带宽	300 MHz	平台速度	100 m/s
采样率	500 MHz	俯仰角	30°
脉冲宽度	10 $\mu\text{s}$	方位向波束宽度	5°
PRF	1 kHz	场景中心坐标	(0,5154.7,0)

提的算法通过级数反演将斜距近似到四阶，其推导得到的 2 维频谱中能够体现出更多的斜距变化信息，因而提高成像质量，获得更高的图像精确度，使点目标的聚焦效果满足成像要求。图 7 和图 8 分别为使用本文所述方法得到的近距点和远距点的成像效果，从图中可以看出，不仅是场景中心点，近距点和远距点也均得到了良好的聚焦，进一步证明本文算法的有效性。

表 2 为本文所提算法对远、中、近 3 个目标的成像质量参数评价结果。其中，理论的距离分辨率和方位分辨率分别为 0.443 m 和 0.125 m，从表 2 可以看出，成像各项性能指标均与理论值较为接近，取得了较好的成像结果，进一步验证了本文所提算法的有效性。

## 6 结束语

本文首先通过建立圆迹环扫 SAR 成像信号模型，展示了 CSSAR 的成像特点和难点，然后针对难点给出了点目标的斜距方程和基于级数反演法的信号 2 维频谱表达式，并通过近似相位误差分析，解决了近似阶数的选取问题；同时与二阶近似的成像方法进行了对比，论证了本文方法的优越性；然后在 2 维频谱的基础上推导了相应的成像算法。文章最后通过不同距离处的点目标仿真对比，验证了所提算法的有效性。

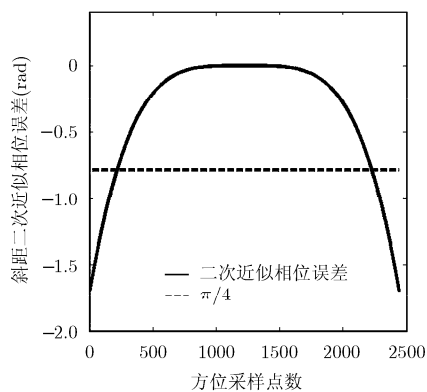


图 3 斜距二阶近似相位误差

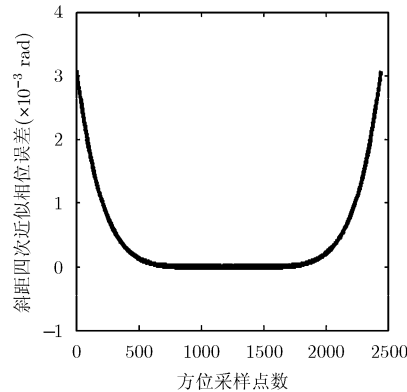


图 4 斜距四阶近似相位误差

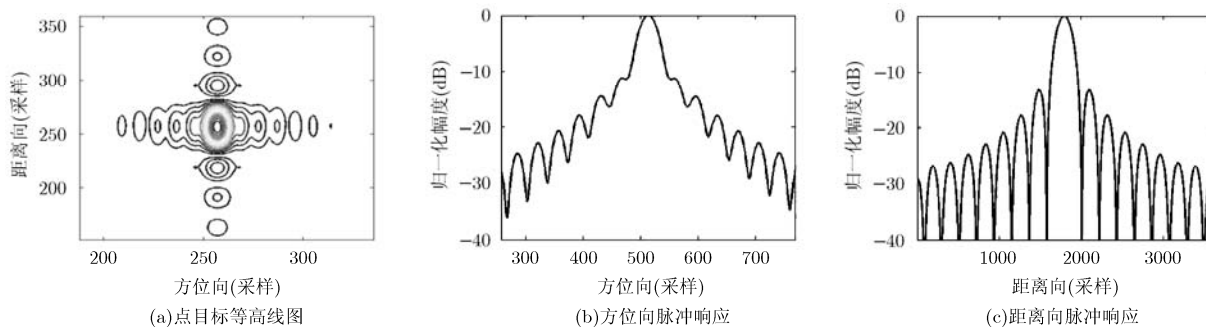


图5 采用对斜距二阶近似的算法, 中心点成像结果

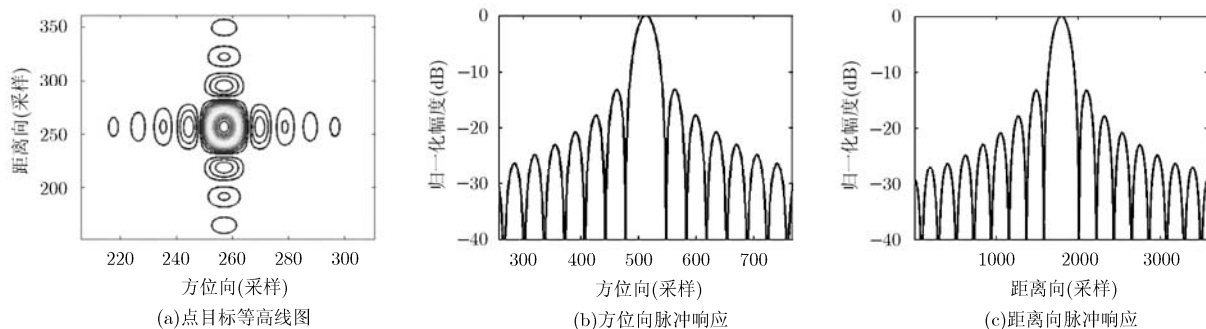


图6 采用本文方法, 中心点成像结果

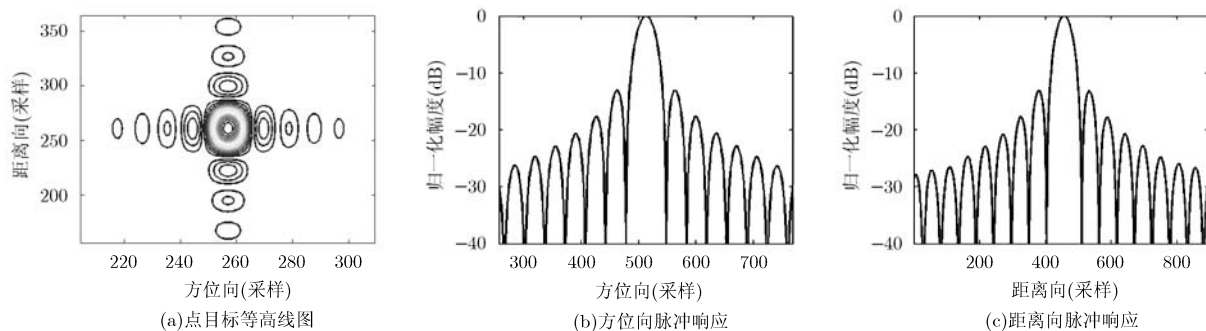


图7 采用本文方法, 近距点成像结果

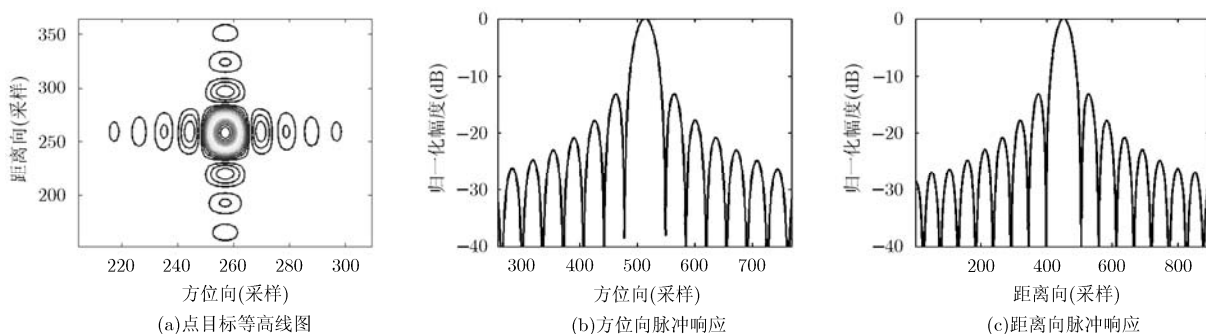


图8 采用本文方法, 远距点成像结果

表2 本文成像算法成像质量评价

参数	理论值		$P_n$		$P_m$		$P_f$	
	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向
分辨率(m)	0.125	0.443	0.126	0.443	0.126	0.445	0.126	0.443
PSLR(dB)	-13.26		-13.22	-13.29	-13.25	-13.26	-13.69	-13.28
ISLR(dB)	-9.80		-9.83	-9.83	-9.88	-9.85	-9.94	-9.89

## 参 考 文 献

- [1] 邓云凯, 陈倩, 祁海明, 等. 一种基于频域子带合成的多发多收高分辨 SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1082-1087.  
Deng Yun-kai, Chen Qian, Qi Hai-ming, *et al.* A high-resolution imaging algorithm for MIMO SAR based on the sub-band synthesis in frequency domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1082-1087.
- [2] 寇波, 江海, 刘磊, 等. 基于压缩感知的 SAR 抑制旁瓣技术研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 3022-3026.  
Kou Bo, Jiang Hai, Liu Lei, *et al.* Study of SAR side-lobe suppression based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 3022-3026.
- [3] 黄平平, 邓云凯, 祁海明. 多发多收星载 SAR 回波处理方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1056-1060.  
Huang Ping-ping, Deng Yun-kai, and Qi Hai-ming. The echo processing method for multiple-transmit and multiple-receive space-borne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1056-1060.
- [4] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Norwood, MA, Artech House, 2005, Chapter 5.
- [5] Knaell K. Three-dimensional SAR from practical apertures [C]. SPIE, 1995, 2562: 31-41.
- [6] Ferrara M, Jackson J A, and Austin C. Enhancement of multi-pass 3D circular SAR images using sparse reconstruction techniques[C]. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XVI, Proceedings of SPIE, 2009, Vol.7337, 733702-1-733702-10.
- [7] Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing[M]. New York: NY, John Wiley & Sons, Inc., 1999: 486-539.
- [8] Soumekh M. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5(8): 1252-1265.
- [9] 孙兵, 周荫清, 陈杰, 等. 广域观测圆迹环扫 SAR 成像模式研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2805-2808.  
Sun Bing, Zhou Yin-qing, Chen Jie, *et al.* Operation mode of circular trace scanning SAR for wide observation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(12): 2805-2808.
- [10] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 93-96.
- [11] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I G. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 14-21.
- [12] 周鹏, 周松, 熊涛, 等. 基于技术反演的弹载 SAR 下降段 CZT 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2861-2867.  
Zhou Peng, Zhou Song, Xiong Tao, *et al.* A chirp-z transform imaging algorithm for missile-borne SAR with diving maneuver based on the method of series reversion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2861-2867.
- 廖 轶: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像.  
周 松: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为弹载 SAR 成像.  
邢孟道: 男, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事雷达成像和目标识别等方面的研究工作.  
保 铮: 男, 1927 年生, 中国科学院院士, 教授, 主要从事自适应信号处理、阵列信号处理、雷达成像和目标识别等方面的研究.